

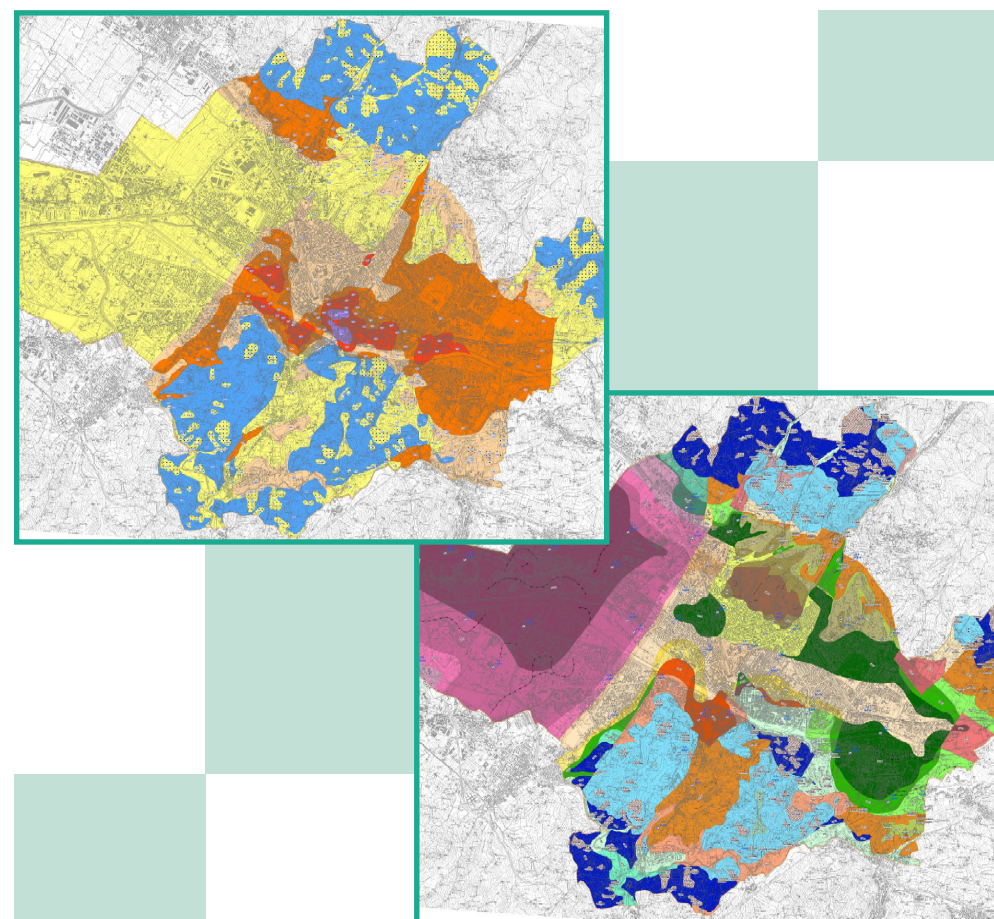


Regione Toscana



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

La microzonazione sismica e le analisi delle condizioni limite per l'emergenza del Comune di Firenze



La microzonazione sismica e le analisi delle condizioni limite
per l'emergenza del Comune di Firenze



Regione Toscana



Regione Toscana



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

La microzonazione sismica e le analisi delle condizioni limite per l'emergenza del Comune di Firenze

I LIBRI DELLA GIUNTA REGIONALE - territori



Regione Toscana



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE**

- **Regione Toscana - Direzione Ambiente ed Energia**
- **Settore Sismica**
- **Comune di Firenze**
- **Università degli Studi di Firenze**

A cura di:

Massimo Coli

Università degli Studi di Firenze
Dip.to di Scienze della Terra

Maurizio Ripepe

Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Scienze della Terra

Giorgio Lacanna

Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Scienze della Terra

Nicolò Iandelli

Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Scienze della Terra

Mario De Stefano

Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Architettura

Marco Tanganelli

Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Architettura

Barbara Paoletti

Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Architettura

Massimo Baglione

Regione Toscana
Settore Sismica – Prevenzione Sismica

Vittorio D'Intinosante

Regione Toscana
Settore Sismica – Prevenzione Sismica

Daniele Giomarelli

Regione Toscana
Settore Sismica – Prevenzione Sismica

Pio Positano

Regione Toscana
Settore Sismica – Prevenzione Sismica

Gianni Bordoni

Comune di Firenze
Servizio sostenibilità, valutazione
ambientale, geologia e bonifiche

Chiara Tanini

Comune di Firenze
Servizio sostenibilità, valutazione
ambientale, geologia e bonifiche

Gaia Paggetti

Comune di Firenze
Servizio sostenibilità, valutazione
ambientale, geologia e bonifiche

Luca Ciarleglio

Comune di Firenze
Servizio Protezione Civile

Coordinamento Progetto grafico:

Regione Toscana

Direzione Generale della Giunta Regionale

Settore Comunicazione, Cerimoniale ed Eventi

Direttore Paolo Ciampi

Catalogazione nella pubblicazione (CIP) a cura della

Biblioteca Toscana Pietro Leopoldo del Consiglio regionale della Toscana

La microzonazione sismica e le analisi delle condizioni limite per l'emergenza del Comune di Firenze / Regione Toscana, Direzione Ambiente ed Energia, Settore Sismica, Comune di Firenze, Università degli Studi di Firenze ; a cura di Massimo Coli ... [et al.] ; premessa di Monia Monni. - Firenze : Regione Toscana, 2022

1. Toscana <Regione> : Direzione Ambiente ed energia : Settore Sismica 2. Firenze

3. Università degli Studi di Firenze 4. Coli, Massimo 5. Monni, Monia

363.3495094551

Zone sismiche - Firenze

ISBN 0978-88-7040-137-0

Stampa a cura del Consiglio Regionale della Toscana. Giugno 2022

Sommario

Premessa

Monia Monni (Assessora "Ambiente, Economia Circolare, Difesa del suolo, Lavori pubblici e Protezione Civile", Regione Toscana) 7

Introduzione

La microzonazione sismica 11

1	Pericolosità di base e sismicità storica	17
1	Pericolosità di base	17
1.1	Pericolosità da eventi franosi	17
1.2	Pericolosità Sismica	19
2	Inquadramento geologico e geomorfologico	27
2.1	Geomorfologia.....	27
2.2	Geologia.....	30
2.3	Modello geologo del sottosuolo	38
3	Indagini geotecniche e geofisiche	43
3.1	Sondaggi geognostici.....	43
3.2	Dati Geotecnici	44
3.3	Dati geofisici	52
4	Modello geologico-tecnico di sottosuolo	57
4.1	Carta Geologico-Tecnica.....	57
5	Le Cartografie di Microzonazione Sismica di livello 1	63
5.1	Carta delle MOPS.....	63
6	Valutazione di qualità dello studio e livelli di incertezze	67
6.1	Procedura semi-quantitativa per stabilire la qualità dei risultati.....	67
7	Analisi Monodimensionale e gli abachi per la predisposizione degli studi di Microzonazione Sismica di Livello 2	73
7.1	Introduzione.....	73
7.2	Analisi Sperimentale (HVSR).....	73
7.3	Analisi Monodimensionale	77
7.4	Abachi Regionali	82
8	Analisi Bidimensionali per la Microzonazione Sismica di Livello 3	91
8.1	Spettro Medio di Risposta per la Microzonazione Sismica	97
9	Indicazione dei risultati della microzonazione sismica di terzo livello per la pianificazione e progettazione ai sensi dei regolamenti regionali	105
9.1	Il recepimento della Microzonazione Sismica negli strumenti urbanistici vigenti per la Regione Toscana	105
9.2	L'utilizzo dei risultati degli studi di Microzonazione Sismica per la gestione della fase di progettazione edilizia per la Regione Toscana	107

10	La banca dati geografica	115
10.1	La creazione di banche dati	115
10.2	Banca Dati delle indagini	117
10.3	Banche dati delle elaborazioni cartografiche	119
11	Criticità e approfondimenti futuri	121
11.1	Modello geologico-tecnico	121
11.2	Ricostruzione dell'andamento del substrato roccioso/bedrock sismico	122
11.3	Ricostruzione del modello geofisico di sottosuolo	123
12	Le analisi delle condizioni limite per l'emergenza	127
12.1	Il Servizio Nazionale di Protezione Civile e la pianificazione dell'emergenza	127
12.2	Le condizioni limite di un insediamento urbano	132
12.3	La Condizione Limite per l'Emergenza del Comune di Firenze	135
13	La valutazione del rischio sismico su scala territoriale	151
13.1	Rischio sismico e scenari di danno	151
13.2	Pianificazione e mitigazione del rischio sismico, alcune esperienze italiane	152
13.3	Classi tipologiche e vulnerabilità di insieme	153
13.4	Metodi di valutazione della vulnerabilità sismica su scala territoriale	154
13.5	Esperienze unità di ricerca	160
	Bibliografia	165

Indice degli allegati tecnici contenuti nel portale WEB regionale

<https://www.regione.toscana.it/-/pubblicazioni-11>

allegato	1	- Carta geologica
allegato	2	- Carta geomorfologica
allegato	3	- Carta litotecnica
allegato	4	- Sezioni geologiche
allegato	5	- Carta geologico-tecnica
allegato	6	- Sezioni geologico-tecniche
allegato	7	- Carta delle indagini
allegato	8	- Carta delle frequenze fondamentali
allegato	9	- Carta MS1 (MOPS)
allegato	10	- Carta delle classi MOPS
allegato	11	- Carta MS2
allegato	12	- Carta MS3
allegato	13	- Carta del grado di conoscenza del sottosuolo al substrato
allegato	14	- Carta del grado di conoscenza del sottosuolo a 30m
allegato	15	- Carta derivata dalla modellazione 1D

Premessa

Monia Monni

*Assessora "Ambiente, Economia Circolare,
Difesa del suolo, Lavori pubblici e Protezione Civile"
Regione Toscana*

Questo importante volume, curato della nostra tipografia regionale, descrive tutte le attività condotte dall'Università di Firenze e dal Comune di Firenze, con il coordinamento e controllo del Settore Sismico della Regione Toscana, finalizzate alla realizzazione dello studio di microzonazione sismica del Comune di Firenze e delle analisi delle condizioni limite per l'emergenza.

Tali importanti iniziative rientrano tra le azioni non strutturali finalizzate alla prevenzione sismica.

La Regione Toscana è impegnata, da oltre 30 anni, nel campo della prevenzione sismica mediante l'attuazione, sul proprio territorio, di graduali politiche di riduzione del rischio sismico, grazie ad una serie di canali di finanziamenti europei, nazionali e regionali che hanno consentito la realizzazione di una serie di azioni prioritarie di prevenzione sismica conseguendo:

- un netto miglioramento delle conoscenze del terreno e del sottosuolo in § chiave di pericolosità sismica,
- una maggiore conoscenza degli edifici mediante indagini e verifiche tecniche,
- un aumento del livello di sicurezza mediante la progettazione e realizzazione di interventi strutturali di prevenzione sismica del patrimonio edilizio con particolare riferimento agli edifici pubblici strategici o rilevanti (EPSR), con priorità alla zona sismica 2.

Già a partire dalla metà degli anni '90, infatti, con l'emanazione della prima legge italiana sulla prevenzione sismica, la LR 56/97 successivamente aggiornata con la LR 58/2009, furono avviati diversi programmi finalizzati alla riduzione del rischio sismico. Questi programmi, evento unico nel contesto nazionale, furono attivati non come conseguenza di un evento sismico dannoso, ma in un'ottica di prevenzione al fine di adottare tutte le misure possibili per ridurre l'esposizione e la vulnerabilità sismica e, contemporaneamente, conoscere la pericolosità sismica del territorio.

Tali iniziative sono state attuate prioritariamente negli 89 Comuni classificati in zona sismica 2 (a elevata pericolosità sismica) ubicati in corrispondenza della catena Appenninica (Garfagnana, Lunigiana, Appennino Pistoiese, Mugello, Valtiberina e Amiata) ed hanno avuto effetti largamente positivi, come anche riscontrato in occasione del terremoto della Lunigiana del 21 giugno 2013 caratterizzato da una magnitudo pari a 5.2 ed epi-

centro localizzato nel territorio comunale di Fivizzano. Secondo le analisi e le valutazioni effettuate dall'Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, infatti, l'evento sismico in oggetto ha causato un limitato danneggiamento (confrontato con analoghe situazioni a livello nazionale), poiché "da più di vent'anni in queste aree si è investito sulla conoscenza geologica del territorio e sul miglioramento e/o sull'adeguamento sismico degli edifici pubblici e privati (rappresentando per quest'ultimi un'assoluta novità sul panorama nazionale)".

Tale riscontro positivo della politica di prevenzione sismica toscana è stato confermato anche più recentemente in occasione del recente terremoto Mugello 2019 (per il quale il danneggiamento è stato limitato al solo centro storico di Barberino M.Ilo).

Tali esempi, tra gli altri, confermano ancora una volta come la politica di prevenzione sismica regionale, se ben attuata, sia di cruciale importanza al fine di contenere i danni (anche in termini di vite umane) e conseguentemente risparmiare risorse per successiva la fase di ricostruzione.

Nell'ultima legislatura è stato innanzitutto definito il quadro conoscitivo del rischio sismico (mediante Del. G.R.T. n. 1271/2016) che riassume, evidenzia e sintetizza tutte le attività per la prevenzione sismica realizzate ed integrate all'interno del quadro delle conoscenze del rischio sismico in Toscana. Sulla base del quadro delle conoscenze del rischio sismico, sono state poi attivate una serie di azioni strutturali e non strutturali. Questa operazione è stata possibile mediante l'attivazione del Documento di Indirizzo per la Prevenzione Sismica (DIPS 2018 – Del. GRT n.15/2018 e DIPS 2021 – Del. G.R.T. 821/2021) e dei successivi Documenti Annuali per la Prevenzione Sismica (DOPS) con i quali sono state attivate le risorse economiche. Nel complesso nel corso degli ultimi 10 anni circa sono state investite risorse pari a oltre 50 milioni di euro per azioni di prevenzione sismica, suddivise, in azioni strutturali e non strutturali.

Particolare attenzione è stata dedicata alla ricostruzione e mappatura del quadro di pericolosità sismica del territorio regionale, mediante l'attivazione con la LR 56/97 del Programma VEL (Valutazione degli Effetti Locali) che ha portato nel corso degli anni all'acquisizione di una dettagliata conoscenza delle caratteristiche di pericolosità sismica locale, mediante la realizzazione di cartografie geologiche di dettaglio ed una campagna di esplorazione del sottosuolo, tra le prime a livello mondiale, sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo.

Più recentemente, grazie ai finanziamenti del Piano Nazionale del Rischio sismico di cui all'art.11 L.77/2009, promossi a seguito del terremoto dell'Aquila del 6 Aprile 2009, è stata avviata la mappatura degli studi di microzonazione sismica sul territorio regionale, tuttora in corso e di cui il presente volume, che vi invito a leggere, ne illustra un esempio di quanto realizzato per il Comune di Firenze.

La prevenzione sismica deve però avere continuità per potere trovare applicazione efficace, tenendo in considerazione il fatto che le risorse impegnate in prevenzione riducono in maniera drastica l'impegno (anche meramente economico) necessario in fase di emergenza e successiva ricostruzione.

Le numerose attività svolte, negli anni, tra cui la microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Firenze, presentata in dettaglio in questo volume, consentono perciò di acquisire un quadro dettagliato dello scuotimento previsto per l'area, a seguito dell'accadimento di un forte terremoto. Per una completa efficacia di tale strumento, tuttavia, risulta indispensabile inserire tali studi all'interno del quadro conoscitivo dello strumento urbanistico vigente, così come previsto dal recente regolamento regionale 5R/2020, al fine di poter indirizzare le future attività di pianificazione territoriale e di progettazione edilizia sul territorio.

Tali informazioni sono necessarie per comprendere il livello di rischio cui è sottoposto il contesto urbanistico e, dunque, la popolazione del territorio. Questo consente di individuare gli edifici maggiormente a rischio sismico e gli interventi prioritariamente necessari per ridurre gli effetti dei terremoti. In questo contesto, pertanto, la prevenzione diventa strumento fondamentale per conoscere, progettare e intervenire, nell'ambito delle risorse disponibili, sull'edilizia pubblica strategica, ospedali e scuole in primis, e sugli edifici privati, così come consentito dalla normativa.

Questo è l'impegno della Regione Toscana a tutela del territorio e della comunità.

Introduzione

M. Baglione & L. Gori

Regione Toscana, Settore sismica – Prevenzione Sismica

Il presente Volume intende riassumere tutte le attività che hanno portato alla redazione dello studio di Microzonazione sismica del Comune di Firenze (FI).

Tale studio, è stato realizzato con metodologie e procedure approfondite, finalizzate alla redazione di cartografie di Microzonazione Sismica di livello 3, secondo i dettami degli Indirizzi e Criteri di Microzonazione Sismica (di seguito ICMS), approvati dalla Conferenza delle Regioni in data 13 novembre 2008.

Gli ICMS hanno il merito di aver omogeneizzato le metodologie di studio e le procedure (sia sotto il profilo formale che sostanziale), creando un “modus operandi” condiviso nel panorama nazionale di settore.

Per gli aspetti di informatizzazione e di rappresentazione dei risultati, il presente studio fa riferimento agli “Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica” redatti dal Dipartimento della Protezione Civile.

Tale documentazione nazionale rappresenta un utile documento per gli studi e le analisi relative alla microzonazione sismica (MS), applicabile ai settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione.

La MS è recepita a livello normativo da tutte le Regioni, che vincolano l'approvazione dei piani alla preventiva realizzazione e valutazione degli studi di MS; sono state predisposte linee guida specifiche per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità cosismiche (fagliazione superficiale, fenomeni di liquefazione, instabilità di versante) condivise e approvate dalla Conferenza delle Regioni e Province autonome.

Infine, sono state sviluppate applicazioni della MS per la riduzione del rischio per finalità di protezione civile, come l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) e la microzonazione sismica compare tra gli elementi considerati fondamentali, a livello nazionale, nei programmi standard di riduzione del rischio sismico.

La Microzonazione Sismica

L'attività di valutazione su un territorio (alla scala comunale) delle modificazioni apportate allo scuotimento del suolo dalle condizioni geologico-tecniche locali e dalle condizioni topografiche locali viene chiamata **microzonazione sismica** (MS).

Tale attività rientra in un quadro più generale nei programmi di prevenzione e di mitigazione degli effetti di un terremoto, in cui è necessario indi-

viduare in via preliminare con criteri speditivi le zone a più elevato rischio sismico da sottoporre a studi particolareggiati.

Si definiscono “**condizioni locali di sito**”:

- la geologia e la geomorfologia locale;
- condizioni geotecniche e stratigrafiche locali;
- prossimità ad una faglia sismicamente attiva.

Le condizioni locali di sito sono responsabili degli effetti locali di sito che possono schematicamente essere così riassunti:

- modifica delle caratteristiche dello scuotimento rispetto a quanto definito in termini di pericolosità di base;
- fenomeni di instabilità del terreno.

Per ciò che attiene alla modifica del moto sismico, si tratta di definire la pericolosità sismica locale. Ciò comporta in generale un’amplificazione del moto sismico, la cui causa è riconducibile a motivi stratigrafici (presenza di depositi soffici poggianti su substrato roccioso), topografici (amplificazione del moto sismico lungo pendii o alla sommità di scarpate o pendii) oppure riferibile alla presenza di particolari geometrie sepolte, in grado di modificare le caratteristiche del moto sismico sia in termini di intensità sia per quanto concerne il contenuto spettrale.

Per ciò che attiene ai fenomeni di instabilità dei terreni e delle rocce gli aspetti rilevanti sono quelli che riguardano:

- liquefazione e/o densificazione dei depositi sabbiosi;
- eccessivi cedimenti e deformazioni permanenti del suolo;
- instabilità di pendio in terreni e roccia;
- attività di faglia.

Danni consistenti possono ricorrere quando la frequenza di risonanza di un terreno (depositi alluvionali, falde di detrito) raggiunta durante un evento sismico corrisponde a quella propria dell’edificio (fenomeno della doppia risonanza).

La **pericolosità di base** è di norma definita mediante approccio di tipo probabilistico. In generale, per la determinazione della pericolosità di base è necessario definire:

- la sismicità storica;
- le zone sismogenetiche;
- le relazioni di attenuazione;
- le leggi di ricorrenza.

A tal fine è necessario raccogliere e interpretare dati e informazioni riguardanti la sismicità regionale, la sismo-tettonica, dati e registrazioni ottenuti da reti sismiche nazionali e locali.

Per quanto riguarda la stima della **pericolosità sismica locale**, essa è da ricondurre ad una serie di caratteri geologico-tecnici di un’area più o meno ampia che viene presa in esame. Tali caratteri geologico tecnici come è noto riguardano: la morfologia di superficie, la morfologia sepolta, le litologie, le caratteristiche fisico meccaniche, le condizioni idrogeologiche s.l.

Queste condizioni infatti oltre ad essere causa di possibile amplificazione degli effetti sismici possono provocare i cosiddetti fenomeni indotti, quali: attivazione e rimobilizzazione di fenomeni gravitativi, liquefazione in terreni granulari saturi, deformazioni permanenti in terreni di fondazione.

La valutazione degli effetti locali di amplificazione del moto sismico e quindi la pericolosità sismica locale sono di norma valutati attraverso analisi di risposta sismica locale dei depositi di terreno.

Tutti i dati così acquisiti saranno organizzati in banche dati geografiche (GIS) al fine di omogeneizzare le procedure di acquisizione, archiviazione e gestione oltre che per la rappresentazione cartografica.

A riguardo la normativa di riferimento (D.M. 17.01.2018) consente di valutare gli effetti locali di amplificazione del moto sismico sia in modo semplificato, sia con modalità analitiche più rigorose.

Uno degli aspetti più importanti di queste normative è quello di definire e di valutare l'amplificazione sismica dei terreni sulla base della definizione del parametro V_s , cioè della velocità delle onde di taglio.

In questa direzione già da diversi anni si sta muovendo la Regione Toscana attraverso il **Programma di Valutazione degli Effetti Locali (VEL)**, nell'ambito del quale sono state migliorate e/o sviluppate metodologie di valutazione degli effetti locali basate su misure sistematiche delle velocità delle onde sismiche trasversali effettuate con varie tecniche (sismica a rifrazione con onde di taglio, prove down-hole, etc...). Tale metodologia, estesa esclusivamente ai Comuni definiti a maggior rischio sismico della Toscana (di cui alla Del. GRT n. 841/2007) rappresenta una procedura di tipo analitico di valutazione degli effetti locali. Per tutti i Comuni toscani (ad eccezione di quelli classificati in zona sismica 4), a seguito dell'entrata in vigore del Regolamento Regionale 26/R, sono state applicate metodologie per la valutazione degli effetti locali prevalentemente di tipo qualitativo ed a basso costo (Carte delle Zone a Maggiore Pericolosità Sismica Locale) cercando comunque di verificarne e di valutarne il grado di soggettività e qualità con successive metodologie e sperimentazioni. Successivamente con l'entrata in vigore del Regolamento Regionale 53/R/2011 e successivamente aggiornato con 5R/2020, le metodologie per la valutazione degli effetti locali sono state ulteriormente affinate mediante la necessità (per tutti i Comuni classificati sismici tranne quelli in zona 4) di effettuare studi di Microzonazione Sismica.

In ambito nazionale, la microzonazione sismica (di seguito denominata MS) costituisce ormai un valido e riconosciuto strumento per analizzare la pericolosità sismica locale applicabile sia in fase di pianificazione urbanistica, sia in fase di progettazione che in fase emergenziale.

Il documento di riferimento nazionale è rappresentato dagli **"Indirizzi e Criteri Generali per la Microzonazione Sismica"** (di seguito denominato come ICMS) approvati dalla Conferenza delle Regioni in data 13 novembre 2008. Tale documento nazionale rappresenta un utile documento per gli

studi e le analisi relative alla MS, applicabile ai settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione.

La pubblicazione è il risultato dell'attività di un gruppo di oltre 100 tecnici ed esperti, che hanno condiviso un percorso di lavoro con le Regioni, le Province autonome e il Dipartimento della Protezione civile, potenziali attori delle politiche di intervento sul territorio finalizzate alla riduzione del rischio sismico. La Regione Toscana ha partecipato attivamente alla stesura del documento fornendo utili osservazioni alla luce dell'esperienza ormai decennale acquisita nell'ambito del Programma Regionale VEL. In particolare, preme sottolineare, che le ***"Istruzioni Tecniche Regionali relative alla realizzazione delle indagini geologico-tecniche, geofisiche, geotecniche finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana"*** adottate in Toscana nell'ambito del suddetto programma, sono state interamente acquisite ed integrate nel documento nazionale degli ICMS.

Nei citati ICMS vengono definite le procedure, le metodologie di analisi al fine di individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e le zone suscettibili di instabilità.

La realizzazione di uno studio di MS, secondo quanto esplicitato nei suddetti ICMS, è uno strumento conoscitivo dalle diverse potenzialità, che ha costi differenziati in funzione del livello di approfondimento.

Al momento di decidere l'esecuzione e il livello dello studio, occorre tener presente l'utilità che da esso può derivare, in modo da compararla con i costi da affrontare. Il miglioramento della conoscenza prodotto dagli studi di MS può contribuire concretamente, insieme a studi di vulnerabilità ed esposizione, all'ottimizzazione delle risorse rese disponibili per interventi mirati alla mitigazione del rischio sismico.

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità ed impegno crescenti, passando dal livello 1 fino al livello 3:

- il **livello 1** è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, esecuzione di nuove indagini in situ e realizzazione di elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee;
- il **livello 2** introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee, utilizzando ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce una vera carta di MS;
- il **livello 3** restituisce una carta di MS con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Per quanto riguarda gli studi di MS finanziati nell'ambito delle **Legge n. 77 del 24 Giugno 2009** – Interventi urgenti di Protezione Civile in materia di prevenzione del rischio sismico – e delle successive ordinanze di ripartizione delle

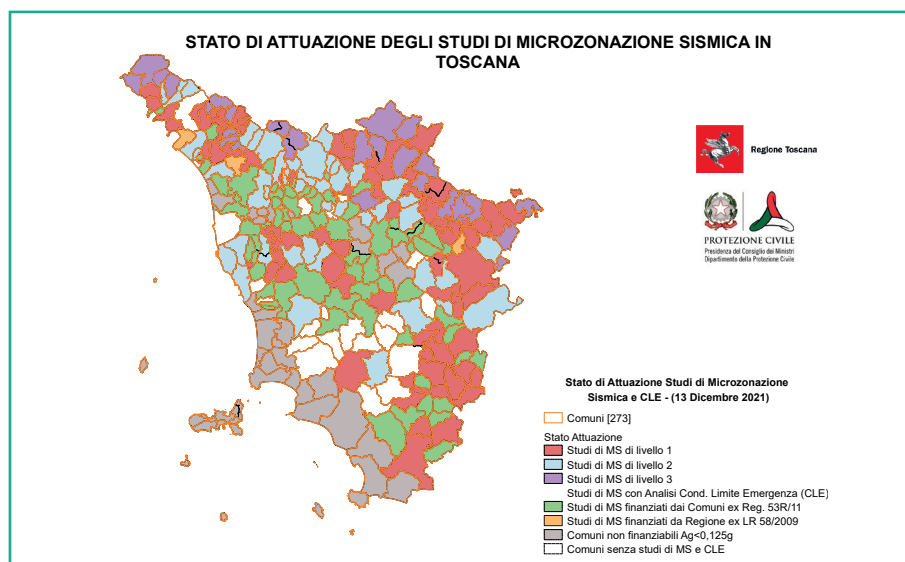
risorse, unitamente agli studi di MS che i Comuni hanno realizzato autonomamente ai sensi del Regolamento Regionale 53R/2009, allo stato attuale la Regione Toscana dispone di studi di microzonazione sismica già realizzati su circa il 90% del territorio regionale come è possibile evincere in figura seguente.

Sono infatti circa **226 gli studi di Microzonazione Sismica di livello 1** realizzati in Toscana, di cui **49** presentano anche **studi di Microzonazione sismica di livello 2**, **n. 28** possiedono anche gli approfondimenti relativi al livello 3 e **n.152** gli studi relativi alle Analisi delle Condizioni Limite per l'emergenza (CLE). **21** sono invece i Comuni che non hanno studi di MS1 realizzati.

La Regione Toscana, grazie ai finanziamenti nazionali di cui sopra, ha finanziato le suddette attività attraverso una serie di contributi ai Comuni interessati per circa **3.500.000,00 euro**.

È utile sottolineare, inoltre, che molti di questi Comuni, dispongono di uno studio di livello 1 particolarmente approfondito, grazie alla disponibilità di una mole di informazioni importante prodotta nel corso dell'ultimo decennio nell'ambito del Programma Regionale VEL.

*Stato di attuazione
degli studi di MS
e delle Analisi CLE
in Toscana*



https://www.regione.toscana.it/documents/10180/12237483/stato_attuazione_mzs_2021dic31.jpeg/05b4dfb8-9eee-57f6-6431-9aa8e11c9f85?t=1647250859315

La microzonazione sismica (MS) si propone l'obiettivo di definire la pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone o porzioni di territorio caratterizzate da un comportamento sismico omogeneo.

Nello specifico la MS individua e caratterizza:

- Le **Zone Stabili**, sono zone nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura (litotipi assimilabili al substrato sismico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata) e pertanto gli scuotimenti attesi sono equivalenti a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- Le **Zone stabili suscettibili di amplificazione sismica**, sono le zone in cui il moto sismico viene modificato a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e/o geomorfologiche del territorio;
- Le **Zone suscettibili di instabilità**, sono le zone suscettibili di attivazione dei fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazioni superficiali).

Pericolosità di base e sismicità storica

Massimo Coli⁽¹⁾, Giorgio Lacanna⁽¹⁾, Maurizio Ripepe⁽¹⁾

⁽¹⁾Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra

1. Pericolosità di base

Le pericolosità di base sono quegli aspetti geologici insiti nella natura stessa di un territorio, si annoverano diverse tipologie, quali: Frane, Alluvioni, Sismi, Vulcani, Maremoti. Nel caso dell'area fiorentina, ovviamente, si esclude la possibilità di accadimenti vulcanici o di maremoti. Gli eventi alluvionali, numerosi e anche dannosi per l'area fiorentina, non verranno trattati nel presente volume, mentre saranno approfondite le cause che concorrono a generare pericolosità a seguito di un evento sismico: la pericolosità da eventi franosi sismoindotti e la pericolosità sismica propria del territorio fiorentino.

1.1 Pericolosità da Eventi Franosi

Con riferimento al recente Decreto del Segretario Generale dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (ex AdB) n. 70 del 22/07/2021 trasmesso al Comune in data 04/08/2021 con PG 2543 59) di approvazione della perimetrazione delle aree a pericolosità da frana, il territorio comunale fiorentino presenta diverse situazioni di instabilità locale (Figura 1.1). La loro ubicazione ed il relativo stato di attività sono stati presi in considerazione nella definizione delle zone di instabilità per il presente studio.

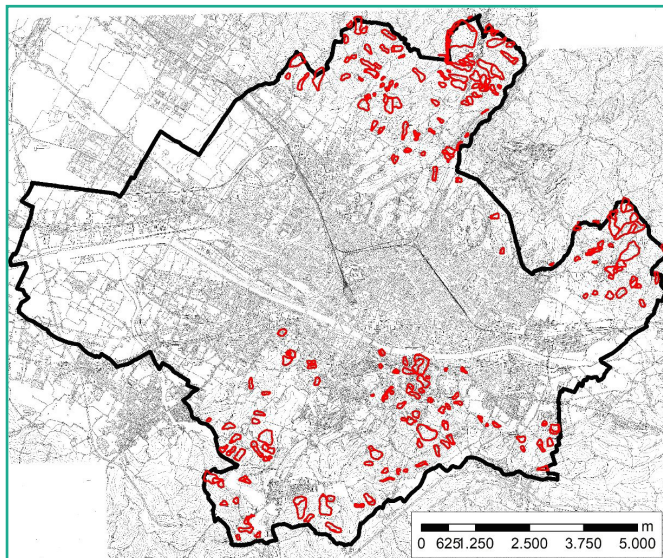


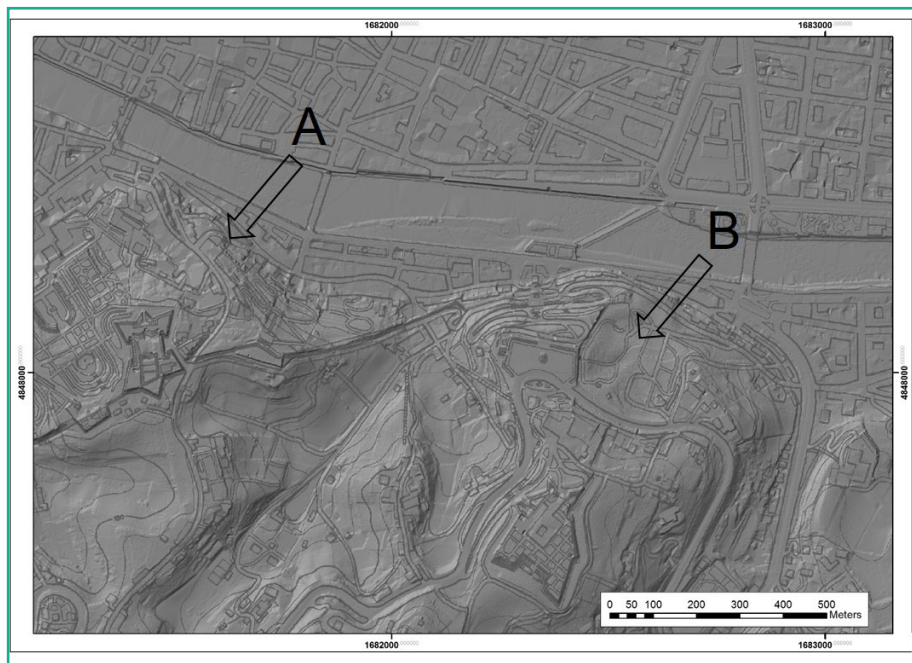
Figura 1.1 –
Le aree di
instabilità del PAI.

(1) <https://geodataserver.appenninosettentrionale.it/portal/apps/webappviewer/index.html?id=72f02517284e4c5ba2f8a5310eff44e1>

Fra le aree di instabilità a Firenze sono presenti due aree storiche di frana: quella di San Salvatore al Monte e quella di Costa de' Magnoli (Figura 1.2, rispettivamente B e A); tutte e due queste situazioni hanno come fattore predisponente un naturale assetto litostratigrafico locale a franapoggio, inclinato circa come il pendio, che vede la presenza della Formazione di Sillano a San Salvatore al Monte e dell'alternanza tra Pietraforte/Formazione di Sillano a Costa de' Magnoli, a cui si aggiunge l'azione erosiva naturale dell'Arno al piede dei rilievi che ha incentivato le situazioni predisponenti.

Per entrambi poi, l'attività antropica ha costituito un fattore contingente: scavi che hanno interessato il piede e accentuato il pendio a valle, hanno creato situazioni di evidente franapoggio, meno inclinato del nuovo pendio artificiale, e, per la zona di Costa de' Magnoli, anche il ricarico a monte, legato alla costruzione di edifici in epoca medievale.

*Figura 1.2 –
La situazione
geomorfologica
delle frane di Costa
de' Magnoli (A)
e di San Salvatore
al Monte (B).*

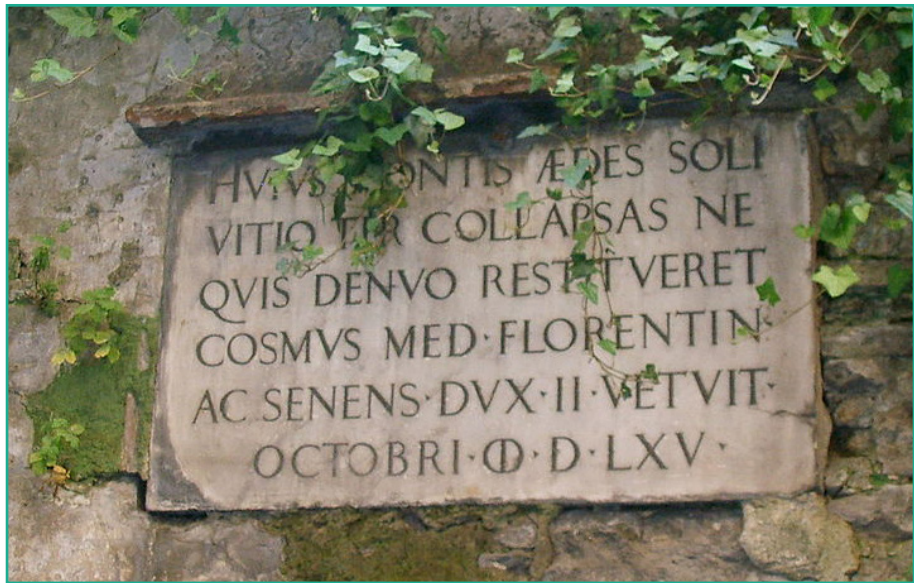


In tutti i casi il fattore scatenante è sempre stato connesso a forti piogge con infiltrazioni di acque nel sottosuolo che hanno abbassato la resistenza già critica dei terreni; inoltre, nella zona di Costa de' Magnoli è anche presente una transizione Pietraforte/Formazione di Sillano arenacea con significativa presenza di livelli argillitici capaci di ritenere le acque. Tale caratteristica si ritrova anche in alcuni toponimi, come Via del Canneto e Vicolo del Canneto che riportano a situazioni di ristagno delle acque a mezza costa.

La zona di Costa de' Magnoli, dopo frane protostoriche, rilevate nell'ambito degli studi sul crollo del Lungarno Torrigiani avvenuto nel 2016, e le ripetute frane storiche del 1284 oltre a quelle del 1490 e del 1547, non ha più mostrato segni di dissesti; evidentemente la distruzione e la proibizio-

ne di nuove edificazioni in zona, stabilita da Cosimo I de' Medici nel 1565, sembra aver definitivamente stabilizzato la situazione (Figura 1.3).

*Figura 1.3 –
La lapide posta
in via dei Bardi
davanti alla chiesa
delle Rovinate che
riporta l'editto di
Cosimo I de' Medici
del 1565 che fa
divieto di edificare
in zona.*



Alcuni movimenti minori sono testimoniati nel 1916, 1925 e 1926 nel giardino Bardini, in zona di frana protostorica, tali movimenti furono prontamente stabilizzati con ricostruzione di terrazzamenti, muri a retta e ripristino delle canalizzazioni a monte.

Diversa appare invece la situazione per la zona di San Salvatore al Monte, dove, nonostante canalizzazioni ed interventi plurimi già dal XVI secolo la situazione appare ancora non definitivamente stabilizzata, ma in una situazione di quiescenza, ed è attualmente tenuta sotto costante monitoraggio da parte del Dipartimento di Scienze della Terra per conto del Comune.

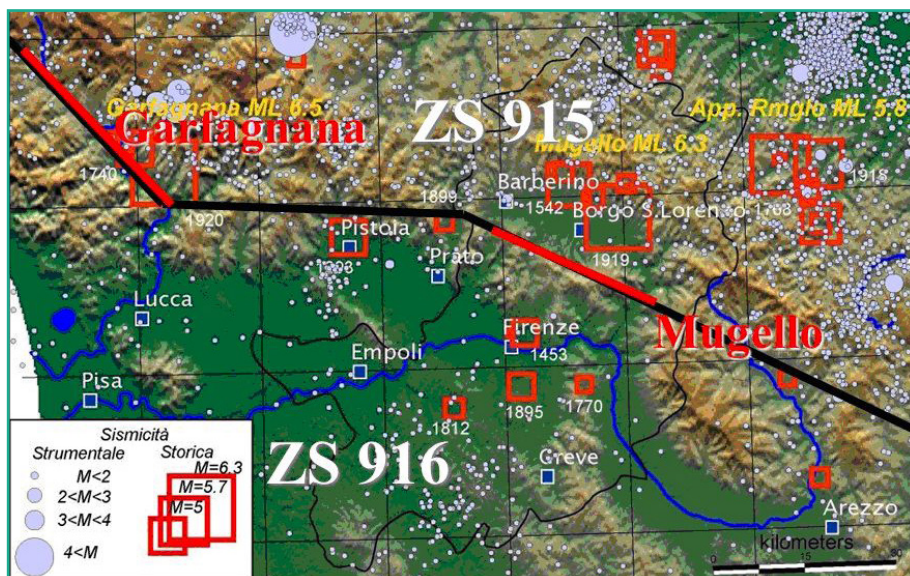
1.2 Pericolosità Sismica

In riferimento all'ultima zonazione sismogenetica del territorio italiano, l'area fiorentina è ubicata a cavallo delle zone sismogenetiche 915 e 916. La zona sismogenetica 915 corrisponde alla zona assiale della catena comprendente il territorio del Mugello, l'Appennino Pistoiese e la Garfagnana ed è caratterizzata da un alto potenziale sismogenetico (magnitudo fino a $M=6.5$). La zona sismogenetica 916 corrisponde alla fascia nord-appenninica più interna che va dalla Versilia fino alla regione del Chianti, caratterizzata da potenziale sismogenetico più moderato con terremoti che possono raggiungere la magnitudo di $M=5,45$.

Gli ultimi 20 anni di registrazioni strumentali sul territorio italiano della Rete Sismica Nazionale permettono di definire le linee principali della sismicità locale, evidenziando nel territorio fiorentino un rilascio dell'energia sismica prevalente lungo la zona di catena appenninica. Il 10% dei terremoti presenta una profondità ipocentrale maggiore di 15 km e valori

di magnitudo locale (ML) sempre inferiori a 5, centrati intorno al valore medio di 2. La ripartizione energetica dei terremoti segue una distribuzione di potenza ben definita, mentre gli eventi più importanti sono stati registrati nell'area del Mugello con magnitudo registrate intorno a 4. Numerosi terremoti di piccola intensità sono stati registrati anche nella pianura alluvionale di Firenze-Pistoia. Le soluzioni focali disponibili evidenziano nell'area appenninica attorno a Firenze un'attività sismica legata a meccanismi principalmente estensionali ed in parte di tipo trascorrente (Figura 1.4).

Figura 1.4 – Sismicità storica e strumentale del bacino di Firenze-Prato-Pistoia e delle aree limitrofe.



Dal punto di vista sismogenetico l'area fiorentina appare storicamente sede di una moderata attività sismica, le cui magnitudo stimate sono risultate sempre e comunque inferiori a 5 ML (Figura 1.5), i dati specifici sono consultabili all'indirizzo https://emidius.mi.ingv.it/CPT115-DBMI15/place/IT_45020, e l'area è stata oggetto del risentimento di diversi terremoti con $I_{max} > 4$ e $I_{max} > 7$ (Figura 1.6, 1.7).

Figura 1.5 – Principali eventi sismici risentiti nell'area fiorentina.

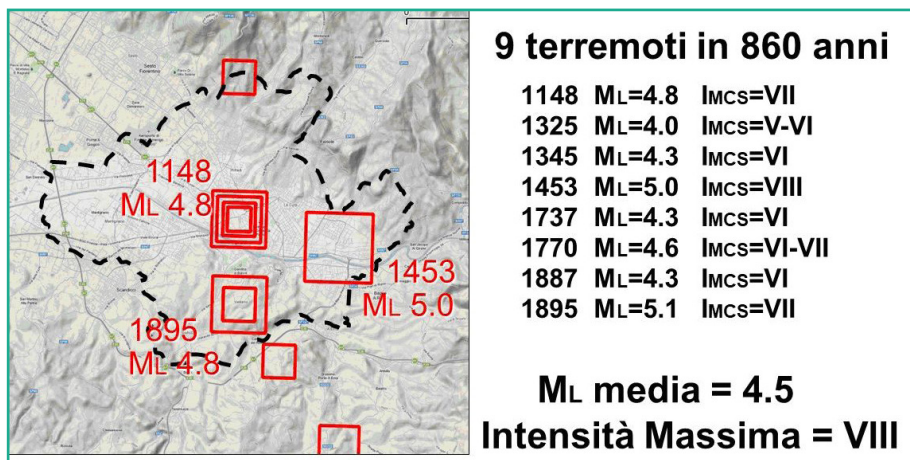


Figura 1.6 –
Eventi sismici
risentiti nell'area
fiorentina
dall'anno 1000
con $I_{max} > 4$, da
[https://emidius.
mi.ingv.it/CPTI15-
DBMI15/place/
IT_45020](https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/place/IT_45020)

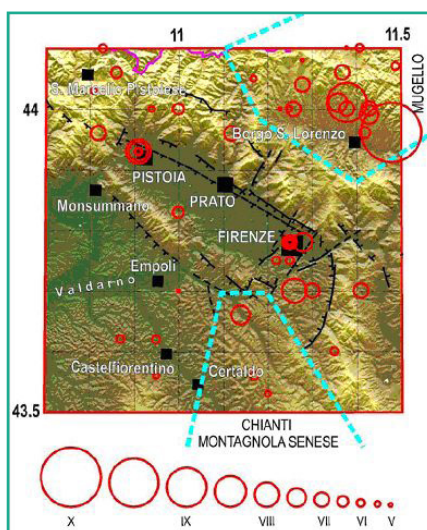
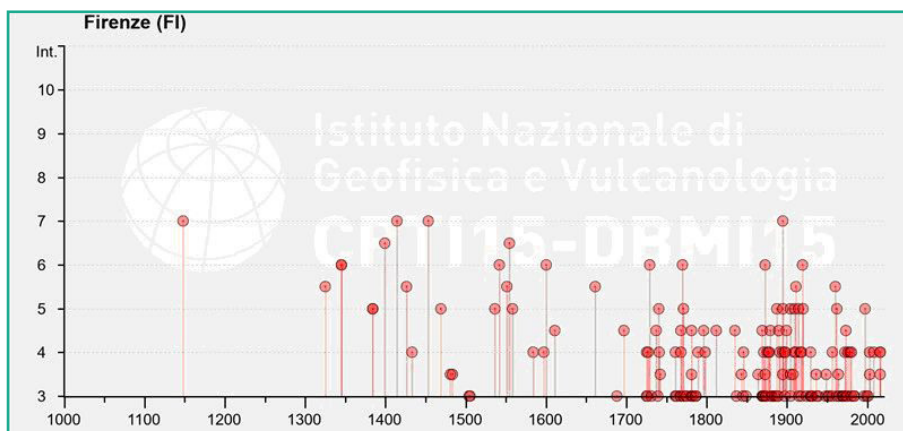


Figura 1.7 - Eventi sismici risentiti nell'area
fiorentina dall'anno 1000 con $I_{max} > 4$
(da Mantovani et al. 2012).

Tabella 1.1 –
Eventi sismici
risentiti nell'area
fiorentina dall'anno
1000 con Intensità
Epicentrale $I_0 > 7$
(da Mantovani et
al. 2012, integrata).

Anno	Mese	Giorno	Zona epicentrale	Latitudine (°N)	Longitudine (°E)	Magnitudo (Mw)	Intensità I_0 (I_{max})	T (anni)
1148			Firenze	43.78	11.25	5.1	7	
1293	3		Pistoia	43.93	10.91	5.6	8	146
1453	9	28	Firenze	43.79	11.29	5.3	7.5	160
1527	10	4	Pistoia	43.93	10.91	5.4	7.5	74
1895	5	18	Fiorentino	43.7	11.26	5.4	8	368
1899	6	26	Valle del Bisenzio	43.96	11.12	5.1	7	4
1959	3	24	Fiorentino	43.70	11.30	4.8	7	60

Tabella 1.2 – Eventi
sismici risentiti
nell'area fiorentina
negli ultimi 10
anni con Intensità
Epicentrale $I_0 > 5$
([http://shakemap.
ingv.it/shake4/](http://shakemap.ingv.it/shake4/)).

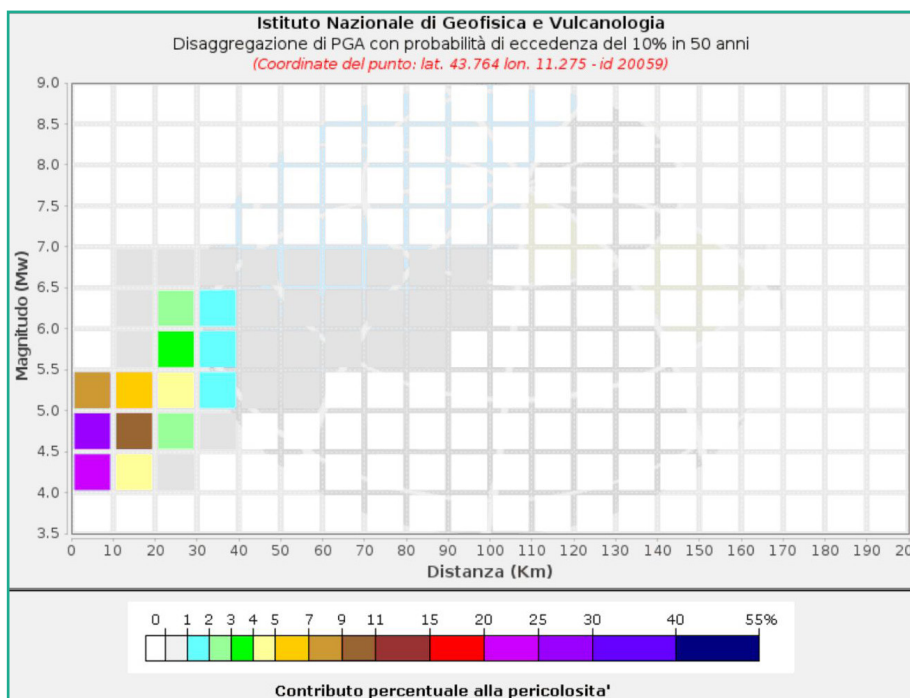
Anno	Mese	Giorno	Zona epicentrale	Latitudine	Longitudine (°E)	Magnitudo (Mw)	Intensità Epicentrale I_0	T (anni)
2015	9	13	Tavernelle	43.60	11.23	3.8	5	
2022	5	3	Impruneta	43.64	11.23	3.7	5	7
2022	5	12	Impruneta	43.65	11.24	3.7	5	0.02

I principali eventi storici risentiti nell'area fiorentina si ubicano nel bacino del Mugello dove, nel 1919, si verificò il terremoto più importante e distruttivo di questa zona dell'Appennino Settentrionale, mentre il più forte risentito a Firenze, con un'intensità del VII grado, è stato quello dell'Impruneta del 1895. La ricostruzione del campo macrosismico dei principali eventi che hanno colpito l'area fiorentina nel passato (terremoti del 1453 e del 18 maggio 1895) evidenzia quello del 1895 come il più forte evento sismico che abbia mai colpito la città di Firenze avendo avuto un'intensità epicentrale stimata e corretta I_0 =VIII grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg e una magnitudo Momento di M_w =5.4 (Tabella 1.1). Gli eventi sismici del 2015 e quelli più recenti del maggio del 2022 si inquadrano geograficamente nella stessa area del terremoto di Impruneta del 1895, con, però, minori valori di Intensità epicentrale I_0 =V (Tabella 1.2).

L'analisi dei dati a disposizione e delle fonti bibliografiche relative a eventi sismici che hanno causato danni nella città di Firenze, ha permesso di caratterizzare quello che viene definito "Terremoto di Progetto", cioè l'evento sismico massimo ipotetico più probabile per una data area.

Terremoti avvenuti nelle aree sismiche del Mugello e della Garfagnana hanno portato a risentimenti nell'area fiorentina fino a I_{max} =VII-VIII grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg; in particolare l'area centro-settentrionale fiorentina mostra una I_{max} =VIII grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg, mentre l'area della pianura verso Scandicci tende a I_{max} =VII grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg.

Figura 1.8 – Contributo in percentuale alla pericolosità sismica del Comune di Firenze per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.



<http://esse1-gis.mi.ingv.it>

I dati di disaggregazione per il Comune di Firenze (Figura 1.8, <http://es-se1-gis.mi.ingv.it>) riportano che il contributo maggiore alla pericolosità sismica di base è rappresentato da terremoti con distanze epicentrale inferiore a 20 km per le seguenti classi di Magnitudo Momento (M_w):

- Magnitudo Momento $M_w=4.0-4.5$ contribuiscono per il 20-25%
- Magnitudo Momento, $M_w=4.5-5.0$ contribuiscono per il 25-30%,
- Magnitudo Momento $M_w = 5.0-5.5$ contribuiscono per 7-9%.

Il contributo alla pericolosità da parte di terremoti $M_w=5.5-6.5$ con distanze epicentrali di 30 km risulta inferiore al 4% (Figura 1.8).

La ricostruzione del campo macrosismico all'interno di un centro urbano costituisce il preludio alla cosiddetta "microzonazione sismica", ovvero, l'individuazione cioè delle aree con differente risposta sismica e quindi diversa intensità massima risentita; questo è dovuto a fattori molto locali, costituiti prevalentemente da forti differenze composizionali del substrato di fondazione, che si traducono in contrasti di impedenza sismica, oltreché a metodologie costruttive diverse.

Dei terremoti storici fiorentini non sono disponibili dati di dettaglio sui danni causati, le cronache riportano che, in seguito a quello del 1453, si aprirono le lesioni della Cupola del Brunelleschi, ancora priva della Lanterna, lesioni che risultarono ampliate dopo il terremoto del 1695.

Dati di dettaglio dei danni subiti dall'area fiorentina per eventi sismici passati sono invece disponibili per gli eventi sismici del 1895 e 1919 (Figura 1.9, 1.10, 1.11).

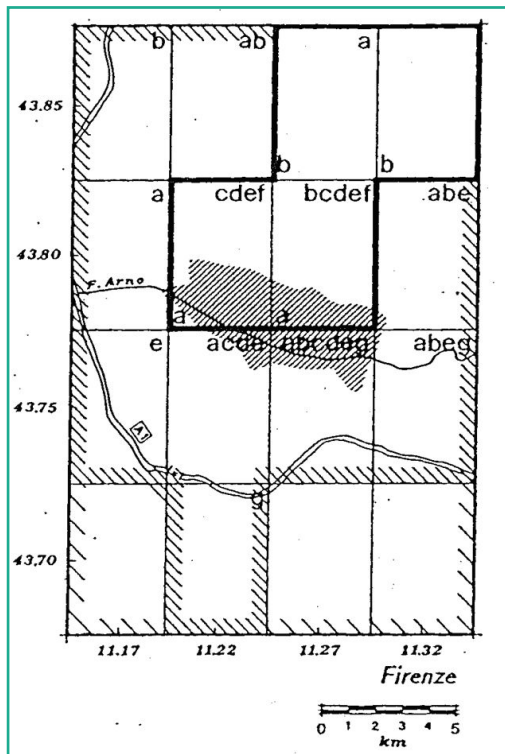


Figura 1.9 – Distribuzione della I_{max} macrosismica risentita storicamente nell'area fiorentina dall'anno 1000 (da Favali et al. 1990).

Legenda: bordo nero $I_{max} = VIII$ MCS,
bordo tratto fitto $I_{max} = VII$ MCS,
bordo tratto largo $I_{max} = VI$ MCS
(da Vannucchi & Gasperini 1997).

Figura 1.10 –
Effetti
macrosismici
a Firenze del
terremoto del
18/5/1895
(da Vannucchi &
Gasparini 1997).

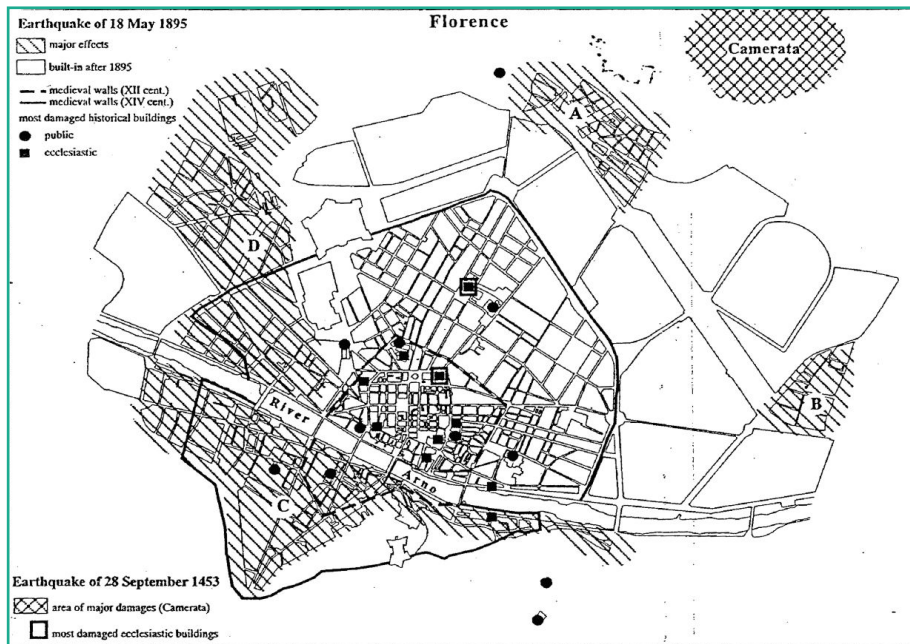
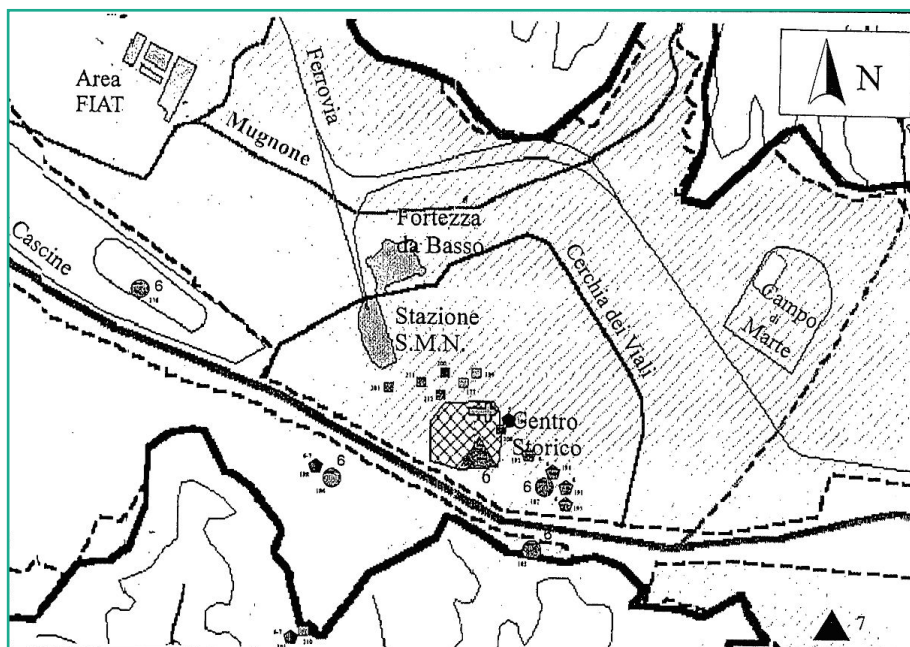
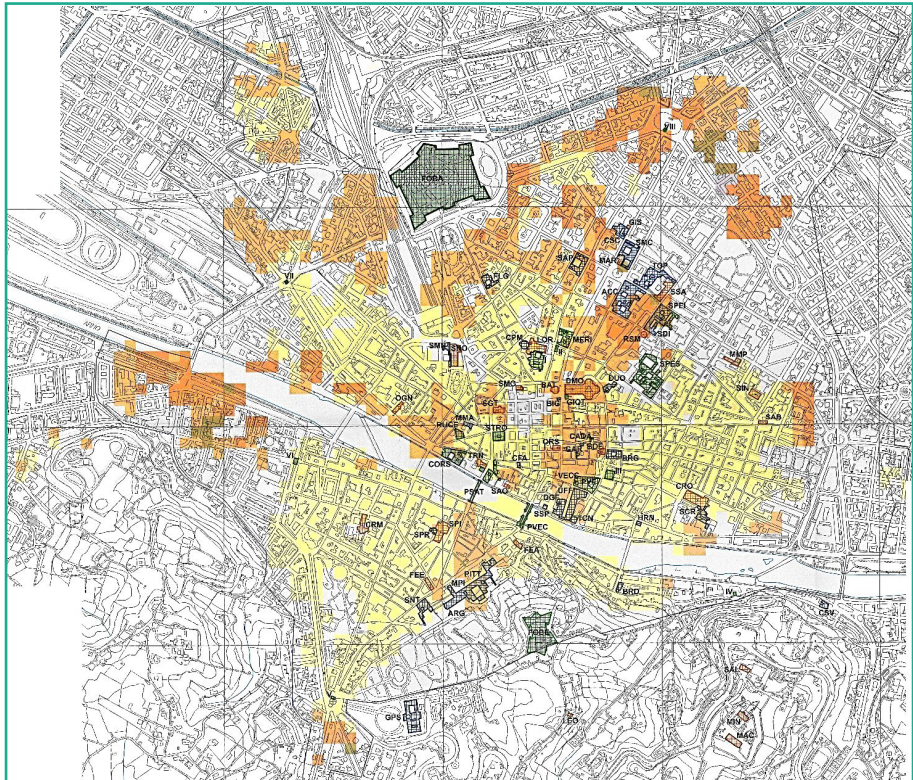


Figura 1.11 –
Effetti
macrosismici
a Firenze
del terremoto
del 29/6/1919
(da Vannucchi &
Gasparini 1997).



Da tali dati appare che le zone che hanno riportato i danni maggiori non siano uniformemente distribuite, ma si concentrino nei quartieri delle Cure, di San Jacopino, di San Salvi, di San Frediano e di San Niccolò; per quanto riguarda la zona interna alla cerchia dei viali, le zone maggiormente danneggiate risultano essere state Santa Croce, San Gallo e Piazza della Libertà (Figura 1.12).

Figura 1.12 – Distribuzione dei danni del terremoto del 1895 a Firenze (da Boccaletti et al. 1997); i diversi toni dal giallo all'arancione sono funzione della gravità dei danni segnalati.



Danni minori furono, tra l'altro, segnalati per Palazzo Pitti, Uffizi, Palazzo Medici Ricciardi, Palazzo Strozzi, Piazza Santissima Annunziata, Piazza della Libertà; risentimenti si ebbero anche alle crepe della Cupola, al Battistero ed al Campanile di Giotto, ma anche alla Badia Fiorentina, San Gervasio, San Lorenzo, San Leonardo, Santa Maria del Carmine, Santa Maria Novella, San Miniato al Monte e Santo Spirito. L'edilizia residenziale e privata della città subì lesioni diffuse e cadute di soffitti ed uno stabile crollò in Via Pier Capponi. Complessivamente circa 100 edifici risultarono inagibili, ma non vi furono vittime e solo 6 feriti non gravi (Cioppi, 1995). Da segnalare che diversi rapporti post eventi hanno evidenziato come molti di questi danni siano da ascrivere a difetti costruttivi o ad interventi strutturali eseguiti nel tempo sugli edifici danneggiati.

Inquadramento geologico e geomorfologico

Massimo Coli⁽¹⁾

⁽¹⁾*Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra*

L'assetto geologico e geomorfologico di un'area rappresenta il background di base sul quale agisce l'azione sismica prima di trasferirsi all'edificato; quindi, risulta basilare conoscere nel dettaglio la situazione geologica di superficie e di sottosuolo dell'area di studio, dalla quale derivare tutte le informazioni necessarie a definire la Microzonazione Sismica dell'area.

La conoscenza geologica dell'area fiorentina e del suo sottosuolo deriva da recenti studi accademici (Briganti et al. 2003, Coli & Rubellini 2007, 2013, CARGT 2012) e da ricerche, elaborati e Banche dati sviluppati negli ultimi 20 anni nell'ambito della collaborazione in corso tra Comune e Dipartimento di Scienze della Terra.

2.1 Geomorfologia

L'area fiorentina è collocata nel settore orientale del bacino di Firenze-Prato-Pistoia che si sviluppa in direzione NW-SE per una lunghezza di 45 km ed una larghezza massima di 10 km ad una quota media di 45 m s.l.m.; il bacino è delimitato a Nord dai Monti della Calvana (916 m s.l.m.) e dal gruppo di Monte Morello (892 m s.l.m.) ed a Sud dalla dorsale del Montalbano (627 m s.l.m.).

La depressione morfologica, alimentata dai fiumi Ombrone, Bisenzio ed Arno e dai relativi affluenti, è riempita da sedimenti fluvio-palustri Plio-Pleistocenici e fluviali recenti che raggiungono i 650 m circa di potenza nella zona di Prato.

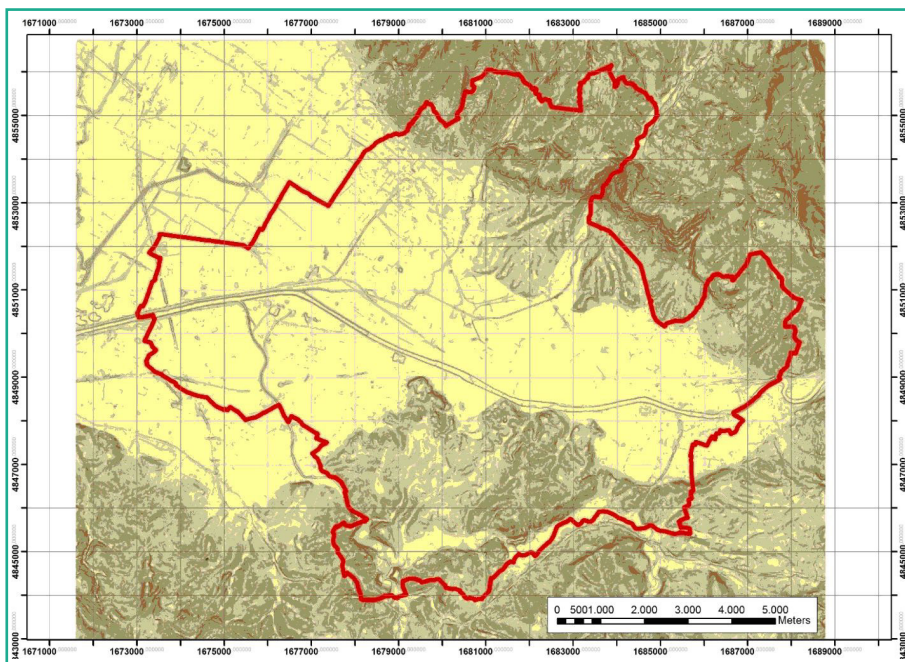
L'area del Comune di Firenze è caratterizzata dall'estesa pianura alluvionale dell'Arno, orientata in direzione NW-SE e posta a circa 45-60 m s.l.m., ed in parte da rilievi collinari, spesso con sommità tabulare, che si raccordano con versanti a bassa acclività (<25%; 14°) con la zona di pianura.

Il principale risalto morfologico dell'area è dato dalla scarpata di faglia degradata della gradinata di faglie di Fiesole, che sul versante settentrionale del bacino di Firenze si eleva, con evidenti faccette triangolari, di circa 150 m con una pendenza residua di circa 20° (35%). A sud dell'Arno i rilievi si elevano fino alla quota massima di 190 m s.l.m. nell'area di San Miniato a Monte, mentre a nord dell'Arno si ha una prima fascia di rilievi (Cionfo e San Domenico) intorno ai 150 m s.l.m., seguita dalle elevazioni principali in corrispondenza della dorsale Monte Rinaldi, Fiesole, Monte Ceceri fino ai 280-350-410 m s.l.m. (Figura 2.1).

Tutti i rilievi presentano dei piani sommitali con pendenza generalmente nulla o comunque inferiore al 5%; tali superfici rappresentano testimonianze di antiche superfici morfologiche, in particolare:

- quella del Cionfo e di San Domenico che si raccorda a sud con quella di San Miniato al Monte-Gamberaia, rappresenta il colmo dei depositi fluvio-palustri Pliocenici,
- quella di Monte Rinaldi-Monte Ceceri, che si raccorda più a monte fino all'Olmo ed a sud alla spianata di Arcetri-Giramonte (160-190 m s.l.m.), rappresenta il residuo dell'antica superficie a bassa energia del rilievo del Pliocene Inferiore.

*Figura 2.1 –
Morfologia e
forma di versante
secondo il grado di
pendenza dell'area
fiorentina, ricavato
dal DTM ad 1 m
del comune di
Firenze, la linea
rossa è il limite
amministrativo
comunale.*



L'area fiorentina si estende prevalentemente (circa il 66%) alle quote della pianura alluvionale (45-60 m s.l.m.), caratterizzata da pendenze inferiori ai 5°, mentre le zone collinari, con pendenze variabili tra il 5% ed il 35%, rappresentano poco più del 30% dell'intera area.

L'esposizione dei versanti è fortemente condizionata dall'ampia zona di pianura nettamente orientata NW-SE, pertanto le pendici collinari appaiono prevalentemente esposte verso i quadranti NW e SE con prevalenza di quest'ultimo settore dato il maggior sviluppo dei versanti nord-orientali.

2.1.2 Elementi morfologici

Dal punto di vista morfologico l'area fiorentina è divisibile in fasce altimetricamente distinte e litologicamente caratterizzate da differenti tipi di terreni, allungate in direzione NW-SE. La fascia nord-orientale è costituita dalla dorsale di Monte Ceceri-Monte Rinaldi che si erge con un brusco cambio di pendio (pendenze medie del 30-35%, pari a circa 18°-20°), corrispondente al versante degradato delle faglie di Fiesole, fino a raggiungere le quote sommitali, spianate con pendenze <5%, varianti tra i 414 m s.l.m. di Monte Ceceri, i 285 m s.l.m. di Monte Rinaldi ed i 216 m s.l.m. delle colline di Monterivechi sopra a Careggi; litologicamente tale fascia è ca-

ratterizzata dalla presenza del Macigno.

La fascia successiva, interrotta nella sua continuità dalla valle del Mugnone, costituisce i piani rialzati del Cionfo e di San Domenico, con sommità spianata (< 5%) situati a circa 130-150 m s.l.m., raccordatisi con la pianura fiorentina tramite declivi dolci a pendenze medie (10%; 5°); litologicamente è costituita dai depositi fluvio-palustri Pliocenici.

La fascia principale è rappresentata dal fondovalle della pianura fiorentina, e si pone ad una quota media di circa 45-60 m s.l.m.; litologicamente è costituita dalle alluvioni dell'Arno e dei suoi principali affluenti.

Il margine meridionale del bacino è costituito da rilievi a morfologia di tipo collinare e con versanti dalle forme dolci, intensamente coltivati; le quote variano dai 60 m s.l.m. al raccordo con la pianura alluvionale, fino a 90 m s.l.m. raggiunti nell'area di Torre del Gallo.

Tutti i rilievi hanno alla sommità superfici a bassa pendenza (< 5%), corrispondenti ad antiche superfici di equilibrio impostatesi durante le varie fasi di riempimento del bacino Firenze-Prato-Pistoia, in relazione ai movimenti di tettonica distensiva che hanno interessato l'intera area durante il Plio-Pleistocene. Tali superfici si presentano seriate a quote diverse: la più antica e più alta, riferibile al Pliocene Inferiore, si estende principalmente sulle arenarie del Macigno lungo la dorsale di Monte Rinaldi-Monte Ceceri a quote intorno ai 280-400 m s.l.m., ed alla sommità delle colline di Arcetri-Giramonte alle quote di 160-190 m s.l.m.; questa superficie si sarebbe sviluppata come livello di equilibrio locale durante il lungo periodo Mio-Pliocenico Inferiore di resistasia.

Una successiva superficie si è imposta a partire dal Pleistocene Inferiore (c. 150 m s.l.m.) in connessione al raggiungimento di un livello di equilibrio tra erosione e sedimentazione nel bacino di Firenze ed è registrata dal colmo dei depositi Villafranchiani del Cionfo e di San Domenico e di quelli a sud dell'Arno (130-90 m s.l.m.); questa superficie è stata successivamente reincisa dall'Arno, dal Mugnone e dagli altri tributari dell'Arno.

La maggior parte delle superfici sommitali impostate sui depositi fluvio-palustri a nord dell'Arno, sono delimitate da orli di scarpate di altezza limitata a pochi metri ed in genere dovute a controllo lito-strutturale (livelli di ciottolami sub-orizzontali).

2.1.3 Forme del rilievo

Il modellamento ed incisione dei rilievi, così come le forme e movimenti di versante, sono strettamente collegati alla struttura tettonica e soprattutto alla distribuzione delle litologie; in particolare gli affioramenti arenacei costituiscono la maggior parte dei rilievi presenti nell'area, con la maggiore estensione nei settori nord-orientale (Macigno) e meridionale (Pietraforte); nei dolci rilievi a sud dell'Arno affiorano anche i litotipi marinoso-arenacei della Formazione di Sillano e subordinatamente i depositi incoerenti fluvio-palustri del Pliocene Superiore, nei rilievi pedecollinari centro-settentrionali sono presenti invece esclusivamente i depositi fluvio-palustri non consolidati.

I rilievi del Cionfo e di San Domenico, costituiti dai terreni meno competenti ed incoerenti dei depositi fluvio-palustri, presentano incisioni vallive con tipica geometria a conca; mentre valli strette con tipica forma a "V", si sono impostate sulle colline costituite dai litotipi arenacei, talora con presenza di gradini in corrispondenza di livelli più competenti. Sul versante meridionale dei rilievi a nord di Castello, dove predominano i terreni argillitici del Complesso Caotico, si è invece impostato un ruscellamento superficiale diffuso.

Sui versanti dei rilievi pedecollinari costituiti dai terreni fluvio-palustri, la diversa distribuzione dei litotipi determina la presenza di scarpate morfologiche, in corrispondenza dei livelli di ghiaie e ciottolami intercalati ai limi, con estensione laterale più o meno continua.

Orli di scarpate di degradazione sono stati rilevati anche ai margini delle superfici di colmo del Cionfo e di San Domenico.

Sui versanti a muro delle faglie di Fiesole, costituiti dalle arenarie del Macigno, sono presenti faccette triangolari, impostate su scarpate di faglia degradate, che raggiungono le quote corrispondenti alla superficie di equilibrio sommitale; i rilievi a nord di Castello, costituiti dalle litologie prevalentemente calcaree della Formazione di Monte Morello, presentano i versanti meridionali regolarizzati.

Ai piedi dei rilievi di Monte alle Croci, Boboli e Monte Oliveto è presente una ripa di erosione fluviale dell'Arno, marcata da una brusca rottura di pendio ad andamento sinuoso e con scarpata inferiore ai 10 m.

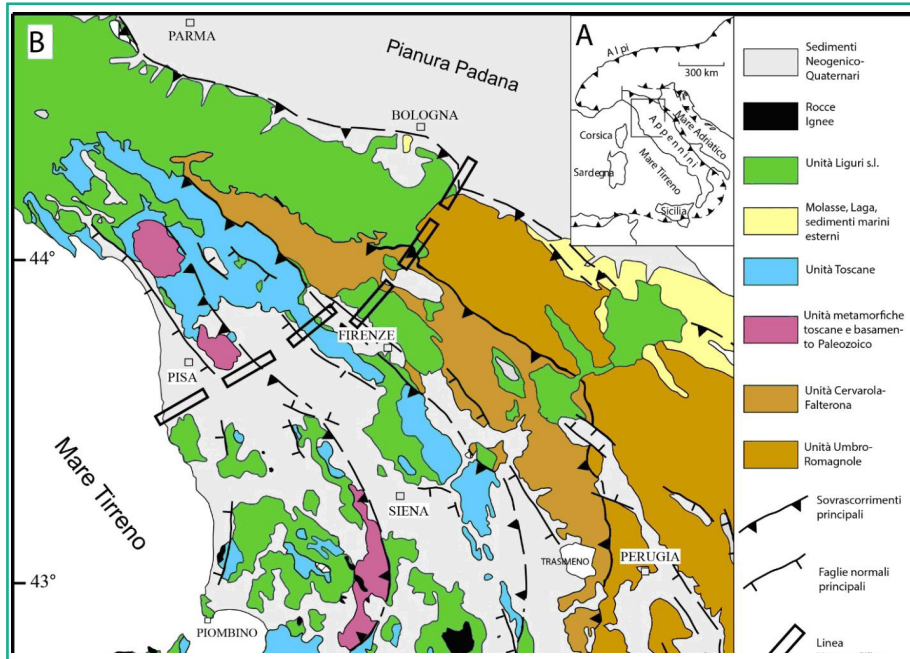
2.2 Geologia

L'Appennino Settentrionale è una catena orogenica strutturalmente complessa, a falde e thrust, formatasi in relazione a più fasi tettoniche legate, a partire dal Cretaceo Superiore, alla chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese ed alla conseguente collisione continentale tra le placche europea ed adriatica nell'Eocene, con successiva apertura del Mar Balearico e rotazione del Blocco Sardo-Corso con sottoscorrimenti crostali a carico del margine africano (Oligocene) (Figura 2.2).

A partire dal Miocene Superiore il fronte compressivo è seguito da un fronte distensivo, legato all'apertura del Bacino Tirrenico; attualmente i due regimi tettonici diversi coesistono in due fasce longitudinalmente contigue della catena: sul versante tirrenico è attivo il regime distensivo, su quello adriatico quello compressivo.

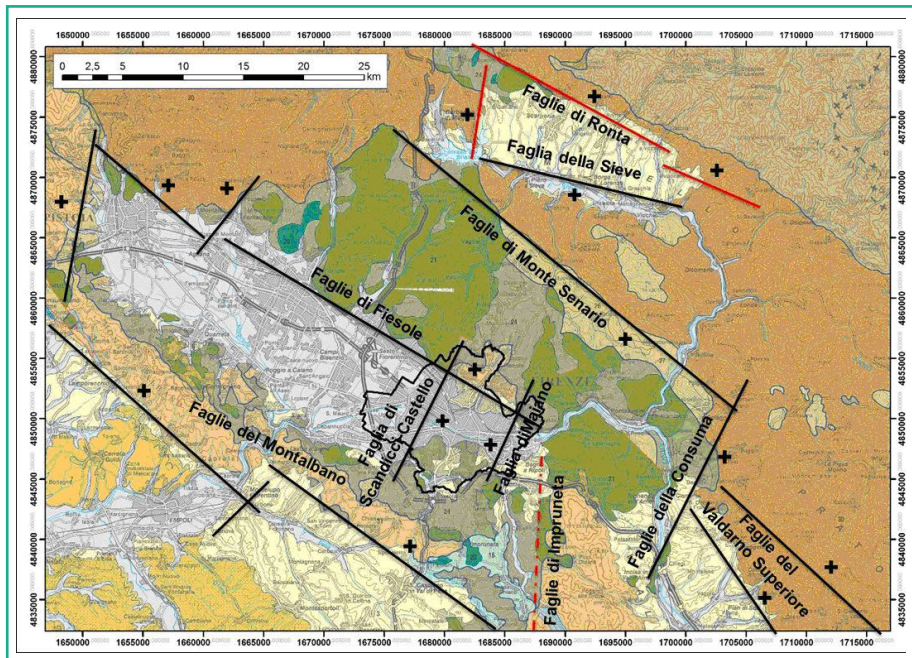
Il regime tettonico distensivo, attraverso una serie di faglie normali immergenti verso il Tirreno, ha portato allo smembramento della catena orogenica precedentemente costituita, ed allo sviluppo di depressioni tettoniche via via più giovani da ovest verso est, sviluppatasi a partire dal Tortoniano terminale-Messiniano. L'assetto tettonico di tali bacini vede una serie di faglie normali a gradinata, immergenti verso ovest, poste sul margine orientale, probabilmente listriche e raccordanti in basso su una faglia basale crostale, con eventuali faglie antitetiche sul margine occidentale e basculamento verso est dei depositi neogenici di riempimento dei

Figura 2.2 – Schema geologico dell'appennino settentrionale con riportate le principali unità tettoniche, i thrust e le faglie estensionali che hanno dato luogo ai bacini intermontani appenninici.



bacini stessi, che possono raggiungere anche diverse centinaia di metri di spessore (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Assetto tettonico del bacino di Firenze-Pistoia nell'ambito della sequenza dei bacini neogenici appenninici, dal Valdarno Inferiore al Mugello. In nero le faglie bordiere fossili, in rosse quelle tettonicamente attive; il segno + indica il lato rialzato.

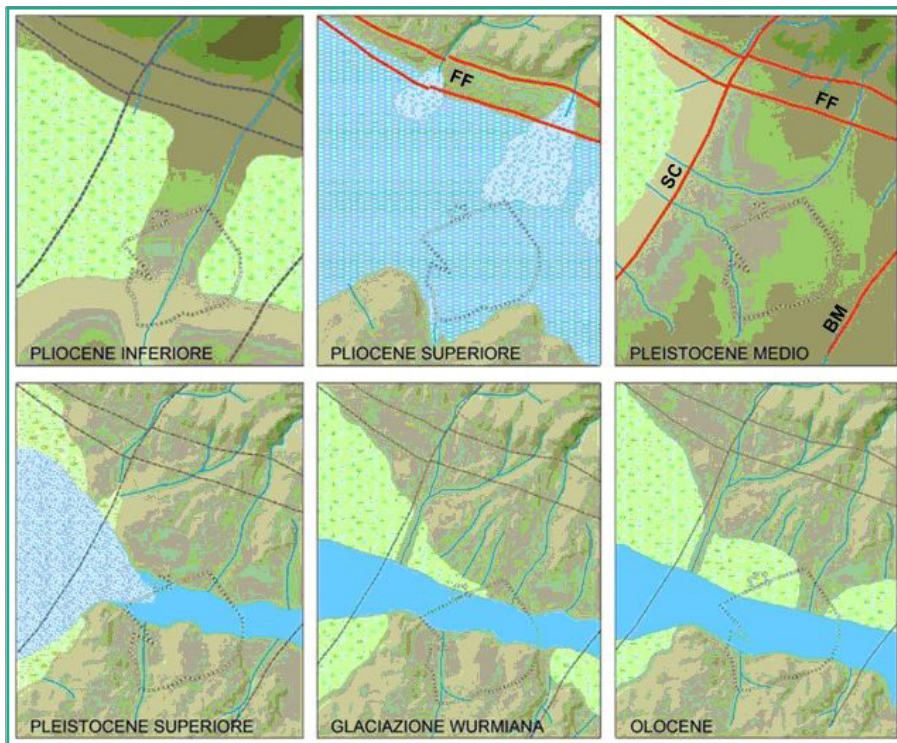


Firenze è posta all'estremità sud-orientale di uno di questi bacini tettonici intermontani appenninici il cui sviluppo è legato all'attività della gradinata di faglie normali di Fiesole, nella zona dell'allineamento Monte Orsaro-Monte Cimone-Montalbano-Monti del Chianti-Monte Cetona, che

nell'interpretazione geologica corrente costituisce il fronte di sovrascorimento della Falda Toscana sull'Unità Cervarola-Falterona; in questo contesto tettonico, questo motivo strutturale e le sovrastanti Unità Liguri sono stati dislocati dalle faglie estensive che hanno segmentato l'edificio a falde preesistente, sovrapponendosi ai motivi plicativi precedenti e determinando strutture a horst e graben allungate prevalentemente in direzione appenninica.

In questo quadro geologico regionale, il bacino di Firenze-Prato-Pistoia si delinea a partire dal Pliocene Superiore come area sottoposta ad un generale abbassamento, alternato a movimenti di sollevamento differenziale documentati soprattutto nel Pleistocene; nel Pleistocene medio l'evoluzione tettonica del bacino si differenzia, con un sollevamento parziale dell'area di Firenze rispetto all'area più occidentale del bacino. Le fasi tettoniche a carattere prevalentemente distensivo, responsabili dell'evoluzione recente del bacino di Firenze, possono essere così schematizzate secondo i principali intervalli di tempo (Figura 2.4.).

Figura 2.4 – Ricostruzione virtuale dell'evoluzione geomorfica plio-quadernaria dell'area fiorentina (il tracciato delle mura del XIV secolo è riportato quale riferimento); celeste: aree palustri; marroncino: aree emerse; verdino: aree palustri; puntinato blu su blu chiaro: aree alluvionali e di conoide; blu: alveo fluviale dell'Arno; linee nere: faglie inattive; linee rosse: faglie attive; linee blu: idrografia. FF: faglie di Fiesole; S-C: faglia Scandicci-Castello; M-B: faglia Maiano-Bagno a Ripoli.



Miocene Superiore: l'area emersa appenninica va soggetta ad una generale erosione tendente allo sviluppo di una superficie a bassa energia del rilievo; dovevano essere già delineate le faglie di Fiesole e di Scandicci-castello e Maiano-Bagno a Ripoli che sollevano il blocco fiorentino.

Pliocene Inferiore: l'area fiorentina, a bassa energia del rilievo, era solcata dal Mugnone che sfociava in mare nella zona di San Casciano.

Pliocene Superiore: la riattivazione delle faglie di Fiesole portò all'individuazione del bacino di Firenze-Prato-Pistoia, che fino al Pleistocene Inferiore divenne area di sedimentazione fluvio-palustre.

Pleistocene medio: la riattivazione delle faglie trasversali di Castello-Scandicci e Maiano-Bagno a Ripoli portò al sollevamento ed erosione dell'area fiorentina, nella quale il sopraggiunto fiume Arno, ed i suoi affluenti laterali, Mugnone in primis, crearono un solco erosivo con formazione di una ampia conoide clastica nel rimanente bacino Prato-Pistoia ad ovest della faglia di Castello-Scandicci.

Pleistocene Superiore: a partire circa da questo momento i depositi d'alveo dell'Arno colmarono questo solco erosivo, ormai in equilibrio con la residua area palustre ad ovest.

Olocene: l'Arno erode i fianchi meridionali del bacino fino alla posizione attuale e l'intera pianura viene coperta da un materasso alluvionale costituito da depositi d'alveo e di esondazione dell'Arno e dei suoi tributari. Il risultato di questa storia geologica ha portato alla situazione geologica attuale dell'area fiorentina che vede la presenza in superficie delle unità del substrato pre -Pliocenico sui bordi del bacino e nella zona di bacino la presenza in affioramento dei terreni lacuo-palustri del Villafranchiano Auctt. e dei depositi recenti dell'Arno e dei suoi affluenti, con i depositi del paleo-Arno presenti solo nel sottosuolo a riempire il suo solco erosivo e a formare la zona di delta-conoide nel bacino di Prato-Pistoia (Figura 2.5) (cfr. Tavola Carta Geologica a: <https://www.regione.toscana.it/-/pubblicazioni-11>).

2.2.1 Stratigrafia

L'ampia disponibilità di dati di sottosuolo e la loro diffusione e profondità ha consentito di effettuare un raggruppamento dei principali corpi sedimentari sulla base dell'evoluzione geologica in termini di UBSU (Unità Stratigrafiche a Limiti Inconformi), secondo tre situazioni ambientali-paleogeografiche diverse e distinte nel tempo: Sintema del Bacino di Firenze-Pistoia, Depositi Antichi, Depositi Recenti; ognuna di queste Unità è a sua volta internamente organizzata in sub-unità e litologie, secondo i vari ambienti fluvio-palustri o corsi fluviali di afferenza.

Caratteristiche peculiari di questi terreni sono un'accentuata varietà di facies verticale e laterale e frequenti discontinuità stratigrafiche, spesso corrispondenti a fenomeni erosivi, nell'ambito di un processo sedimentario prevalente; altrettanto rilevante è la complessità dei rapporti stratigrafici che nella maggior parte dei casi non sono di semplice sovrapposizione, ma presentano passaggi eteropici ed erosivi tra le diverse unità secondo superfici sedimentarie eteropiche o secondo superfici erosive anche complesse e ripetute. Di secondaria importanza, ma non per questo trascurabile, è il problema dello spessore frequentemente modesto o comunque variabile, sia per un'originaria discontinuità od episodicità delle aree di accumulo, sia in conseguenza di intercorsi fenomeni erosivi.

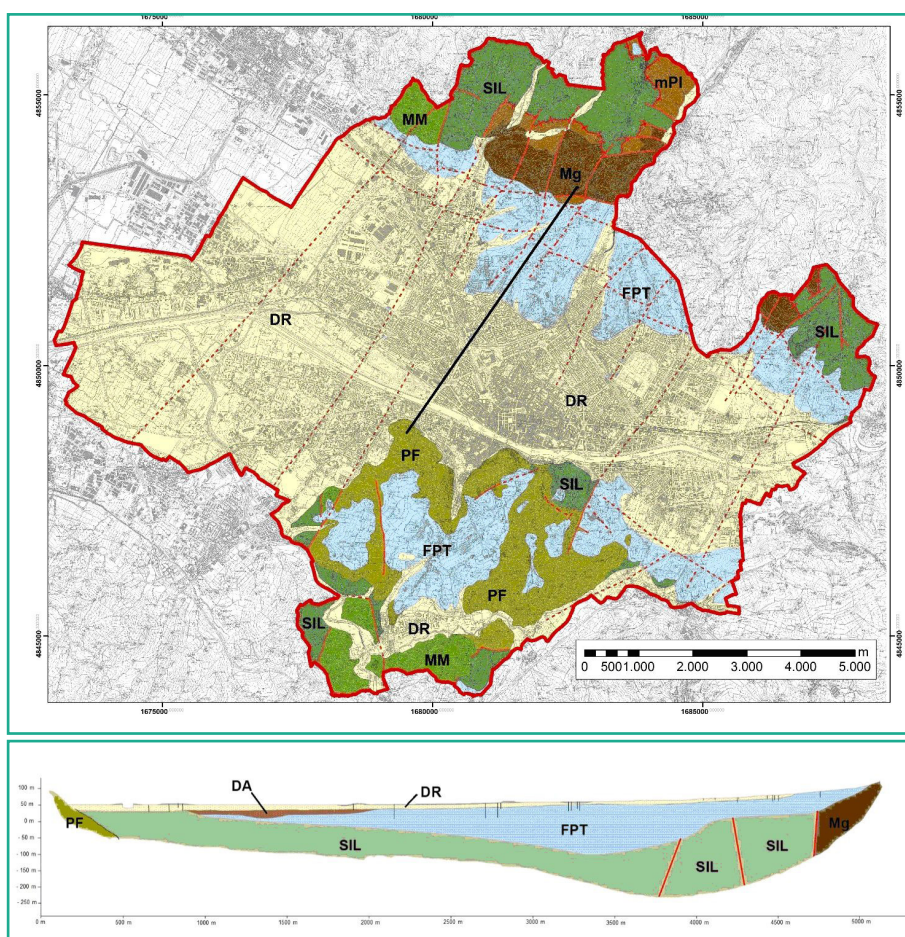
Il substrato litoide è rappresentato da una successione costituita da al-

ternanze di argilliti, siltiti e marne con livelli arenacei o calcarenitici. Tali terreni sono attribuibili rispettivamente alla Formazione di Sillano e alla Pietraforte dell'Unità Ligure di Monte Morello. La parte superiore del substrato, per uno spessore anche di alcuni metri, si presenta fortemente alterata e fratturata con avanzati processi di riargillificazione a carico degli orizzonti argillitici eventualmente presenti.

Nella parte settentrionale, a livello delle faglie di Fiesole, il substrato litoide è invece costituito dalle arenarie del Macigno, della Falda Toscana.

Al di sopra del substrato litoide, poggiano in discordanza depositi legati alla fase continentale del tardo Miocene e del Pliocene Inferiore, a cui seguono i depositi fluvio-palustri del Sintema del Bacino di Firenze- Pistoia, e poi i Depositi Antichi ed i Depositi Recenti.

*Figura 2.5 –
Carta e sezione
geologica
esemplificativi
dell'assetto
dell'area fiorentina
mostrante i
rapporti tra
le varie UBSU.
Substrato litoide:
PF = Pietraforte,
SIL = Fr. Sillano,
Mg = Macigno;
depositi plio-
quaternari:
FPT = Sintema del
Bacino,
DA = Depositi
Antichi,
DR = Depositi
Recenti;
linee rosse: faglie.*



Terreni del Pliocene Inferiore

I terreni del Pliocene Inferiore sporadicamente presenti alla base dei depositi fluvio-palustri del bacino sono costituiti da:

- *Depositi del Paleo-Mugnone* (Pliocene Inferiore): sono costituiti dai depositi d'alveo ed alluvionali che il paleo-Mugnone lasciava nella sua paleo-valle tra le faglie di Fiesole, già presenti ma spianate, e lo sbocco nel

la pianura costiera di San Casciano; si tratta di ciottolami con lenti e livelli di sabbie e limi; hanno potenza di pochi metri e si ritrovano al contatto con il substrato nei sondaggi più profondi dell'area fiorentina.

- *Depositi palustri* (Pliocene Inferiore): rappresentano il residuo della sedimentazione limno-palustre che avveniva in depressioni ristrette individuate sulla superficie di equilibrio a bassa energia del rilievo del Pliocene Inferiore.

A questi depositi seguono quelli del Sintema del Bacino di Firenze-Pistoia e dei Depositi Antichi e dei Depositi Recenti fluvio-palustri riconosciuti nell'area fiorentina, che in dettaglio presentano le seguenti caratteristiche litostratigrafiche:

Sintema del Bacino di Firenze-Pistoia

- a. Massicci corpi di argille e argille-limose grigio-bluastre (Argille Turchine Aucct.): sono costituiti da depositi limoso-argillosi deposti in condizioni climatiche prevalentemente fredde. All'interno di questo corpo principale sono presenti livelli e lenti di ghiaie e sabbie, in genere sporchi; verso l'alto passano, nell'area fiorentina, a limi bruni di ambiente limno-palustre, a luoghi varvati, con torbe, frustoli carboniosi, calici e paleosuoli. Sono fortemente interdigitali con i depositi di delta e fan-delta del paleo-Affrico, paleo-Mugnone e paleo-Terzolle. Nell'area centrale fiorentina hanno uno spessore massimo di circa 90 m, che raggiunge i circa 160 m nei rilievi pedecollinari a NE della città.
- b. Depositi clastici di delta e fan-delta costituiti da ciottolami (localmente segnalati anche blocchi) e ghiaie in genere sporchi, ghiaie-sabbiose, sabbie limose e limi sabbiosi, in corpi più o meno massivi e/o canalizzati, formati ad opera dei vari torrenti che confluivano nel bacino. Nelle varie articolazioni in lobi e canali, si interdigitano in maniera complessa nei depositi palustri; sono più sviluppati e potenti (diverse decine di metri) nelle zone apicali, si vanno a disperdere in lenti e livelli clastici sempre più fini e diluiti nelle zone più distali. Sono stati individuati i seguenti quattro gruppi, dei quali i primi tre legati ai torrenti provenienti dal versante NE e il quarto dalle colline a sud della città:
- *Depositi del paleo-Affrico* - sono costituiti dai depositi clastici delta/fan-delta che il paleo-Affrico, che comprendeva anche l'alto bacino del Mensola, lasciava nel bacino; si tratta di ciottolami e ghiaie sporchi, con matrice limosa; costituisce un cospicuo corpo clastico nel sottosuolo dell'area nord-orientale.
- *Depositi del paleo-Mugnone* - si tratta dell'ampia conoide di delta/fan-delta lasciata dal paleo-Mugnone nel bacino, è ben documentata nei rilievi pedecollinari e nella zona settentrionale del sottosuolo fiorentino; è costituita da ciottolami e ghiaie in matrice limoso-sabbiosa e da corpi limoso-argillosi bruni; localmente sono presenti sabbie monogranulari.
- *Depositi del paleo-Terzolle* - si tratta di corpi lentiformi di ciottolami e ghiaie spesso sabbiosi, e di lenti di limi argillosi bruni; sono presenti con scarsa rilevanza nel sottosuolo della zona nord-occidentale della città.
- Depositi del paleo-Ema/Greve: costituiscono un ampio e consistente

corpo clastico a ciottolami e ghiaie in matrice sabbiosa, talora massicci, affiorante estesamente sui rilievi di Ripoli-Ponte a Ema e presente nella zona sud-orientale del sottosuolo fiorentino.

Depositi Antichi

Sono costituiti da ciottolami e ghiaie d'alveo del paleo-Arno, più o meno sporchi, frammisti a livelli sabbioso-limosi bruni nella zona settentrionale della cerchia dei viali di Firenze; sono essenzialmente depositi ciottolosi e ghiaiosi nella zona Cascine-Osmannoro-Legnaia. Non affioranti nell'area fiorentina, ma presenti nel sottosuolo, sono suddivisibili in:

- *Depositi del margine*: si tratta dei depositi derivanti dal trasporto di massa (debris-flow) dei detriti del disfacimento crioclastico e susseguente regolarizzazione dei versanti dei rilievi carbonatici di Monte Morello e della Calvana; hanno potenza di diverse decine di metri e sono costituiti da limi bruni ghiaiosi a clasti spigolosi centimetrici di natura eminentemente carbonatica.
- *Depositi del Bacino Prato-Pistoia*: sono caratterizzati da una sedimentazione prevalentemente limno-palustre con sporadici apporti clastici, legata principalmente a condizioni climatiche fredde. Sono costituiti da limi argillosi bruni con fiocchi grigio azzurri e piccole concrezioni carbonatiche e manganesifere, con dispersi corpi lentiformi ghiaioso-sabbiosi. Tali depositi sono progradanti sul margine eroso dell'alto di Firenze lungo la faglia di Castello-Scandicci, si interdigitano ed accolgono le conoidi del paleo-Arno, del Greve-Ema e del paleo-Terzolle, hanno una potenza di almeno 90 m, che aumenta verso l'area pratese del bacino.
- *Depositi del paleo-Arno*: sono costituiti dall'ampia conoide dell'Arno nel bacino di Prato-Pistoia, ben sviluppata nella zona delle Cascine-Osmannoro, con apice nella zona della Fortezza da Basso, e dal solco erosivo sviluppato dal paleo-Arno lungo la direttrice Piazza Beccaria-Piazza San Marco-Fortezza da Basso. Si tratta di ciottolami e ghiaie d'alveo, più o meno sporchi, frammisti a livelli sabbioso-limosi bruni. Sono essenzialmente depositi ciottolosi e ghiaiosi nella conoide nel bacino Prato-Pistoia nella zona Cascine-Osmannoro-Legnaia. Questo corpo clastico, che ha una potenza variabile fino ad un massimo di una ventina di metri, è stato poi variamente eroso dai depositi recenti dell'Arno.
- *Depositi del Greve-Ema*: comprendono la conoide del Greve-Ema nel bacino Prato-Pistoia presente nella zona di Scandicci-Legnaia, sono costituiti da ciottolami sparsi e ghiaie sporche ed hanno una potenza nell'ordine della decina di metri.
- *Depositi dei Torrenti minori*: sono costituiti dall'insieme dei depositi alluvionali antichi lasciati dai vari torrenti (Affrico, San Gervasio, Mugnone, Montughi, Arcovata, Lastra, Terzolle), anche come depositi alluvionali di fondovalle nel loro solco erosivo a carico dei terreni fluvio-lacustri del Sintema del Bacino, o come fan-delta nel bacino di Prato-Pistoia (Terzolle). Sono organizzati a seconda dei torrenti adduttori in corpi clastici, costituiti da ghiaie in genere sporche o da limi sabbiosi, più o meno

separati od interdigitati lateralmente tra di loro; hanno una potenza variabile da pochi metri fino ad una decina di metri. Verso la zona centrale fiorentina questi depositi si interdigitano ai Depositi Recenti con complessi rapporti di erosione-deposizione.

Depositi Recenti

Sono costituiti dai depositi d'alveo e di esondazione recenti ed attuali del materasso alluvionale dell'Arno e dei suoi affluenti nell'area fiorentina, in complessi rapporti di eteropie laterali erosive e sedimentarie non sempre definibili in modo univoco. I depositi d'alveo sono costituiti principalmente di ciottolami e ghiaie, da puliti a sporchi, con livelli e lenti di sabbie, anche gradate. I 3-5 m superiori sono formati da limi più o meno sabbiosi, in relazione alla loro distanza dal corso fluviale; le ghiaie presentano frequenti episodi di erosione e sostituzione, come dimostra la presenza di elementi fittili fino alla profondità di 10 m dal piano città. Rappresentano il corpo clastico principale, presente con continuità in tutta l'area fiorentina, con uno spessore estremamente variabile da pochi metri fino ai circa 20-25 m; giace in discordanza erosiva sul substrato litoide nell'area del centro storico fiorentino, e sui Depositi Antichi, lungo ed oltre la cerchia settentrionale dei viali. Si tratta nel complesso di depositi testimoniati un ambiente sub-aereo fluviale dominato da piene catastrofiche ad alta energia; in base ai corsi d'acqua di afferenza, sono stati individuati varie tipologie:

- *Depositi degli affluenti di destra* (Affrico, San Gervasio, Mugnone, Arcovata, Montughi, Terzolle, Lastra): rappresentano i depositi alluvionali recenti dei vari torrenti; si tratta di depositi d'alveo ghiaioso-ciottolosi con abbondante matrice limoso-sabbiosa, imballati in corpi limosi palustri e/o d'esondazione. Hanno potenze variabili da pochi metri fino alla ventina di metri.
- *Depositi palustri*: costituiti dai depositi limno-palustri delle residue zone umide a nord ed ad ovest della città e nella pianura tra Campi e Sesto-Castello. Hanno potenza di un paio di metri nella zona settentrionale fino a qualche metro nella zona meridionale della pianura.
- *Depositi di conoide dei torrenti minori*: si tratta dei modesti apparati di conoide che i vari torrenti minori hanno lasciato al loro sbocco nella pianura fiorentina. Sono depositi clastici sporchi, ghiaie in matrice limoso-sabbiosa (derivanti tutti da erosione dei terreni villafranchiani dei rilievi pedecollinari settentrionali), mal classati e mal assortiti; hanno potenza di alcuni metri.

Riporti

Per l'area fiorentina i riporti antropici sono riferibili al livello archeologico presente essenzialmente nell'area del centro storico a coprire il terreno vergine riempiendo lo spazio del piano terreno dell'edificato romano, ma tutti gli edifici romani, medioevali e successivi, e ancor più i recenti, sono fondati sulle ghiaie sottostanti un paio di metri sotto il piano romano e

pertanto i riporti in realtà costituiscono un riempimento e non un piano di fondazione.

Nel dettaglio questi materiali, genericamente classificati come Riporti, sono divisibili come segue:

- *Livello archeologico*: costituito da ruderi, macerie e materiali antropici che ripienano i piani terreni dell'edificato romano e medievale; è prevalentemente presente nel centro storico all'interno della II Cerchia di mura ed in particolare della I Cerchia, rispetto all'attuale piano stradale può raggiungere uno spessore anche di fino a 6-8 m al di sopra del terreno vergine. Non ha valenza sismica in quanto gli edifici attuali sovrastanti sono in genere fondati su pre-esistenze medievali e romane che trovano la loro base fondale sul primo livello di ghiaie posto al massimo un paio di metri sotto il piano vergine naturale. La loro eventuale influenza sul singolo edificio sarà a carico di chi eseguirà la verifica sismica dell'edificio, ove lo riterrà opportuno.
- *Riempimenti*: si tratta di materiale di scarico posto a riempimento dei fossati lungo la III Cerchia di mura lungo il piano stradale dei Viali, e delle macerie belliche della II Guerra Mondiale scaricate in Arno ed ora costituenti i giardini a lato del Ponte San Niccolò; alla stessa categoria appartengono i riporti costituenti gli argini attuali dell'Arno, del Mugnone e del Terzolle.
- *Rilevati*: sono rappresentati dai materiali messi in posto a costituire i rilevati ferroviari, stradali ed autostradali presenti nell'area fiorentina.
- *Discariche RSU*: si tratta delle discariche urbane di rifiuti indifferenziati della Montagnola all'Isolotto e di Case Passerini; mentre la seconda è al suo stato di completamento, la prima è stata colonizzata con la costruzione della scuola de La Montagnola.

2.3 Modello Geologico del sottosuolo

2.3.1 Affidabilità e valenza dei dati di sottosuolo

L'ampia disponibilità di dati di sottosuolo che per l'area comunale fiorentina enumera i dati di 1926 sondaggi, e la loro diffusione e profondità, ha consentito di avere dati attendibili, anche se con valenza differenziata, per l'intero territorio comunale fiorentino, anche in funzione della profondità di interesse (Figura 2.6).

Il grado di conoscenza del sottosuolo fiorentino è stato sviluppato in base a due profondità di riferimento: -30 m dal p.c., inteso come limite di interesse ingegneristico anche in riferimento alle NTC2018 che prevedono il riferimento alle V_{seq}/V_{s30} , e il substrato litoide, inteso come base di input sismico.

Operativamente è stata considerata la profondità dei singoli sondaggi, rapportata in % della profondità indagata rispetto alla profondità di riferimento (-30 m, oppure quella reale del substrato) e quindi pesata arealmente in base alla densità/concentrazione dei sondaggi. Il risultato è rappresentato dalle Carte della valenza del Grado di Conoscenza dei primi 30 m dal p.c. e rispetto al substrato (Figura 2.6).

Figura 2.6 a) – Area comunale di Firenze con ubicazione dei 1926 log stratigrafici disponibili ed inseriti nel GDB. Grigio: substrato; le intensità di verde rappresentano il grado di conoscenza del sottosuolo relativamente ai primi 30 m di interesse geo-ingegneristico, compute in base alla densità dei sondaggi e della loro profondità rispetto alla profondità considerata.

< 0.2 = scarso;
 0.2-0.4 = discreto;
 0.4-0.6 = affidabile;
 0.6-0.8 = buono;
 > 0.8 = ottimo.

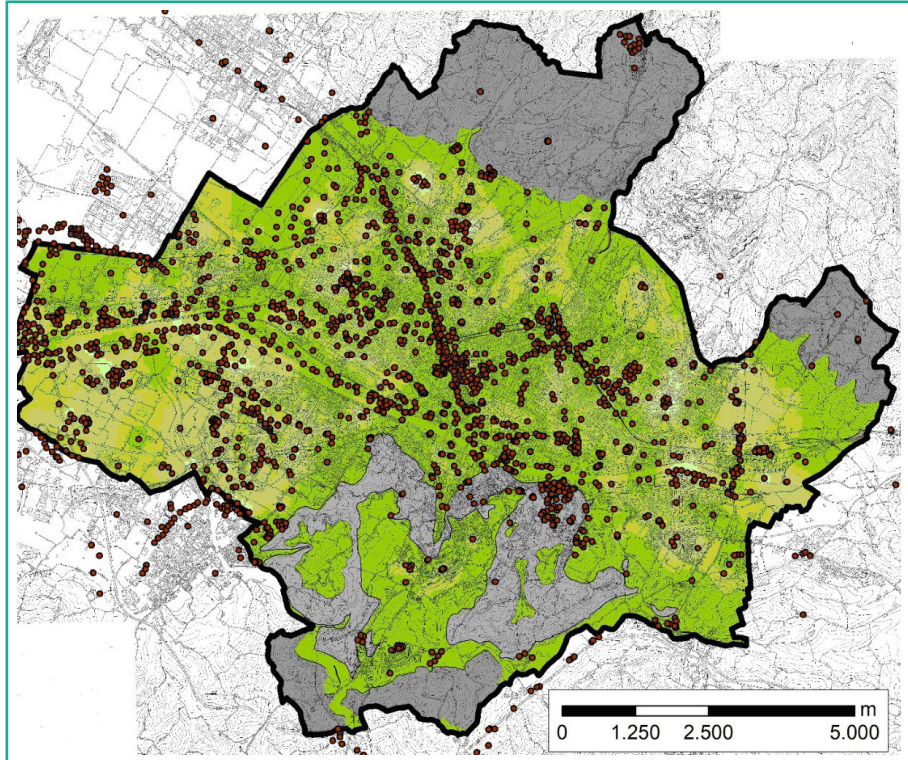
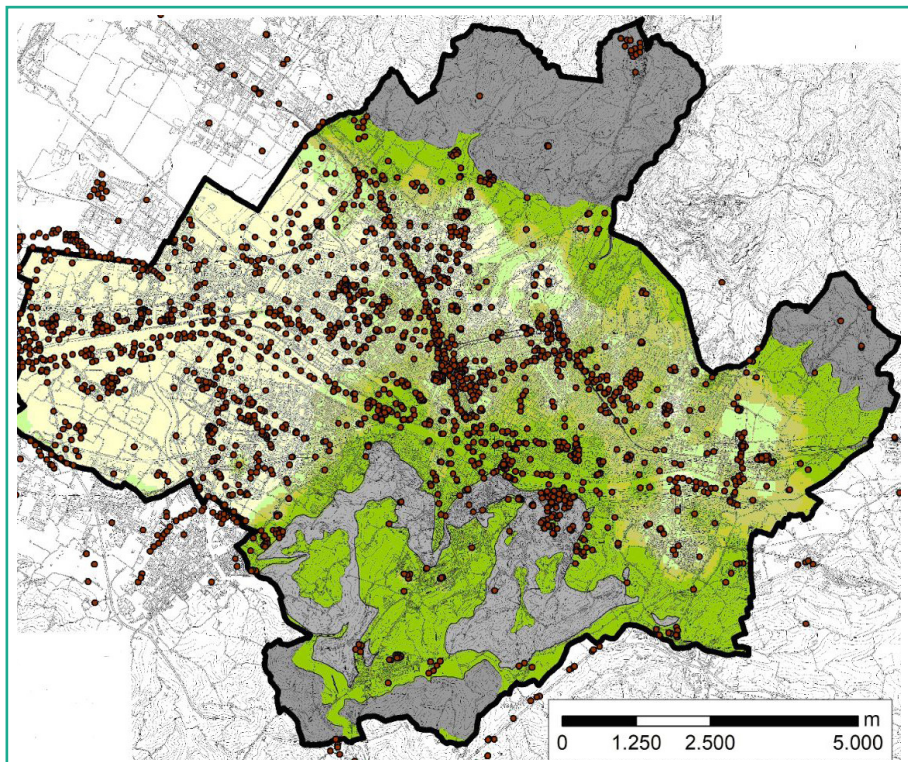


Figura 2.6 b) – Area comunale di Firenze con ubicazione dei 1926 log stratigrafici disponibili ed inseriti nel GDB. Grigio: substrato; le intensità di verde rappresentano il grado di conoscenza del sottosuolo relativamente al substrato, compute in base alla densità dei sondaggi e della loro profondità rispetto alla profondità considerata.

< 0.2 = scarso;
 0.2-0.4 = discreto;
 0.4-0.6 = affidabile;
 0.6-0.8 = buono;
 > 0.8 = ottimo.



Caratteristiche peculiari dei terreni del sottosuolo fiorentino sono un'accentuata varietà verticale e laterale di facies e frequenti discontinuità stratigrafiche, spesso corrispondenti a fenomeni erosivi, nell'ambito di un processo sedimentario prevalente.

Altrettanto rilevante è la complessità dei rapporti stratigrafici che nella maggior parte dei casi non sono di semplice sovrapposizione, ma presentano passaggi eteropici ed erosivi tra le diverse unità secondo superfici sedimentarie eteropiche o secondo superfici erosive anche complesse e ripetute.

Di secondaria importanza, ma non per questo trascurabile, è il problema dello spessore frequentemente modesto o comunque variabile, sia per un'originaria discontinuità od episodicità delle aree di accumulo, sia in conseguenza di intercorsi fenomeni erosivi.

La qualità dei dati riportati nei log litostratigrafici è, ovviamente, ampiamente variabile, ma riferendosi a quelli degli ultimi trent'anni è stato possibile fornire un'interpretazione affidabile ai più vecchi.

I primi 30 m dalla superficie del suolo possono essere considerati ben documentati, ma verso il basso, specialmente dove il substrato litoide si trova a oltre 100 m di profondità, la ricostruzione è principalmente congetturale e basata su ipotesi geologiche supportate da indagini indirette e poche indagini dirette.

Complessivamente il progressivo aggiornamento della banca dati, che presenta al suo interno dati storici e dati più recenti a cui dal 1995 si sono aggiunti dati più affidabili, ed aggiornata nel 2004, 2012, 2015 ed ora fino al dicembre 2018, ha sistematicamente confermato il quadro generale del modello 3D del sottosuolo, definendolo, nei dettagli a livello metrico nel sito di indagine volta per volta.

2.3.2 Il Modello

La disponibilità di una significativa quantità di dati litostratigrafici ha consentito la realizzazione e la validazione di un modello geologico tridimensionale che ricostruisce l'assetto geologico del sottosuolo fiorentino, classificato in unità geologico tecniche secondo i criteri UBSU e USCS.

Nel dettaglio sono stati ricostruiti i volumi 3D delle unità afferenti a: Depositi Recenti (DR), Depositi Antichi (DA), al Sintema del Bacino di Firenze-Pistoia (FPT), inoltre è stato definito l'andamento del top del Substrato litoide pre-pliocenico e, sulla base dei dati dei sondaggi che toccano il substrato e di considerazioni geologiche regionali e locali, è stata redatta la geologia del substrato litoide (Figura 2.7).

La costruzione del sottosuolo parte dall'interpretazione delle stratigrafie dei sondaggi e prosegue con l'interpolazione dei livelli di top e bottom delle unità considerate ottenuti attraverso elaborazioni di selezione e raggruppamento delle singole stratigrafie presenti all'interno del geodatabase. L'interpolazione delle superfici di top e di bottom è stata realizzata impiegando interpolatori deterministici (di tipo IDW) e integrando/verificando i risultati con considerazioni geologiche regionali e locali, e dati

dalle sezioni sismiche specificatamente eseguite, anche in base all'assetto e all'evoluzione geologica pregressa e recente dell'area; questa procedura ha permesso di andare a correggere eventuali derive o artifici creati dall'interpolatore.

Le superfici di delimitazione delle varie UBSU (Substrato, Sintema del Baccino, Depositi Antichi, Depositi Recenti) sono superfici continue e grazie all'abbondanza di dati è stato possibile tracciarne, con affidabile approssimazione, i limiti su tutta l'area fiorentina (Figura 2.8). Da queste superfici sono stati poi realizzati i volumi del Modello Geologico 3D dell'area fiorentina; il modello ha come base il tetto del substrato litoide che, ovviamente sui bordi, ma anche nella zona del centro storico di Firenze appare poco profondo (< 20 m dal p.c.), presentando depocentri verso le faglie di Fiesole e sprofondando verso Campi Sesto oltre la faglia di Scandicci-Castello. Verso ovest la presenza della faglia Castello-Scandicci ribassa il substrato con un gentile raccordo di circa un centinaio di metri; ancora più ad ovest il substrato sprofonda decisamente verso la pianura sestese-pratese, raggiungendo e superando i 600 m dal p.c. nella zona di Campi Bisenzio. A NE, nella zona dei viali e pedecollinare, il substrato si approfondisce ed è segmentato da faglie trasversali e dalla gradinata delle faglie di Fiesole, raggiungendo la massima profondità (> 110 m) dal p.c. nella zona delle colline Villafranchiane. La faglia di Bagno a Ripoli-Maiano ha determinato un abbassamento dell'area più sud-orientale del bacino di circa 10-20 m.

Figura 2.7 – Ricostruzione dell'assetto del substrato litoide nell'area del comune di Firenze e le mura per riferimento. in rosso le faglie principali.
 PF = Pietraforte, SIL = Formazione di Sillano, Mm = Formazione di Monte Morello, Mg = Macigno.

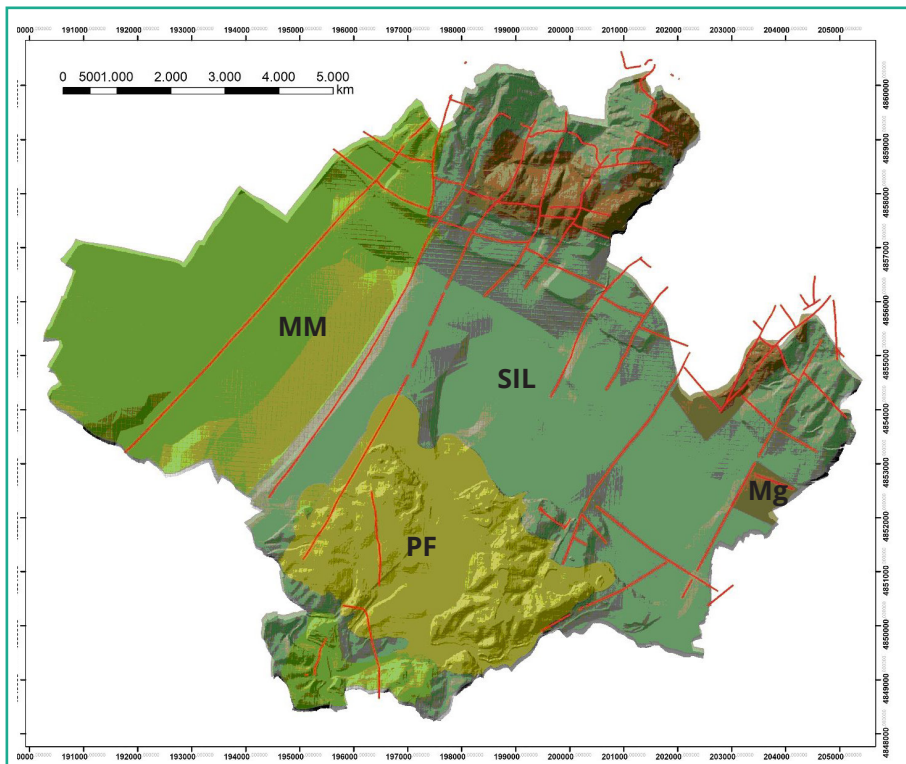
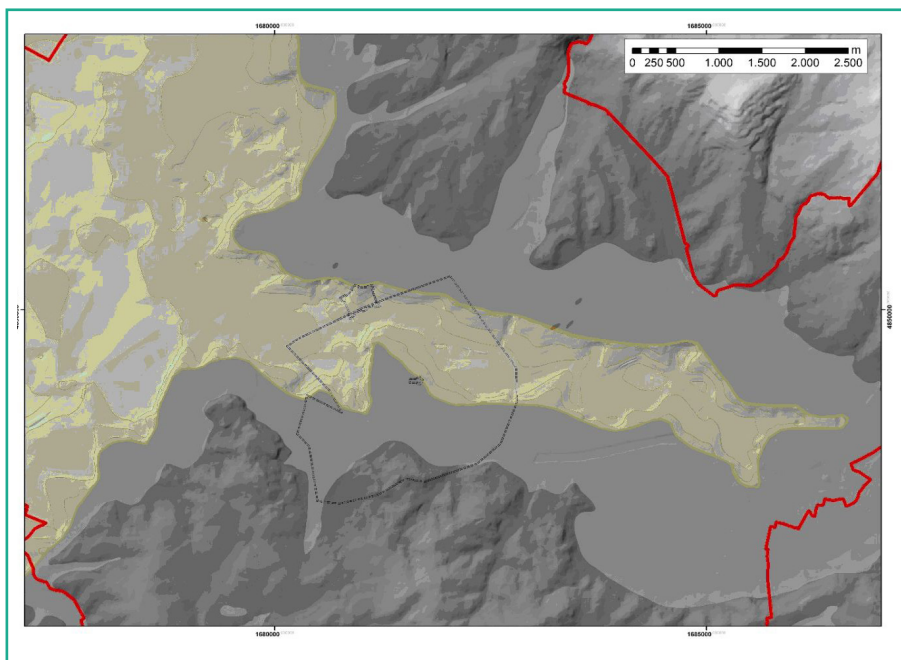


Figura 2.8 – Ricostruzione della distribuzione dei depositi antichi nel sottosuolo della pianura fiorentina che hanno riempito la valle del paleo-Arno. R: roccia affiorante, DA: Depositi Antichi, SB: Sintema del Bacino. Il tracciato delle mura del XIV secolo è riportato quale riferimento, in rosso i limiti comunali.



Relativamente ai corpi 3D delle diverse Unità Litotecniche, che mostrano rapporti complessi di interdigitazione e ripetizioni multiple variamente articolate, la loro ricostruzione 3D non è possibile a livello di bacino ma è possibile solo a livello locale dove si ha una concentrazione di dati di sottosuolo.

Dal modello 3D sono state derivate le sezioni geologiche e geologico-tecniche illustranti le varie modalità dei rapporti tra le unità geologiche e geologico-tecniche presenti nel sottosuolo fiorentino (cfr. Tavola Sezioni Geologiche a: <https://www.regione.toscana.it/-/pubblicazioni-11>).

Indagini geotecniche e geofisiche

Massimo Coli⁽¹⁾, & Giorgio Lacanna⁽¹⁾

⁽¹⁾*Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra*

Ai fini della redazione dello studio di Microzonazione Sismica sono stati raccolti tutti i dati pertinenti presenti e disponibili nelle banche del Dipartimento di Scienze della Terra, Comune, Città Metropolitana, Regione ed organismi nazionali.

L'insieme dei dati raccolti, ed inseriti nella Banca Dati prevista e definita secondo le modalità delle istruzioni tecniche, rappresenta una base significativa di conoscenza che consente di affermare di avere superato per l'area fiorentina la fase conoscitiva dell'incertezza epistemica, arrivando a definire una tipologia rappresentativa e significativa di distribuzione dei dati e di valenza dei modelli sviluppati, lasciando quindi a successive indagini locali il superamento dell'incertezza aleatoria insito nella modellazione tipologica eseguita (Coli et al. 2015).

La disponibilità pubblica, sul sito web del Comune e degli altri Enti territoriali e istituzioni locali e nazionali di cluster di dati di riferimento a cui riferire i dati progettuali locali è conforme alla filosofia insita nell'Eurocodice 7 e nelle NTC2008/2018, che prevede che i dati singoli locali siano inquadrati in un contesto territoriale ampio.

Pertanto, per quanto riguarda il sottosuolo fiorentino l'insieme dei dati disponibili è consistente e ha permesso di arrivare ad elaborazioni tematiche e cartografiche attendibili (cfr. Tavola Indagini a: <https://www.regione.toscana.it/web/guest/speciali/rischio-sismico>)

3.1 Sondaggi geognostici

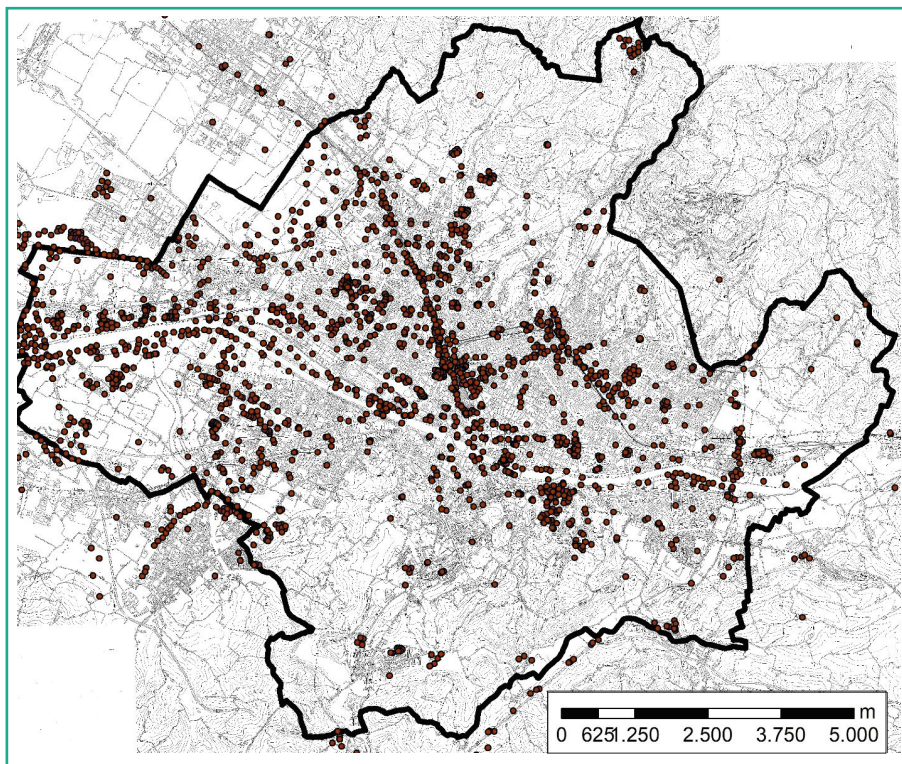
Complessivamente sono stati considerati **1957 sondaggi** equidistribuiti nel territorio del Comune di Firenze (Figura 3.1) che hanno permesso di coprire tutte le unità geologiche e geologico-tecniche presenti nel territorio comunale, di questi **367** hanno raggiunto il substrato, tra cui 27 a distruzione (pozzi per acqua da BD ISPRA).

I dati dei sondaggi derivano dall'integrazione tra la Banca Dati del Sottosuolo del Comune di Firenze, quella del DST dell'Università di Firenze e alcune informazioni sono state reperite dalla Banca Dati ISPRA. I dati di origine derivano da archivi pubblici e privati e da indagini ITALFERR, ASPI, FS eseguite per grandi opere infrastrutturali.

I sondaggi, realizzati negli ultimi 25 anni, sono in genere stati ben eseguiti ed hanno una buona se non ottima documentazione litostratigrafica, quelli precedenti non sempre sono di qualità apprezzabile ed il dato litostratigrafico restituito necessita spesso di interpretazione alla luce dei dati più prossimi più recenti (Figura 3.2).

Data la puntualità dei dati disponibili e la loro natura complessa si è ritenuto di limitarsi ad un dettaglio di caratterizzazione non troppo approfondito in modo da avere un'informazione media omogenea sull'intera area cartografata adottandone una forma semplificata (Figura 3.2).

*Figura 3.1 –
Distribuzione dei
logs litostratigrafici
nell'area del
Comune di Firenze.*



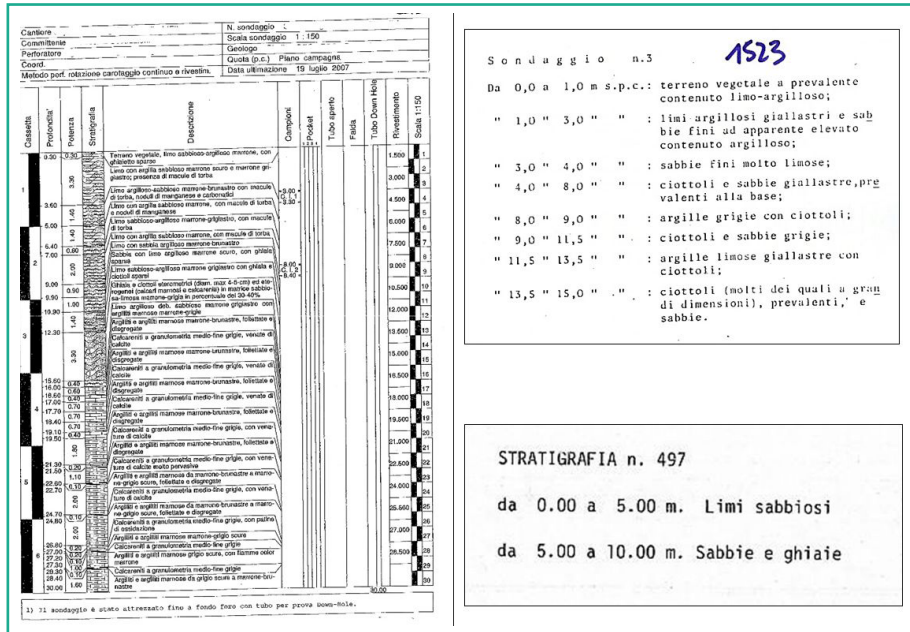
3.2 Dati Geotecnici

Sulla base dei dati di campagna disponibili (pochi) e dell'analisi diretta di carote di sondaggio ed interpretazione di litostratigrafie, ogni singolo livello litologico di sondaggio superiore al metro è stato interpretato in termini di USCS ed inserito nella banca dati; da questa elaborazione è stata sviluppata la Carta Litotecnica (cfr. Tavola Carta Litotecnica a: <https://www.regione.toscana.it/web/guest/speciali/rischio-sismico>).

La USCS (Unified Soil Classification System - ASTM: D2488-84) e BSCS (British Soil Classification System - BS 5930:1981) prevede prioritariamente una divisione dei terreni in coesivi e granulari, integrata da quanto espresso in Bell (1993) per i terreni misti (GM), per i quali l'attribuzione della percentuale di impurità va considerata solo come valore indicativo di ordine di riferimento.

In riferimento alla USCS usata si ricorda e si sottolinea che l'espressione "ben classate" raccoglie un ampio spettro di dimensioni granulometriche ed è l'opposto dell'espressione "ben assortite" che invece significa un ristretto spettro di dimensioni granulometriche, similmente "mal classate" è l'opposto di "mal assortite"; molta confusione può derivare dal non realizzare questa differenza lessicale (West, 1985).

Figura 3.2 –
Diverso
dettaglio nei log
litostratigrafici
tra i più recenti (a
sinistra) ed i più
antichi (a destra).



La cartografia presentata è relativa al primo livello litologico significativo, ed è rappresentativa di una situazione areale principale correlando i vari dati di sondaggio disponibili e dando preferenza alla prevalenza areale, tralasciando, a volte, il singolo dato puntuale; l'interpretazione ha tenuto nel debito conto anche l'assetto geomorfologico e l'andamento dei diversi corsi d'acqua nei periodi di pre-antropizzazione e durante lo sviluppo urbano della città di Firenze.

Materiali di origine antropica:

C- Riporti e coperture: costituiti da materiali sciolti misti di varia pezzatura ed origine, più o meno costipati, anche con cocciame di laterizi; nei vecchi fossati delle mura a luoghi anche livelli limosi compatti. Sono stati cartografati solo ove costituiscono un livello continuo e potente almeno un paio di metri. Attuale

Terreni fluvio-lacustri ed alluvionali - plio-quaternario

Terreni Granulari:

GP: Ghiaie pulite, con diametro medio dei clasti di 2÷3 cm e massimo dell'ordine dei 5 cm, con frequente componente sabbiosa; i clasti sono in genere ben arrotondati, prevalentemente discoidali, subordinatamente subsferici.

GS: Ghiaie sporche, con diametro medio dei clasti di 2÷3 cm e massimo dell'ordine dei 5 cm, i clasti sono in genere ben arrotondati, prevalentemente discoidali, subordinatamente subsferici, con componente fine del 5%÷20%; localmente le ghiaie posso essere anche molto sporche con componente fine del 20%÷50%, in tale caso risultano totalmente chiuse.

SP: Sabbie ocra pulite, in parte con ghiaie a clasti ben arrotondati prevalentemente discoidali.

SS: Sabbie ocra sporche, a luoghi con componente pelitica fino al 20%÷50%, in tale caso risultano totalmente chiuse.

Terreni coesivi:

LS: Limi-ghiaiosi e limi-sabbiosi con componente granulare anche del 20%÷50%

LP: Limi e limi-argillosi con scarsa (5÷20%) componente granulare, di colore bruno, con calici (in genere con $LL < 50$).

AS: Limi-argillosi ed argille-limose inorganiche grigio-azzurrognole e grigio-verdastre, a plasticità bassa e media, con calici e/o con componente granulare media del 5%÷20% costituita da sabbie e ghiaie, localmente anche più significativa (20%÷50%); le ghiaie hanno clasti di diametro medio di 2÷3 cm e massimo dell'ordine dei 5 cm, in genere ben arrotondati, prevalentemente discoidali, subordinatamente sub-sferici.

AP: Limi-argillosi ed argille-limose grigio azzurrognole e grigio-verdastre, con calici, a plasticità bassa e media; componente granulare scarsa (< 5%) o nulla.

Substrato litoide

ULa: Materiali prevalentemente argillitici ma inglobanti elementi litici di varia natura e pezzatura; nel complesso ascrivibili alla Formazione di Sillano, ex Complesso Caotico Auctt. p.p., ed alle Argilliti di Pescina.

ULc: Materiali prevalentemente carbonatici o carbonatici-marnosi variamente alternati; ascrivibili alla Formazione di Monte Morello.

ULp: Materiali calcareo-silicei ed argillitici regolarmente alternati; ascrivibili alla Pietraforte Auctt..

FTm: Materiali silico-arenacei, subordinatamente silico-siltosi regolarmente stratificati; ascrivibili al Macigno (membro Modino) ed alle Marne di Pievepelago.

3.2.1. Dati geotecnici di laboratorio

La diponibilità nella banca dati del comune dei dati geotecnici di laboratorio relativi a 354 sondaggi, (Tabella 3.1), che copre abbondantemente le varie tipologie di depositi presenti nel sottosuolo fiorentino, ha consentito, nello spirito dell'Eurocodice 7 e delle NTC2018, di definire dei valori geotecnici di riferimento (Coli et al. 2015).

Unità	n. dati
Dr coesivi	62
Dr granulari	263
Da coesivi	14
Da granulari	64
FPT coesivi	62
FPT granulari	35
FPT Argille Turchine	22
Totale	522

Tabella 3.1 -
Dati di laboratorio
di varia natura
disponibili
per le Unità
del sottosuolo
fiorentino.

Figura 3.3 –
Classificazione
USCS e sua
semplificazione
usata per il
sottosuolo
fiorentino.

Unified Soil Classification System (USCS)*						
Major divisions		Group symbols	Soils names	Mixtures of very coarse materials and soils***	Key	
Granular Soils	Coarse-grained soils GRAVELS 50% of the coarse fraction retained on n° 4 sieve**	GW	Well-graded gravels and gravel-sand mixtures, little or no fines.		GP	
		GP	Poorly graded gravels and gravel-sand mixtures, little or no fines.			
		Gravels with Fines	GM	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures.	a: < 5% of finer	GS
			GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures.	b: 5:20% of finer c: 20:50% of finer	
	SANDS > 50% of coarse fraction passes n° 4 sieve**	SW	Well-graded sands and gravelly sands, little or no fines.		SP	
		SP	Poorly graded sands and gravelly sands, little or no fine.			
		Sands with Fines	SM	Silty sands, sand-silt mixtures.		SS
			SC	Clayey sands, sand-clay mixtures.		
	Cohesive Soils	Fine-grained soils SILT AND CLAYS Liquid limit ≤ 50%	ML	Inorganic silts, very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands, with slight plasticity.	c: 20:50% of gravels b: 5:20% of gravels a: < 5% of gravels	LS
			CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays.		
OL			Organic silts and organic silty clays of low plasticity.		LP	
SILT AND CLAYS Liquid limit > 50%		MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sands or silts, plastic silts.		AS	
		CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays.		AP	
		OH	Organic clays of medium to high plasticity.			
Highly Organic Soils		PT	Peat, muck, other highly organic soils.		=	
Note: if based on field observations the symbols should be written in brackets, f.i. (GP) * ASTM: D2488-84 (American Society for Testing and Materials, 1988) ** Sieve n° 200 = particle size diameter 0,075 mm; sieve n° 4 = particle size diameter 4,75 mm (ASTM Standards, Annual Book, 1983) *** Adapted from BS 5930:1981						

Tali dati di laboratorio presentano una variabilità di qualità intrinseca poiché derivati da laboratori, progetti diversi ed eseguiti in anni diversi. Devono pertanto essere considerati "tal quali", non essendo stato possibile effettuare un controllo critico per ogni dato prodotto dal singolo laboratorio in anni diversi; pertanto, si tratta solo di valori di riferimento di massima per una valutazione speditiva e descrittiva della tipologia di terreno presente e che non devono essere assolutamente utilizzati per attività di progettazione edilizia, se non come riferimento di una distribuzione statistica.

I dati sono stati analizzati in funzione delle UBSU (Unità stratigrafiche a limiti inconformi) e suddivisi in “coesivo/granulare” per omogeneità sull'intero territorio fiorentino, ma il dato di base consente anche di ricavare informazioni a livello delle singole USCS; i dati geotecnici analizzati sono stati:

- Peso di volume,
- Granulometria,
- Vs.

Per i terreni granulari

- Rapporto clasti calcarei/silicei,
- ϕ' dai dati NSPT.

Per terreni coesivi

- c' e ϕ' .
- Attività e plasticità.

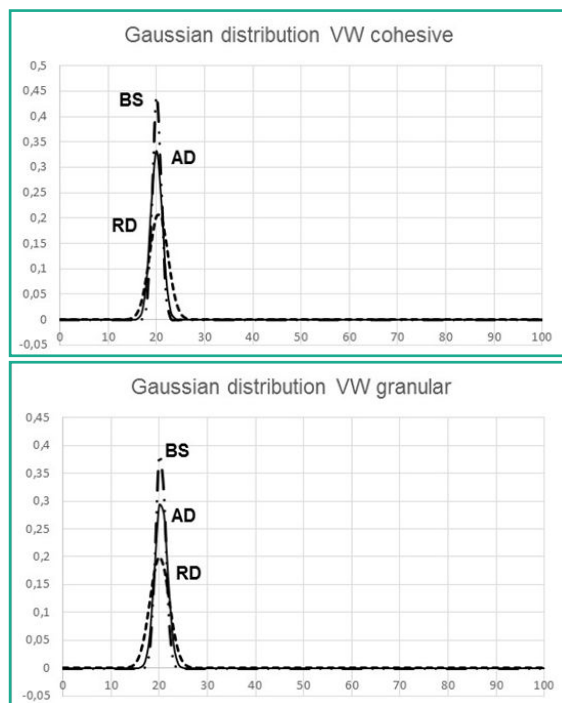
Nelle tabelle e figure successive sono riportati i valori di riferimento risultanti.

Dati disponibili (Tabella 3.2, Figura 3.4) risulta un peso di volume relativamente consistente per tutti i terreni presenti, indipendentemente che siano coesivi o granulari, attorno a 20 kN/m³.

Tabella 3.2 –
Peso di volume
(kN/m³), media e
deviazione
standard (StD);
DR: Depositi
Recenti;
DA: Depositi
Antichi; SB:
Sistema d
el Bacino.

Unità	coesivo	StD	granulare	StD
DR	20.5	1.9	20.1	2.0
DA	20.0	1.2	20.4	1.3
SB	20.1	0.9	20.3	1.0

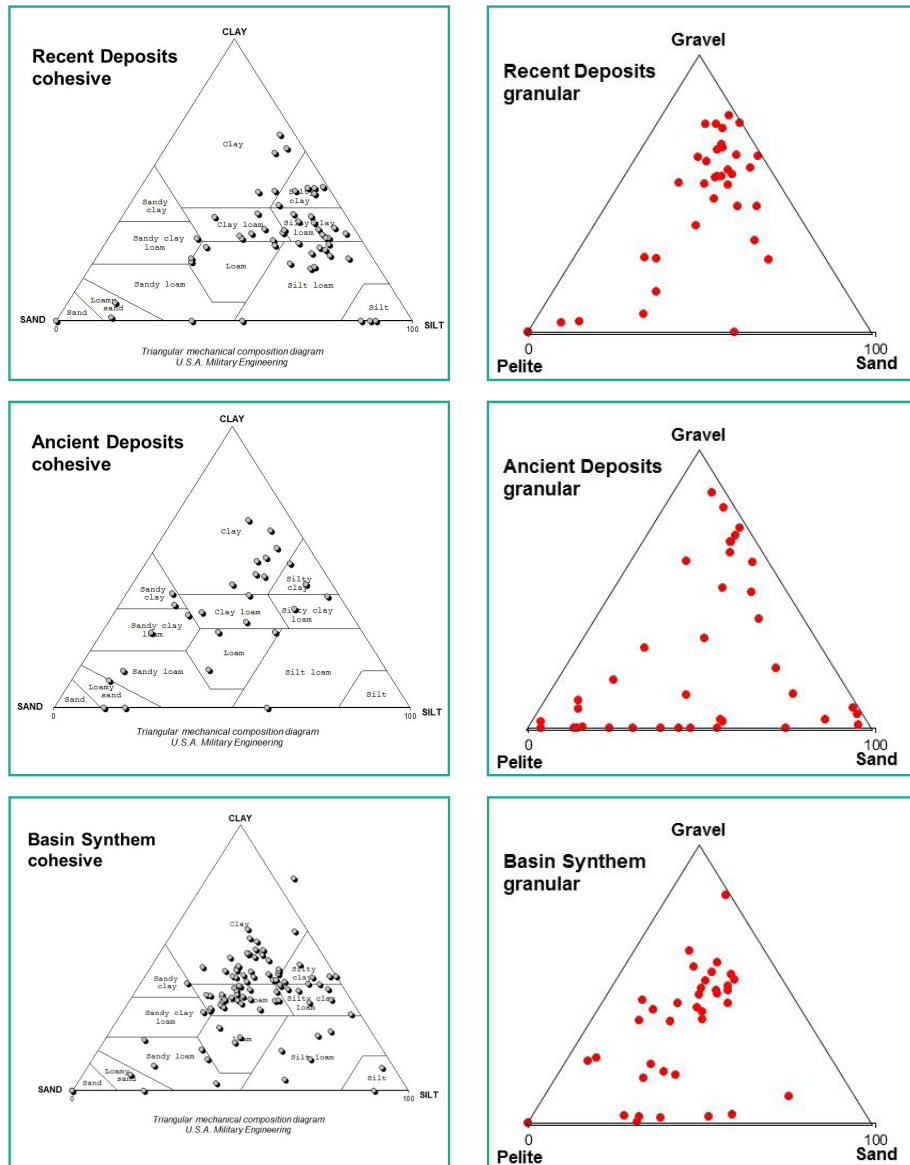
Figura 3.4 –
Distribuzione
Gaussiana
dei dati
di peso di
volume; BS:
Sistema del
Bacino;
AD: Depositi
Antichi; RD:
Depositi
Recenti.



Granulometria

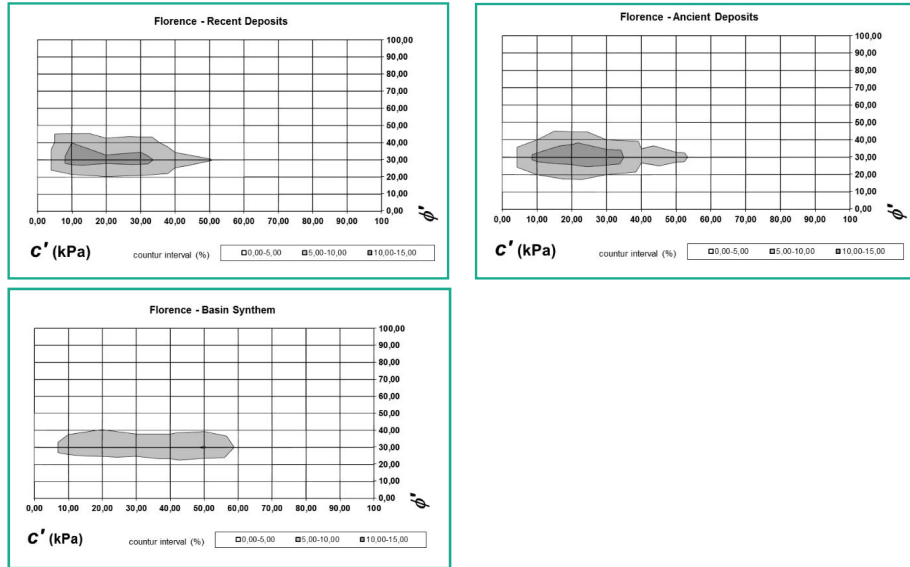
Le unità di terreno coesivo (Figura 3.5) mostrano un raggruppamento di granulometria simile nell'area di confine tra i campi di argilla/argilloso-limoso/limoso-argilloso/limoso-argilloso-limoso. I terreni coesivi del Bacino (SB) appaiono più argillosi e i terreni coesivi Recenti (DR) appaiono più limosi; i terreni granulari del Bacino (SB) sono scarsamente selezionati, mentre quelli Recenti (DR) sono meglio selezionati in quanto correlati a depositi d'alveo del fiume Arno.

Figura 3.5 –
Diagrammi
composizionali
ternari da USMC
(United States
Military Corp) per
i terreni coesivi e
granulari.



Suoli coesivi: c' e ϕ'

I dati di coesione ed angolo d'attrito dei suoli coesivi sono stati analizzati statisticamente mediante simulazione Montecarlo come distribuzioni a grappolo (Figura 3.6). I risultati sono simili per ciascuna Unità UBSU, con valori di c' che variano tra circa 8 kPa e 55 kPa, e valori di ϕ' tra 20° e 45°.



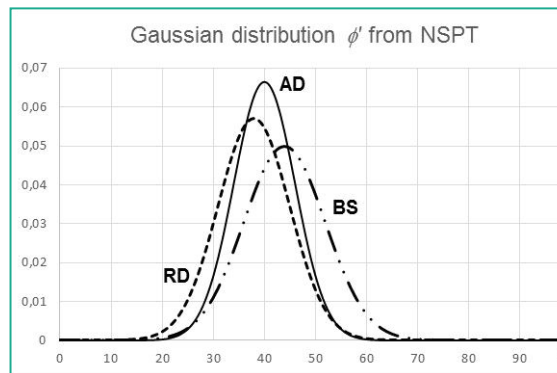
Suoli granulari: ϕ' da dati NSPT

Per i dati di ϕ' relativi ai terreni granulari sono stati analizzati i valori riportati nei dati di laboratorio come derivanti dalle prove NSPT in situ, ma senza che siano note le relazioni in base alle quali i dati siano stati derivati dalle prove NSPT per ciascuno dei dati di laboratorio; ciò nonostante i dati (Tabella 3.3) risultano coerenti e poco dispersi rispetto ai valori medi (Figura 3.7).

Tabella 3.3. –
Angolo ϕ' da
dati NSPT per
suoli granulari

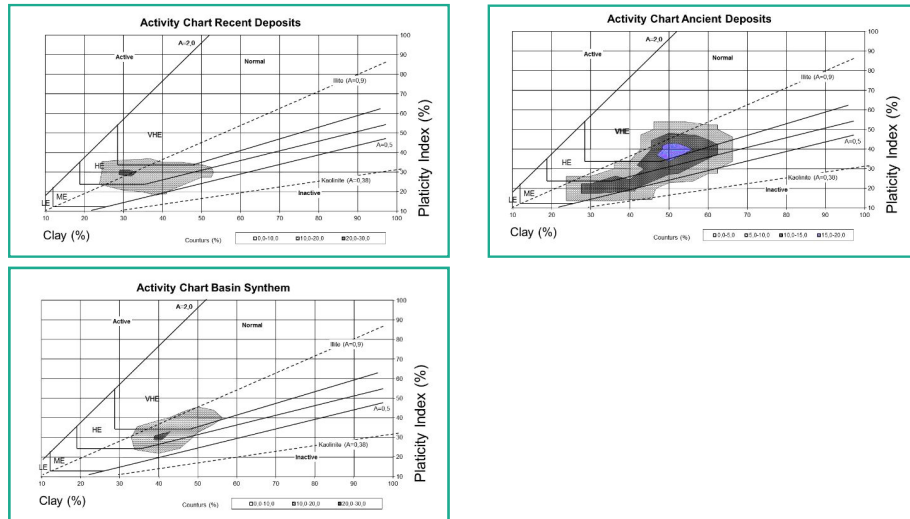
Unità	media	Dev. Stand.
DR	38°	7°
DA	40°	6°
SB	44°	8°

Figura 3.7 –
Distribuzione
gaussiana del
valore di ϕ'
risultante dalle
prove NSPT
per i terreni
granulari.
BS: Sintema
del Bacino;
AD: Depositi
Antichi; RD:
Depositi
Recenti.



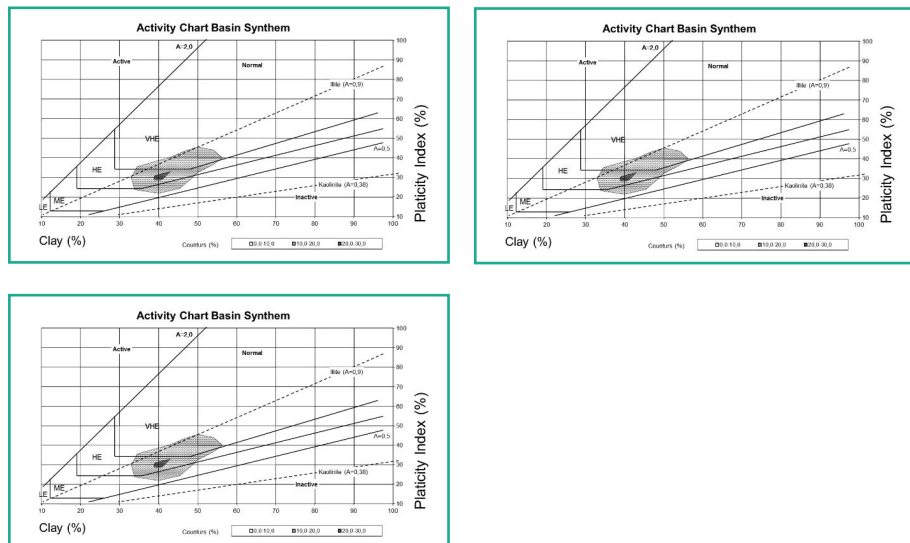
Diagrammi di attività

L'attività dei terreni è stata analizzata tramite analisi statistica con simulazione Montecarlo come distribuzioni di cluster sul diagramma di attività (Figura 3.8). I terreni coesivi del Sintema del Bacino e dei Depositi Recenti cadono nel campo HE, mentre quelle dei Depositi Antichi vanno dal campo ME fino a un cluster principale nel campo VHE; tutte sono intorno/sotto la linea dell'Illite.



Diagrammi di Plasticità

La plasticità dei terreni è stata analizzata tramite analisi statistica con simulazione Montecarlo come distribuzioni di cluster sul diagramma di plasticità (Figura 3.9). Sia i terreni del Sintema del Bacino che quelli dei Depositi Antichi ricadono principalmente nel campo dell'alta plasticità nel campo CH; i terreni dei Depositi recenti mostrano una plasticità media che cade nel campo CI.

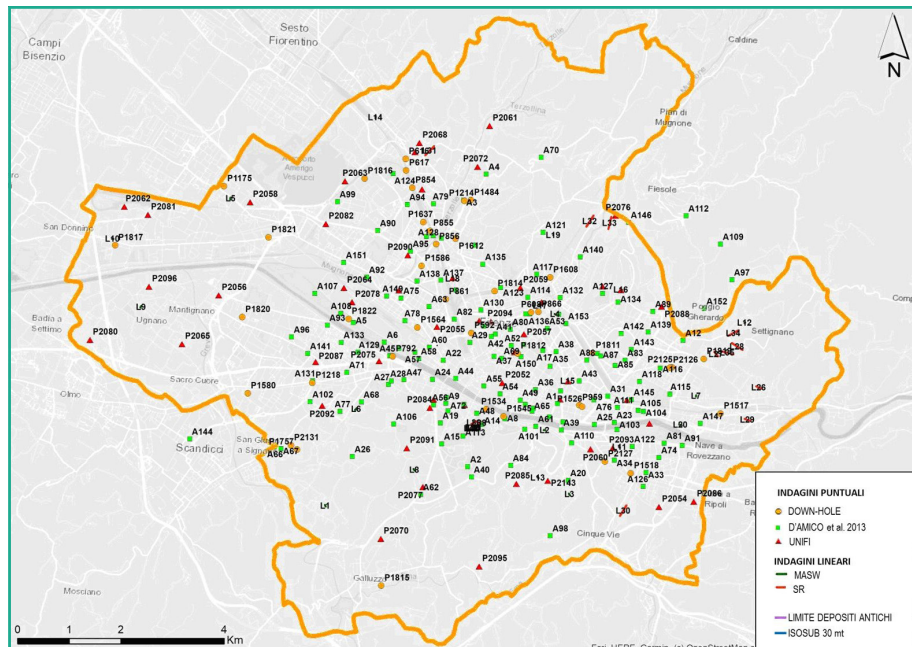


3.3 Dati Geofisici

Dalla raccolta dei dati disponibili in archivi e banche dati complessivamente sono state utilizzate 289 indagini di tipo geofisico (Figura 3.10), costituite da:

- 206 Misure di rumore ambientale (HVSR)
- 41 Indagini Down-hole (DH)
- 6 Indagini Cross-hole (CH)
- 16 Sezioni sismiche a rifrazione (SR)
- 20 Profili sismici MASW

Figura 3.10 –
Localizzazione
e tipologia
delle indagini
geofisiche.



3.3.1 Analisi di rumore ambientale (HVSR)

Nel complesso sono stati reperite 206 misure di rumore ambientale (HVSR), di cui 52 eseguiti dal DST e 154 dai dati d'archivio della banca dati di D'Amico et al (2016), i cui valori dei periodi fondamentali ricavati dai rapporti spettrali HVSR sono riportati in Tabella 3.4.

Il tempo di acquisizione in ogni sito d'indagine delle 52 misure effettuate dal DST è stato mediamente di circa uno-due mesi, in modo da permettere una registrazione quanto più rappresentativa possibile del rumore sismico. Riguardo al lungo periodo di acquisizione, la scelta dei siti d'indagine è stata dettata, oltre che per ottenere una distribuzione quanto più possibile omogenea dei punti di misura, anche da problematiche di tipo logistico, che richiedevano l'installazione semipermanente della strumentazione in ambienti relativamente sicuri.

Le diverse campagne di misure, nel comune di Firenze, sono state realizzate con le stazioni sismiche triassiali della rete mobile del Laboratorio di Geofisica Sperimentale del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze. Le stazioni sismiche consistono in un digitalizzatore Guralp CMG-DM24 a 24 bits e in un sismometro triassiale

Lennartz 3D/5sec, con sensibilità di 400 V/m/s e risposta spettrale tra 0.2 – 50 Hz. I dati, acquisiti con una frequenza di campionamento di 100 Hz, sono stati immagazzinati nella memoria interna dei digitalizzatori e sono stati scaricati durante le operazioni di manutenzione ordinaria della strumentazione. La sincronizzazione oraria delle stazioni è stata ottenuta tramite ricevitore GPS. Le stazioni sono state alimentate da un pannello solare da 100 W e batterie (Figura 3.11) e i sismometri, sono stati interrati per migliorare l'accoppiamento con il terreno.

Le 154 misure prelevate dai dati di archivio della banca dati di D'Amico et al. 2016 consistono in registrazione sismiche diurne della durata di 20 minuti e con un passo di campionamento di 128 Hz, acquisite e registrate con il TROMINO® (<http://www.tromino.it>). Le analisi dei dati sismici per il calcolo dei rapporti HVSR sono state condotte tramite l'utilizzo del software Grilla (<http://www.tromino.it/frameset-grilla.htm>).

In generale la distribuzione dei siti d'indagine ha permesso di coprire in modo significativo l'intera area fiorentina e le varie unità affioranti con le relative situazioni di sottosuolo, poi confluite nell'identificazione delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospezione Sismica).

Figura 3.11 – Stazioni sismiche installate nel comune di Firenze durante le diverse campagne di microzonazione sismica, batterie e digitalizzatore sono stati installati all'interno della scatola di alluminio, mentre l'antenna GPS è stata posta all'esterno. Il sismometro è stato interrato per aumentare l'accoppiamento con il terreno.

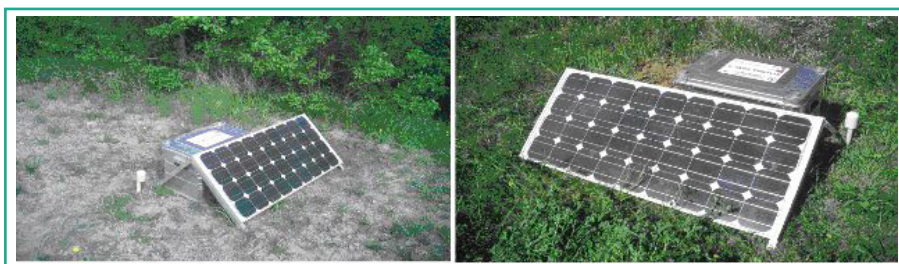


Tabella 3.4 – Valori dei periodi fondamentali ricavati dai rapporti spettrali HVSR per le varie stazioni di misura sito puntuale.

ID_SPU	F0	A	ID_SPU	F0	A	ID_SPU	F0	A
2050	4	5,4	2068	4,9	2,5	2086	7,7	4,2
2051	3,6	2,5	2069	3,8	3,4	2087	0,94	1,4
2052	6,7	4,7	2070	4,9	3,8	2088	4,4	2,7
2053	1,1	2,2	2071	2,2	3,8	2089	0,9	1,8
2054	6,6	4,6	2072	1	1,7	2090	1,2	3,1
2055	3,5	3,5	2073	3,6	3,4	2091	4,8	2,6
2056	0,5	2,7	2074	4	1,8	2092	1,8	4,9
2057	3,5	3,1	2075	5,4	3,8	2093	2,9	6,5
2058	0,37	3,1	2076	5,6	1,8	2094	2,4	2,8
2059	0,86	2,1	2077	2,2	5,1	2095	8	1,2
2060	3,3	3,5	2078	1,8	2,5	2096	0,41	3
2061	13,1	2,2	2079	4,7	1,5	2140	1,08	1,8
2062	0,36	2,6	2080	0,6	3	2141	0,8	2,1
2063	0,6	2,5	2081	0,33	2,1	2142	9	2,3
2064	1,4	2,4	2082	0,7	1,9	2143	9,98	3,6
2065	0,7	2,9	2083	3,6	3,8	2144	6,4	2,8
2066	6	5,9	2084	4,8	7,2			
2067	12,3	3,3	2085	4,2	1,1			

3.3.2 Indagini *Down-Hole* e *Cross-Hole*

La disponibilità di un cospicuo numero di indagini *down-hole* e *cross-hole*, principalmente derivanti da indagini svolte per grandi opere infrastrutturali ed edilizie, ha consentito di avere un dataset significativo delle velocità sismiche delle diverse Unità Litostratigrafiche (UBSU) presenti nel sottosuolo fiorentino, con tutte queste unità campionate in termini di velocità per uno spessore significativo.

Per ogni indagine *down-hole* e *cross-hole* sono state calcolate le Vs di ancoraggio delle singole Unità Litostratigrafiche come la media pesata delle Vs misurate secondo la seguente formula:

$$V_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{m_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^N h_i}$$

Tabella 3.5 –
Velocità di
ancoraggio

delle varie Unità

Litotecniche:

Rip. = Riperti,

DR a = Depositi

Recenti, coesivi;

DR b = Depositi

Recenti, granulari;

DA a = Depositi

Antichi, coesivi;

DA b = depositi

antichi, granulari;

FPT a= Sistema

del Bacino

Firenze-Pistoia,

coesivi; FPT b =

Sistema del Bacino

Firenze-Pistoia,

granulari; FPT c =

Sistema del Bacino

Firenze-Pistoia,

argille turchine.

n = numero di

sondaggi che

interessano l'unità,

m = metri totali

perforati nell'unità,

vs mp = velocità

media ponderata

delle onde Vs,

DS = deviazione

standard.

dove Vmi è la velocità media calcolata per lo spessore h dell'Unità intercettata nell'iesimo *down-hole* per ogni sondaggio.

L'analisi comparata tra i dati geofisici e le Unità Litostratigrafiche, che costituiscono l'intera stratigrafia del sottosuolo fiorentino e che risultano tutte campionate, ha quindi permesso di assegnare ad ogni singola Unità Litotecnica, relativamente ai segmenti campionati, un valore di Vs di riferimento, scelto come la media ponderata tra i valori disponibili per le varie Unità Litostratigrafiche (Figura 3.12).

Questi valori riferibili alle singole combinazioni UBSU/USCS sono però applicabili solo per aree limitate dove la densità di sondaggi e la loro profondità consentono una più dettagliata ricostruzione 3D del sottosuolo fino alle profondità indagate e relativamente alla divisione in coesivo e granulare, quale ad esempio lungo il corridoio del previsto sottoattraversamento FS della città.

Al di fuori di tali aree e profondità il Modello 3D del sottosuolo, ricostruito sulle superfici di contatto tra le varie UBSU, che sono univoche e non variamente ripetitive come invece quelle USCS, consente solo la valutazione ponderata delle velocità sismiche per UBSU (Tabella 5, Figura 3.13).

Unità	n	m	Vs mp	DS	Unità	m	Vs mp	DS
Rip	34	105	210	35	Rip	105	210	35
Dr a	32	129	302	130	Dr	417	371	135
Dr b	47	289	384	130				
Da a	18	121	526	136	Da	273,5	610	107
Da b	25	153	676	186				
FPT a	27	194	537	161	FPT	532,5	596	173
FPT b	23	212	641	195				
FPT c	19	127	494	122				

Figura 3.12 –

Velocità di ancoraggio delle varie Unità Litotecniche.

Rip. = Riporti,

DR a = Depositi Recenti, coesivi;

DR b = Depositi Recenti, granulari;

DA a = Depositi Antichi, coesivi;

DA b = depositi antichi, granulari;

FPT a = Sintema del Bacino

Firenze-Pistoia, coesivi;

FPT b = Sintema del Bacino

Firenze-Pistoia, granulari;

FPT c = Sintema del Bacino

Firenze-Pistoia, argille turchine.

Sono riportati i valori di ancoraggio.

Figura 3.13 –

Analisi della

varianza statistica delle velocità di

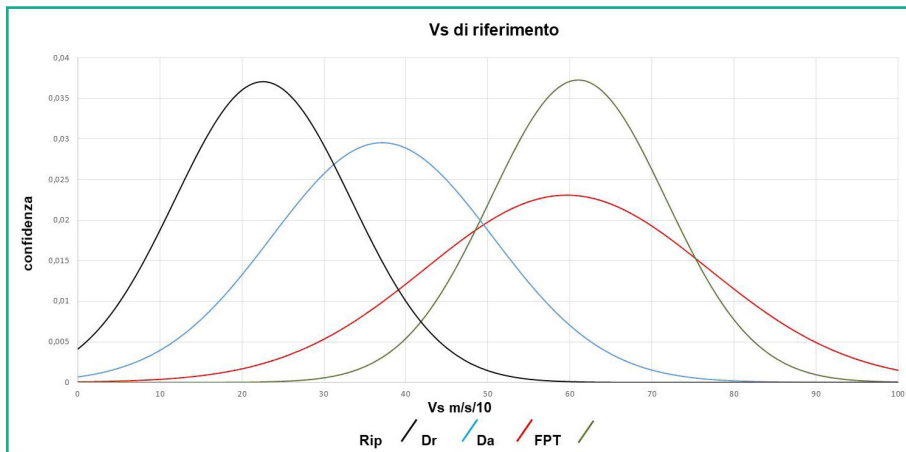
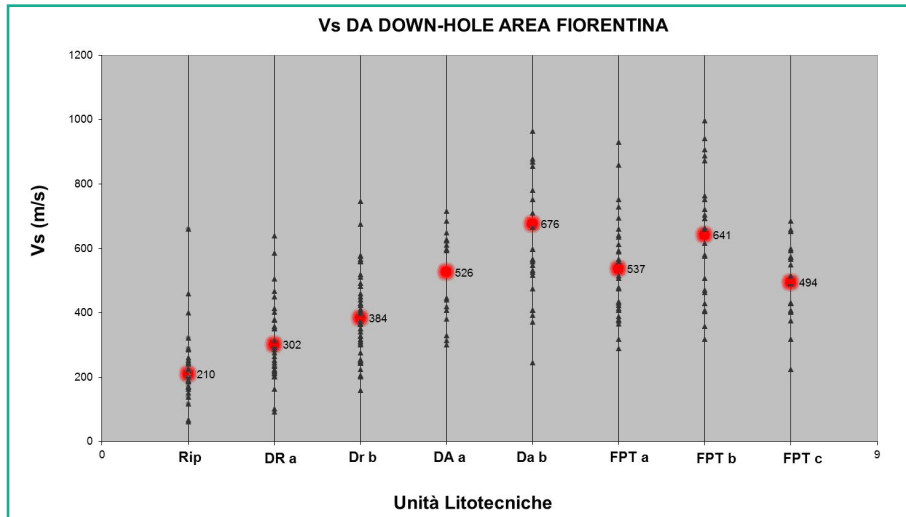
ancoraggio per le varie UBSU:

DR = Depositi Recenti; DA =

Depositi Antichi;

FPT= Sintema del

Bacino Firenze-Pistoia.



Le maggiori velocità sismiche di riferimento dei terreni del Sintema del Bacino (FPT) sono da ascrivere alla loro natura sovraconsolidata, mentre quelle dei terreni dei Depositi Antichi alla loro natura prevalentemente ciottolosa calcarea addensata. Alcuni down-hole hanno raggiunto il substrato litoide perforandolo però solo per pochi metri, questi sondaggi sono essenzialmente nella zona del centro storico ed hanno interessato la Pietraforte e la Formazione di Sillano (Tabella 3.6).

Down-hole	Ubicazione	Unità	Vp m/s	Vs m/s
1534	Via dei Bardi	Pietraforte	2100	900
1545	Lungarno Torrigiani	Fr. Sillano	2100	700
2127	Rusciano	Fr. Sillano	1800	700
2131	Torregalli	Pietraforte	2400	700
1757	Torregalli	Fr. Sillano	1800	700
1564	Leopolda	Fr. Sillano	3300	850
1812	Galleria dell'Accademia	Fr. Sillano	2900	1000

Tabella 3.6 –

Velocità sismiche registrate al substrato nei vari down-hole.

3.3.3 Sezioni Sismiche a Rifrazione

Nell'ambito degli studi svolti negli anni tra Comune e DST sono state eseguite alcune sezioni sismiche mirate a definire la profondità del substrato litoide e sue eventuali dislocazioni in zone critiche, non coperte da indagini dirette; altre sono state recuperate da progetti privati o pubblici per interventi di recupero edilizio.

Tali indagini, elaborate anche in tomografia, hanno consentito di avere dati locali, ma distribuiti, essenzialmente di V_p , che hanno interessato diverse Unità Litostratigrafiche, ma anche il substrato litoide (Tabella 3.7).

Tabella 3.7 –
Velocità sismiche
registrate al
Bedrock.

Ubicazione	Unità	V_p m/s	V_s m/s
Villa le Grazie	Fr. Sillano	2000	--
Coverciano	Macigno	2200	--
Pozzino	Macigno/Fr. Sillano	2200	--
Villa Favard	Macigno	2600	--
Moccoli	Fr. Sillano	2000	--
Villa dei Pazzi	Fr. Monte Morello	2400	--
Il Lapo	Fr. Sillano	2000	--
Badia Fiesolana	Fr. Sillano	2000	--
Ponte a Mensola	Macigno	2400	--
Villa Viviani	Macigno/Fr. Sillano	2400	--
Giardino di Boboli	Pietraforte	1800-3800	1100-1800

Nel complesso questi dati hanno contribuito a definire le profondità del substrato e l'assetto 3D locale del substrato litoide.

Da considerare che le velocità delle V_p in una formazione lapidea stratificata possono variare notevolmente in funzione dell'alternanza litologica e dello spessore relativo dei vari litotipi, nonché dello stato di fratturazione, alterazione e detensionamento, e quindi essere anche molto più basse di quelle misurate in laboratorio su campioni di roccia intatti.

3.3.4 MASW

Per ottemperare alla normativa vigente ed al RU2015 del Comune, in occasione di recenti interventi di recupero edilizio, sono state eseguite indagini MASW di sito, finalizzate alla definizione del profilo di velocità V_{s30} in modo non invasivo e speditivo.

Gli obiettivi dell'indagine MASW sono quelli di fornire dati relativi alla propagazione di onde superficiali in una banda di frequenza più ampia possibile poiché ciò consente di ottenere informazioni sulle proprietà degli strati profondi, che influenzano le componenti a bassa frequenza, e di descrivere con adeguata risoluzione gli strati più superficiali, che influenzano in maniera significativa soprattutto le componenti ad alta frequenza. Ciò implica la scelta di corretti parametri di acquisizione nello spazio e nel tempo, cosa questa non sempre ben evidenziata nei vari report, motivo per cui l'attendibilità di questo dato è stata ritenuta secondaria.

Comunque, nel loro insieme, anche questi dati tendono a confermare le attribuzioni fatte in base ai dati di rumore sismico di fondo e di down-hole e cross-hole, contribuendo quindi a corroborare il quadro di risposta sismica delle diverse Unità Litostratigrafiche del sottosuolo fiorentino.

Modello geologico-tecnico di sottosuolo

Massimo Coli⁽¹⁾, & Niccolò Iandelli⁽¹⁾

⁽¹⁾*Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra*

Partendo dai dati preparatori di base e di riferimento sono stati elaborati i prodotti necessari ad arrivare alla definizione della Microzonazione Sismica di 1° Livello dell'area fiorentina secondo le indicazioni metodologiche del DPC; tali prodotti sono la Cartografia Geologico-Tecnica e la Carta delle MOPS.

4.1 Carta Geologico-Tecnica

La Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica rappresenta un elaborato già previsto specificatamente dalle linee guida della Regione Toscana di cui alla DPGRT 971/2013.

Tale cartografia rappresenta una sintesi e revisione a scala di dettaglio delle cartografie geologiche e geomorfologiche precedenti unitamente a tutti i dati litologici, stratigrafici e litotecnici disponibili, con particolare attenzione alla mappatura dei depositi di copertura, alla ricostruzione dettagliata delle forme geomorfologiche e alla ricostruzione dell'andamento del substrato roccioso (cfr. Tavola Carta Litotecnica a: <https://www.regione.toscana.it/web/guest/speciali/rischio-sismico>

La Carta Geologico-Tecnica è stata sviluppata sulla base di tutti i dati geologico-stratigrafici, litotecnici e geomorfologici attualmente disponibili; in particolare si è partiti dalle attuali revisioni della Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Toscana e dalla Carta Litotecnica del Comune di Firenze prodotta dal DST per l'area fiorentina.

A livello delle unità clastiche di sottosuolo, i dati disponibili non consentono una chiara divisione secondo la USCS per volumi areali e profondità significativi, ma solo secondo le UBSU, per cui le suddivisioni geologico-tecniche USCS operate a livello dei singoli sondaggi non sono estrapolabili in profondità se non nel preciso intorno dei singoli sondaggi e pertanto non consentono una precisazione unitaria in tal senso in profondità, né una connessione laterale diretta tra una sezione e l'altra.

Pertanto, le unità geologico-tecnico distinte tengono conto di tutti i dati di base sopra indicati, ma sono state ridefinite in coerenza con quanto previsto dagli Standard di Rappresentazione di cui alla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (Figura 4.1), arrivando alla definizione delle Unità Litotecniche specifiche rispetto alla Carta Litotecnica del Comune e DST (Figura 4.2).

Quindi, i terreni coesivi del sottosuolo, non meglio divisibili al loro interno, data la loro storia geologica sono stati rappresentati come prevalentemente limoso-argillosi e quindi classificati in blocco come CL, i terreni prevalentemente ghiaiosi a predominante natura calcarea e ben addensati,

Figura 4.1 - Classificazione adottata per la carta geologico-tecnica, secondo le indicazioni degli standard ministeriali.

Terreni di copertura	
Ri	Terreni contenenti resti di attività antropica
GPIn	Ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia
GCIn	Ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla
SWIn	Sabbie ghiaiose
SMin	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo
CLIn	Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre.
Substrato geologico	
LPS	Lapideo, stratificato
ALS	Alternanza di litotipi, stratificato

corrispondenti ai Depositi Antichi di alveo del paleo-Arno, sono stati classificati in blocco come GP così come gli stessi terreni ghiaiosi del Sintema del Bacino, i terreni a natura prevalentemente ghiaioso sporca e riferiti ai Depositi Recenti dell'Arno e dei suoi affluenti sono stati classificati in blocco come GC. Per quanto riguarda le sabbie, cartografate in superficie e riportate in alcune sezioni, ove ritrovate in sondaggio, sono state classificate come SM. Pertanto, le classi geologico-tecniche presenti sono:

- GC** - Terreni prevalentemente granulari con granulometria poco assortita, costituiti da ghiaie variamente frammiste od intercalate con sabbie e limi, con clasti di natura prevalentemente arenacea; sono essenzialmente riferibili ai Depositi Recenti.
- GP** - Terreni prevalentemente granulari costituiti e miscele di ghiaie variamente frammiste od intercalate con sabbie e limi, bene addensate e con clasti di natura prevalentemente calcarea; sono essenzialmente riferibili ai Depositi Antichi e al Sintema del Bacino.
- SM** - Sabbie limose più o meno pulite, a luoghi leggermente ghiaiose, indipendentemente dal sintema di appartenenza.
- CL** - Terreni prevalentemente coesivi costituiti da limi più o meno argillosi o sabbiosi, con possibili intercalazioni di materiali granulari costituiti da sabbie e ghiaie, non localmente definibili per mancanza di sondaggi specifici; sono qui riportati tutti i depositi coesivi dei Depositi Recenti e dei Depositi Antichi e del Sintema del Bacino Firenze-Pistoia.

Chiaramente la cartografia geologico-tecnica non può tenere conto della storia geologica e quindi delle formazioni o unità UBSU, ma si basa solo sugli aspetti litologico-tecnici dei terreni e quindi principalmente sulla classificazione USCS dei terreni costituenti il primo livello litologico.

La distinzione principale è tra terreni di copertura (terreni fluvio-lacustri ed alluvionali di riempimento del bacino di Firenze-Prato-Pistoia) e substrato litoide pre-Pliocenico, che nel caso specifico comprende il Macigno e la Pietraforte (Lapideo stratificato - LPS) e la Formazione di Sillano e la Formazione di Sillano (alternanza di litotipi, stratificato - ALS).

La cartografia presentata è pertanto relativa al primo livello litologico significativo, ed è rappresentativa di una situazione areale principale, interpolando tra i vari dati di sondaggio disponibili è stata data preferenza

ad una prevalenza areale, tralasciando a volte il singolo dato puntuale; l'interpretazione ha tenuto nel debito conto la situazione geomorfologica e l'andamento dei vari corsi d'acqua pre-antropizzazione e durante lo sviluppo urbano della città di Firenze.

In relazione agli aspetti geologico-tecnici, si precisa inoltre che in base all'analisi dei vari sondaggi e prove di laboratorio disponibili per l'area fiorentina, non è mai emersa la presenza di corpi di sabbie monogranulari sature e di spessore significativo e quindi potenzialmente soggette a liquefazione in caso di evento sismico.

4.1.1. Sezioni Geologico-Tecniche

Sul territorio comunale sono state tracciate sei sezioni geologiche e geotecniche volte a ricostruire l'assetto geologico in profondità (Figura 4.3). La scelta delle tracce delle sezioni tiene conto della non cilindricità dell'assetto 3D del sottosuolo fiorentino, pertanto ogni sezione rappresenta una situazione-tipo di riferimento, estendibile lateralmente con cautela e che si raccorda con le sezioni vicine in modo graduale e non sempre continuo; le sei sezioni delineano bene l'andamento del sottosuolo e del tetto del substrato.

Figura 4.2 –
Classificazione
Geologico-
Tecnica per la
microzonazione
sismica a raffronto
con quella
Litotecnica del
Comune e DST.

Unified Soil Classification System (USCS)*					Carta Geologico Tecnica				
Divisioni maggiori	Simboli di Gruppo	Nome	Miscela di materiali molto grossolani e suoli***						
GRANULARI	Terre a grana grossa > 50% trattenuto al setaccio n° 200** Ghiaie > 50% trattenuto al setaccio n° 4** Ghiaie pulite Ghiaie con frazione fine	GW	Ghieie ben gradate, miscele di sabbie e ghiaie		GP	GPIn	GCIn		
		GP	Ghieie poco gradate, miscele di sabbie e ghiaie						
		GM	Ghiaie siltose; miscele di ghiaie, sabbie e limi	a: < 5% di fini b: 5-20% di fini c: 20-60% di fini	GS	se DR	se DA		
		GC	Ghiaie argillose; miscele di ghiaie, sabbie e argille						
	Sabbie > 50% passante al setaccio n° 4** Sabbie pulite Sabbie con frazione fine	SW	Sabbie ben gradate, sabbie ghiaiose con poco o niente fine		SP	SWin			
		SP	Sabbie poco gradate, sabbie ghiaiose con poco o niente fine						
		SM	Sabbie siltose e miscele di sabbie e limi		SS	SMin			
		SC	Sabbie siltose e miscele di sabbia e argilla						
COESIVI	Terre a grana fine = 50% passante al setaccio n° 200** LIME/ARGILLE Limite liquido > 50%	ML	Limii inorganici e sabbie molto fini, frammenti di roccia, sabbie fini limoso-argillose di bassa plasticità		LS	CLIn			
		CL	Argille inorganiche di plasticità da media a bassa, argille ghiaioso-sabbiose o limose, argille magre	c: 20-60% di ghiaie b: 5-20% di ghiaie a: < 5% di ghiaie					
		OL	Limii organici e argille limose organiche a bassa plasticità		LP				
		MH	Limii inorganici, limi o sabbie fini micacee o diatomitiche, limi plastici		AS				
	LIME/ARGILLE Limite liquido > 50%	CH	Argille inorganiche di alta plasticità, argille grasse		AP				
		OH	Argille organiche di plasticità da media a alta						
	Terre fortemente organiche	PT	Torbe e altre terre fortemente organiche		=				

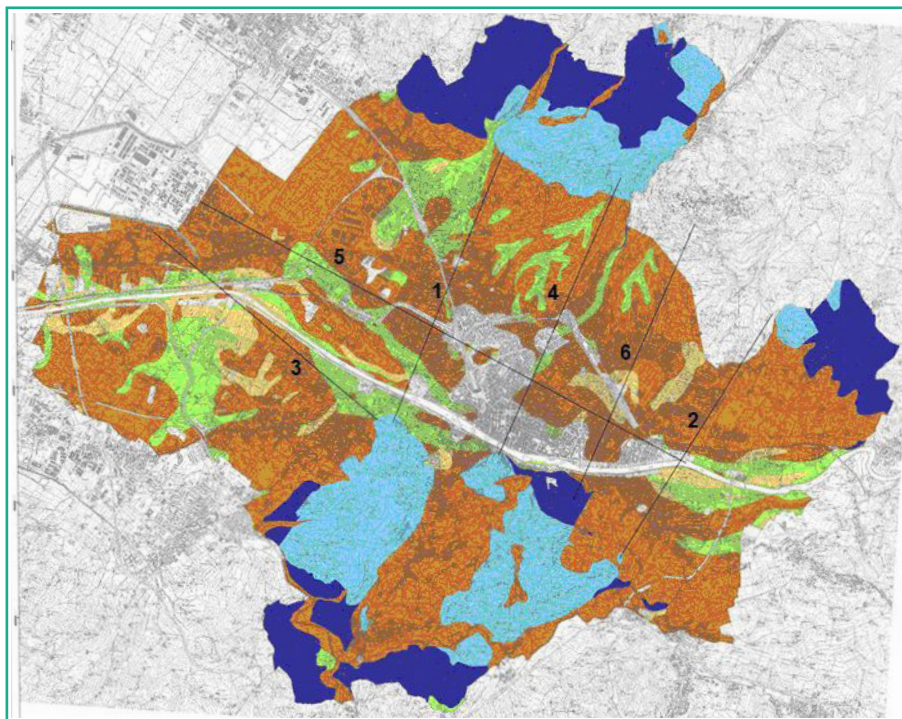
Note: se basati su osservazioni di campagna i simboli devono essere scritti fra parentesi, es (GP)

* ASTM: D2499-84 (American Society for Testing and Materials, 1988)

** passante n° 200 = diametro particella 0,075 mm; passante n° 4 = diametro particella 4,75 mm (ASTM Standards, Annual Book, 1983)

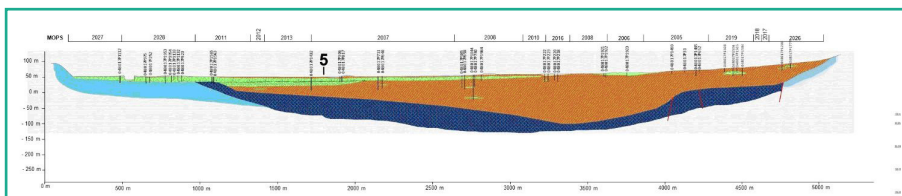
***Adattato da BS 5930:1981

*Figura 4.3 –
Distribuzione
delle sezioni
sulla base
geologico-tecnica.*

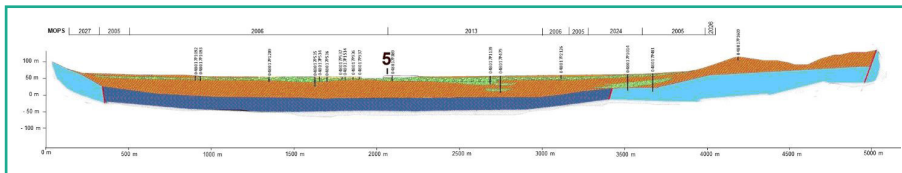


Le sei sezioni (cfr. anche Tavola Sezioni Geologico-tecniche a: <https://www.regione.toscana.it/web/guest/speciali/rischio-sismico>) permettono di completare la conoscenza sull'assetto geologico-tecnico profondo e sono utili per la definizione delle successive elaborazioni per realizzare la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica e per le Carte di Microzonazione Sismica.

*Figura 4.3.1 –
Sezione
geologico-Tecnica
n.1*



*Figura 4.3.2 –
Sezione
geologico-Tecnica
n.2*



*Figura 4.3.3 –
Sezione
geologico-Tecnica
n.3*

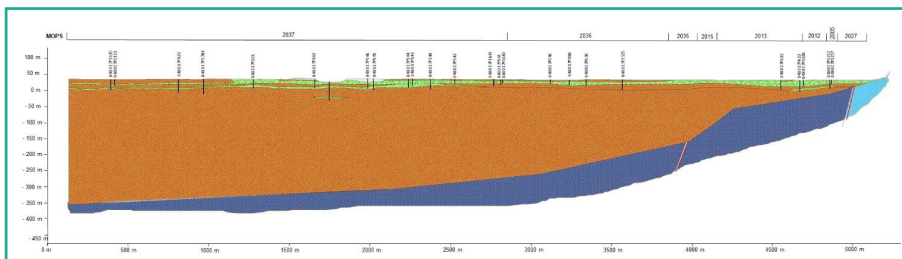


Figura 4.3.4 –
Sezione
geologico-Tecnica
n.4

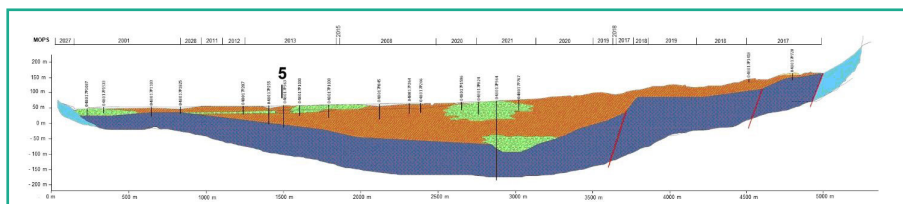


Figura 4.3.5 –
Sezione
geologico-Tecnica
n.5

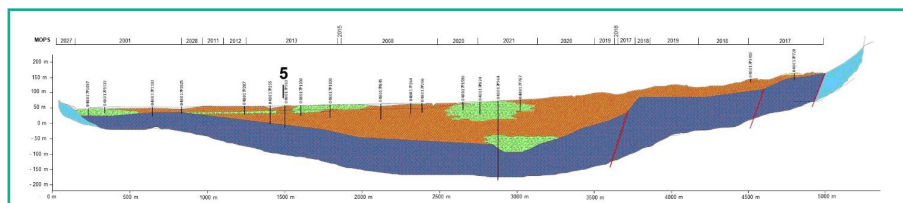
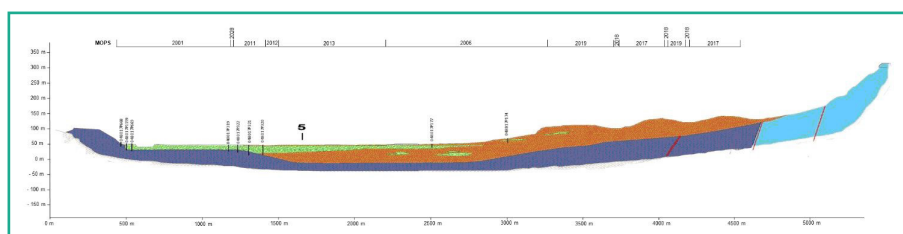


Figura 4.3.6 –
Sezione
geologico-Tecnica
n.6



Le Cartografie di Microzonazione Sismica di livello 1

Massimo Coli⁽¹⁾ & Niccolò Iandelli⁽¹⁾

⁽¹⁾*Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra*

5.1 Carta delle MOPS

La Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) rappresenta l'elaborato principale di base della Microzonazione Sismica di 1° Livello (cfr. Tavola Carta MOPS a <https://www.regione.toscana.it/web/guest/speciali/rischio-sismico>).

Tale elaborato ha lo scopo di individuare le microzone ove, sulla base delle osservazioni e caratteristiche geologiche e geomorfologiche oltre all'elaborazione dei dati geognostici e geofisici disponibili, è prevedibile l'occorrenza di diverse tipologie di effetti prodotti dall'azione sismica (amplificazioni, instabilità di versante, liquefazione, ecc.).

Da segnalare che nessun dato del sottosuolo fiorentino mostra condizioni riconducibili al probabile accadimento di fenomeni di liquefazione causati principalmente da sabbie monogranulari sature.

La definizione delle zone, la loro perimetrazione e la loro rappresentazione grafica è stata effettuata secondo quanto previsto dagli ICMS, par.2.3 e dagli Standard di Rappresentazione di cui alla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica nella versione più recente (Versione 4.1 - 2018).

Nello specifico tali indirizzi e standard prevedono che la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) individui e caratterizzi le seguenti aree:

- Zone stabili: aree di affioramento del substrato litoide
- Zone stabili suscettibili di amplificazione locale: aree di pianura a diversa struttura di sottosuolo e profondità del substrato litoide
- Zone di attenzione per le instabilità: caratterizzate da dissesti superficiali o profondi.

L'elaborazione della carta deriva dall'integrazione dei dati di superficie, così come riportati negli attuali aggiornamenti della Carta Geologica in scala 1: 10.000 CARGT (2012) e della Carta Litotecnica del Comune di Firenze sviluppata dal DST, integrata con le conoscenze di sottosuolo condensate nel modello geologico-tecnico e di tutti i tematismi geologici e geomorfologici contenuti nella Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica.

Le aree di bordo bacino ove affiora il substrato, sono costituite da sub-

strato lapideo stratificato (**LPS**), ascrivibile a Macigno e Pietraforte o da alternanza di litotipi stratificati (**ALS**), riferibili alla Formazione di Sillano e Formazione di Monte Morello. Tali aree sono state considerate come Zona stabile (Figura 5.1).

Figura 5.1 -
Legende usate
per le MOPS
relativamente alle
zone stabili ed alle
zone di attenzione
per instabilità di
versante.



I dati dei sondaggi che raggiungono il substrato, unitamente all'interpretazione derivante dall'assetto geologico locale, portano a ritenere come questo sia costituito, nell'area urbana, dalla Formazione di Sillano e più specificatamente, forse, dalla sua porzione superiore: il membro di Vallina (Formazione di Vallina AUCTT.). Tale membro è caratterizzato da alternanze argillitico-calcareo-marnose. Il bordo delle colline meridionali è invece costituito dalla Pietraforte, dal Macigno in alcuni settori settentrionali e dalla Formazione di Monte Morello nella piana ad ovest dellaaglia Scandicci-Castello.

Macigno e Pietraforte sono classificabili come **LPS**, Formazione di Monte Morello e Formazione di Sillano come **ALS**.

Dati i richiamati problemi di tracciabilità 3D nel sottosuolo dei diversi corpi litoidi secondo le USCS la definizione delle MOPS non ha potuto entrare nel dettaglio di questa ripartizione, ma siamo stati costretti a fare queste attribuzioni tracciabili invece con continuità nel sottosuolo:

CL - argille inorganiche di medio bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre, riferibili principalmente ai depositi del Sintema del Bacino (SB), ma presenti in parte anche nei Depositi Antichi (DA) e nei Depositi Recenti (DR).

GC - miscela di ghiaia, sabbia e limo, riferibili principalmente ai Depositi Recenti (DR).

GP - ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia, riferibili essenzialmente ai Depositi Antichi (DA), ma presenti parzialmente anche nel Sintema del Bacino (SB).

Operativamente le MOPS sono state ricavate incrociando il tipo di sub-

strato, la sua profondità rispetto al p.c., la presenza di Depositi Recenti (DR), Depositi Antichi (DA) e Sintema del Bacino (SB).

Nella carta delle MOPS per l'area di pianura, dove sono presenti le microzone riferibili alle Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, sono state definite 33 sottozone di microzonazione in prospettiva sismica (MOPS); tali zone sono rappresentate e descritte tramite colonne stratigrafiche di sintesi, così come riportate in dettaglio nella Tavola Classi Stratigrafiche MOPS – Dettagli (vedi a <https://www.regione.toscana.it/web/guest/speciali/rischio-sismico>).

5.1.1 Zone di attenzione per instabilità di versante per la MZS di primo livello

Le aree instabili considerate sono quelle cartografate nelle mappe del PAI (classificate come S3, S2 e FD3), che per l'area comunale fiorentina riportano complessivamente 291 aree di instabilità, così ripartite:

- 102 aree di scorrimento superficiale nello stato attivo, codificate come 301220xy;
- 189 aree di scorrimento superficiale nello stato quiescente, codificate come 302220xy.

Rispetto alle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica le Zone di Attenzione per Instabilità di Versante risultano così distribuite:

COD. MOPS	n°	COD. MOPS	n°
2001	1	2014	8
2002	2	2017	8
2003	3	2021	9
2004	3	2022	13
2012	4	2026	35
2013	5	2099	200

La larga maggioranza, 69% circa, ricade completamente in aree con substrato sub affiorante e/o alterato (Zona 2099), mentre il restante 31% è distribuito nelle zone che presentano coperture, di queste la maggioranza vede coinvolte le zone MOPS 2022 e 2026.

Valutazione di qualità dello studio e livelli di incertezze

Massimo Coli⁽¹⁾ & Niccolò Iandelli⁽¹⁾

⁽¹⁾Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra

6.1 Procedura semi-quantitativa per stabilire la qualità della carta di microzonazione sismica

Le specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di microzonazione sismica e prescrizioni per le analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (aggiornamento 02/10/2018) riportano in Appendice 2 una procedura semi-quantitativa per stabilire la qualità della Carta di Microzonazione Sismica, basata su 6 parametri ai quali viene assegnato un peso che deriva da 3 indicatori. Il calcolo dei valori da inserire è riassunto nello schema seguente (Tabella 6.1):

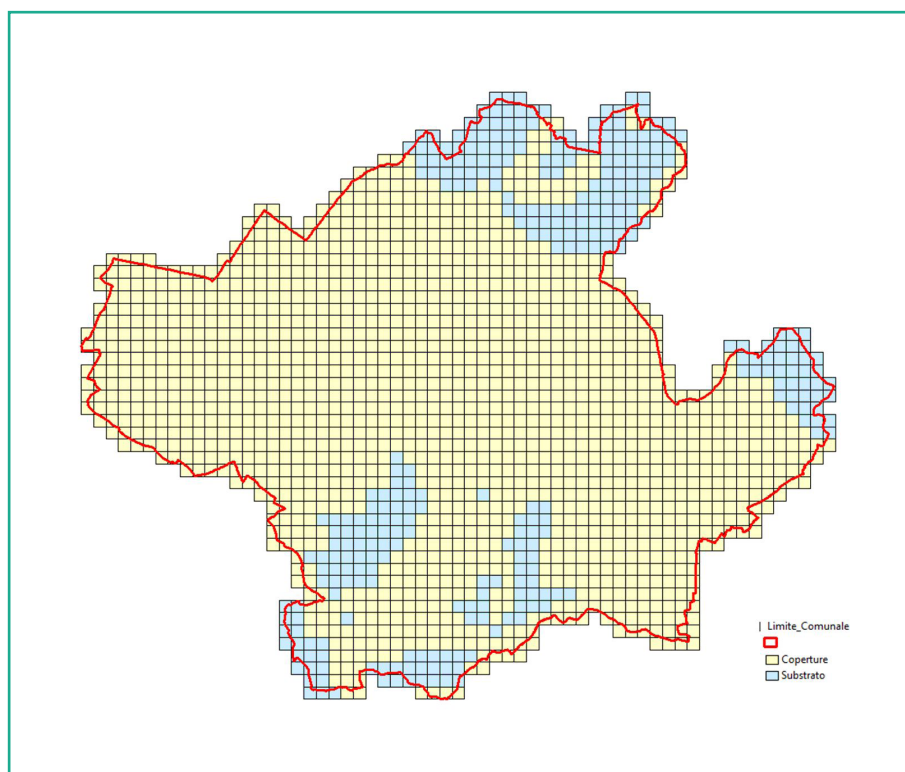
Parametro (peso parametro)	Peso indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0.33)	Media (0.66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0.33	Anno rilevamento	No data	< 2000		> 2000
	0.33	Progetto	No data	Altro	Allegato piano urbanistico	Ad hoc
	0.33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0.50)	0.33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero di sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0.33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero di sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0.50)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0.25)	0.33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0.75)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

* D. Albarelli, C. Cesi, V. Eulilli, F. Guarrini, E. Lunedei, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll. Geofis. Teor. Appl.

6.1.1 Costruzione del reticolato di riferimento

In base a quanto richiesto è stato costruito sull'area da investigare un reticolato di celle quadrate, tutte uguali, orientate N-S e E-W, con il lato di 250 m, come indicato dalle linee guida regionali. Complessivamente il territorio comunale è coperto da 1790 celle di cui 1468 riferibili a coperture e 322 al substrato sub-affiorante.

Figura 6.1 –
reticolato
di riferimento con
cella 250x250 mt



Parametro B – Carta geologico tecnica

La Carta, in scala 1:5.000 è del 2018, eseguita per l'aggiornamento del Regolamento Urbanistico Comunale, pertanto i punteggi inseriti sono i seguenti:

Tabella 6.2 –
valutazione del
parametro b "carta
geologica tecnica"

b	Carta Geologico tecnica	1	Anno Rilevamento	Progetto	Scala
Punteggi indicatori			1	1	1
Pesi indicatori			0,33	0,33	0,33

Parametro C – Sondaggi a Distruzione

Nella banca dati sono stati considerati 27 sondaggi a distruzione (generalmente pozzi per acqua) che coprono il 2% delle celle delle coperture. Il 30% raggiunge il substrato.

Figura 6.2 –
distribuzione dei
sondaggi
a distruzione

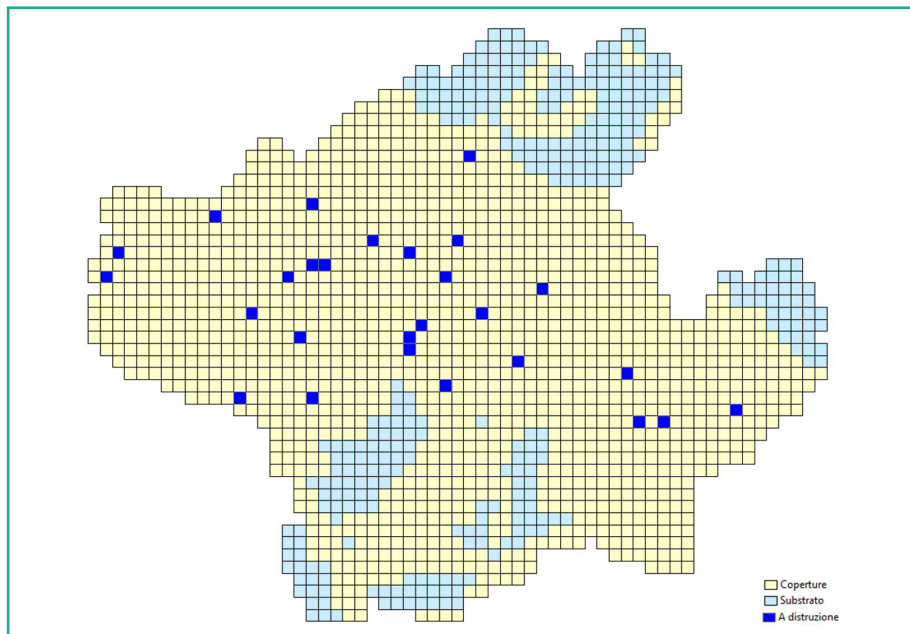


Tabella 6.3 –
valutazione
del parametro
c "Sondaggi a
Distruzione"

c	Sondaggi a distruzione	0,5	Numero sondaggi	% celle occupate	Num. Sondaggi bedrock
Punteggi indicatori			1	0,33	0,66
Pesi indicatori			0,33	0,33	0,33

Parametro D – Sondaggi a Carotaggio Continuo

Complessivamente sono stati impiegati 1957 sondaggi a carotaggio continuo, 340 dei quali arrivano al substrato. Il 46% delle celle di copertura (681 su 1468) presenta una o più indagini al suo interno.

Figura 6.3 –
distribuzione
delle indagini

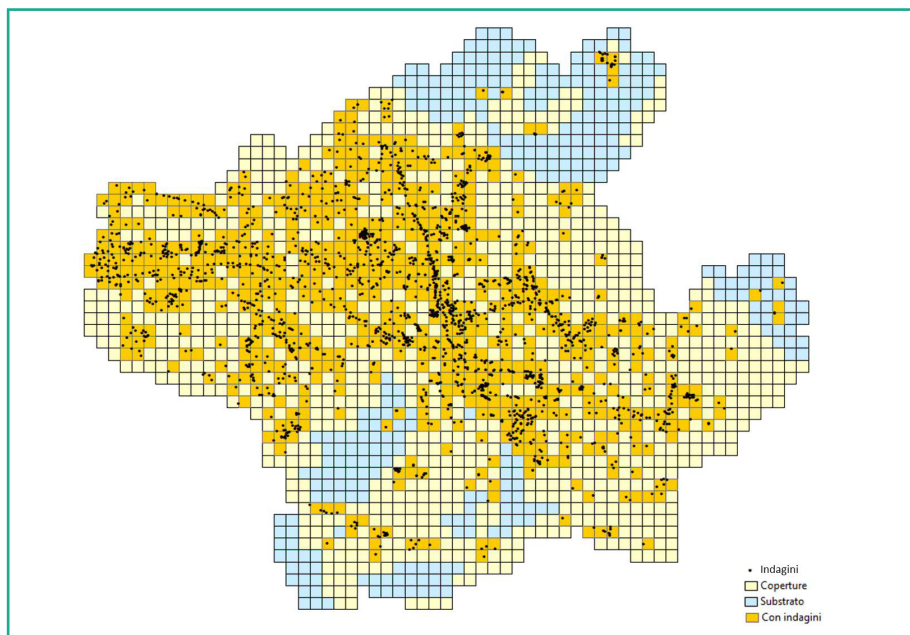


Tabella 6.4 –
valutazione
del parametro
d “Sondaggi
a carotaggio
continuo”

d	Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero sondaggi	% celle occupate	Num. Sondaggi bedrock
<u>Punteggi indicatori</u>			1	0,66	1
<u>Pesi indicatori</u>			0,33	0,33	0,33

Parametro E – Indagini Geofisiche

Complessivamente sono state analizzate 135 indagini di tipo geofisico (52 misure di rumore, 38 Indagini Down-hole, 6 indagini Cross-hole, 18 Sezioni sismiche a rifrazione, 21 M.A.S.W.). Il 5% delle celle di copertura (99 su 1790) presenta una indagine al suo interno, il 35% raggiunge il bedrock.

Figura 6.4 –
distribuzione delle
indagini geofisiche

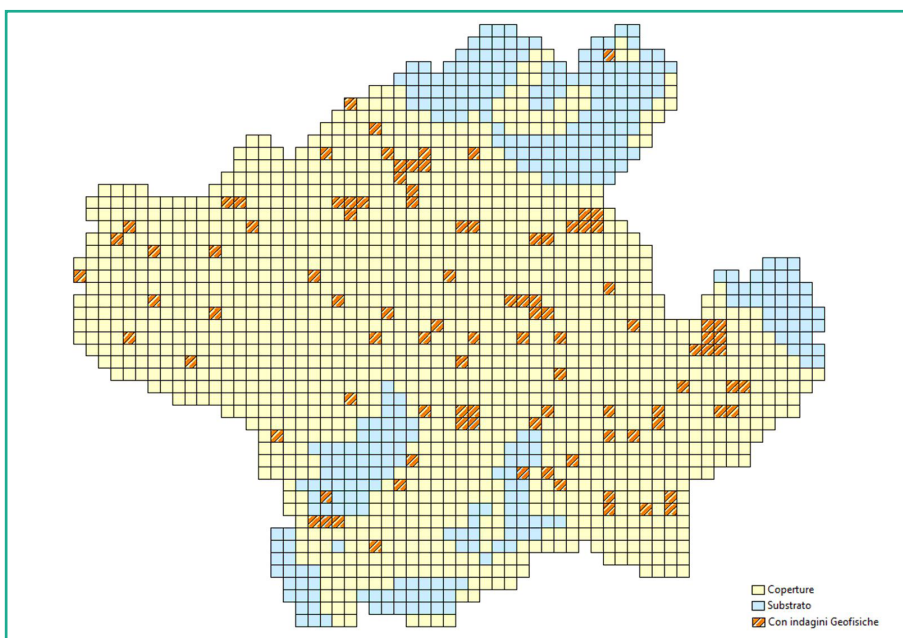


Tabella 6.5 –
valutazione
del parametro
e “indagini
geofisiche”

e	Indagini geofisiche	0,5	Numero misure	% celle occupate	% indagini al bedrock
<u>Punteggi indicatori</u>			1	0,33	0,66
<u>Pesi indicatori</u>			0,33	0,33	0,33

Parametro F – Prove Geotecniche

Complessivamente sono presenti 223 sondaggi con campioni che hanno prodotto 227 analisi di laboratorio oltre a 952 valori di geotecnica in situ (SPT). Il 15% delle celle di copertura (223 su 1468) presenta una o più indagini al suo interno, il 35% raggiunge il bedrock.

Figura 6.5 –
distribuzione
delle indagini con
campioni

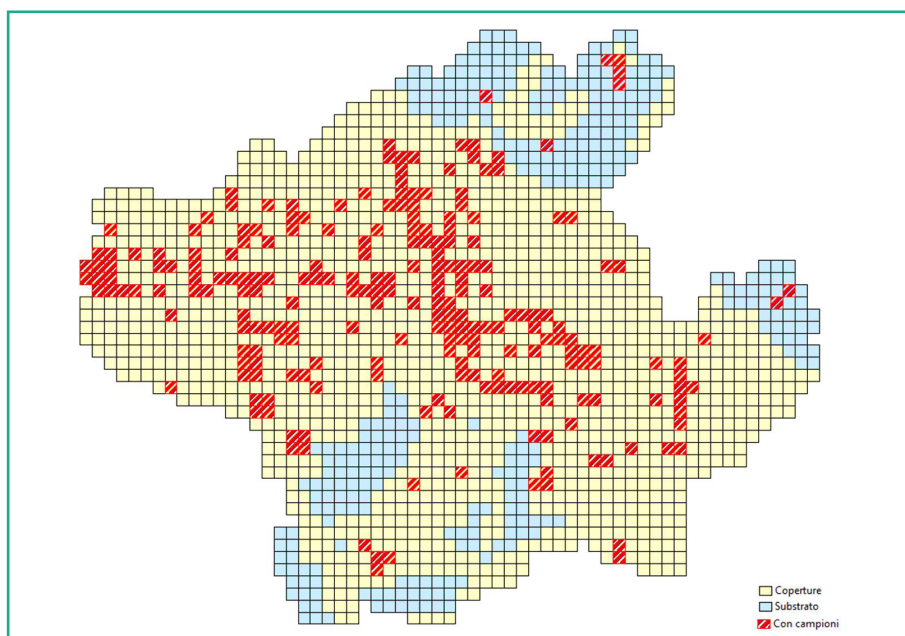


Tabella 6.6 –
valutazione del
parametro f “prove
geotecniche”

f	Prove geotecniche	0,25	Numero prove	% celle occupate	% prove al bedrock
Punteggi indicatori			1	0,33	0,33
Pesi indicatori			0,33	0,33	0,33

Parametro G – Misure Frequenze

Complessivamente sono presenti 52 misure di frequenza. Il 3% delle celle di copertura (52 su 1790) presenta una o più indagini al suo interno, il 35% raggiunge il bedrock, le misure sono di affidabilità elevata.

Figura 6.6 –
distribuzione
delle misure di
frequenza

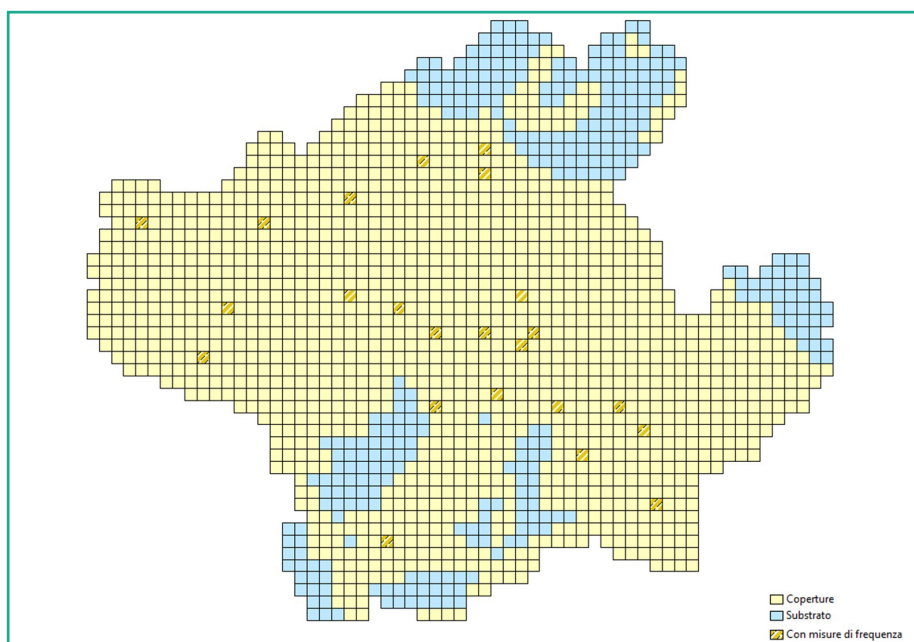


Tabella 6.7 –
valutazione
del parametro
g “misure di
frequenza”

g	Misure Frequenze	0,75	Numero misure	% celle occupate	Classe di affidabilità
Punteggi indicatori			1	0,33	1
Pesi indicatori			0,33	0,33	0,33

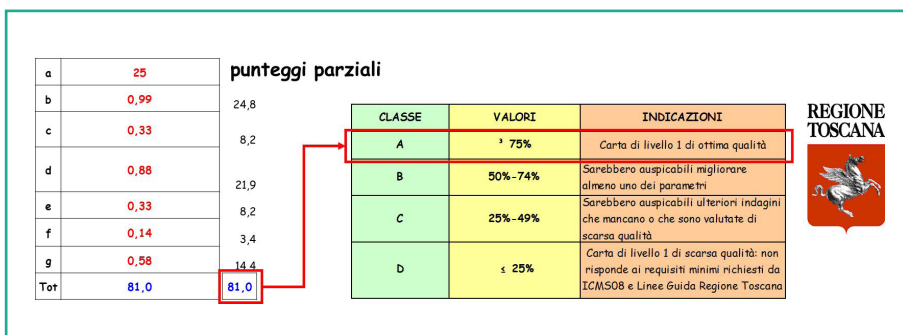
Risultati ottenuti e Commento

In base ai risultati parziali si desume che:

- La cartografia geologica è di ottimo livello e soddisfa completamente le condizioni richieste;
- I sondaggi a distruzione sono mediocri e soddisfano le condizioni al 33%;
- I sondaggi a carotaggio continuo sono di elevata qualità e soddisfano le condizioni all'88%;
- Le indagini geofisiche sono di ottima qualità ma mediocri nel numero e soddisfano le condizioni al 33%;
- Le prove geotecniche per essendo in ottima quantità, sono scarse e soddisfano le condizioni al 14%;
- Le misure di rumore, di elevata qualità ma non ben distribuite, sono più che sufficienti e soddisfano al 58% le condizioni richieste.

In base alla procedura realizzata si può asserire che la Carta di Microzonazione Sismica è di Ottima qualità ed è riferibile alla Classe A.

Figura 6.7 –



Analisi Monodimensionale e gli abachi per la Microzonazione Sismica di II Livello

Giorgio Lacanna⁽¹⁾ & Maurizio Ripepe⁽¹⁾

⁽¹⁾Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra

7.1 Introduzione

Lo scuotimento sismico prodotto da un terremoto può essere alterato da effetti locali, legati alle caratteristiche geologiche, geotecniche e geomorfologiche dei terreni. Questo fenomeno fa sì che lo scenario di scuotimento prodotto da un terremoto segua, spesso, una distribuzione complessa, non giustificabile soltanto con la distanza epicentrale ma risultante dalla combinazione di diversi fattori.

Il campo d'onda sismico prodotto da un evento può essere descritto dalla sovrapposizione di caratteristiche sismologico-strutturali del terremoto stesso, quali l'energia e la direttività dell'evento, dalla distanza dalla sorgente e da fenomeni di amplificazione sismica.

Le principali cause di amplificazione sismica, ampiamente documentati e riconosciuti, sono associate a caratteristiche stratigrafiche e morfologiche. La presenza di sedimenti con scarse caratteristiche meccaniche, sopra un substrato rigido, porta a un confinamento delle onde sismiche nella coltre sedimentaria con un conseguente effetto di amplificazione. Questo fenomeno, in particolare, giustifica le alterazioni delle onde sismiche osservate comunemente all'interno di bacini sedimentari. Una corretta valutazione della pericolosità sismica ha bisogno d'indagini di vario tipo, volte, non solo alla conoscenza della tipologia, ubicazione ed energia degli eventi sismici attesi, ma alla ricostruzione areale dei diversi effetti locali (risposta sismica locale), che possono portare a variazioni anche significative dello scuotimento atteso.

Nelle valutazioni dei possibili effetti di amplificazione sono comunemente effettuate indagini di microzonazione sismica volte a quantificare l'entità e il contenuto spettrale di tale amplificazione. Tali indagini si dividono in due gruppi principali: (1) misure strumentali in situ tramite registrazioni sismiche triassiali (Analisi Sperimentale) e (2) simulazione numeriche della propagazione di onde sismiche. Entrambe le analisi sono state condotte per redigere le carte di Microzonazione sismica del Comune di Firenze.

7.2 Analisi Sperimentale (HVSr)

Il fenomeno principale che genera l'amplificazione della perturbazione sismica in bacini sedimentari è rappresentato dal confinamento delle

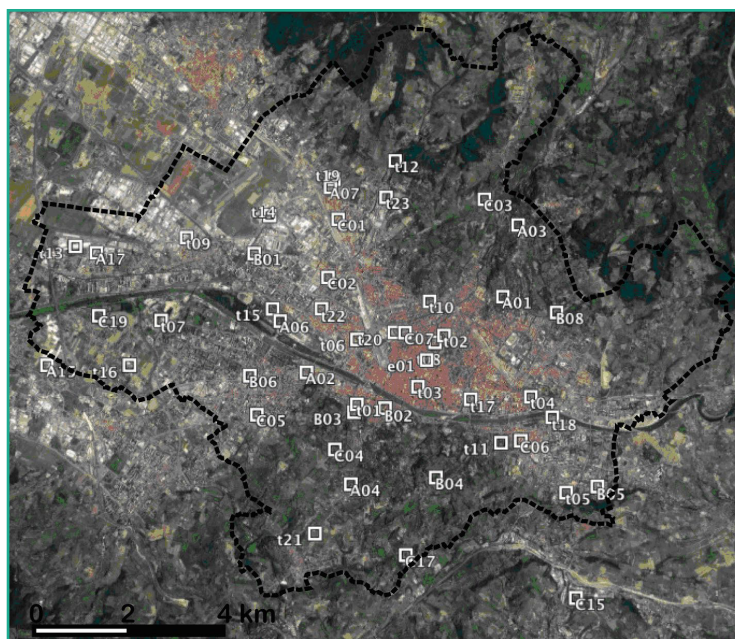
onde sismiche all'interno della copertura sedimentaria. Il forte contrasto d'impedenza acustica, esistente tra substrato rigido e terreni di copertura con caratteristiche meccaniche generalmente più scadenti, permette un facile passaggio delle onde sismiche nella coltre sedimentaria con successivo confinamento delle onde al suo interno. L'interferenza delle onde confinate nella copertura determina la risonanza del sistema per una frequenza particolare, in corrispondenza della quale si ha l'amplificazione massima. Questa è funzione delle caratteristiche meccaniche e geometriche del sistema, quale lo spessore dei sedimenti e la velocità di propagazione dell'onda sismica nel mezzo.

L'analisi HVSR consente di calcolare, da registrazioni sismiche, le frequenze che sono amplificate dalle caratteristiche geologiche e che costituiscono quindi la componente dominante del moto di input che sollecita l'edificio. La tecnica HVSR proposta da Nakamura [Nakamura 1989] utilizza il rapporto tra la media degli spettri delle componenti orizzontali dei segnali sismici rispetto a quella verticale nell'ipotesi che la componente verticale del rumore sia libera da amplificazione.

La tecnica di Nakamura [Y. Nakamura, 1989], utilizzata con successo in numerosi casi di studi volti a stimare la risposta sismica locale di alcuni siti sia in ambito urbano che extraurbano [C. Lachet et al., 1992; L.F. Bonilla et al., 1997], si basa su analisi spettrale FFT (Fast Fourier Transform) dei segnali sismici.

Il Laboratorio di Geofisica Sperimentale del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (LGS-DST) ha eseguito, dal

*Figura 7.1–
Posizione delle 52
stazioni sismiche
installate nel
comune di Firenze.*



2002, una serie di campagne d'indagini sismiche nell'abitato del territorio comunale di Firenze, per un numero complessivo di 48 siti di misure, atte alla valutazione della risposta sismica locale, a cui si sono aggiunte 5 misure HVSr fornite dell'Ufficio tecnico del comune per un numero complessivo di 52 misure sismiche (Figura 7.1).

Il tempo di acquisizione in ogni sito d'indagine è stato da un minimo di una settimana fino a circa uno-due mesi, in modo da permettere una registrazione quanto più rappresentativa possibile del rumore sismico. La scelta dei siti d'indagine è stata dettata in modo da ottenere una distribuzione quanto più possibile omogenea dei punti di misura su tutta la pianura alluvionale del territorio comunale (Figura 7.1).

Le diverse campagne di misure, nel comune di Firenze, sono state realizzate con stazioni sismiche triassiali della rete mobile di LGS-DST. Le stazioni sismiche consistono in un digitalizzatore Guralp CMG-DM24 a 24 bits e in un sismometro triassiale Lennartz 3D/5sec, con sensibilità di 400 V/m/s e risposta spettrale a larga banda tra 0.2 – 50 Hz. I sismometri, sono stati interrati per migliorare l'accoppiamento con il terreno e la sincronizzazione oraria delle stazioni è stata ottenuta tramite ricevitore GPS. I dati, acquisiti con una frequenza di campionamento di 100 Hz, sono stati immagazzinati nella memoria interna dei digitalizzatori e sono stati scaricati durante le operazioni di manutenzione ordinaria della strumentazione.

L'analisi sismica condotta a Firenze ha previsto la valutazione del rapporto spettrale tra la componente orizzontale e quella verticale del rumore sismico registrato (HVSr, Horizontal to Vertical Spectral Ratio). L'analisi spettrale FFT (Fast Fourier Transform) è stata effettuata su finestra mobile della durata di 60 secondi con 50% di sovrapposizione, dopo aver rimosso la media ed eventuali derivate lineari, e dopo aver applicato un taper di Hamming. Il rapporto spettrale è poi calcolato sugli spettri orari e mediato ulteriormente sull'intera durata della campagna di misura (Figura 7.2a), in modo da essere quanto più rappresentativo del sito d'indagine.

Il periodo di risonanza del sito d'indagine è calcolato dal massimo del rapporto HVSr. Per ogni misura HVSr, è eseguito un controllo su eventuali direttività della sorgente di rumore, che, se presenti, potrebbero influenzare la forma e la posizione del picco spettrale (Figura 7.2b). L'assenza di direttività indica, infatti, che il rapporto spettrale calcolato sul rumore può essere ritenuto rappresentativo del sito, mentre la presenza di picchi spettrali con una chiara direttività suggerisce la presenza di sorgenti locali di segnale sismico, che potrebbero alterare le componenti orizzontali del moto, andando così a inficiare la validità del rapporto spettrale.

I rapporti HVSR valutati per i 52 siti di misura presentano picchi di amplificazione in un intervallo spettrale molto ampio, che si spinge da un massimo di 3 sec (0.33 Hz) a un minimo di 0.08 s (12 Hz) (Figura 3). In generale i rapporti HVSR sono caratterizzati da picchi a alti periodi (> 1 s Figura 7.2 a,b) nella porzione occidentale dell'area d'indagine mentre

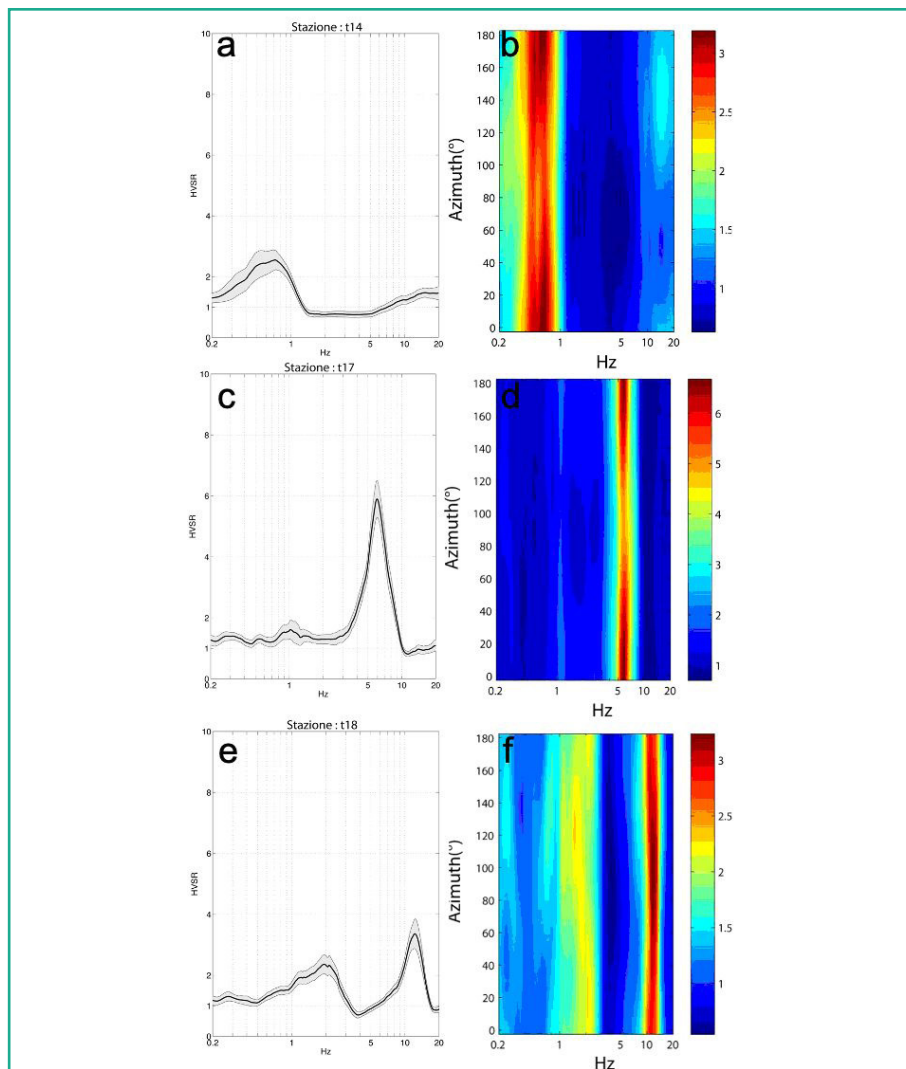
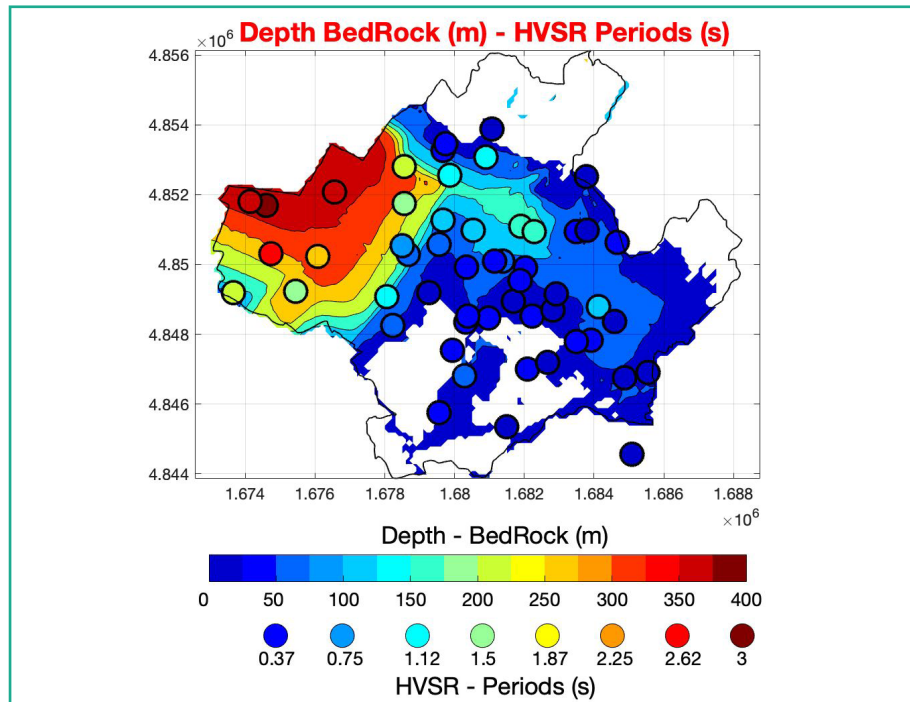


Figura 7.2 – a) Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticale del rumore sismico (HVSR) durante l'intero periodo di indagine alla stazione t14, installata in Via dell'Olmattello presso la Sede della Protezione Civile Provincia-le. Il rapporto HVSR indica amplificazione significativa a 0.8. b) Analisi di direttività del rapporto HVSR alla stazione t14. c) Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticale del rumore sismico (HVSR) durante l'intero periodo di indagine alla stazione t17, installata presso la Caserma Baldissera. Il rapporto HVSR indica amplificazione significativa a 6 Hz. d) Analisi di direttività del rapporto HVSR alla stazione t17. e) Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticale del rumore sismico (HVSR) durante l'intero periodo di indagine alla stazione t18, installata presso la Sede di Pubbliacqua all'Anconella. Il rapporto HVSR indica due picchi di amplificazione significativa a 1,9 Hz e sopra 11 Hz. f) Analisi di direttività del rapporto HVSR alla stazione t18.

mostrano valori significativamente più bassi (0.3-0.08 s, Fig.7.2 c,d) nelle stazioni poste in corrispondenza del centro storico e della porzione settentrionale e orientale del territorio comunale (Figura 7.3). Questa distribuzione dei periodi di risonanza è coerente con la profondità del bacino fluvio-lacustre di Firenze-Prato-Pistoia, relativamente superficiale (30-60 m) in corrispondenza della zona del centro storico e dei bordi del bacino e notevolmente più profondo a ovest della faglia Scandicci-Castello che interessa il bacino in direzione NE-SW (Figura 7.3).

Le stazioni poste nell'area orientale del territorio comunale di Firenze mostrano dei rapporti HVSR con due evidenti picchi di amplificazione:

Figura 7.3 – Confronto tra mappa della profondità del bedrock e i periodi di picco dei 52 rapporti HVSR (cerchi).



il primo a alto periodo ~1 s (~1 Hz) e il secondo nella banda spettrale tra 0.25 e 0.08 s (4 – 11 Hz) (Figure 7.3 e figure 7.2 e,f). Tali rapporti spettrali HVSR suggeriscono la presenza di due contrasti d'impedenza distinti, dove il picco a più alto periodo è rappresentativo di un contrasto d'impedenza a maggiore profondità, mentre quello a più basso periodo rispecchia un contrasto d'impedenza più superficiale. L'andamento di questi rapporti HVSR è quindi, coerente con le informazioni geologiche e di sottosuolo dell'area, in cui com'è evidente dalle sezioni geologiche si riscontra il substrato ad una profondità tra -100-200 m dal piano campagna (rappresentativo del picco ~ 1Hz) e un passaggio a depositi antichi attorno ai -30-50 m dal piano campagna.

7.3 Analisi Monodimensionale

L'insieme delle modifiche che il moto di ingresso al sito subisce, in termini di ampiezza, contenuto in frequenza e durata, per effetto delle con-

dizioni locale è indicato generalmente con il termine di effetti di sito o risposta sismica locale.

La valutazione degli effetti di amplificazione dovuta alla presenza dei sedimenti di riempimento del bacino fluvio-lacustre del territorio comunale fiorentino è stata calcolata nel dominio delle frequenze tramite un approccio lineare equivalente, che consiste in una sequenza di analisi lineari in cui G (modulo di taglio) e D (smorzamento) sono continuamente aggiornati fino a convergenza, mediante una procedura iterativa. Il programma calcola la risposta associata alla propagazione verticale di onde S su modelli monodimensionali.

Il modello fisico consiste di N strati piani paralleli di estensione orizzontale infinita, su un semispazio (bedrock sismico). Ogni strato, considerato omogeneo ed isotropo, è caratterizzato dallo spessore (h), dalla densità (γ), dalla velocità delle onde S (V_s) (Tabella 7.1) e dal fattore di smorzamento.

*Tabella 7.1–
Dati di Input per
analisi numerica*

Unità	V_p m/s	V_s m/s	γ t/m ³
Rip – Riporti antropici	600	210	2,0
DR – Depositi Recenti	1050	371	2,01
Da – Depositi Antichi	1980	610	2,02
FPT – Sintema del Bacino	2020	596	2,02
S – Substrato litoide	2960	1000	2,65

Nella presente elaborazione si è tenuto conto delle direttive della Regione Toscana, per cui la definizione dell'input sismico è stata realizzata con il programma Scalcona-3 sulla base di un set di 7 accelerogrammi naturali registrati su roccia e spettrocompatibili con la normativa (NTC2008/2018) per la zona di Firenze e per un periodo di ritorno pari a 475 anni (Figura 7.4). Le proprietà dinamiche utilizzate (G/G_0 e Damping) nel modello monodimensionale derivano dalle relazioni fornite da respellani & Vannucchi 1991 e Ghinelli & Vannucchi 1992 (Figura 7.5) ricavate da indagini di laboratorio per le argille (FPT) e per depositi granulari (DR e DA).

Per l'intero territorio fiorentino è stata realizzata una maglia di 100x100 m e per ogni nodo della maglia (7800 punti) è stato realizzato un sondaggio virtuale che sulla base del Modello Geologico 3D restituisce gli spessori relativi delle varie tipologie di depositi presenti.

Quindi, per ognuno di questi 7800 sondaggi virtuali, considerando l'input sismico fornito dal programma Scalcona-3, è stata calcolata la funzione di trasferimento e la serie temporale in superficie per ognuno dei 7 accelerogrammi naturali e i corrispondenti spettri di accelerazione (PSAout).

I periodi fondamentali ricavati dal massimo di ogni singola funzione di trasferimento dei 7800 sondaggi virtuali sono consistenti con quelli ricavati dai rapporti HVSr (Figura 7.6). L'ottima corrispondenza tra i periodi rica-

Figura 7.4 – a) 7 accelerogrammi naturali relativi al territorio comunale di Firenze per un periodo di ritorno di 475 anni e relativi Spettri di risposta b).

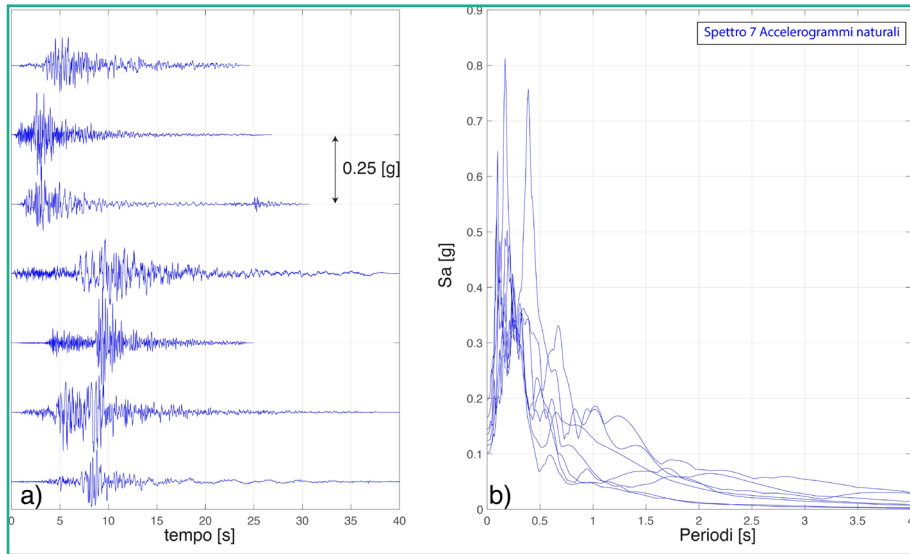
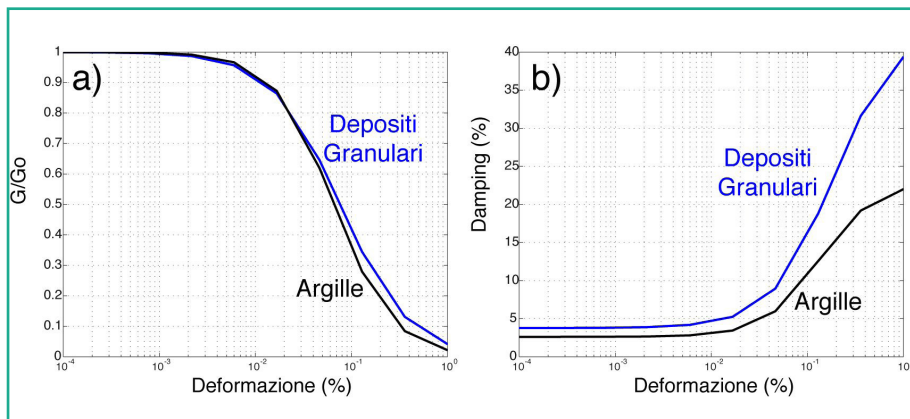


Figura 7.5 – a) Valori del rapporto G/G_0 al variare delle deformazioni di taglio per le Argille (linea nera) e per i depositi granulari (Linea Blue). b) Curve del rapporto di smorzamento al variare delle deformazioni di taglio per le Argille (Linea nera) e per i depositi granulari (Linea Blue).

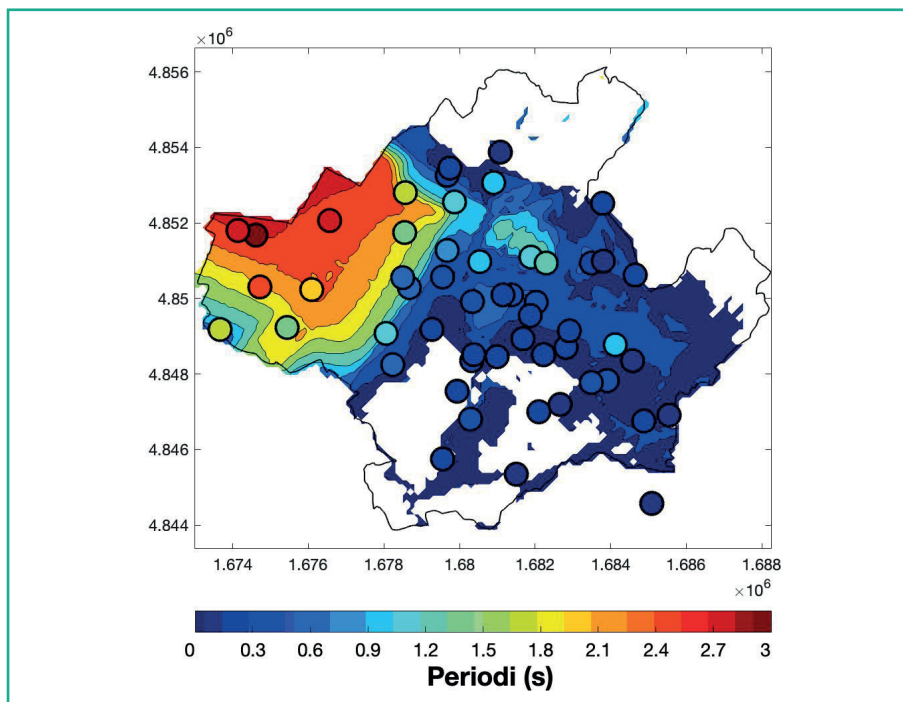


vati dal metodo sperimentale (HVSR) e quelli ottenuti dall'analisi numerica monodimensionale indica come quest'ultima sia in grado di riprodurre efficacemente i periodi fondamentali che caratterizzano il territorio comunale della città di Firenze.

In particolare, entrambi i metodi mostrano alti periodi (>1 secondi o <1 Hz) nella porzione occidentale dell'area d'indagine ad ovest della dislocazione tettonica "Scandicci-Castello", mentre diminuiscono in corrispondenza del centro storico dove raggiungono valori <0.3 s (Figura 7.6).

L'analisi numerica monodimensionale ha permesso di stimare oltre che i periodi fondamentali anche le mappe di amplificazione sismica. Il parametro utilizzato per la definizione della risposta sismica è il fattore di amplificazione di Housner (FHA) espresso come rapporto tra l'integrale dello spettro di accelerazione di output (PSAout) e l'omologo integrale

Figura 7.6 –
Mappa dei periodi
fondamentali
calcolati
da modello
monodimensionali
su cui sono
plottati (cerchi) i
valori dei periodi
fondamentali
ricavati dati
rapporti spettrali
HVSr.



dello spettro di accelerazione del segnale d'input (PSA_{in}) in tre diverse bande spettrali (0.1-0.5 s, 0.4 -0.8 s e 0.7-1.1 s):

$$FHa_{(0,1+0,5)} = \frac{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{in}(T)dT}$$

$$FHa_{(0,4+0,8)} = \frac{\int_{0,4}^{0,8} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0,4}^{0,8} PSA_{in}(T)dT}$$

$$FHa_{(0,7+1,1)} = \frac{\int_{0,7}^{1,1} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0,7}^{1,1} PSA_{in}(T)dT}$$

Le mappe del fattore di amplificazione (Figura 7.7) sono, infine, state ottenute mediando i 7 valori di FHA di ognuno dei 7.800 sondaggi virtuale per le tre diverse bande spettrali. Il confronto tra le tre mappe rivela che i fattori di amplificazioni sono strettamente legati alla profondità del bacino fluvio-lacustre. I fattori di amplificazioni per le tre bande spettrali, nella porzione occidentale del territorio comunale ad ovest della dislocazione tettonica "Scandicci-Castello", sono caratterizzati da valori più bassi rispetto alla porzione orientale dell'area fiorentina.

In particolare, la mappa relativa al fattore di amplificazione calcolata nella banda spettrale 0.1–0.5 sec (Figura 7.7a) presenta i massimi valori di amplificazione nella parte settentrionale e meridionale del territorio comunale in corrispondenza dei bordi del bacino, dove la profondità del substrato è al di sotto dei 50 m; mentre nella porzione centrale del territorio comunale fiorentino la presenza dei depositi antichi dell'Arno (linea

nera, Figura 7.7a), caratterizzati da alte velocità di propagazione (610 m/s, Tabella 7.1), limita i valori di FAH su valori medi.

Al contrario, le mappe di amplificazione calcolate nelle altre due bande a periodi maggiori, tra 0.4-0.8 s (Figura 7.7b) e tra 0.7 – 1.1 s (Figura 7.7c), come atteso, presentano valori di amplificazioni via via crescenti nelle aree dove la profondità del substrato litoide è compresa tra i 50 e i 200 m.

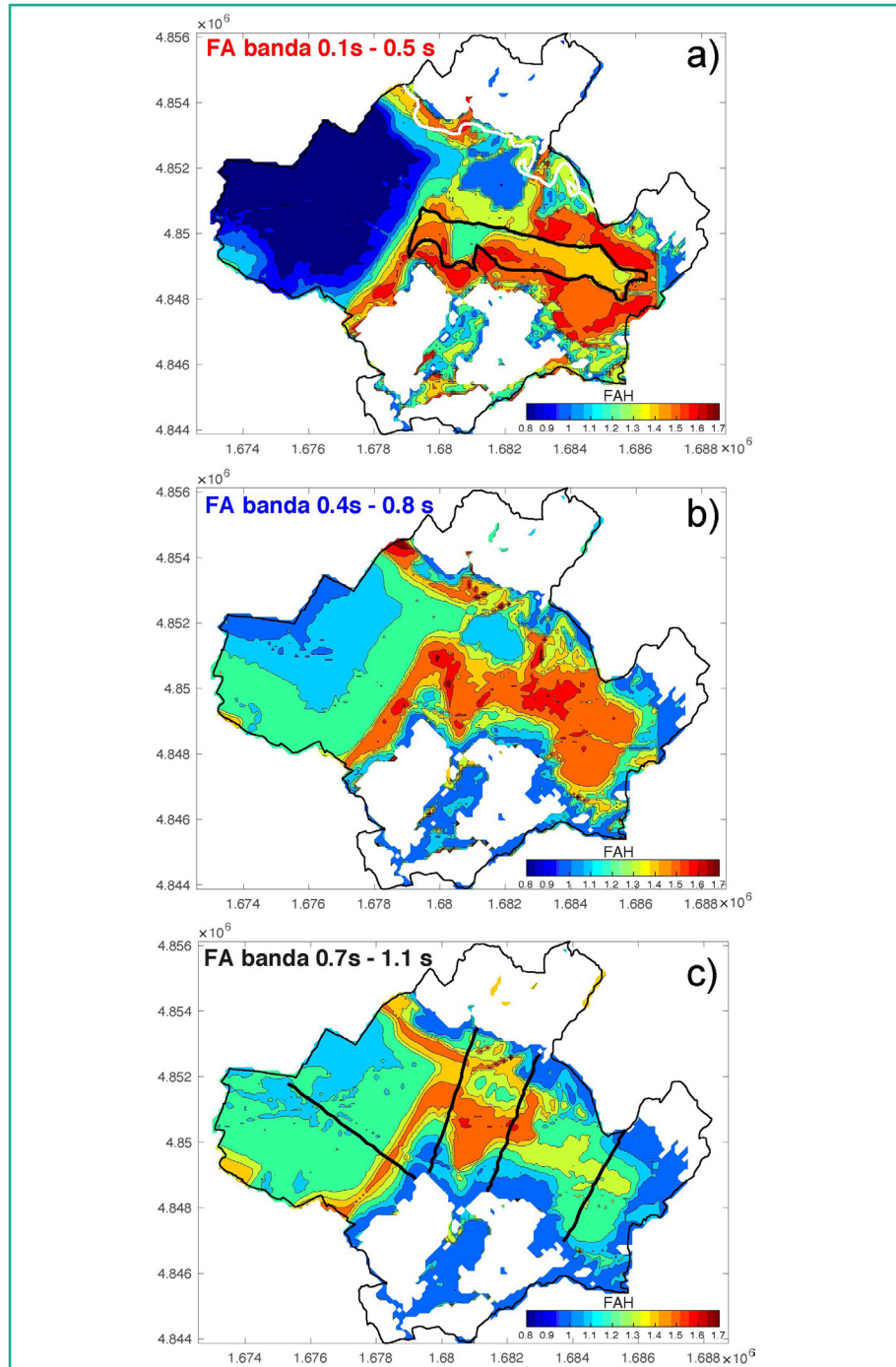


Figura 7.7 – Mappa dei fattori di amplificazione nelle tre bande spettrali. a) Banda 0.1-0.5 s, la linea nera indica il limite dei depositi antichi dell'Arno. b) Banda 0.4-0.8 s. c) Banda 0.7-1.1 s, le linee nere indicano le 4 sezioni utilizzate per le analisi bidimensionali.

7.4 Abachi Regionali

Per la stima semplificata dell'amplificazione litostratigrafica tramite i dati delle misure di rumore sismico effettuate sul territorio secondo macroaree (Figura 7.8) sono stati impiegati gli Abachi (Tabella 7.2 e Tabella 7.3) specificatamente previsti dalla Regione Toscana per la Microzonazione Sismica di 2° Livello.

Operativamente il lavoro ha considerato i seguenti passaggi:

1. Inserimento delle misure di rumore HVSr disponibili, di cui 48 realizzate dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, 5 fornite dall'Ufficio tecnico del Comune e 154 provenienti da D'Amico et al. (2016), utilizzate per l'interpretazione della carta
2. In base alla posizione della misura H/V è stata attribuita ad ogni singola misura il valore della V_s equivalente calcolata da modello geologico 3D, associando il valore di velocità in base al punto del modello (griglia regolare) più vicino al punto di misura.
3. Per ogni misura H/V è stata definita la profondità del substrato per l'impiego dell'Abaco appropriato e cioè caratterizzata da una profondità del substrato litoide >30 m (Tabella 7.2) o <30 m (Tabella 7.3).
4. Per la parte centrale del territorio comunale riferita alle zone MOPS 2007-2008-2009-2010-2011, riconducibili all'area sovrastante il solco sedimentario del paleoArno, i depositi clastici granulari addensati dei DA, con elevate velocità sismiche (610 m/s), in accordo con gli uffici Regionali preposti e alla luce dei risultati del modello numerico monodimensionale sono stati considerati, ai soli utilizzi dell'abaco, come substrato sismico; per cui per queste aree è stato usato l'Abaco riferito ad un substrato <30 m ed un valore di V_{Seq} di 371 m/s per i DR sovrastanti.
5. Ad ogni sito di misura è stata associata una classe di frequenza in base alla frequenza per cui il rapporto HVSr è massimo e una classe di velocità, entrambi i parametri rappresentano i dati di ingresso degli abachi (Tabella 7.4).
6. Per ogni sito di misura è stato preso il dato di "uscita" dagli abachi in termini di FA nei tre intervalli spettrali previsti (0.1-0.5 s, 0.4 – 0.8 s, 0.7 – 1.1 s)
7. A partire dalla suddivisione delle MOPS e in base alla posizione delle misure sono stati attribuiti i valori di FA per i tre intervalli nello shapefile STAB di II livello. Dove risultava che i valori ottenuti lo richiedessero, i poligoni delle MOPS sono stati tagliati per generare i nuovi poligoni STAB di II livello. Nelle aree senza misura H/V i valori di FA sono stati attribuiti in base alla MOPS di appartenenza.

I risultati di queste elaborazioni hanno permesso la realizzazione della Carta di Microzonazione Sismica di 2° livello realizzata associando il valore di FA ad ogni MOPS (Figura 7.9) che, al caso, sono state suddivise in sotto aree in base alle diverse informazioni ottenute dall'applicazione degli abachi regionali derivate dai valori ottenuti dalle misure H/V.

Figura 7.8 –
Suddivisione del
territorio toscano
in macroaree per la
scelta degli abachi
di secondo livello

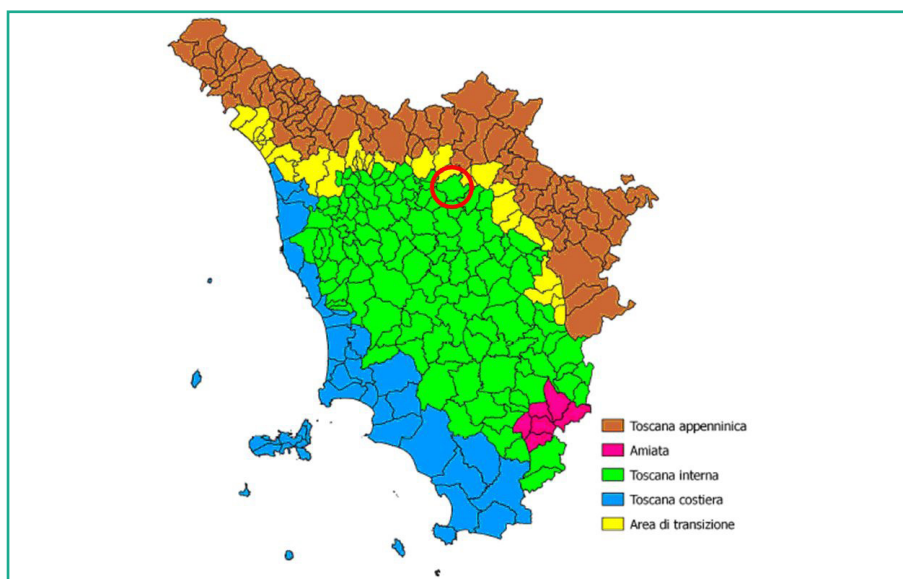


Tabella 7.2 –
Abaco relativo a
Substrato sismico
con profondità
maggiore di 30 m

DSFTA
DIPARTIMENTO
SISMICO
TOSCANO

Toscana Interna (Substrato sismico > 30m)

Valore di a_g ($T_r=475$ anni) $\geq 0.125g$

FA $0.1 < T < 0.5$ s

	D (m) DVA	B (Hz)								75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
	<200	1.0	1.3	2.0						1.2
	300	1.1	1.4	1.7	1.8	1.7	1.7	2.0	1.8	1.4
	500	1.1	1.3	1.5	1.7	1.6	1.5	1.5	1.7	1.4
	700	0.9	1.1	1.3	1.5	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2
	≥800	1.0	1.0	1.0				1.2	1.1	1.0

FA $0.4 < T < 0.8$ s

	D (m) DVA	B (Hz)								75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
	<200	1.5	1.9	3.3						1.8
	300	1.4	1.8	2.1	1.8	1.7	1.5	1.7	1.8	1.7
	500	1.2	1.6	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.6	1.5
	700	1.0	1.2	1.5	1.4	1.2	1.4	1.3	1.2	1.2
	≥800	1.0	1.2	1.2				1.1	1.1	1.1

FA $0.7 < T < 1.1$ s

	D (m) DVA	B (Hz)								75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
	<200	2.0	2.5	3.1						2.2
	300	1.5	2.0	1.6	1.7	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8
	500	1.2	1.7	1.4	1.3	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5
	700	1.1	1.4	1.3	1.1	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2
	≥800	1.1	1.3	1.1				0.9	1.0	1.2

CLASSI

Velocità B (Hz) gruppo	Vs	
	200	400
300	200 < Vs < 400	
500	400 < Vs < 600	
700	600 < Vs < 800	
≥800	Vs > 800	

D (m) assemblaggio	B < 1	
	1.5	1.5 < B < 2
2.5	2 < B < 3	
3.5	3 < B < 4	
4.5	4 < B < 5	
5.5	5 < B < 6	
6.5	6 < B < 7	
7.5	7 < B < 8	
≥ 8		

Tabella 7.3 –
Abaco relativo
a Substrato sismico
con profondità
minore o uguale
di 30 m





Toscana Interna (Substrato sismico $\leq 30\text{m}$)

Valore di a_g ($T_r=475$ anni) $\geq 0.125g$

FA $0.1 < T < 0.5$ s

D (m) DVA	<200	300	500	700	≥800	B (Hz)								75° perc.
						<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
	1.1	1.5	1.9	2.5	2.1	2.1	2.0	2.0	1.5			1.9		
	0.7	1.3	1.8	2.1	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5			1.8		
			1.5	1.7	1.7	1.6	1.4	1.5	1.3			1.4		
				1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2			1.2		

FA $0.4 < T < 0.8$ s

D (m) DVA	<200	300	500	700	≥800	B (Hz)								75° perc.
						<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
	1.3	2.3	2.4	1.9	1.5	1.3	1.3	1.1	1.1			2.2		
	1.0	2.1	2.2	1.8	1.4	1.2	1.2	1.1	1.1			1.9		
			1.6	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1			1.1		
				1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0			1.1		

FA $0.7 < T < 1.1$ s

D (m) DVA	<200	300	500	700	≥800	B (Hz)								75° perc.
						<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	
	2.0	2.4	1.6	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0			2.0		
	1.6	2.0	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0			1.3		
		1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0		
				1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0		

CLASSI

Velocità [m/s]	Vs	
	200	400
300	200 < Vs < 400	
500	400 < Vs < 600	
700	600 < Vs < 800	
≥800	Vs > 800	

Assemblaggio [m]	B < 1	
	1.5	1.5 < B < 2
2.5	2 < B < 3	
3.5	3 < B < 4	
4.5	4 < B < 5	
5.5	5 < B < 6	
6.5	6 < B < 7	
7.5	7 < B < 8	
≥ 8		

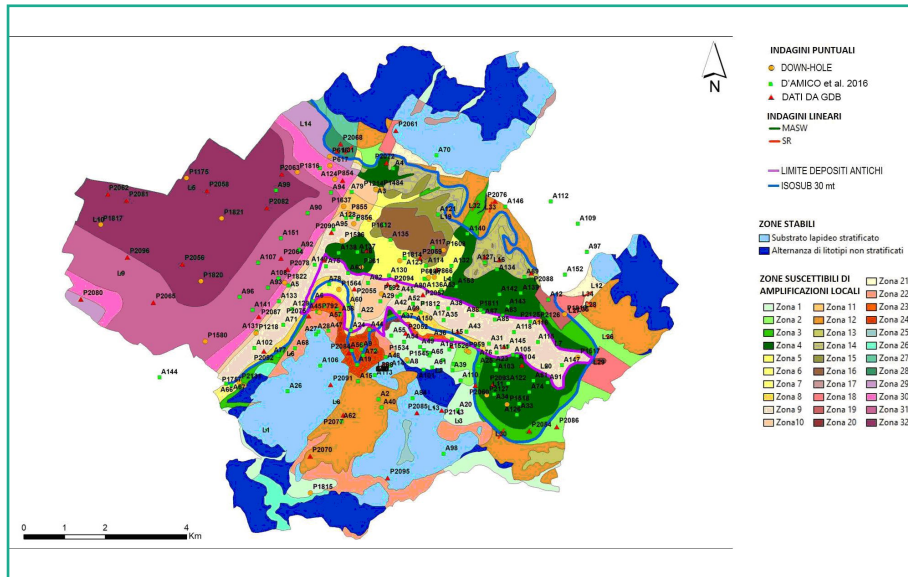


Figura 7.9 –
Mappa
di Microzonazione
di liv. 2, basata
sulla carta MOPS,
con riportata la
isobata dei -30 m
(in blue), il limite
dei DA (Depositi
Antichi, in viola) e la
localizzazione dei
siti HVSR usati per
la Microzonazione
di II Livello

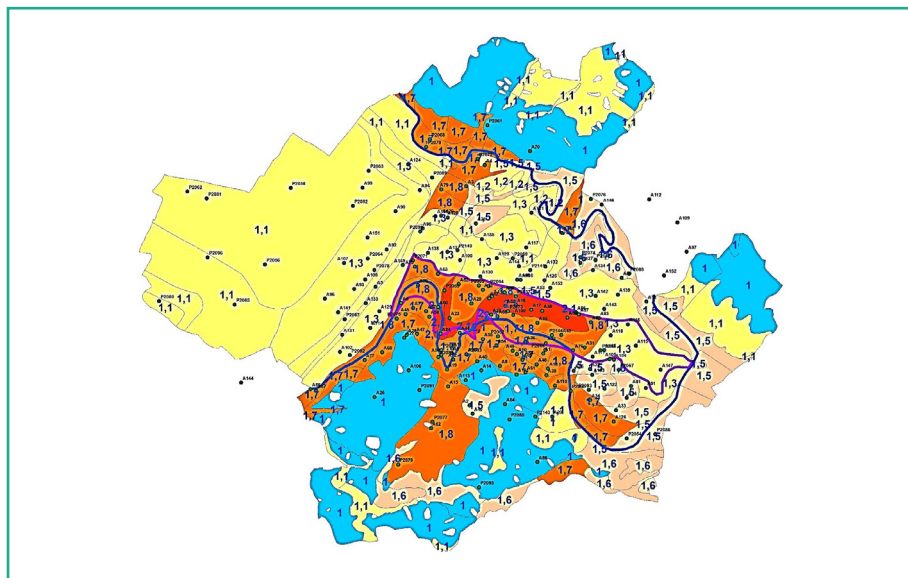


Tabella 7.4.a –
Dati di HVSr di
UniFI, usati per la
Microzonazione di
II livello

DATI NEL GDB											
Tipo_Z	CODICE MISURA	f0 (Hz)	Vs Eq (m/s)	ABACO (PROF. SUBSTRATO)	CLASSE f0	CLASSE Vs eq	FA 01-05 (Hz)	FA 04-08 (Hz)	FA 07-11 (Hz)	CLASSE MICROZONAZIONE SISMICA FA 01-05 (Hz)	
1011	P2061	13,1	>800	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0	
	P2085	4,2	>800	-30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8	
	P2091	4,8	>800	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0	
	P2095	8	>800	-30	6,5	500	1,5	1,4	1,4	1,5 - 1,6	
	P2143	9,98	>800	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2	
2001	P2052	6,7	453	-30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
	P2066	6	456	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2	
2002	P2086	7,7	506	-30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
2003	P2054	6,6	545	+30	<1	500	1,1	1,2	1,2	1,1 - 1,2	
	P2060	3,3	493	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2	
2004	P2067	12,3	495	+30	>8	>800	1	1	1	1	
	P2072	1	497	+30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
	P2093	2,9	513	+30	<1	500	1,1	1,2	1,2	1,1 - 1,2	
	P2140	1,08	496	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4	
	P2141	0,8	512	+30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
2009	P2053	1,1	470	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8	
	P2055	3,5	353	-30	>8	300	1,8	1,8	1,7	1,7 - 1,8	
	P2057	3,5	460	-30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8	
	P2071	2,2	484	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2	
	P2073	3,6	459	-30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8	
	P2090	1,2	478	+30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8	
	P2092	1,8	473	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4	
	P2144	6,4	455	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2	
2010	P2069	3,8	467	-30	4,5	500	1,6	1,5	1,5	1,5 - 1,6	
	P2094	2,4	463	-30	5,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8	
2012	P2070	4,9	595	-30	5,5	500	1,6	1,2	1,1	1,5 - 1,6	
	P2076	5,6	548	-30	2,5	500	1,5	1,6	1,3	1,5 - 1,6	
	P2077	2,2	595	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4	
2013	P2088	4,4	595	+30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8	
2014	P2142	9	595	+30	<1	500	1,1	1,2	1,2	1,1 - 1,2	
2015	P2059	0,86	596	+30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
	P2074	4	595	+30	<1	500	1,1	1,2	1,2	1,1 - 1,2	
2022	P2075	5,4	474	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2	
2024	P2050	4	470	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0	
	P2083	3,6	462	-30	4,5	>800	1	1	1	1	
	P2084	4,8	498	-30	7,5	500	1,5	1,1	1	1,5 - 1,6	
2028	P2068	4,9	520	-30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
	P2079	4,7	619	-30	4,5	500	1,6	1,5	1,5	1,5 - 1,6	
2029	P2080	0,6	577	+30	<1	500	1,1	1,2	1,2	1,1 - 1,2	
2030	P2087	0,94	452	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4	
	P2089	0,9	508	+30	4,5	>800	1	1	1	1	
	P2064	1,4	495	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4	
2031	P2065	0,7	476	+30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6	
	P2078	1,8	483	+30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8	
	P2096	0,41	482	+30	>8	>800	1	1	1	1	
	P2056	0,5	481	+30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2	
2032	P2058	0,37	472	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4	
	P2062	0,36	429	+30	<1	500	1,1	1,2	1,2	1,1 - 1,2	
	P2063	0,6	554	+30	>8	500	1,6	1,6	1,5	1,5 - 1,6	
	P2081	0,33	422	+30	>8	>800	1	1	1	1	
	P2082	0,7	506	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8	

Tabella 7.4.b -
Dati di HVSR di
D'Amico et. al.
2016, non inseriti
in banca dati
ma usati per la
Microzonazione di
II livello

DATI da D'Amico et al. 2016										
Tipo_Z	CODICE MISURA	f0 (Hz)	Vs Eq (m/s)	ABACO (PROF. SUBSTRATO)	CLASSE f0	CLASSE Vs eq	FA 01-05 (Hz)	FA 04-08 (Hz)	FA 07-11 (Hz)	CLASSE MICROZONAZIONE SISMICA FA 01-05 (Hz)
1011	A14	9,94	>800	-30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A26	18,69	>800	-30	2,5	500	1,5	1,6	1,3	1,5 - 1,6
	A27	7,38	595	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
	A28	4,63	411	-30	3,5	500	1,7	1,6	1,3	1,7 - 1,8
	A70	10,81	>800	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A84	10,84	>800	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A98	0	>800	-30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A106	3,03	>800	-30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
1042	A113	0	>800	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A101	6,78	490	-30	>8	500	1,3	1,1	1	1,3 - 1,4
2001	A1	6,88	471	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A8	6,56	494	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
	A10	11,47	600	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A20	5	580	-30	>8	>800	1	1	1	1
	A39	6	567	-30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8
	A46	6,84	570	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A49	6,44	640	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A54	3,16	400	-30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A55	5,38	430	-30	6,5	500	1,4	1,1	1	1,3 - 1,4
	A61	8,19	438	-30	5,5	500	1,6	1,2	1,1	1,5 - 1,6
	A64	8,18	596	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
	A65	7,47	400	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A110	1,84	465	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
2002	A18	6,19	258	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
2003	A25	5,75	523	+30	5,5	500	1,5	1,5	1,4	1,5 - 1,6
	A77	4,81	459	-30	>8	>800	1	1	1	1
2004	A4	3,53	500	+30	7,5	500	1,5	1,1	1	1,5 - 1,6
	A23	2,09	502	+30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A33	2,47	506	+30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A34	3,44	521	+30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A74	2,38	490	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A81	2,16	483	+30	5,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A83	7,06	484	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
	A86	3,97	438	-30	3,5	500	1,7	1,6	1,3	1,7 - 1,8
	A91	1,5	500	+30	5,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A100	1,41	429	+30	3,5	500	1,7	1,5	1,2	1,7 - 1,8
	A103	1,53	487	+30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A104	1,25	449	+30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A105	1,28	470	-30	6,5	500	1,4	1,1	1	1,3 - 1,4
	A122	1,75	495	+30	2,5	500	1,5	1,6	1,3	1,5 - 1,6
	A126	7,88	486	+30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A134	1,84	541	+30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A137	1,41	465	+30	5,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A138	1,66	444	+30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A139	1,34	490	+30	5,5	500	1,6	1,2	1,1	1,5 - 1,6
	A140	1,53	513	+30	6,5	500	1,4	1,1	1	1,3 - 1,4
	A142	1,16	446	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A143	1,19	479	+30	3,5	500	1,7	1,5	1,2	1,7 - 1,8
	A153	1,25	451	+30	6,5	500	1,4	1,1	1	1,3 - 1,4
2005	A53	2,41	472	+30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A114	1,25	475	+30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A123	1,53	493	+30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A125	1,19	468	+30	5,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A130	1,72	474	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A132	1,5	460	+30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A135	1,69	522	+30	5,5	500	1,6	1,2	1,1	1,5 - 1,6
	A136	1,13	448	+30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A148	1,22	458	+30	>8	300	1,5	1,1	1	1,5 - 1,6
2007	A6	3,5	477	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A32	5,91	449	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A60	2,56	436	-30	>8	500	1,3	1,1	1	1,3 - 1,4
	A66	3,25	470	-30	7,5	300	1,7	1,2	1	1,7 - 1,8
	A67	4,72	653	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A78	2,59	470	-30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8

2008	A24	3,97	446	-30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8
	A37	2,69	433	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A69	2,72	451	-30	>8	>800	1	1	1	1
	A76	8,22	458	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A150	3,66	447	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
2009	A16	3,94	458	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A17	4,36	474	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A22	2,41	459	-30	>8	300	1,5	1,1	1	1,5 - 1,6
	A31	6,5	465	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A35	5,63	446	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A38	3,94	455	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
	A41	3,44	458	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A42	3,06	455	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A43	5,72	456	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A52	3,75	463	-30	7,5	300	1,7	1,2	1	1,7 - 1,8
	A63	2,47	465	-30	>8	>800	1	1	1	1
	A71	2,63	463	+30	7,5	300	1,7	1,2	1	1,7 - 1,8
	A75	2,13	481	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A80	2,44	461	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A85	7,03	459	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A87	4,38	462	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A88	4,34	438	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A95	1,22	474	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A102	1,22	480	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A111	1,41	473	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A115	1,13	470	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A116	1,25	491	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A118	1,38	470	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A129	1,75	439	+30	<1	>800	1	1	1	1
	A145	1,63	479	+30	<1	>800	1	1	1	1
	A147	1,16	490	+30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2
	A149	1,66	482	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2010	A3	2,94	523	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A5	2,09	478	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A13	2,72	455	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A29	2,97	433	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A82	2,59	469	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A119	1,22	490	+30	3,5	>800	1	1	1	1
	A120	1,34	489	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A128	1,25	502	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A131	1,16	481	+30	3,5	>800	1	1	1	1
	A133	1,34	451	+30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A79	2,13	529	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2011	A2	2,72	595	-30	<1	>800	1	1	1	1
	A15	4,38	595	-30	<1	>800	1	1	1	1
	A40	2,72	595	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A62	2,72	420	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A146	1,81	553	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
2014	A89	1,22	584	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A121	1,19	596	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2015	A127	1,19	596	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A21	2,34	595	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2016	A117	1,16	596	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A12	2,56	527	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2022	A45	5,03	558	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A47	6,03	436	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A48	3,75	574	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A68	4,97	595	-30	7,5	300	2	1,7	1,6	2,1 - 2,2
	A7	6,13	450	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
2023	A36	3,22	503	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A57	4,56	485	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A58	5,16	642	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4

2008	A24	3,97	446	-30	4,5	500	1,7	1,3	1,1	1,7 - 1,8
	A37	2,69	433	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A69	2,72	451	-30	>8	>800	1	1	1	1
	A76	8,22	458	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A150	3,66	447	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
2009	A16	3,94	458	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A17	4,36	474	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A22	2,41	459	-30	>8	300	1,5	1,1	1	1,5 - 1,6
	A31	6,5	465	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A35	5,63	446	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A38	3,94	455	-30	2,5	500	1,5	1,7	1,4	1,5 - 1,6
	A41	3,44	458	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A42	3,06	455	-30	2,5	300	1,7	2,1	1,6	1,7 - 1,8
	A43	5,72	456	-30	2,5	300	1,8	2,2	1,5	1,7 - 1,8
	A52	3,75	463	-30	7,5	300	1,7	1,2	1	1,7 - 1,8
	A63	2,47	465	-30	>8	>800	1	1	1	1
	A71	2,63	463	+30	7,5	300	1,7	1,2	1	1,7 - 1,8
	A75	2,13	481	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1 - 2,2
	A80	2,44	461	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A85	7,03	459	-30	4,5	300	2	1,4	1,2	1,9 - 2,0
	A87	4,38	462	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A88	4,34	438	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A95	1,22	474	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A102	1,22	480	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A111	1,41	473	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A115	1,13	470	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A116	1,25	491	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A118	1,38	470	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A129	1,75	439	+30	<1	>800	1	1	1	1
	A145	1,63	479	+30	<1	>800	1	1	1	1
	A147	1,16	490	+30	<1	300	1,1	1,4	1,5	1,1 - 1,2
	A149	1,66	482	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2010	A3	2,94	523	+30	6,5	300	1,8	1,2	1,1	1,7 - 1,8
	A5	2,09	478	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A13	2,72	455	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A29	2,97	433	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A82	2,59	469	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A119	1,22	490	+30	3,5	>800	1	1	1	1
	A120	1,34	489	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A128	1,25	502	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A131	1,16	481	+30	3,5	>800	1	1	1	1
	A133	1,34	451	+30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A79	2,13	529	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2011	A2	2,72	595	-30	<1	>800	1	1	1	1
	A15	4,38	595	-30	<1	>800	1	1	1	1
	A40	2,72	595	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A62	2,72	420	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
	A146	1,81	553	-30	1,5	300	1,3	2,1	2	1,3 - 1,4
2014	A89	1,22	584	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A121	1,19	596	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2015	A127	1,19	596	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A21	2,34	595	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2016	A117	1,16	596	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A12	2,56	527	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2022	A45	5,03	558	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A47	6,03	436	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A48	3,75	574	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A68	4,97	595	-30	7,5	300	2	1,7	1,6	2,1 - 2,2
2023	A7	6,13	450	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A36	3,22	503	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A57	4,56	485	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A58	5,16	642	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4

2024	A9	3,23	460	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A11	3	456	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A19	6,41	531	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A30	3,75	462	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A44	2,56	441	-30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A56	6,5	495	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2030	A72	3,28	469	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A124	1,66	533	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2031	A90	1,09	473	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A92	1,31	483	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1,3 - 1,4
	A93	1,19	477	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A94	1,47	537	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A96	1,22	428	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A107	1,34	484	+30	1,5	>800	1	1	1	1
	A108	1,53	479	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A141	1,09	458	+30	1,5	500	1,3	1,6	1,7	1
	A151	1,09	497	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A99	0,91	473	+30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
2032	A97	0	>800	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
Fuori comune	A109	3,88	>800	-30	3,5	300	2,1	1,8	1,3	2,1-2,2
	A112	0	>800	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4
	A144	1,03	>800	-30	3,5	>800	1	1	1	1
	A152	3,09	>800	-30	1,5	300	1,4	1,8	2	1,3 - 1,4

Analisi Bidimensionale per la Microzonazione Sismica di III Livello

Giorgio Lacanna⁽¹⁾, Vittorio D'Intinosante⁽²⁾, Maurizio Ripepe⁽¹⁾

⁽¹⁾Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra

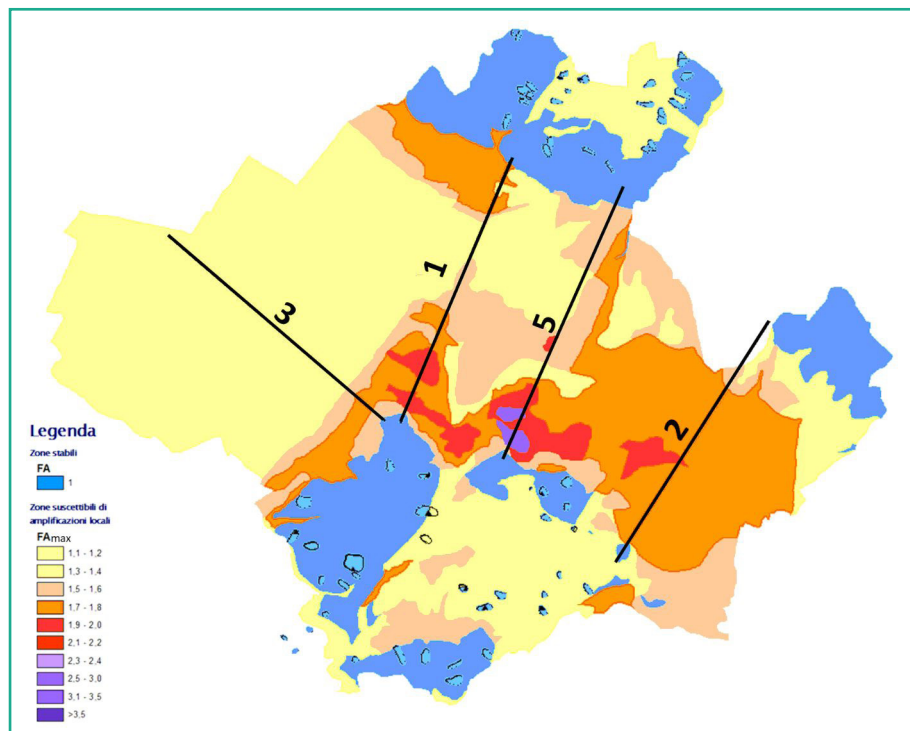
⁽²⁾Regione Toscana – Settore Sismica – Prevenzione Sismica

Lo studio di microzonazione sismica di III Livello prevede l'analisi degli effetti di amplificazione locale tramite anche simulazioni numeriche bidimensionali. È noto che, laddove le condizioni al contorno lo richiedono, i modelli di risposta sismica bidimensionali siano preferibili rispetto a quelli monodimensionali, poiché questi ultimi non sono in grado di cogliere fenomeni come la focalizzazione in corrispondenza dei bordi della valle del bacino. Tuttavia, nel caso in cui tali condizioni al contorno non siano presenti o non siano così accentuate l'analisi numerica monodimensionale, fornisce risultati confrontabili con quelli ottenuti dalle analisi bidimensionali.

Nel caso della città di Firenze, per verificare il grado di tali effetti indotti dalla morfologia del fondo del bacino si è deciso di condurre analisi della risposta sismica bidimensionale.

Dal modello geometrico e geofisico del sottosuolo fiorentino sono state estratte 4 sezioni sismostratigrafiche per le analisi bidimensionali (Figura 8.1).

Figura 8.1 –
Carta della
F_{Amax} con
posizionamento
delle sezioni usate
per l'analisi sismica
bidimensionale



Le 4 sezioni sismostratigrafiche sono state scelte in modo da ottenere una buona copertura del territorio comunale fiorentino, oltre da intercettare tutte le possibili geometrie superficiali e sepolte in grado di influenzare la risposta sismica locale.

Le analisi sismiche bidimensionali sono state eseguite con il software di calcolo LSR2D in cui i parametri di input sono elencati come segue:

1. 7 Accelerogrammi naturali ricavati dal codice di calcolo SCALCONA 3.0 con un $T_r=475$ anni (Figura 4) per la definizione dell'azione sismica per edifici ordinari agli stati limiti SLV e 7 accelerogrammi naturali con un $T_r=50$ anni per la definizione dell'azione sismica per stati limiti SLD.
2. Ad ogni sismostrato delle 4 sezioni è stato associato il corrispondente valore di V_p e V_s e peso di volume come da Tabella 7.1
3. Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato e curve di Smorzamento per simulare il comportamento non-lineare dei terreni (Figura 7.5).

Lungo le 4 sezioni sismostratigrafiche con una lunghezza variabile tra i 4 e 6 Km, sono stati scelti punti di output distanziati con una spaziatura media di 200 m, ottenendo così per ogni sezione dai 20 ai 30 punti di output. Per ogni punto di output sono stati calcolati i 7 spettri in accelerazione (PSA-out) per un tempo di ritorno di 475 anni e per un tempo di ritorno di 50 anni che rapportati con i 7 spettri degli input sismici (PSA-in) hanno fornito i fattori di amplificazione nelle tre bande spettrali (0.1 – 0.5 s, 0.4 – 0.8 s, 0.7 – 1.1 sec).

I valori di FHA delle 3 bande spettrali per ogni singolo punto di output, e per i due tempi di ritorno di 475 (linee rosse, Figure 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5) e 50 anni (linee blue, Figure 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5), sono stati confrontati con i valori FHA del modello monodimensionale attenuati per un tempo di ritorno di 475 anni (linee nere, Figure 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5).

I valori di FHA ricavati dal modello monodimensionale (linee nere) presentano lo stesso andamento anche se risultano in genere leggermente minori rispetto a quelli ricavati da modello bidimensionale (linee rosse), indicando che gli effetti bidimensionali della morfologia del tetto del substrato del bacino fluvio-lacustre del territorio comunale fiorentino sono limitati e non così accentuati.

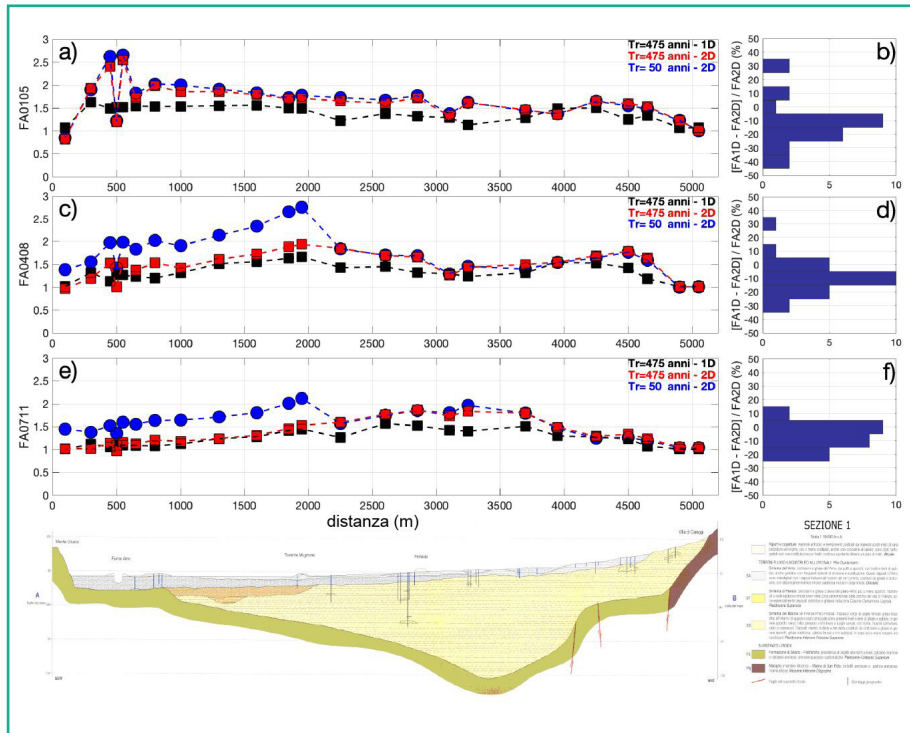


Figura 8.2 – a) Valori di FA nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°1 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. b) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec. c) Valori di FA nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°1 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. d) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec. e) Valori di FA nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°1 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. f) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec.

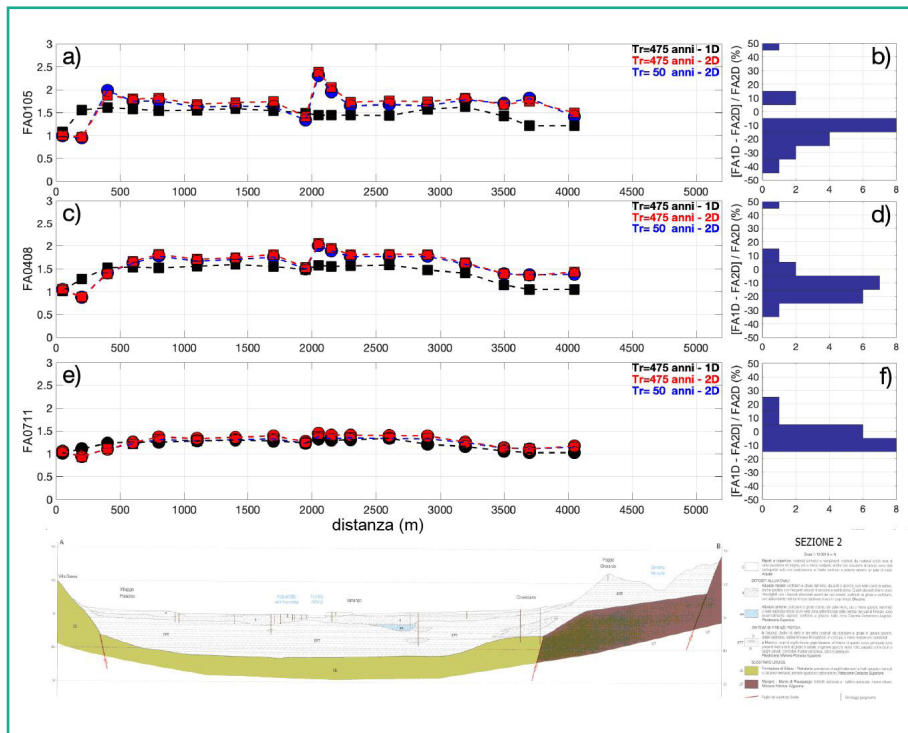


Figura 8.3 – a) Valori di FA nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°2 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. b) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec. c) Valori di FA nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°2 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. d) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec. e) Valori di FA nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°2 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. f) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec.

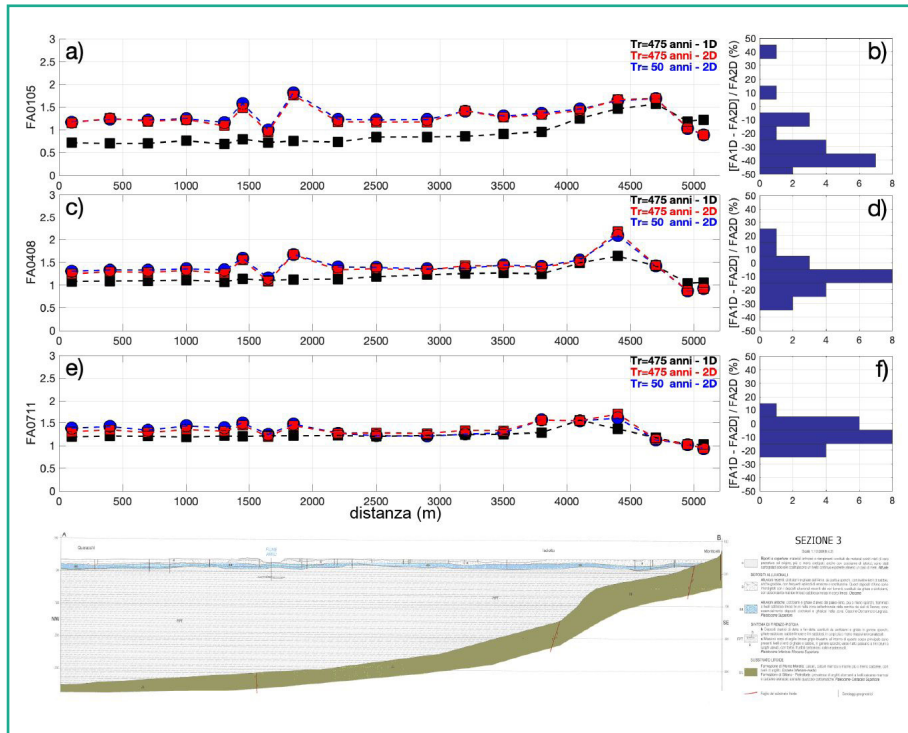


Figura 8.4 – a) Valori di FA nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°3 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. b) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec. c) Valori di FA nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°3 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. d) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec. e) Valori di FA nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°3 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. f) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec.

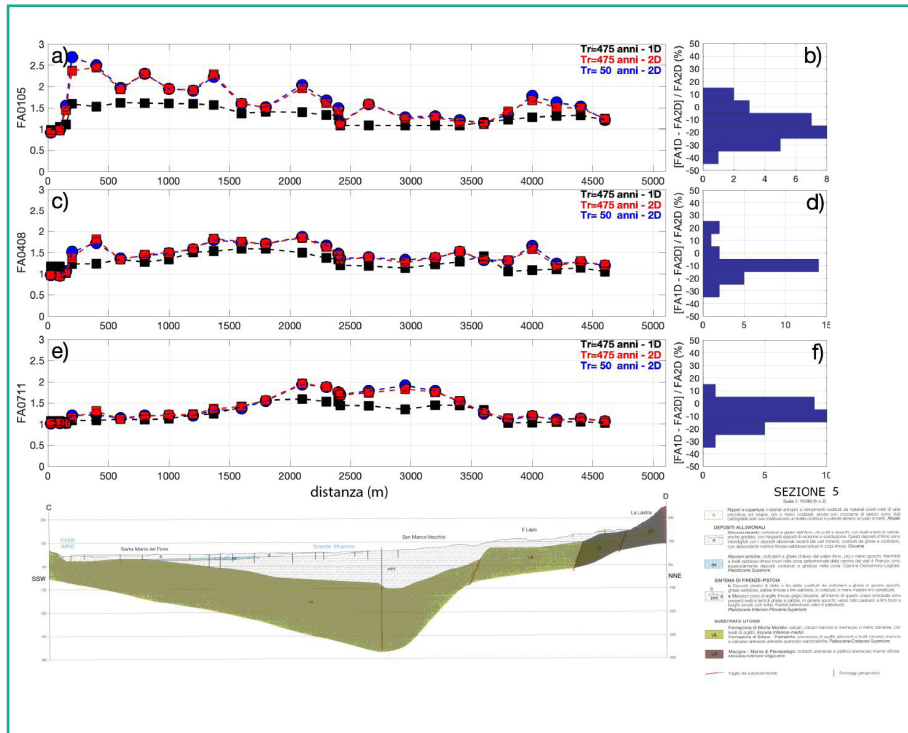


Figura 8.5 – a) Valori di FA nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°5 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. b) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.1 – 0.5 sec. c) Valori di FA nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°5 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. d) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.4 – 0.8 sec. e) Valori di FA nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec ricavati da analisi bidimensionale (quadrati rossi) e monodimensionale (quadrati neri) per la sezione N°5 e per un tempo di ritorno di 475 anni. I cerchi blue indicano i valori di FA calcolati da analisi bidimensionale per un tempo di ritorno di 50 anni. f) Istogramma della differenza in percentuale tra i valori di FA monodimensionali e bidimensionali per un tempo di ritorno di 475 anni nella banda spettrale 0.7 – 1.1 sec.

8.1 Spettro Medio di Risposta per la Microzonazione Sismica

Le elaborazioni eseguite sui raffronti tra i risultati della modellazione 1D e quella 2D lungo le sezioni analizzate mostrano che le FHA del modello 1D hanno lo stesso andamento ma con uno scarto sistematico delle FHA verso l'alto delle simulazioni 2D, secondo quanto in Tabella 8.1.

*Tabella 8.1 –
delta incrementale
di FHA da dati 1D
a dati 2D,
per tempo di
ritorno di 475 anni*

delta %	0105	0408	0711
Sezione 1	+12	+11	+11
Sezione 2	+12	+12	+11
Sezione 3	+15	+11	+11
Sezione 5	+12	+11	+11
Globale	+12	+11	+11

Inoltre le frequenze fondamentali del modello 1D sono consistenti con le frequenze fondamentali ricavate dai rapporti spettrali HVSR. Entrambi i risultati indicano che il modello 1D riesce a predire i caratteri principali del fenomeno di amplificazione sismica del territorio comunale fiorentino con una sottostima dei valori di FHA di solo circa il 12 %.

Un aspetto che influenza la significatività della modellazione 2D è la non simmetria dell'andamento del tetto del substrato che unito all'articolazione topografica varia lo spessore dei depositi in modo non costante. Questo fatto non consente pure e semplici estrapolazioni laterali di connessione tra i dati derivanti dalle 4 sezioni sperimentali eseguite, per cui, per la redazione della Carta di Microzonazione Sismica di 3° Livello si è cercato di tenere conto al meglio del dato della modellazione 2D appoggiandosi per la sua estensione laterale ai dati della modellazione 1D ed alle MOPS, dati questi che riflettono più continuamente la variabilità geologica di sottosuolo. Su questa base statistica, tutti i dati della maglia territoriale 1D sono stati incrementati del relativo delta globale per avere un dato di riferimento di FHA, per le tre bande spettrali, potenzialmente attribuibile ad una simulazione globale 2D e distribuito su tutta l'area fiorentina.

Quindi le Carta di Microzonazione Sismica di 3° Livello, per tutte e tre le bande spettrali (Figura 8.64, 8.7 e 8.8), derivano da dati della modellazione 2D estesi e raccordati lateralmente considerando anche i dati del Modello Sismico Monodimensionale incrementati del delta differenziale. La mappa dei valori di FHA nella banda spettrale 0.1-0.5 s in Figura 8.6, ottenuta così come sopra descritto, mostra gli stessi tratti distintivi, sebbene con valore di amplificazione leggermente più alti, della mappa di amplificazione ricavata dall'analisi monodimensionale. La cartografia ottenuta dagli studi di microzonazione sismica di 3° livello (Figure 8.6, 8.7 e 8.8) ricalca sostanzialmente quelle precedenti evidenziando ancora una volta il ruolo dello spessore globale dei depositi recenti e quel-

lo della profondità del substrato. In particolare, l'analisi bidimensionale combinata con i risultati di quella monodimensionale ha permesso di differenziare il territorio comunale in 6 zone di livelli di amplificazione, che vanno da un valore minimo nella parte ad ovest della dislocazione tettonica "Scandicci-Castello" dove la profondità del substrato litoide supera i 200 m ad un massimo di 2.33 nella parte meridionale del territorio comunale caratterizzata da una profondità del substrato ben al di sotto dei 50 m e dalla presenza di riporti di spessori significativi. Come noto infatti i Riporti, per le loro scadenti proprietà meccaniche, tendono ad esaltare le amplificazioni per frequenze che aumentano in maniera inversamente proporzionale al loro spessore. L'influenza dei Riporti è significativa per la risposta sismica di superficie e quindi ai fini della pianificazione territoriale, mentre per la valutazione sismica dell'edificato conta il terreno su cui poggiano le fondazioni. Per l'area del centro storico fiorentino in genere questo è rappresentato dal primo livello di ghiaie dei Depositi Recenti.

In riferimento ai dettami della normativa, per ognuna delle 6 zone, di Microzonazione Sismica individuate, sono stati calcolati ed associati gli spettri di risposta medi per $T_r=475$ e $T_r=50$ anni ricavati in base alla media degli spettri di risposta sismica calcolati nei punti di output del modello 2D rientranti nella singola zona di Microzonazione Sismica.

Gli spettri medi a loro volta sono stati regolarizzati (Figure 8.9, 8.10, 8.11, 8.12, 8.13, 8.14), così come previsto dalla procedura dell'ICMS 2008 (Figura 8.15). La procedura di regolarizzazione permette di trasformare lo spettro di risposta, risultato delle simulazioni numeriche, in uno spettro con forma standard (secondo le vigenti norme tecniche per le costruzioni), costituito da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante e un ramo in cui l'accelerazione decresce. Alla fine della procedura sono definiti e resi disponibili tutti i parametri utili per il calcolo dello spettro con forma standard, così come previsto dalla vigente normativa NTC2018, in ognuna delle 6 Microzone individuate, sia per un tempo di ritorno $T_r=475$ anni per la definizione dell'azione sismica agli stati limiti SLV (Tabella 8.2) che quello per un tempo di ritorno $T_r=50$ anni per la definizione dell'azione sismica agli stati limiti SLD (Tabella 8.3).

Figura 8.6 –
Carta dei valori
di FA nella banda
spettrale 0.1-0.5 sec
ricavata da analisi
bidimensionale
secondo la
procedura descritta
nel testo.

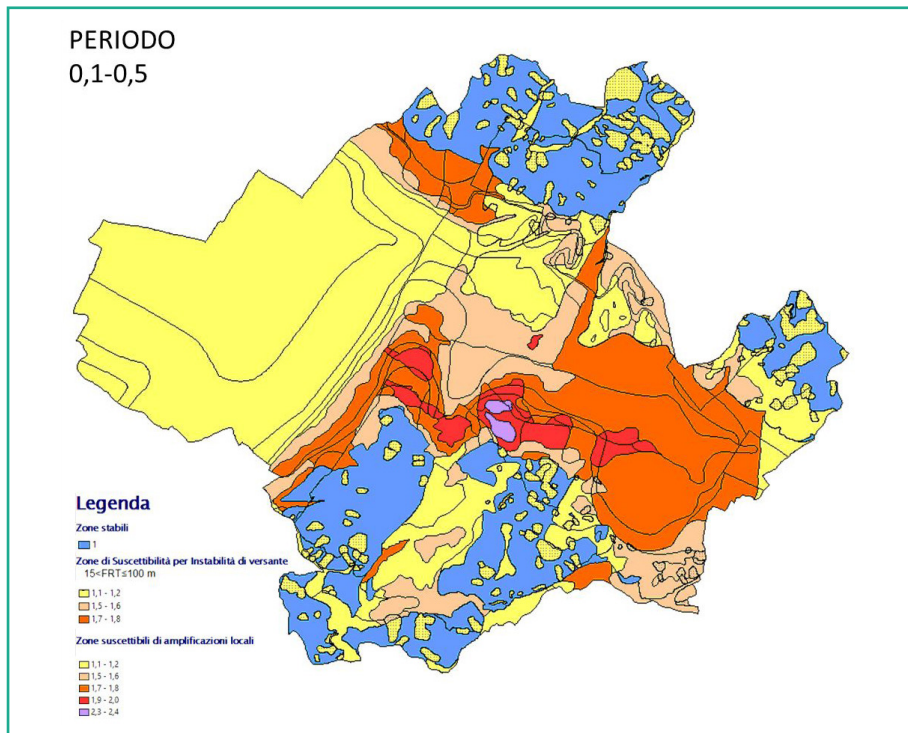


Figura 8.7 –
Carta dei valori
di FA nella banda
spettrale 0.4-0.8 sec
ricavata da analisi
bidimensionale
secondo la
procedura descritta
nel testo.

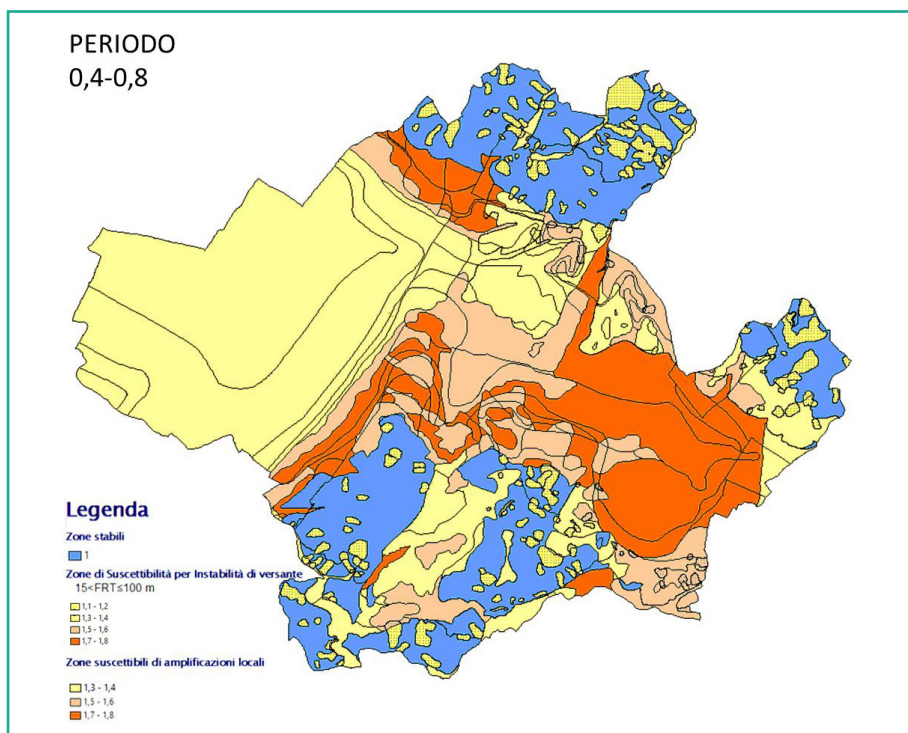


Figura 8.8 –
Carta dei valori
di FA nella banda
spettrale 0.7-1.1 sec
ricavata da analisi
bidimensionale
secondo la
procedura descritta
nel testo.

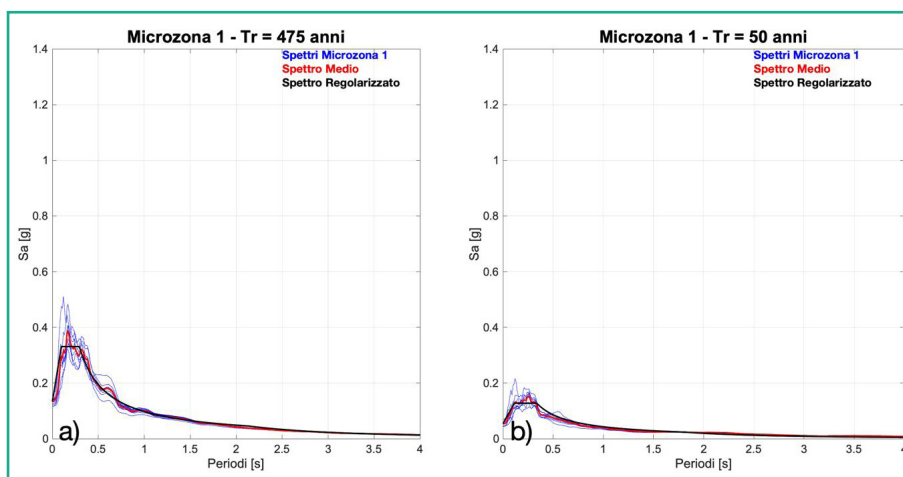
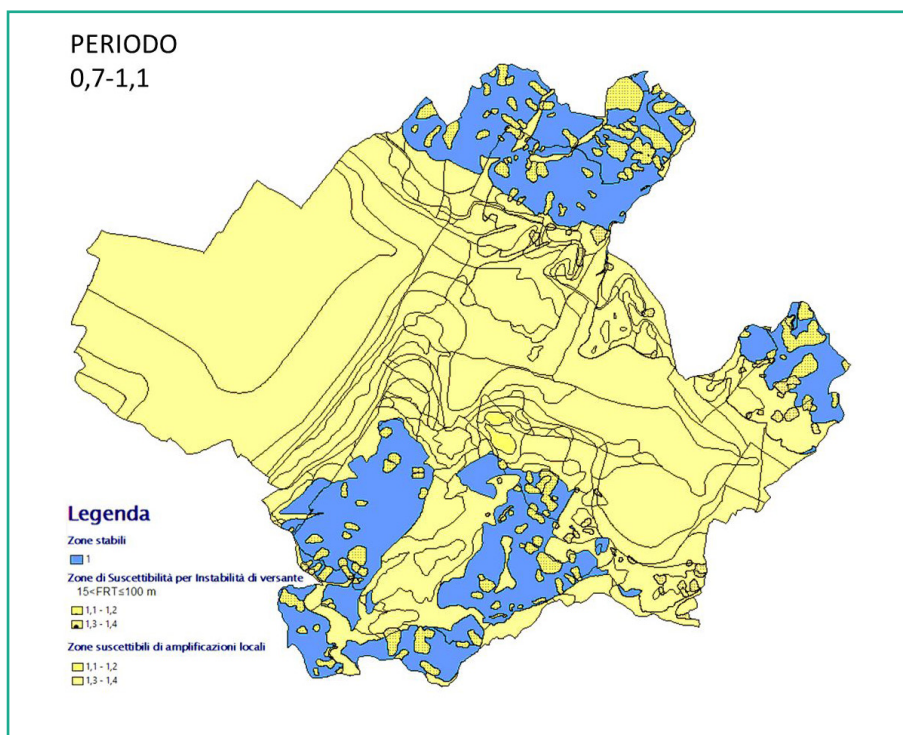


Figura 8.9 – a) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 1 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero) per un $Tr = 475$ anni. b) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 1 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero), per un $Tr = 50$ anni.

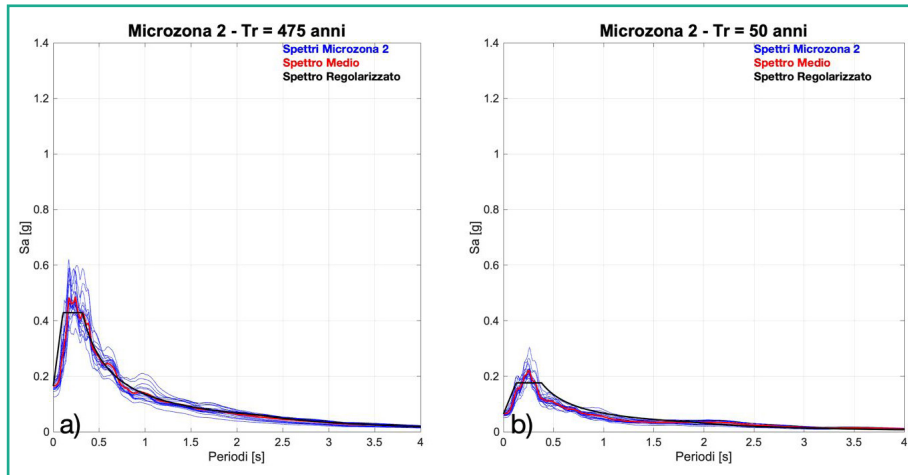


Figura 8.10 – a) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 2 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero) per un $Tr = 475$ anni. b) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 2 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero), per un $Tr = 50$ anni.

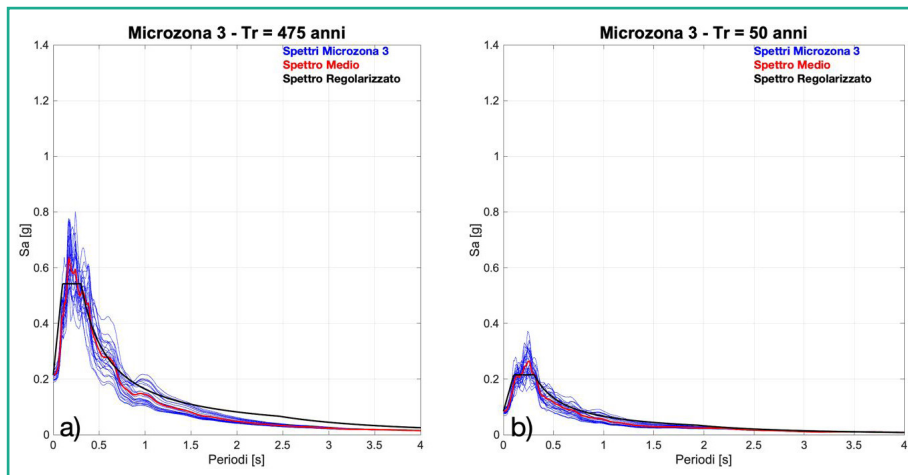


Figura 8.11– a) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 3 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero) per un $Tr = 475$ anni. b) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 3 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero), per un $Tr = 50$ anni.

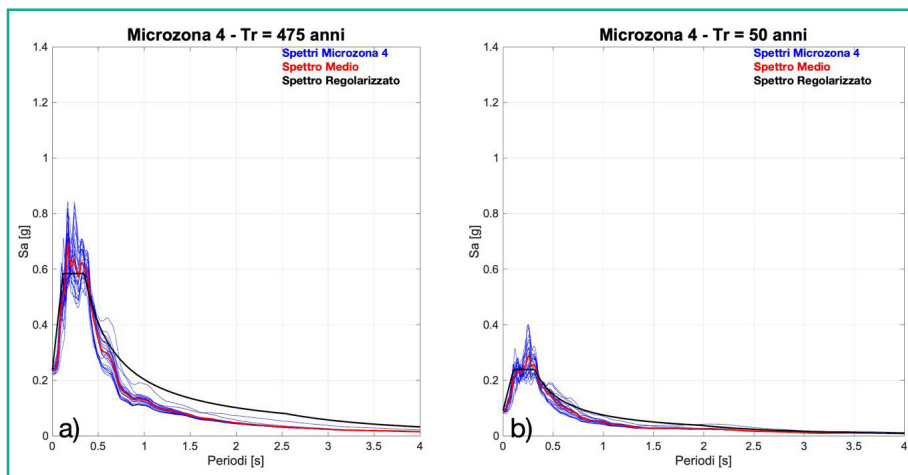


Figura 8.12 – a) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 4 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero) per un $T_r = 475$ anni. b) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 4 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero), per un $T_r = 50$ anni.

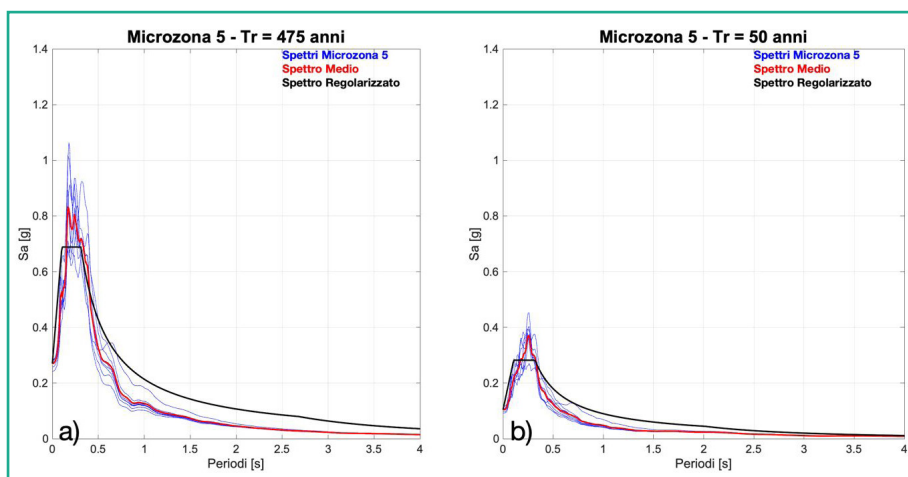


Figura 8.13 – a) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 5 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero) per un $T_r = 475$ anni. b) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 5 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero), per un $T_r = 50$ anni.

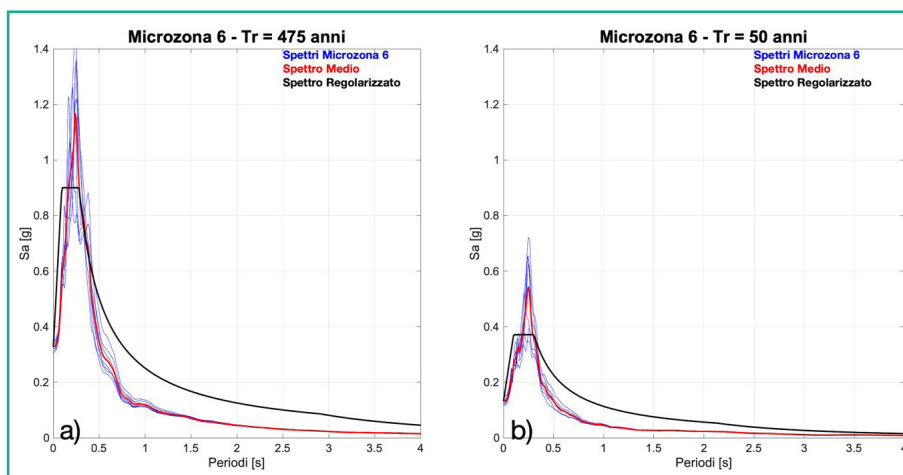


Figura 8.14 – a) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 6 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero) per un $T_r = 475$ anni. b) Spettri dei punti di output del modello 2D ricadenti nella microzona 6 (blue), spettro medio (rosso) e il rispettivo spettro regolarizzato (nero), per un $T_r = 50$ anni.

Tabella 8.2 –
Parametri
da utilizzare
per lo spettro
caratteristico SLV
($T_r=475$ anni)
delle 6 Microzone
individuate nel
comune di Firenze.

ag = 0.131g, $T^*c=0.302$					
microzona	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
1	2.471	1.019	0.098	0.294	2.1342
2	2.607	1.255	0.105	0.315	2.258
3	2.526	1.638	0.100	0.302	2.4585
4	2.480	1.797	0.115	0.347	2.5419
5	2.551	2.060	0.103	0.310	2.6795
6	2.750	2.498	0.092	0.278	2.9091

Tabella 8.3 –
Parametri
da utilizzare
per lo spettro
caratteristico
SLD ($T_r=50$ anni)
delle 6 Microzone
individuate nel
comune di Firenze.

ag = 0.055g, $T^*c=0.268$					
microzona	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
1	2.359	0.973	0.112	0.336	1.816
2	2.742	1.157	0.126	0.380	1.857
3	2.551	1.517	0.102	0.307	1.936
4	2.624	1.636	0.104	0.314	1.963
5	2.715	1.872	0.106	0.318	2.015
6	2.810	2.380	0.101	0.304	2.128

ICMS 2008 - O.C. n. 55/2018 - DGR n. 377/10

Regolarizzazione di uno spettro ottenuto con gli studi di MS3

La procedura di regolarizzazione (Newmark e Hall, 1982², Romeo, 2007³, Liberatore e Pagliaroli, 2014⁴), permette di trasformare lo spettro di risposta, risultato delle simulazioni numeriche nell'ambito degli studi di MS3, in uno spettro con forma standard (secondo le vigenti norme tecniche per le costruzioni), costituita da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, un ramo in cui l'accelerazione decresce con $1/T$ e, quindi, a velocità costante. Alla fine della procedura saranno disponibili anche tutti i parametri per l'inserimento dello spettro elastico in codici di calcolo per la progettazione e la verifica delle costruzioni (a_g , a_{max} , T_B , T_C , T_D , T_C^* , F_0 , ξ , η , S_s , S_T).

Indicando con SA lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione e SV lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità, ottenuti dalle simulazioni numeriche, i passi della procedura di regolarizzazione sono i seguenti:

- a) Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (SA) e si determina il periodo proprio (TA) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione
 b) Si calcola il valore medio dello spettro (SA_m) nell'intorno di TA tra $0.5TA$ e $1.5TA$, questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$SA_m = \frac{1}{TA} \int_{0.5TA}^{1.5TA} SA(T) dT$$

- c) Si determina lo spettro di pseudovelocità (SV) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $w = 2\pi/T$:

$$SV(T) = SA(T) * \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (TV) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;

- d) Si calcola il valore medio dello spettro (SV_m) nell'intorno di TV nell'intorno tra $0.8TV$ e $1.2TV$:

$$SV_m = \frac{1}{0.4 * TV} \int_{0.8TV}^{1.2TV} SV(T) dT$$

- e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_c = 2\pi \frac{SV_m}{SA_m};$$

- f) Si determina $T_B = 1/3 * T_C$ e $T_D = 4.0 * a_{max}/g + 1.6$ (secondo quanto indicato dalla normativa), con a_{max} punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output. Poiché il valore di a_{max} non è generalmente fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01s)}{SA_m} - \frac{0.01}{T_B} \right) \left(\frac{SA_m}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

con $S_e(T=0.01s)$ ordinata dello spettro di accelerazione per $T=0.01s$, primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche.

- g) Si applicano le equazioni riportate in NTC (2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra $T_A=0$, T_B , T_C , T_D , fino a un T di interesse.

- h) Si termina il parametro F_0 come rapporto SA_m / a_{max}

Figura 8.15 -
Procedura
ICMS 2008 di
regolarizzazione
degli spettri seguita
nella presente
analisi.

Indicazione dei risultati della microzonazione sismica di terzo livello per la pianificazione e la progettazione ai sensi dei regolamenti regionali (Regione Toscana)

Massimo Baglione⁽¹⁾ & Vittorio D'Intinosante⁽¹⁾

⁽¹⁾Regione Toscana - Settore Sismica – Prevenzione Sismica

Obiettivo del presente capitolo, è quello di illustrare le modalità di utilizzo dei risultati dello studio di microzonazione sismica di terzo livello (e anche degli studi di primo e secondo livello), sia per la pianificazione urbanistica secondo quanto previsto dal vigente regolamento regionale 5R/2020, sia per la successiva fase di progettazione edilizia nel rispetto di quanto riportato più recentemente dal regolamento regionale 1R/2022.

9.1 Il recepimento della Microzonazione Sismica negli strumenti urbanistici vigenti per la Regione Toscana

Il Regolamento Regionale 5R del 30/01/2020 “Regolamento di attuazione dell’articolo 104 della legge regionale 10 novembre 2014, n.65 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche, idrauliche e sismiche” disciplina:

1. le direttive tecniche per la predisposizione delle indagini finalizzate alla verifica della pericolosità del territorio sotto il profilo geologico, idraulico e sismico, all’individuazione delle aree esposte a rischio e delle condizioni di fattibilità degli interventi di trasformazione in relazione all’obiettivo della mitigazione dei rischi;
2. il procedimento per il deposito delle indagini geologiche presso le strutture regionali competenti;
3. le modalità del controllo delle indagini geologiche da parte della struttura regionale competente.

Le disposizioni del regolamento si applicano alle indagini geologiche da effettuare in sede di formazione:

- a) dei piani strutturali, piani strutturali intercomunali e relative varianti;
- b) dei piani operativi, piani operativi intercomunali e relative varianti;
- c) dei piani attuativi e relative varianti;
- d) degli atti di ricognizione degli interventi di rigenerazione urbana;
- e) delle varianti ai piani regolatori generali vigenti o ai regolamenti urbanistici.

Nell’ambito di tale regolamento è previsto l’obbligo di redazione degli stu-

di di MS di livello 1 per tutti i comuni, tranne quelli classificati in zona sismica 4, e dell'obbligo di realizzazione degli studi di MS di livello 2 (qualora i Comuni dispongano di studi di MS1) che intendono predisporre nuovi piani strutturali o relative varianti, in casi particolari di previsioni del piano operativo ricadenti al di fuori del territorio urbanizzato e comunque in caso sia prevista, in ambito di piano operativo, una sostanziale modifica del quadro conoscitivo.

Gli studi di MS di livello 1, 2 o di livello 3 (nei casi previsti di impossibilità di applicazione del precedente livello 3) devono essere effettuati secondo le specifiche tecniche regionali previste per la microzonazione sismica e più in generale facendo riferimento agli standard a livello nazionali definiti dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica"

In generale, la sintesi di tutte le informazioni derivanti dallo studio di MS di livello 1, 2 o 3, laddove presenti, consente la valutazione delle condizioni di pericolosità sismica locale dei centri urbani studiati secondo le seguenti graduazioni di pericolosità:

Pericolosità sismica locale molto elevata (S.4): zone suscettibili di instabilità di versante attiva e relativa area di evoluzione che pertanto potrebbero subire una accentuazione dovuta ad effetti dinamici quali possono verificarsi in occasione di eventi sismici; terreni suscettibili di liquefazione dinamica accertata mediante indagini geognostiche o notizie storiche; aree interessate da faglie attive e capaci

Pericolosità sismica locale elevata (S.3): zone suscettibili di instabilità di versante quiescente che pertanto potrebbero subire una riattivazione dovuta ad effetti dinamici quali possono verificarsi in occasione di eventi sismici; zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti che possono dar luogo a cedimenti diffusi; terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione dinamica; zone di contatto tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche significativamente diverse; zone stabili suscettibili di amplificazioni locali caratterizzati da un alto contrasto di impedenza sismica atteso tra copertura e substrato rigido entro alcune decine di metri, così come definito dal livello 1 o con fattori di amplificazione superiori a 1.4 così come desunto dagli studi di MS2/3.

Pericolosità sismica locale media (S.2): zone suscettibili di instabilità di versante inattiva e che pertanto potrebbero subire una riattivazione dovuta ad effetti dinamici quali possono verificarsi in occasione di eventi sismici; zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (che non rientrano tra quelli previsti per la classe di pericolosità sismica S.3);

Pericolosità sismica locale bassa (S.1): zone stabili caratterizzate dalla presenza di litotipi assimilabili al substrato rigido in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata.

Tale processo consente di evidenziare le situazioni di criticità sulle quali porre attenzione, al fine di effettuare una corretta pianificazione, da disciplinare in maniera specifica nel piano operativo in funzione delle destinazioni d'uso previste.

Alle condizioni diversificate di pericolosità sismica locale sono, quindi, associate condizioni di fattibilità sismica egualmente diversificate, le quali prevedono approfondimenti d'indagine da attuarsi in fase di piano attuativo o, se non previsto, direttamente in fase progettuale.

Le indagini di esplorazione del sottosuolo sono, quindi, diversificate sia in termini quantitativi, sia per quanto attiene alla loro tipologia, sulla base sia del grado di pericolosità sismica locale, sia della tipologia della microzona in caso di MS di livello 1 oppure del valore del Fattore di amplificazione per quanto riguarda studi di MS di livello superiore.

Infine gli aspetti più interessanti, sono stati quelli di aver previsto, in ambito regolamentario, le seguenti specifiche:

1. limitatamente alle aree in classe di pericolosità sismica S3 e per alcune tipologie di opere, la valutazione obbligatoria dell'azione sismica (ai sensi del par.3.2 delle NTC 2018) mediante specifiche analisi di risposta sismica locale;
2. possibilità di poter utilizzare i risultati degli studi di MS3 in termini di spettri di risposta direttamente per la successiva fase di progettazione edilizia, limitatamente alle opere ordinarie e secondo quanto meglio definito di seguito

9.2 L'utilizzo dei risultati degli studi di Microzonazione Sismica per la gestione della fase di progettazione edilizia per la Regione Toscana

All'interno del regolamento regionale 5R/2020 è stata prevista la possibilità di utilizzo diretto dei risultati della microzonazione sismica di terzo livello per la progettazione di opere ordinarie.

La realizzazione di studi di microzonazione sismica di terzo livello prevede, infatti, per la stima delle amplificazioni locali, la realizzazione di adeguate analisi di risposta sismica locale. Il prodotto di output per tali analisi è solitamente costituito oltre che dai fattori di amplificazione, utilizzati per la quantificazione della minore o maggiore predisposizione dei terreni indagati all'amplificazione locale, anche da spettri di risposta elastici (caratterizzati da uno smorzamento del 5%).

In aree di studio in cui la MS3 restituisce microzone stabili con amplificazione con limitata estensione areale ed in cui è presente una dettagliata definizione dell'azione sismica sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, è possibile (in aggiunta a quanto previsto dagli ICMS) fornire per ogni microzona strumenti utili a rappresentare in quel determinato

ambito areale l'azione sismica di progetto. La metodologia (oggi operativa mediante Ordinanza n.55 nelle fasi di ricostruzione delle aree del Centro Italia colpite dai sismi del 2016) verte, quindi, sulla definizione di una procedura finalizzata alla definizione di spettri di risposta elastici, direttamente derivanti dagli studi di microzonazione sismica, da utilizzare nelle fasi progettuali successive a quella pianificatoria.

Effettuate le analisi di risposta sismica locale (tipicamente per un $T_r=475$ anni e $T_r=50$ anni) è possibile, realizzata la carta di microzonazione sismica di terzo livello, pervenire alla definizione di spettri "caratteristici", prevedendo i seguenti step:

1. Raggruppare per ogni microzona individuata (caratterizzata da un valore omogeneo del Fattore di amplificazione scelto) tutti gli spettri di risposta elastici di output ricadenti in essa, ricavandone lo spettro medio (in fig. 9.1 sono rappresentati gli spettri medi associati alle 7 microzone omogenee individuate in una MS3);
2. Operare la regolarizzazione dello spettro medio. Questa operazione permette di definire sia uno spettro di forma simile a quelli semplificati di normativa sia, di conseguenza, i suoi parametri dipendenti (**S**, **T_b** e **T_c**), mentre i parametri indipendenti sono fissati, come noto, dalla localizzazione del sito e dalle scelte progettuali alla base funzione della progettazione. La regolarizzazione dello spettro viene effettuata secondo le procedure illustrate negli ICMS 2008 e meglio specificate da Pergalani e Compagnoni (2013). In sintesi, secondo tale metodo, dallo spettro medio si ricavano i valori di **T_A** (periodo per il quale è massimo il valore in accelerazione), **S_A** (valore medio dello spettro in accelerazione per periodi compresi tra **0.5T_A** ed **1.5T_A**), **T_V** (periodo per il quale è massimo il valore in pseudovelocità), **S_V** (valore medio dello spettro in pseudovelocità per periodi compresi tra **0.8T_V** ed **1.2T_V**). Ricavati tali valori si determinerà l'estensione del plateau (tratto dello spettro con accelerazione costante) tenendo conto che **T_c = 2π*(S_V/S_A)** e **T_b = 1/3T_c**. Noti i parametri indipendenti dalle condizioni di sito (**a_g** e **T_d**) è possibile, infine, ricavare il parametro **S** come **a_{max}/a_g** dove **a_{max}** è calcolata da analisi di risposta locale. Il parametro **F₀**, indipendente dalle condizioni sismostratigrafiche del sito secondo l'approccio semplificato delle **NTC2018**, nel presente metodo viene reso, invece, dipendente dalle condizioni geologiche locali con valore pari al rapporto tra **S_A** ed **a_{max}** (accelerazione di ancoraggio dello spettro caratteristico). Lo spettro così regolarizzato è visibile in verde nell'esempio di figura 9.2, dove è messo a confronto con gli spettri semplificati di normativa (relativi alle categorie di sottosuolo B ed E) più attinenti alle condizioni sismostratigrafiche della microzona individuata nell'esempio di figura 9.2.

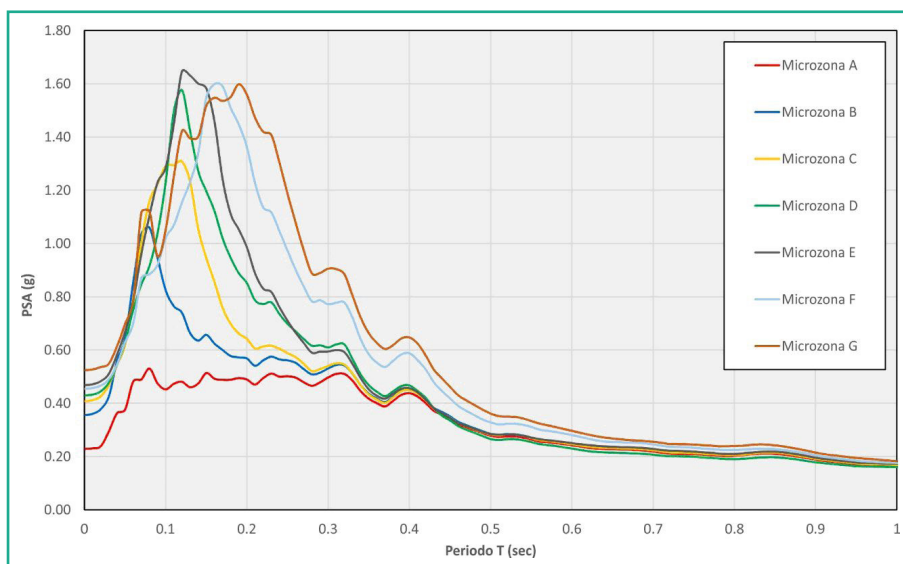


Figura 9.1– Spettri di risposta elastici medi in pseudoaccelerazione relativi alle microzone stabili suscettibili di amplificazione locale individuate nell'ambito di una MS3 nell'area del Mugello

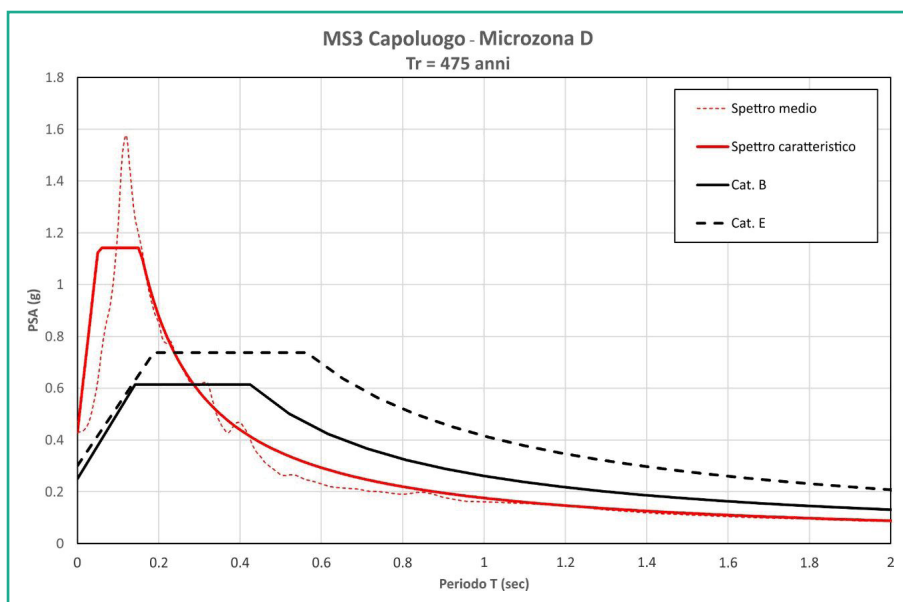


Figura 9.2– Spettro caratteristico normalizzato secondo la procedura descritta nel testo, relativo alla microzona D per un comune del Mugello e per un periodo di ritorno pari a 475 anni a confronto con gli spettri semplificati di normativa più attinenti alle caratteristiche sismostratigrafiche della microzona in oggetto

Questo spettro si riferisce ad un **periodo di ritorno di 475 anni** e, pertanto, può essere paragonato allo spettro semplificato di normativa relativo all'azione sismica per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**) per un edificio "ordinario" (Vita nominale **VN = 50 anni** e **Classe d'uso CU = II**).

Regolarizzato lo spettro è possibile produrre un file .txt (in figura 9.3 il file .txt relativo allo spettro caratteristico rappresentato in figura) in cui saranno indicati nelle prime 3 righe (header) i dati d'origine dello spettro ed i parametri indipendenti e dipendenti desunti a seguito della regolarizzazione dello spettro medio.

Oltre all'analisi "ufficiale" della MS3, caratterizzata da un periodo di ritorno tipicamente di 475 anni (come per il centro abitato di Fivizzano) ed utile per la progettazione di opere con vita nominale $V_n=50$ anni e classe d'uso II per lo Stato Limite Ultimo (usualmente Salvaguardia della Vita, **SLV**), bisognerà realizzare analoghe analisi imponendo come input sismico accelerogrammi spettro-compatibili e sismo-compatibili per periodi di ritorno propri dello Stato Limite di Esercizio (di solito Stato limite di Danno, **SLD**), che nel caso specifico corrispondono ad un **Tr=50 anni**. Operando con la medesima procedura precedentemente illustrata, sarà possibile ricavare spettri caratteristici normalizzati utilizzabili per rappresentare l'azione sismica allo SLE.

Infine, preme sottolineare alcune regole base per un corretto utilizzo degli spettri caratteristici:

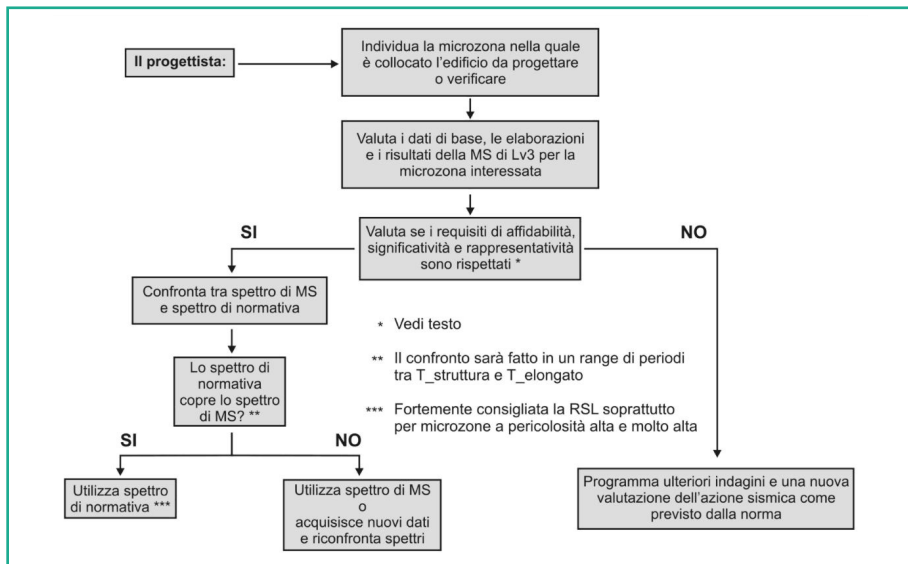
- Si ritiene opportuno che tale approccio sia consentito per progetti caratterizzati al massimo da **classe d'uso II** (opere ordinarie). Per opere caratterizzate da classe d'uso superiore (opere strategiche e rilevanti) e ricadenti in aree definite a elevata pericolosità sismica sarà necessario rendere obbligatoria la stima dell'azione sismica di progetto mediante adeguate analisi di risposta sismica locale;
- L'utilizzo degli spettri caratteristici dovrà essere vincolato alla verifica, a cura del professionista incaricato della stima dell'azione sismica di progetto, della conformità del modello di sottosuolo (in termini di affidabilità, significatività e rappresentatività delle analisi effettuate) in corrispondenza del sito di progetto con quello tipico della microzona, anche in riferimento alla quota di riferimento dell'opera in progetto (quota di imposta delle fondazioni);
- L'uso degli spettri caratteristici dovrebbe essere, inoltre, subordinato al rispetto di un indice di qualità, opportunamente definito, che valuti la qualità degli studi di livello 3 in particolare in ragione della densità e qualità delle indagini geotecniche e geofisiche utilizzate per la definizione del modello di sottosuolo. Un esempio di procedura di valutazione dell'opportunità di utilizzo degli spettri caratteristici può essere riassunta nel diagramma di flusso in figura 9.4

- Se i valori dei periodi di ritorno di progetto corrispondono a quelli utilizzati per le analisi di livello 3 sarà possibile utilizzare direttamente i dati presenti nel file .txt (fig. 9.3). In alternativa, per piccole variazioni del periodo di ritorno (ad esempio il passaggio dall'azione sismica propria dello **SLD** a quella per **SLO**), assumendo quindi lo stesso grado di non linearità nel comportamento dei terreni, si potranno utilizzare i parametri dipendenti presenti nella "header" del file testo (**S**, **F0**, **TB**, **TC**) combinandoli con i parametri indipendenti (**ag**, **TD**) propri della scelta progettuale.

Figura 9.3 –
Spettro
caratteristico
normalizzato
secondo la
procedura descritta
nel testo, relativo
alla microzona D
per un comune del
Mugello e per un
periodo di ritorno
pari a 475 anni a
confronto con gli
spettri

spettro_caratteristico_zonaD_slv - Blocco note	
File	Modifica Formato Visualizza ?
(FI) . Microzonazione sismica livello 3 - microzona D - SLV	
ag = 0.209g, F0 = 2.660, Td = 3.316	
S = 2.05, Tb = 0.051s, Tc = 0.154s	
0	0.429081
0.01	0.567962
0.02	0.706842
0.03	0.845723
0.04	0.984604
0.05	1.123485
0.06	1.141444
0.07	1.141444
0.08	1.141444
0.09	1.141444
0.1	1.141444
0.11	1.141444
0.12	1.141444
0.13	1.141444
0.14	1.141444
0.15	1.141444
0.16	1.097779
0.17	1.033203
0.18	0.975803
0.19	0.924445
0.2	0.878223
0.21	0.836403
0.22	0.798384
0.23	0.763672
0.24	0.731852
0.25	0.702578
0.26	0.675556
0.27	0.650536
0.28	0.627302
0.29	0.605671
0.3	0.585482
0.31	0.566595
0.32	0.548889
0.33	0.532256
0.34	0.516602
0.35	0.501842
0.36	0.487902
0.37	0.474715
0.38	0.462223
0.39	0.450371
0.4	0.439111
0.41	0.428401
0.42	0.418201
0.43	0.408476
0.44	0.399192
0.45	0.390321
0.46	0.381836
0.47	0.373712
0.48	0.365926
0.49	0.358458
0.5	0.351289
0.51	0.344401
0.52	0.337778
0.53	0.331405
0.54	0.325268
0.55	0.319354
0.56	0.313651
0.57	0.308148
0.58	0.302835
0.59	0.297703
0.6	0.292741
0.61	0.287942
0.62	0.283298
0.63	0.278801

Figura 9.4 –
Diagramma
di flusso della
procedura
per il possibile
utilizzo degli
spettri di risposta
caratteristici
(risultato della MS
di livello 3) nella
progettazione o
verifica degli edifici.
Da Gruppo di
Lavoro Fivizzano
(2017)



Fivizzano (MS)

Microzonazione sismica di 3°livello - SLU ($T_r=475$ anni)

Spettri caratteristici delle microzone stabili - parametri

Tabella 9.1
– Parametri
dipendenti
relativi agli
spettri di risposta
caratteristici
($T_r=475$ anni),
desunti a seguito
del processo di
normalizzazione.
Da Gruppo di
Lavoro Fivizzano
(2017)

ag = 0.200g, $T^*c = 0.279s$					
microzona	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	2.518	0.929	0.107	0.320	2.343
B	2.430	1.201	0.087	0.261	2.560
C	2.819	1.349	0.079	0.238	2.680
D	3.026	1.582	0.077	0.232	2.866
E	3.052	1.612	0.104	0.311	2.889
F	3.102	1.854	0.101	0.302	3.083
G	3.091	1.977	0.114	0.341	3.181
H	3.263	2.049	0.116	0.349	3.239
I	3.335	2.202	0.120	0.361	3.361
L	3.240	2.499	0.119	0.358	3.599

Fivizzano (MS)

Microzonazione sismica di 3°livello - SLE ($T_r=50$ anni)

Spettri caratteristici delle microzone stabili - parametri

Tabella 9.2 –
Parametri
dipendenti
relativi agli
spettri di risposta
caratteristici
($T_r=50$ anni),
desunti a seguito
del processo di
normalizzazione.
Da Gruppo di
Lavoro Fivizzano
(2017)

ag = 0.079g, $T^*c = 0.251s$					
microzona	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	2.913	0.822	0.102	0.306	1.860
B	2.661	1.090	0.089	0.266	1.945
C	3.186	1.294	0.072	0.217	2.009
D	3.346	1.569	0.072	0.215	2.096
E	3.334	1.639	0.084	0.251	2.118
F	3.346	1.856	0.086	0.257	2.186
G	3.421	1.959	0.091	0.274	2.219
H	3.441	2.001	0.100	0.300	2.232
I	3.449	2.143	0.104	0.312	2.277
L	3.392	2.344	0.103	0.308	2.341

La progettazione di opere ricadenti in **classe d'uso I e II** ai sensi delle NTC 2018, caratterizzate da uno stato limite corrispondente ad un medesimo periodo di ritorno dello spettro rappresentativo, può avvalersi direttamente di tale spettro, previa verifica della maggior cautela, stabilita in base al valore di accelerazione spettrale per il/i periodo/i di interesse dell'opera, rispetto a quanto ricavabile in termini di spettro di risposta elastico dall'applicazione delle categorie semplificate di sottosuolo. Andrà comunque sempre verificata la reale corrispondenza delle condizioni geologico-tecniche del sito rispetto al contesto riportato nello studio di MS.

La normalizzazione di uno spettro di risposta permette la determinazione immediata di tutti i parametri (dipendenti ed indipendenti) che ne caratterizzano l'aspetto. Nelle tabelle 9.1 e 9.2 sono riportati i parametri per **SLV (Tr=475 anni)** e **SLD (Tr=50 anni)** relativi alla MS3 di Fivizzano (MS).

La Banca dati geografica

Niccolò Iandelli⁽¹⁾, Daniele Giomarelli⁽²⁾ & Pio Positano⁽²⁾

⁽¹⁾*Università di Firenze – Dip.to di Scienze della Terra (DST)*

⁽²⁾*Regione Toscana – Settore Sismica – Prevenzione Sismica*

10.1 La creazione della banca dati

Ai fini della redazione dello studio di Microzonazione Sismica assume particolare importanza la raccolta, l'analisi e la strutturazione di una banca dati che funga da base conoscitiva per le considerazioni, rappresentazioni ed interpretazioni proprie dello studio. Tale importanza è evidente anche negli Standard di Rappresentazione redatti dalla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, che ne descrive minuziosamente le caratteristiche strutturali e tecniche, in termini di modello concettuale e logico.

Nell'area fiorentina, le istituzioni ed gli enti che sono in qualsiasi ruolo coinvolte nella sua gestione e sviluppo, hanno prodotto, mantenuto e sviluppato diverse banche dati alcune anche da lungo periodo (oltre 20 anni). Per lo studio di Microzonazione Sismica, sono stati raccolti tutti i dati pertinenti presenti e disponibili nelle diverse banche dati, in particolare sono state impiegate la banca dati del DST, del Comune di Firenze, Città Metropolitana, Regione Toscana e ISPRA, andando a selezionare quelle informazioni necessarie per la ricostruzione del modello geologico e sismico e privilegiando le strutture dati che fossero quanto più simili a quanto richiesto dagli Standard. Tali quadri conoscitivi hanno riguardato le indagini geognostiche, le indagini geofisiche, l'identificazione delle aree di instabilità, i rilievi di superficie sviluppati nei diversi progetti che hanno interessato il territorio, le ricostruzioni paleogeografiche prodotte per studi precedenti oltre alle informazioni su pozzi profondi e studi idrogeologici. L'insieme dei dati e informazioni raccolte sono state "modellate" come richiesto dalla struttura informativa proposta dagli Standard e inseriti nella Banca Dati a corredo dello Studio di Microzonazione Sismica secondo le modalità richieste. Tale sistemazione è stata effettuata attraverso delle operazioni armonizzazione e conversione del dato originale.

Oltre alla migrazione del dato dalle diverse fonti, un'operazione importante ha riguardato la conversione del sistema di riferimento dalla BD di origine al sistema richiesto dagli standard. Tale operazione ha generato diversi problemi, causati principalmente dalla differenza di datum di origine e destinazione, che hanno obbligato spesso ad una verifica puntuale del posizionamento per ripristinare l'informazione di posizionamento corretta.

Il risultato ottenuto è una base significativa di conoscenza che consente di affermare di aver superato la fase conoscitiva dell'incertezza epistemica, arrivando a definire una tipologia rappresentativa e significativa di distribuzione dei dati e di valenza dei modelli sviluppati. La Banca Dati (di seguito BD) realizzata per il sottosuolo fiorentino dall'insieme dei dati disponibili è da considerarsi consistente e ha permesso di arrivare ad elaborazioni tematiche e cartografiche attendibili, lasciando quindi a successive indagini a carattere puntuale e locale, il superamento dell'incertezza aleatoria insito nella modellazione geologica.

Tutti i dati sono stati trattati e gestiti all'interno di una banca dati geografica costituita da un insieme di dati geografici fra loro correlati e riferiti alla medesima area geografica, organizzati per uno scopo univoco, e inquadrati in un unico sistema di riferimento. A tal proposito si ricorda che un dato o un'informazione vengono definiti geografico o georiferiti quando possono essere associati a un luogo sulla superficie terrestre mediante l'attribuzione di una coppia di coordinate (latitudine, longitudine).

Le complessità principali hanno riguardato le procedure di conversione e omogeneizzazione a cui sono stati sottoposti i dati che, provenendo da BD diverse, sono stati elaborati e modificati al fine di rispondere ai requisiti richiesti. Le operazioni principali sono state automatizzate attraverso routine sulle banche dati, svolte con software GIS (Sistemi Informativi Geografici) o DBMS (Data Base Management System).

Le operazioni principali hanno spaziato dalla necessità di cambio di formato, al cambio di unità di misura, alla conversione sino al riordino dell'ordine dei campi, oltre alla necessità di mantenere la tracciabilità dell'origine del dato, che permettesse di effettuare delle verifiche. L'insieme di tali dati e le interpretazioni geologiche, geologico tecniche e sismiche, realizzate nell'ambito delle collaborazioni svolte tra Comune e DST sono quindi state allineate alle specifiche tecniche ed agli standard di riferimento previsti per lo studio di Microzonazione Sismica secondo le indicazioni della struttura Servizio Sismico regionale, e si riferiscono ai seguenti documenti:

- Indirizzi e Criteri di Microzonazione Sismica del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (ICMS), approvati il 13 Novembre 2008 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome;
- Specifiche tecniche regionali: Edizione n. 6 – approvata con D.G.R.T. n.1162/2018;
- Istruzioni Tecniche per le indagini geologico-tecniche, geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche, finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana, Programma VEL Toscana – D.G.R.T. n. 1343 del 18 dicembre 2000 e s.m.i.
- Standard di rappresentazione e archiviazione informatica per la Microzonazione Sismica – Commissione Tecnica per la microzonazione sismica – Versione 4.1 - ottobre 2017

I risultati ottenuti soddisfano appieno le specifiche ed i requisiti richiesti dalla normativa riguardo alla realizzazione di carte di microzonazione sismica di 1°, 2° e 3° livello.

10.2 Banca dati delle indagini

Elemento base per la realizzazione del presente studio è stata l'esistenza e disponibilità della banca dati geognostica del sottosuolo, sviluppata negli ultimi 20 nell'ambito delle diverse collaborazioni tra Comune di Firenze e Dipartimento di Scienze della Terra e basata sull'insieme di tutte le indagini svolte sul territorio comunale in disponibilità pubblica.

Tale banca dati comprende anche quanto derivante da indagini appositamente eseguite per interventi infrastrutturali (sondaggi, sismica, down-hole e cross-hole per i progetti Tramvia, TAV, Circonvallazione nord etc..) a cui si aggiungono le informazioni idrogeologiche sui pozzi per emungimento e le indagini profonde provenienti da ISPRA.

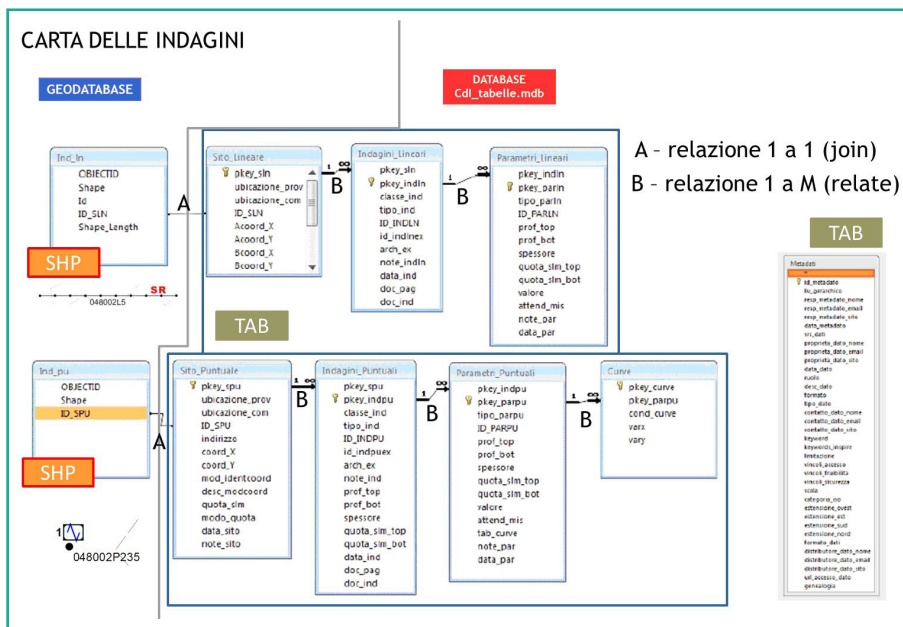
I dati disponibili risultano equidistribuiti nel territorio ed arrivano a coprire tutte le unità geologiche e geologico-tecniche presenti, la loro elaborazione ha quindi consentito di popolare adeguatamente la BD di riferimento a livello comunale (Coli et al., 2017) e per le singole aree di zonazione sismica con le varie informazioni richieste dalla normativa.

Complessivamente la BD delle indagini (fig.10.1) realizzata per il presente progetto, in base ai dati disponibili, contiene:

Livello Informativo	Quantità	Descrizione
Sito Puntuale	2043	Punti di indagine complessivi
Indagini Puntuali	3284	Indagini puntuali di tipo: EL, GF, GG, GL, GS, IG
Parametri Puntuali	13693w	Parametri puntuali di tipo: AR, C, CP, CU, E, F1, FR, G, GH, IP, L, LID, LM, PT, PV, SA, SG, VP, VS, W
Sito Lineare	42	Indagini di tipo lineare
Indagini Lineari	42	Indagini Lineari di tipo: MASW, SGE, SR
Parametri Lineari	137	Parametri lineari di tipo: VS

La struttura della BD delle indagini è una classica struttura dati che prevede una serie di relazioni tra gli oggetti geografici e i corrispondenti dati/informazioni, relazioni che assumono un carattere diverso in base alle informazioni da registrare all'interno della BD.

Figura 10.1 –
modello
delle relazioni
del geodatabase
relazionale
afferrite alla carta
delle indagini.



In particolare l'aspetto geografico delle indagini, geometria punto per le indagini puntuali e geometria linea per le indagini lineari, è legata ad una serie di informazioni alfanumeriche e numeriche da una relazione uno a uno (vedi figura 10.2), tale relazione unisce il punto o la linea con la tabella Sito Lineare o Sito Puntuale. A partire da questo collegamento sono asso-

Figura 10.2 a) –
schema strutturale
degli strati
informativi indagini
lineari

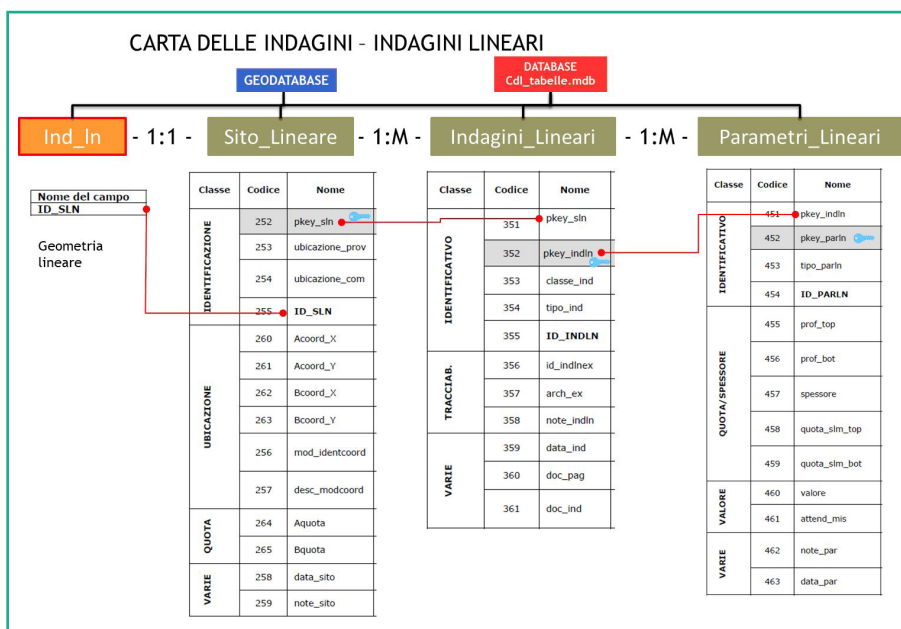
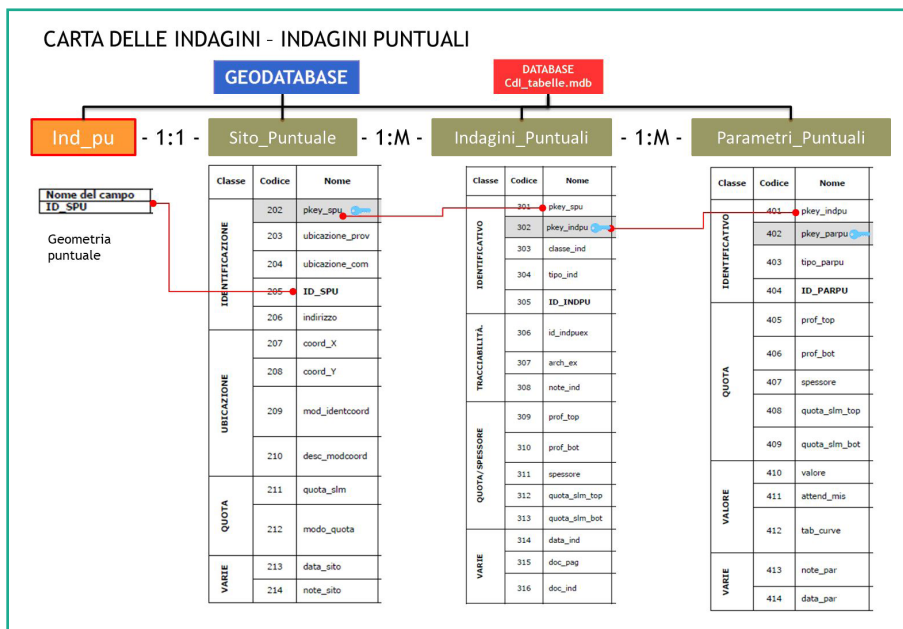


Figura 10.2 b) –
schema strutturale
degli strati
informativi indagini
puntuali.



ciate ad un Sito Lineare o ad un Sito Puntuale, una o più Indagini (Puntuali o Lineari a seconda della tipologia) attraverso una relazione di uno a molti. Ogni Indagine puntuale o lineare, può generare una serie di Parametri (anche questi puntuali o lineari) linkati all'indagine anche in questo caso attraverso relazioni uno a molti.

10.3 Banche dati delle elaborazioni cartografiche

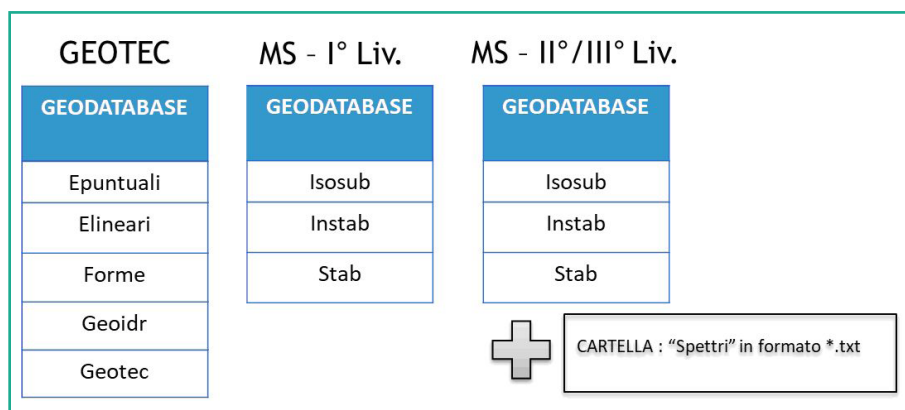
Oltre alla banca dati delle indagini sono state prodotte tutte le banche dati geografiche afferenti ai diversi elaborati richiesti dallo studio, nello specifico:

- BD Geodr, base informativa per la Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica.
- BD MS I°, base informativa per la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica
- BD MS II° e DB MS III°, base informativa per la Carta di Microzonazione Sismica, rispettivamente di II° e III° Livello.

Ogni BD geografica realizzata è stata realizzata attraverso la creazione di una banca dati geografica vettoriale archiviata in diversi geodatabase, ognuno dei quali ha al suo interno diverse Feature class che rappresentano diverse tabelle che sono i diversi livelli informativi che compongono la cartografia prodotta.

Uno schema di sintesi è rappresentato nell'immagine seguente (Fig.10.3).

*Figura 10.3 –
Livelli informativi
presenti nei diversi
geodatabase.*



La presenza di geometrie poligonali in alcuni livelli informativi ha obbligato ad un attento controllo topologico delle relazioni tra gli oggetti cartografati al fine di garantire la correttezza geometrica degli oggetti stessi.

Ognuno degli oggetti cartografici GIS presenti nelle diverse banche dati deve rispondere a delle caratteristiche strutturali che secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica e a cui si rimanda per i dettagli.

Elementi di criticità dello studio e approfondimenti futuri

Massimo Baglione⁽¹⁾

⁽¹⁾*Regione Toscana – Settore Sismica – Prevenzione Sismica*

Lo studio di Microzonazione Sismica del Comune di Firenze, ha subito notevoli modifiche e miglioramenti a partire dalla preliminare stesura del 2014 ad oggi.

Nel corso degli anni, infatti, sono stati apportati dal DST dell'Università di Firenze numerosi aggiornamenti, sia in relazione all'implementazione del quadro conoscitivo, sia sotto il profilo degli standard di rappresentazione e di archiviazione informatica dei dati.

Sono stati infatti acquisiti ulteriori indagini esistenti sul territorio e/o realizzate ad hoc per lo studio in oggetto e questi hanno certamente consentito un netto miglioramento del modello geologico-tecnico di sottosuolo alla base dello studio rispetto alla prima stesura del 2014.

Inoltre le indicazioni fornite dalla Regione Toscana nel corso della lunga e impegnativa attività istruttoria hanno consentito un ulteriore approfondimento sotto il profilo metodologico anche per rendere lo studio omogeneo e in linea con gli standard nazionali.

Tutto ciò ha permesso di realizzare uno studio di MS di livello 1, 2 e 3 particolarmente affidabile e di interesse anche sul piano nazionale, oltre che ovviamente di diretto utilizzo per la pianificazione territoriale.

Di seguito, tuttavia, si intende riassumere quali siano, a nostro avviso, i peculiari aspetti dello studio che potrebbero essere ulteriormente migliorati e approfonditi in ottica futura.

Lo studio di MS, infatti, pur rappresentando la sintesi di un lungo processo di implementazione dei dati, omogeneizzazione dei risultati, approfondimenti successivi e opportune calibrazioni del modello, presenta alcune importanti elementi di criticità che si intendono di seguito riassumere.

11.1 Modello geologico-tecnico

Questo è uno degli aspetti più interessanti, ma anche più rilevanti dello studio.

Il modello geologico-tecnico di sottosuolo di Firenze è indubbiamente particolarmente complesso per la presenza di corpi sedimentari con elevata variabilità di facies sia in senso verticale che laterale, con passaggi eteropici e discontinuità dovute ai successivi meccanismi di depositi in ambienti differenti (lacustri, lacustro-palustri, fluvio-lacustri, fluviali, di conoide,

ecc...). Per tali motivazioni, la sua rappresentazione, nonostante la buona mole di dati di base, non è stata facile ed è stato necessario apportare delle semplificazioni. Per questo si è passati da una carta litologica, come quella redatta nella prima fase del 2014, particolarmente dettagliata, ma valida esclusivamente in superficie (in quanto considerava solo la litologia prevalente in superficie) ad una cartografia geologico-tecnica (CGT) per la Microzonazione Sismica impostata con la finalità di poter indirizzare la ricostruzione del modello anche nel sottosuolo, mediante la redazione delle relative sezioni geologico-tecniche rappresentative. Ciò ha comportato, forzatamente, una notevole semplificazione del modello, mediante l'accorpamento ragionato di unità stratigrafiche diverse sulla base della litologia prevalente: i depositi alluvionali recenti (DR) ed antichi (DA) sono stati assimilati a materiali prevalentemente granulari (GP/GC o SW/SM), mentre i depositi fluvio-lacustri di bacino (FPT) sono stati assimilati a materiali prevalentemente coesivi (CL). Questa è ovviamente una forte semplificazione, peraltro vincolata dalla scelta di suddividere le unità fluvio-lacustri secondo i criteri UBSU (Unità Stratigrafiche a Limiti Inconformi) e non USCS (Unified Soil Classification System).

Infatti, dal punto di vista dell'amplificazione sismica, i depositi antichi presentano spesso un comportamento nettamente differente dai depositi recenti sovrastanti e inoltre la presenza estesa di lenti e/o livelli di ghiaia (eventualmente cementata) all'interno dell'unità prevalentemente argillosa dei depositi fluvio-lacustri, pare possa influenzare in modo non trascurabile la risposta sismica in superficie.

Apprezzabile e' stato il tentativo di ricostruzione paleogeografica dell'area fiorentina che ha certamente consentito di interpretare in modo ottimale gli ambienti in cui si sono originati i depositi e ricostruire in modo preciso l'estensione dei depositi relativi al paleoarno. Anche da questo punto di vista, potrebbe essere utile un ulteriore approfondimento finalizzato in particolare alla ricostruzione dettagliata dei paleoalvei dei torrenti minori esistenti (Terzolle, Mugnone, Ema) e di quelli tombati (Affrico); vi sono infatti numerose pubblicazioni al riguardo e anche alcune tesi di laurea specifiche.

11.2 Ricostruzione dell'andamento del substrato roccioso/bedrock sismico

Si ritiene che la stima della profondità del substrato roccioso (bedrock sismico), pur ritenendola assolutamente coerente con i dati disponibili e quindi sufficientemente affidabile in linea generale, possa essere però ulteriormente approfondita.

Infatti si rileva come i dati diretti (sondaggi e/o pozzi con stratigrafia) che individuano il substrato roccioso più in profondità, oltre i 30m, che sono stati utilizzati per la ricostruzione del modello sepolto, siano pochi (solo 31) e addirittura solo 1 di essi (in particolare quello realizzato per il Museo dell'Accademia) dispone anche della prova down-hole in foro spinta all'in-

terno del substrato roccioso in modo da poter avere una affidabile stima delle Vs del bedrock sismico. Quindi la parametrizzazione geofisica media del substrato, utilizzata per tutte le analisi 1D-2D e riportata in Tab.7.1 è mediata esclusivamente su una singola prova DH (per le aree con profondità del substrato roccioso superiore a 30m) e su 6 prove DH (per le aree con profondità del substrato roccioso inferiore a 30m).

Inoltre anche i dati indiretti (indagini sismiche) presenti non consentono una ricostruzione attendibile, in quanto quasi mai raggiungono il substrato sismico. Le uniche prove, grazie alle quali è stato possibile effettuare questa ricostruzione, sono le misure HVSR che però, oltre ad essere speditive, non consentono un dettaglio affidabile. Non sono infine disponibili prove ESAC e/o indagini di sismica a riflessione o di sismica a rifrazione con lunghezza di stendimento elevata, che avrebbero rappresentato, invece, affidabili metodologie seppur di tipo indiretto per la ricostruzione del profilo delle Vs in profondità e quindi una potenziale stima anche della profondità del bedrock sismico.

Peraltro, mentre si ha una conoscenza sufficientemente dettagliata delle tipologie di substrato roccioso presente lungo i versanti bordieri del bacino (in cui affiorano estesamente le formazioni della "Pietraforte", "Sillano", "Macigno" e "Monte Morello"), non è invece certa la tipologia di substrato roccioso sepolto, presente al di sotto del bacino sedimentario e questo implica alcune incertezze nella definizione dei parametri dinamici (in particolare le velocità sismiche) per le analisi della risposta sismica locale.

Per tali motivazioni, aggiunte ad un complesso andamento del tetto del substrato roccioso nella porzione orientale del capoluogo (ad est della faglia di Castello-Scandicci) che influisce non poco nella risposta sismica locale in chiave 2D, si ritiene che tale ricostruzione potrebbe essere suscettibile di ulteriori miglioramenti in futuro qualora si disponesse di una serie di sondaggi a c.c. profondi con relativa prova down-hole opportunamente integrati con prove ESAC, ulteriori misure di rumore HVSR e indagini di sismica a riflessione ubicate trasversalmente nel bacino fiorentino.

11.3 Ricostruzione del modello geofisico di sottosuolo

Anche questo aspetto merita una puntuale sintesi.

In aggiunta alle valutazioni di cui al punto precedente, si ritiene che anche la ricostruzione del modello geofisico possa essere ulteriormente approfondita.

Infatti tale ricostruzione è stata inizialmente basata sulle 52 misure di rumore condotte dal DST (peraltro di ottima qualità, ma purtroppo poco numerose) e sulle 47 prove down-hole e cross-hole eseguite (di cui però solo 7 raggiungono il substrato roccioso e rispettivamente 6 entro i 30m e 1 oltre i 30m di profondità), mentre le poche indagini di sismica a rifrazione non sono state utilizzate perché realizzate tutte con onde P e le prove MASW spesso non sono di ottima qualità.

La parametrizzazione geofisica, visibile nella tab 7.1, è stata quindi stimata esclusivamente sulle prove geofisiche in foro con il vantaggio che esse forniscono una stima di sicura affidabilità, di elevato dettaglio e omogenee, ma di contro rappresentano solo una stima puntuale e quindi meno estendibile arealmente come per altre tipologie di indagini (quali ad esempio le indagini di sismica a rifrazione). Osservando infatti la fig.3.12 e tabella 3.5, si nota infatti come possa essere condivisibile aver accorpato i depositi alluvionali recenti granulari (Dr_a) e coesivi (Dr_b) vista la poca differenza di Vs, mentre alcune perplessità restano in merito alla scelta di accorpare unità afferenti ai depositi antichi (Da_a e Da_b) e alle unità Fluvio-lacustri (FPT_a; FPT_b; FPT_c) che, a nostro avviso, potrebbero mostrare delle differenze, anche non trascurabili, in termini di Vs, ma che con i dati e le conoscenze a disposizione non è stato possibile evidenziare ed approfondire.

Un altro aspetto molto interessante che si intende rilevare su questo argomento, è emerso a seguito dell'acquisizione e utilizzo delle ulteriori 154 misure di rumore HVSr acquisite da un precedente studio (D'Amico et alii 2016) condotte dall'Università di Siena e preventivamente acquisite dalla Regione Toscana e rese disponibili per il presente studio. Tali misure, hanno evidenziato alcuni elementi di interesse e di assoluta novità quali:

- L'area di bordo del bacino presenta valori di frequenze assolutamente compatibili con l'interfaccia risonante del substrato roccioso;
- L'area di Novoli/Peretola presenta frequenze sempre costantemente inferiori a 1Hz e quindi in perfetto accordo con gli spessori del pacchetto di copertura;
- Tutta l'area del centro storico compresa l'area dei viali di circonvallazione presenta un elemento molto interessante da tener in considerazione. Per quest'area, infatti, le frequenze fondamentali, variabili tra 3 e 5Hz, non si associano sempre al passaggio al substrato roccioso che appare spesso più profondo, ma ad un passaggio più superficiale, ma estremamente significativo in termini di impedenza, che potrebbe corrispondere alla presenza di depositi particolarmente addensati di paleoalveo dell'Arno e che localmente costituiscono l'interfaccia risonante dell'area.

Si noti, infatti, in fig.11.1 l'area centrale con retino obliquo rosso per le quali le frequenze fondamentali (variabili tra 3 e 5 Hz) presentano anche significative ampiezze (sempre superiori a 3). Tale area è quasi coincidente con la perimetrazione dei depositi di paleoalveo rappresentata in fig.2.8 e riportata nella cartografia MOPS con la sigla "2009".

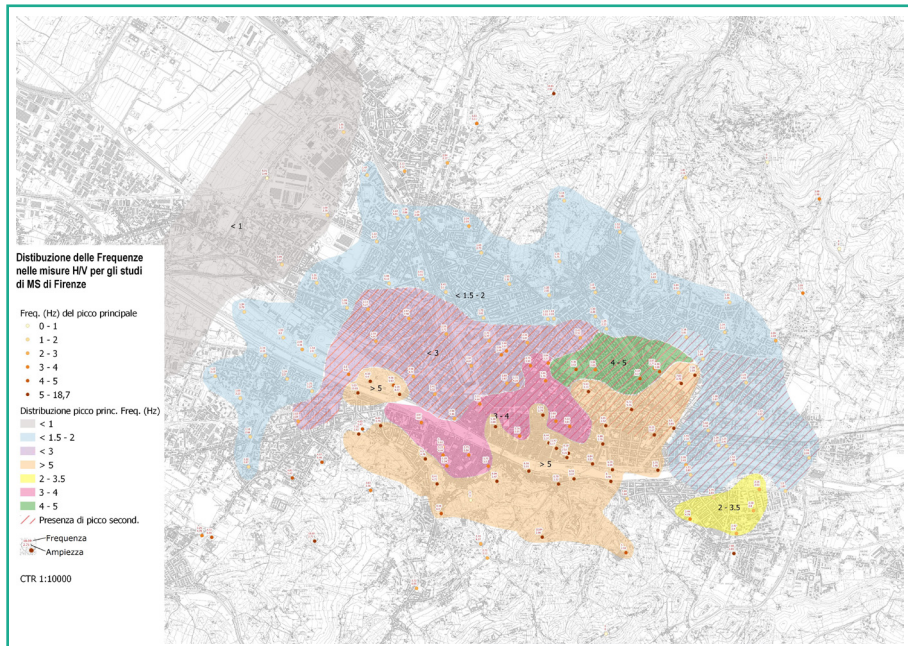


Figura 11.1 – Perimetrazione della macroaree suddivise in base alle frequenze fondamentali relative alle misure di rumore HVSR e nello specifico sono indicate le aree con frequenza inferiore a 1Hz (in colore bianco), con frequenza compresa tra 1.5-2 Hz (in colore celeste), con frequenza tra 2 e 3 Hz (in colore viola chiaro), con frequenza tra 3 e 4 Hz (in colore viola), con frequenza tra 4 e 5 Hz (in colore verde) e con frequenza maggiore di 5 Hz (in marroncino). Inoltre si riporta un'area particolare con frequenza tra 2 e 3.5 Hz associabile ad un contrasto significativo con un differente substrato roccioso (in colore giallo) e un'area (con retinatura obliqua rossa) in cui e' presente un significativo contrasto di impedenza non associabile al passaggio al substrato roccioso.

Questo aspetto, relativo alla presenza di un orizzonte risonante importante e più superficiale nell'area del centro storico (coincidente con i depositi antichi - Da), è stato tenuto in debito conto sia nelle stime dei fattori di amplificazione sismica (desunti da abachi) per la stesura delle cartografie di livello 2, sia per le analisi 2D finalizzate alla stesura delle mappe di livello 3.

Tuttavia, risulterebbe da chiarire meglio, come mai i parametri relativi alla Vs utilizzati per le analisi 2D relativamente ai depositi antichi (Da) e ai depositi fluvio-lacustri (FPT) così come visibili in fig.3.12 e tabella 3.5, siano sostanzialmente identici (intorno a 600 m/sec), nonostante vi siano una drastica differenza in termini di risposta al suolo, come emerge dalle misure di rumore (sia quelle del DST dell'Università di Firenze che quelle di D'Amico et alii, 2006) per le quali il cambiamento è invece drastico, tra le aree in cui sono presenti i depositi antichi (per le quali vi sono indicazioni

che suggeriscono forti contrasti in superficie) e le aree in cui tali depositi sono assenti o poco rappresentativi (per le quali sono evidenti solo contrasti di impedenza profondi associabili al substrato). Tale aspetto dovrebbe essere ulteriormente approfondito in futuro.

Infine, altre considerazioni interessanti scaturiscono dall'esame dei picchi secondari delle misure di rumore, che sono quasi sempre presenti nell'area e che si aggirano intorno a 10-12Hz in linea con il passaggio tra i depositi alluvionali e i depositi fluvio-lacustri.

Inoltre nell'area di Novoli/Peretola tale passaggio appare con uno spessore decisamente maggiore (dell'ordine di 30-40m) in quanto le frequenze dei picchi secondari passano improvvisamente da 10-12Hz a circa 2-4Hz. Questo aspetto potrebbe anche essere legato con la fase tettonica connessa alla struttura Castello-Scandicci. Ma è solo un'ipotesi da approfondire ulteriormente.

(1) Infatti per questo contesto è stato utilizzato l'abaco con spessore dell'interfaccia risonante (bedrock sismico) inferiore a 30m anche se il substrato roccioso risultava ben superiore a tale soglia.

Le analisi delle Condizioni Limite per l'emergenza

Barbara Paoletti⁽¹⁾, Luca Ciarleglio⁽²⁾, Marco Tanganelli⁽¹⁾

⁽¹⁾*Università di Firenze - Dipartimento di Architettura*

⁽²⁾*Servizio Protezione Civile - Comune di Firenze*

12.1 Il Servizio Nazionale di Protezione Civile e la pianificazione dell'emergenza

Il terremoto di Messina e Reggio Calabria che il 28 dicembre del 1908 provocò fra le 90.000 e le 120.000 vittime, vide l'introduzione nel Regno d'Italia della prima normativa e classificazione antisismica del territorio e per l'imponente mobilitazione delle associazioni di volontariato a fronte di un'iniziale grave inefficienza nell'invio di soccorsi può essere considerato il primo intervento di protezione civile su scala nazionale.

Saranno purtroppo necessari ancora molti decenni, calamità e lacune burocratiche e operative come nell'alluvione di Firenze del 1966 e nel catastrofico terremoto del Belice per un primo quadro operativo complessivo di protezione civile, delineato solo con la legge n. 996 dell'8 dicembre 1970 recante "Norme sul soccorso e l'assistenza alle popolazioni colpite da calamità - Protezione Civile". Le tematiche affrontate dal testo normativo, totalmente incentrato nel disciplinare e favorire la prontezza dell'azione di soccorso nell'immediato post evento poneva come nodo centrale il superamento del momento dell'emergenza, riguardavano la definizione dei compiti fondamentali, la razionalizzazione nel coordinamento e nell'organizzazione degli interventi l'attività del volontariato la disseminazione sul territorio e l'assetto direttivo nazionale con ai vertici il Ministero dei Lavori Pubblici e il Ministero dell'Interno.

Purtroppo, la lentezza della macchina amministrativa ha fatto sì che le norme di attuazione venissero approvate solo nel 1981 a seguito di ulteriori gravi catastrofi quali i terremoti del 1976 e del 1980 in Friuli e Irpinia, dove si registrano rispettivamente 976 e 2570 vittime, gravi lentezze e assenza di coordinamento nell'azione dei soccorsi. Per l'Irpinia in particolare, la gestione dell'emergenza del tutto fallimentare evidenziò la necessità di politiche di previsione e prevenzione del rischio.

Per l'istituzione del Dipartimento della Protezione Civile e un commissario permanente si dovrà attendere il 1982. Afferente alla Presidenza del Consiglio, al neonato Dipartimento furono attribuite attività di previsione e prevenzione delle emergenze, attuazione dei piani nazionali e territoriali di protezione civile, l'organizzazione e il coordinamento dei soccorsi e il sostegno al volontariato. Tutto questo in assenza di una esaustiva e defi-

nitiva riforma che avrà luogo con la Legge 225 del 1992 e l'istituzione del Servizio Nazionale di Protezione Civile.

Per la prima volta si vide delineare uno schema organico con una suddivisione precisa di ruoli e competenze, oltre al soccorso e alle azioni necessarie al superamento dell'emergenza, viene inserita fra le competenze del Servizio anche l'attività di previsione e prevenzione, con l'individuazione dei possibili rischi presenti sul territorio accompagnata dalla definizione dei relativi scenari di danno e la messa in campo di politiche di mitigazione e contenimento del danno in caso di calamità naturale.

La definizione dell'organigramma di struttura di Protezione Civile sul territorio fu accompagnata dall'introduzione del concetto di pianificazione di emergenza prevista ai vari livelli amministrativi, intesa come l'insieme delle procedure operative di intervento per fronteggiare una qualsiasi calamità attesa in un determinato territorio.

Rimanevano comunque in essere lacune ai vari livelli amministrativi, mentre per i livelli superiori, Stato e Regione, era prevista la sola emanazione di programmi di previsione e prevenzione del rischio, fisicamente il piano di emergenza era previsto al solo livello provinciale e risultava facoltativo per le municipalità.

Mentre con la legge 225/92 in ambito di pianificazione le funzioni spettanti a Stato, Regioni e Province furono attribuite con chiarezza, solo successivamente con il decreto legislativo n.112 del 1998 che definì in dettaglio i compiti afferenti alle amministrazioni comunali. Quest'ultimo attuativo della legge Bassanini di riordino delle funzioni amministrative statali, implicò il trasferimento di competenze statali a Regioni e autonomie locali quali la presa in carico della predisposizione dei piani comunali e/o intercomunali di emergenza.

L'esigenza di unitarietà di linguaggio e procedure vede l'adozione da parte del Dipartimento della Protezione Civile di un nuovo strumento di riferimento per la pianificazione nel campo delle emergenze, il cosiddetto Metodo Augustus, derivato dai Disaster Preparedness, i protocolli di previsione e adozione di misure precauzionali adottati dall'ONU.

L'O.P.C.M. 3274/2003 recante Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, emanato in seguito al tragico evento sismico che colpì il Molise nel 2002, andò ad interessare profondamente la gestione dell'emergenza includendo l'obbligo di verifica sismica per gli edifici e infrastrutture strategiche e rilevanti ai fini di protezione civile. Di fronte al sisma che nella notte del 6 aprile del 2009 colpì il territorio con un ulteriore tragico bilancio si tornerà di nuovo a parlare di prevenzione

del rischio sismico con l'istituzione di un Fondo economico a incentivare studi sull'effettiva pericolosità del territorio e alla predisposizione della pianificazione di emergenza e interventi di mitigazione del rischio (Piano nazionale per la prevenzione del rischio sismico). Le istanze sono introdotte con il decreto-legge n.39 del 2009 tradotto successivamente nella legge 77/2009 ed emanate con una prima ordinanza il 13 dicembre 2010 con l'OPCM n. 3907 che regola l'utilizzo degli stanziamenti economici messi a disposizione e destinandoli a:

- a) indagini di microzonazione sismica (MS), per definire le aree soggette ad amplificazioni dello scuotimento sismico o deformazioni permanenti del suolo in caso di terremoto;
- b) interventi di rafforzamento locale o miglioramento sismico o, eventualmente, demolizione/ ricostruzione su edifici ed opere pubbliche d'interesse strategico per finalità di protezione civile e/o rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso;
- c) interventi strutturali di rafforzamento locale o miglioramento sismico o di demolizione/ ricostruzione su edifici privati; d) altri interventi urgenti e indifferibili per la mitigazione del rischio sismico, riservati a infrastrutture (es. ponti, viadotti) di interesse strategico in caso di emergenza.

(Manuale per l'analisi della CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA dell'insediamento urbano)

In ambito di pianificazione d'emergenza con l'opcm n. 4007 del 29 febbraio 2012, è introdotta l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) da redigere in concomitanza con la Microzonazione Sismica (MS), con il fine la mitigazione del rischio sismico e una maggior efficienza nella gestione dell'emergenza.

La Legge 100 del 12 luglio del 2012 ridefinì le competenze della Protezione civile ricondotte ai dettami della legge 225/1992, specificando il suo ruolo di primo piano nella previsione e prevenzione degli effetti dovuti a calamità ambientali, soccorso alle popolazioni e azione volta al superamento dell'emergenza. A livello comunale è mantenuta la funzione di autorità di protezione civile spettante al sindaco e l'aggiornamento periodico dei piani di emergenza, alle municipalità che ne risultassero sprovviste è imposta la dotazione entro novanta giorni dall'entrata in vigore della legge.

I decreti-legge in materia di protezione civile finora trattati sono stati oggi sostituiti dal D.L. n. 1 del 2018 che ha definitivamente disciplinato il Servizio Nazionale introducendo il Codice della Protezione Civile. Un testo normativo destinato a semplificare e a mettere ordine in materia di protezione civile viste le varie stratificazioni normative che nel corso del tempo hanno modificato la legge 225/1992. I temi salienti oggetto della riforma sono l'attività di previsione e prevenzione, la gestione delle emergenze nazionali e la durata dello stato di emergenza, la pianificazione di protezione

civile, i rischi di cui si occupa, il ruolo della comunità scientifica, i centri di competenza e la partecipazione dei cittadini alle attività di protezione civile. In ambito di pianificazione, è ribadita la necessità di superamento della "concezione compilativa" già avviata con l'introduzione della CLE in favore di una visione più evoluta basata sulla definizione di scenari di rischio e sul contributo della comunità scientifica.

Il "Codice della protezione civile" identifica i seguenti livelli di pianificazione:

- Nazionale;
- Regionale;
- Provinciale/città metropolitana/area vasta;
- Ambito territoriale e organizzativo ottimale;
- Comunale.

La pianificazione di protezione civile ad ogni livello comporta:

- La previsione dei rischi incombenti sul territorio ovvero la definizione di scenari di rischio;
- L'attività di prevenzione, che ha lo scopo di evitare o ridurre al minimo i danni e le conseguenze di una calamità naturale come, per esempio, adottando le norme antisismiche nella costruzione degli edifici in zona sismica;
- La gestione dell'emergenza;
- Il superamento dell'emergenza.

Il Piano di Protezione Civile (PPC) è un piano di emergenza, uno strumento urbanistico e operativo che non solo localizza le strutture di protezione civile ma include le procedure operative di intervento per fronteggiare una qualsiasi calamità.

Di fondamento alla pianificazione della gestione dell'emergenza ad ogni livello, dalle Regioni ai Comuni vi è l'individuazione dei potenziali rischi incombenti sul territorio, obiettivo primario del Dipartimento di Protezione Civile. Pianificare e programmare ad ogni livello con gli stessi intenti e criteri consente di sviluppare un sistema integrato fra i diversi enti e amministrazioni, i PPC regionali, provinciali e di ambito perseguono tutti l'obiettivo di coordinare a cascata l'azione sul territorio.

Il PPC regionale recepisce gli indirizzi del coordinamento nazionale e stabilisce criteri e modalità di intervento, a seguire il livello provinciale e di ambito a loro volta supportano coadiuvando i comuni, ottimizzando al meglio gli aspetti della comunicazione e la gestione delle risorse disponibili. Ai diversi livelli territoriali il PPC è costituito da:

- L'introduzione;
- L'inquadramento del territorio:
Caratterizzazione dell'assetto fisico, trattazione degli aspetti climatici, delle trasformazioni antropiche subite e dei rischi che lo interessano.

- Gli scenari di pericolosità e di rischio:
Sono gli strumenti di cui oggi si serve la Protezione Civile per redigere specifici piani di emergenza capaci di una maggior efficienza a fronte di un evento, attività di previsione dinamiche ed evolutive utili ai fini di una corretta pianificazione.
- Il modello d'intervento, contenente l'organizzazione della struttura di protezione civile, gli elementi strategici e le procedure operative.
"Codice della protezione civile" art. 18, comma 1, lettera a) gli obiettivi della pianificazione mirano "alla definizione delle strategie operative e del modello di intervento contenente l'organizzazione delle strutture per lo svolgimento, in forma coordinata, delle attività di protezione civile e della risposta operativa per la gestione degli eventi calamitosi previsti o in atto, garantendo l'effettività delle funzioni da svolgere".

La pianificazione di Protezione Civile ha nel piano Piano Comunale di Protezione Civile il suo principale strumento attuativo, in questo sono definiti gli standard organizzativi e funzionali minimi necessari a garantire il funzionamento del sistema di protezione civile, l'omogenizzazione con gli strumenti dei livelli soprastanti è condizione essenziale perché questo possa accogliere e beneficiare del supporto esterno. Con la Legge 100/2012 se ne impose la dotazione alle Municipalità che ne risultassero ancora sprovviste e il continuo aggiornamento dei piani già in essere.

In caso di emergenza, l'organigramma di Protezione Civile prevede che siano le strutture locali, i Comuni, a garantire la prima risposta con l'attivazione del Centro Operativo Comunale (COC), al Sindaco è attribuita l'autorità di protezione civile e nel PCPC si individua lo strumento di riferimento con cui è garantita l'organizzazione di assistenza e soccorso alla popolazione a livello comunale.

Il PCPC presenta i seguenti contenuti:

- Il prospetto dei rischi incombenti sul territorio e i relativi scenari di danno e i punti critici individuati;
- Dettami circa l'organizzazione comunale attinente all'attività del Centro Situazioni, del Centro operativo e dell'Unità di Crisi con il coinvolgimento di tutti i servizi dell'Amministrazione Comunale ritenuti di interesse strategico;
- Le procedure operative da attuare nelle diverse fasi da affrontare in caso di emergenza;
- L'attività di presidio territoriale relativa agli scenari di danno e ai punti soggetti a rischio idraulico ed idrogeologico;
- L'organizzazione del COC (Centro Operativo Comunale);
- L'individuazione di Aree e Strutture di emergenza di livello comunale. Suddivise in:
 - aree di attesa;

- aree e centri di assistenza;
 - aree di ammassamento soccorritori e risorse;
 - vie di allontanamento per il rischio maremoto;
 - zone di atterraggio in emergenza - ZAE;
 - aree per insediamenti semipermanenti di dimensione comprensoriale;
 - infrastrutture e servizi ambientali per la gestione dei rifiuti in emergenza.
- L'individuazione delle risorse comunali disponibili;
 - Le modalità di comunicazione e collaborazione con i livelli sovrastanti;
 - La cartografia in scala non inferiore a 1:10.000 rappresentante i contenuti precedentemente elencati e le cartografie d'insieme del territorio comunale e dei suoi ambiti.

Gli elementi infrastrutturali ritenuti strategici, individuati dalla pianificazione sono sottoposti a obbligo di valutazione della prestazione strutturale secondo l'O.P.C.M. 3274/2003, che avviò un complesso percorso di riforma normativa includendo l'obbligo di verifica sismica per gli edifici strategici e rilevanti ai fini di protezione civile specificati nel decreto a seguire n. 3685.

Dal PCPC è dedotta l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (4007/2012) contestualizzata al rischio sismico e redatta in parallelo alla Microzonazione Sismica (MS) a determinare la pericolosità che interessa il territorio comunale. Lo strumento ad oggi non esplica tutte le sue potenzialità ma amplia l'orizzonte di lettura all'area urbana focalizzando l'attenzione non solo sulle singole Aree e Strutture di emergenza individuate a livello comunale ma anche sul contesto urbano che le circonda, capace di incidere in modo sostanziale sulla loro effettiva funzionalità.

12.2 Le condizioni limite di un insediamento urbano

"La città è un sistema definito dagli elementi (attività e funzioni urbane) e dalle interazioni e relazioni tra le sue varie componenti (comunicazioni) che producono effetti difficilmente individuabili su tutte le sue parti." (Apunti di Tecnica Urbanistica a cura di F. Gigante – Prof. Papa – Ing. Civile, UNINA).

Il persistere di una cronica suscettibilità verso il rischio sismico nuovamente evidenziata dagli eventi calamitosi del 1997 in Umbria, 2009 in Abruzzo, 2012 in Emilia Romagna e 2016 in Italia Centrale, ha nuovamente riproposto il tema dell'organizzazione urbana e della distribuzione funzionale in un centro urbano come possibile ostacolo o causa di amplificazione di drammatici ritardi nell'azione di soccorso e assistenza alle popolazioni colpite, questione nata già all'indomani del terremoto dell'Irpinia del 1980. In questo contesto e conformemente al modello sistemico applicato alla città e al territorio che individua innumerevoli sottosistemi e le conse-

guenti interazioni e relazioni, si è assistito alla nascita e alla diffusione di strumenti urbanistici quali la Struttura Urbana Minima (SUM) e la Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) (Bramerini et al., 2013).

Sviluppata dopo il terremoto dell'Umbria del 1997, il concetto di Struttura Urbana Minima (SUM) unisce principi di organizzazione urbana e prevenzione sismica. La Sum si identifica come un sottosistema urbano composto da percorsi, spazi, funzioni urbane ed edifici strategici funzionanti in caso di emergenza sismica e capaci di assicurare le funzioni vitali della città e l'avvio della ripresa a seguito dell'evento sismico. Lo strumento presenta un forte carattere sociologico e identitario non limitandosi ai soli elementi ritenuti fondamentali nel superamento dell'emergenza ma il concetto di strategico è esteso ai soggetti necessari alla ripresa sociologica ed economica del centro urbano. È chiaramente uno strumento di governo del territorio; multidisciplinare per il coniugare ambiti geologici e geomorfologici, discipline urbanistiche e ingegneria sismica; territoriale per la dimensione operativa. Dal forte carattere progettuale che la rende ascrivibile alla dimensione di strumento urbanistico, si presenta come un'integrazione fra prevenzione e pianificazione includendo in sé interventi per la riduzione del rischio e linee guida per la ricostruzione post sisma e il ripristino della normalità.

Della SUM fa parte anche uno specifico sottosistema funzionale composto da tutti quelli elementi necessari a esplicitare le funzioni protezione civile nella fase emergenziale del sisma, individuato e definito dall'OPCM 4007/2012, come Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), uno strumento operativo di incentivo e garanzia del funzionamento della rete dell'emergenza nella fase immediatamente successiva a un evento sismico.

Si definisce CLE dell'insediamento urbano quella condizione al cui superamento, a seguito del manifestarsi dell'evento sismico, pur in concomitanza con il verificarsi di danni fisici e funzionali tali da condurre all'interruzione delle quasi totalità delle funzioni urbane presenti, compresa la residenza, l'insediamento urbano conserva comunque, nel suo complesso, l'operatività della maggior parte delle funzioni strategiche per l'emergenza, la loro accessibilità e connessione con il contesto territoriale.

(<https://www.protezionecivile.gov.it/it/>).

In generale, per condizione limite di un insediamento urbano si intende una soglia di danneggiamento fisico e funzionale di uno o più sottosistemi che lo compongono il cui raggiungimento comporta la temporanea o definitiva perdita di operatività.

Variando i diversi livelli di perdita di funzionalità è possibile porre le condizioni in analogia con gli stati limite della normativa tecnica per le costruzioni sono state classificate in:

- Condizione limite di operatività, perdite di funzionalità non destabilizzanti;

- Condizione limite di danno, perdite di funzionalità per tempi limitati o parziali;
- Condizione limite di salvaguardia della vita, perdite di funzionalità significative ma non definitive o totali da compromettere la sua struttura;
- Condizione limite di collasso dell'insediamento, poche funzioni rimangono in essere e vengono meno attività fondamentali come la residenza.

Il centro urbano alla condizione limite di collasso non sempre può colmare le perdite riscontrate, teoricamente le uniche prestazioni che dovrebbero in ogni caso essere garantite sono quelle indispensabili alla gestione dell'emergenza per la tutela e la salvaguardia delle vite umane.

Questa ulteriore soglia è definita Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), uno stato in cui a seguito di terremoto distruttivo si verifichi l'interruzione delle funzioni proprie dell'insediamento urbano compresa la residenza, e si conservi solo la funzionalità delle funzioni strategiche per l'emergenza e delle relative infrastrutture di connessione ed accessibilità con il contesto territoriale. Oltre tale condizione è compromessa la ripresa della funzionalità del centro urbano in tempi relativamente brevi oltre alla messa in campo di efficaci e tempestive azioni di soccorso.

La Condizione Limite per l'Emergenza è desunta dal Piano Comunale di Protezione Civile ed ha lo scopo di individuare la totalità o alcune (se ritenute sufficienti) strutture fisiche necessarie all'azione di soccorso e salvaguardia della popolazione colpita da evento sismico. Viene quindi definito un sottosistema inclusivo di tutti gli elementi che in modo diretto o indiretto vanno a comporre garantire il funzionamento della rete dell'emergenza. Nello specifico: gli edifici strategici, le aree di emergenza, la rete viaria di connessione e accessibilità al contesto territoriale. Di concerto, sono individuati gli aggregati strutturali e le singole unità strutturali risultate interferenti per geometria sia con le strutture di gestione dell'emergenza che con la rete stradale individuata, ovvero che a causa dei danni subiti a seguito di un evento sismico possono interferire, ostruire o causare l'inefficienza del sistema individuato.

Ogni elemento sopracitato è a seguire oggetto di catalogazione previo l'utilizzo della modulistica predisposta dalla Commissione Tecnica (articolo 5 commi 7 e 8 dell'O.P.C.M. 3907/2010) consistente in 5 specifiche schede di rilevamento (ES-Edifici strategici, AE-Aree di Emergenza, AC-Infrastrutture di Accessibilità/Connessione, AS-Aggregati Strutturali, US-Unità Strutturali) gestite da un apposito software in libera distribuzione che facilita le attività di inserimento dati (SoftCLE). Le schede di rilevamento compilate, quindi le informazioni relative ad ogni elemento fisico del sistema, sono connesse al soggetto stesso individuato e rappresentato geometricamente sulla cartografia di riferimento rappresentata in ambito di Sistemi Informativi Geografici-GIS (open source QGIS-Quantum Gis).

Allo stato attuale, l'analisi della CLE si limita a una dimensione compilativa,

lo strumento è di fatto privo di una valutazione dell'effettiva efficienza del sistema volta ad individuarne le criticità e alla programmazione dei necessari interventi di mitigazione del rischio, reale obiettivo di coloro che l'hanno pensata e ideata.

Riproponendo un'analogia con gli Stati limite delle NTC, la mancata funzionalità della CLE potrebbe essere sopperita se letta come sottomultiplo o sottosistema della SUM, strumento urbanistico di più ampio respiro e di conseguenza più impegnativo in termini prestazionali. Questo porterebbe a una similitudine di intenti, a un ragionamento sequenziale e organico che andrebbe integrare la CLE nello strumento urbanistico SUM, e attraverso la pianificazione urbanistica ad attribuirle l'operatività e un ruolo attivo in tema di prevenzione sismica di cui è priva.

12.3 La Condizione Limite per l'Emergenza del comune di Firenze

12.3.1 Percorso progettuale

La redazione dell'Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza del Comune di Firenze è avvenuta nell'ambito dell'accordo di ricerca tra Comune e Università (Dipartimento di Scienze della Terra e Dipartimento di Architettura) recante "Studi di Microzonazione Sismica e di Condizione Limite per l'Emergenza (ex O.C.D.P.C. 532/2018) del territorio comunale di Firenze", di cui alla D.C.M. n.344 del 19/07/2018 ex bando D.R.T. 468 del 02/05/2018.

Per il Comune al progetto hanno collaborato la Direzione Ambiente Servizio Sostenibilità, Valutazione Ambientale, Geologia e Bonifiche del Comune di Firenze, Dirigente l'Arch. Marcello Cocchi, Referente l'Arch. Gianni Bordini e il Dott. Luca Ciarleglio Responsabile Sala Operativa della Protezione Civile.

Per il Dipartimento di Architettura, il Prof. Marco Tanganelli e l'Arch. Barbara Paoletti.

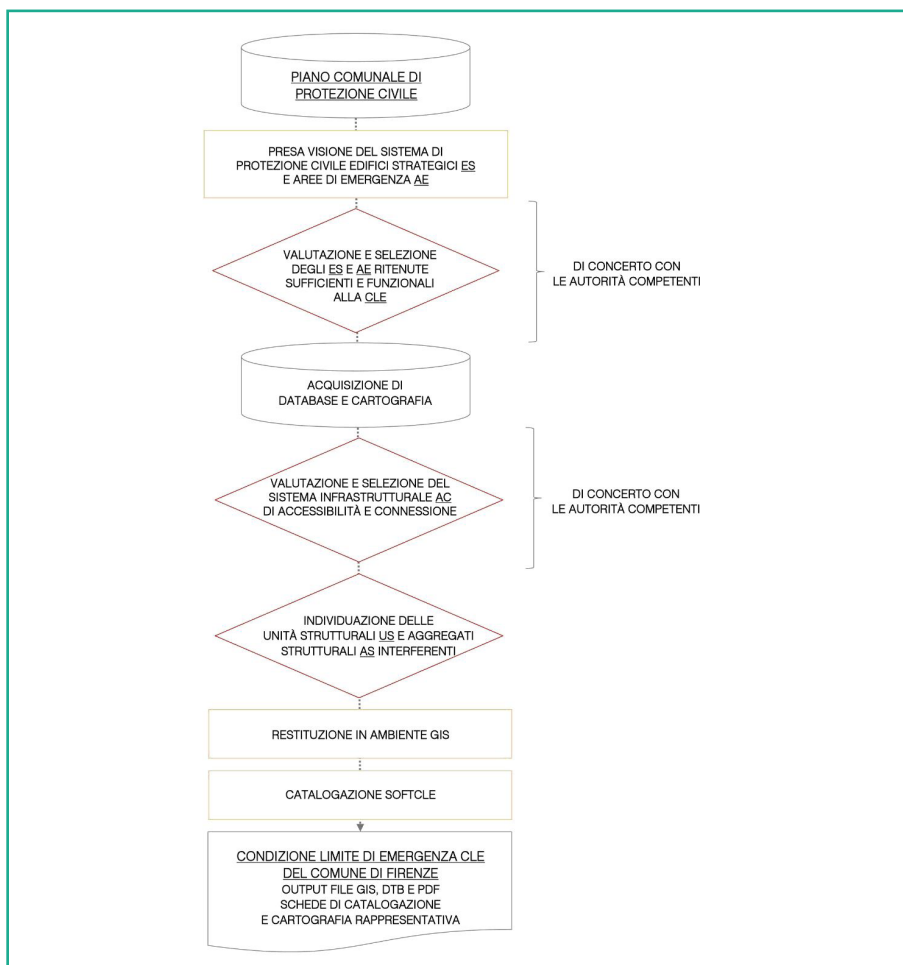
Il sistema di gestione dell'emergenza analizzato è stato individuato e concordato con le autorità competenti del Comune di Firenze e della Regione Toscana, il Dott. Luca Ciarleglio, l'Arch. Gianni Bordini e il Dott. Massimo Baglione Settore Sismica - Prevenzione Sismica Regione Toscana.

Fanno parte della Condizione Limite per l'Emergenza analizzata gli Edifici Strategici e le Aree di Emergenza AE di ammassamento e ricovero per la popolazione entrambi desunti dal Piano Comunale di protezione Civile in vigore, approvato nella sua ultima versione nel gennaio 2019 e rispondente alle direttive del D.Lgs n.1 del 2 gennaio 2018 "codice della Protezione Civile" in cui è delegata al Sindaco, quale autorità territoriale di protezione civile l'attività di pianificazione e studio dei rischi nei contesti di calamità. Di concerto con le autorità competenti di Protezione Civile, Comune e Regione sono stati incluse nella Condizione Limite per l'Emergenza le strutture strategiche e le aree di emergenza ritenute fondamentali e sufficienti a

garantire soccorso e assistenza alla popolazione in caso di evento sismico. La selezione è avvenuta a monte di attente valutazioni circa la funzionalità e le capacità operative, non è di fatto obbligo che tutti gli edifici strategici indicati dal PCPC siano inclusi nella Condizione Limite per l'Emergenza. Contemporaneamente sono state individuate le infrastrutture AC di connessione e accessibilità al contesto urbano, andando a prediligere i percorsi con minori criticità, relazionando l'ampiezza della sede stradale all'edificio circostante onde limitare l'incorrere di ostruzioni per il danneggiamento degli edifici prospicienti il tracciato.

Per gli Edifici Strategici, i principali punti di riferimento che hanno guidato la definizione del sistema sono il Centro Operativo Comunale di Protezione Civile, Azienda Ospedaliera Careggi-Pronto Soccorso, Azienda Ospedaliera Universitaria Meyer, Ospedale San Giovanni di Dio, Centrale Operativa 118 IOT, le caserme dei Vigili del Fuoco di via Giuseppe La Farina e Firenze ovest. Mentre per le Aree di Emergenza, i fulcri principali risultano essere l'area Mercafir e l'area sportiva di Campo di Marte.

Figura 12.1 –
Flowchart
del percorso
progettuale



Il quartiere Centro Storico risulta al momento non incluso nella Condizione Limite per l'Emergenza individuata. L'area patrimonio dell'UNESCO non fa parte del sistema individuato, definibile essenziale in questo primo step, per le caratteristiche tipologico e strutturali del comparto edilizio e le possibili conseguenze del probabile danneggiamento sulla viabilità compromessa a prescindere per la propria morfologia. Incluse per la sua posizione a margine e facilmente raggiungibile dai viali di circonvallazione sono le sedi della Questura in via Zara e della Guardia di Finanza in via Santa Reparata.

La sequenza operativa adottata è sintetizzabile in nove punti fondamentali:

1. Individuazione sulla mappa (CTR) delle Funzioni Strategiche ritenute essenziali ES;
2. Attribuzione di un identificativo di Funzione Strategica a ciascun ES;
3. Individuazione degli eventuali Aggregati Strutturali di appartenenza degli edifici strategici individuati al punto precedente;
4. Individuazione delle aree di emergenza AE di ammassamento e di ricovero per la popolazione desunte dal PCPC in vigore;
5. Individuazione della viabilità di connessione AC fra edifici strategici e aree di emergenza;
6. Individuazione delle infrastrutture stradali che garantiscono l'accessibilità AC dal territorio circostante all'insieme degli elementi aree/edifici con funzioni strategiche e strade di connessione;
7. Individuazione degli aggregati AS con unità strutturali US, o edifici isolati US (999), interferenti con le infrastrutture stradali e le aree di emergenza che ricadono nella condizione $H > L$ per le AC, per le AE e gli ES, $H > d$. Ossia l'altezza (H) sia maggiore della distanza tra l'aggregato e il limite opposto della strada (L) o la distanza (d) fra edificio ed AE;
8. Attribuzione sulla mappa degli identificativi di aggregati strutturali, aree di emergenza, infrastrutture di accessibilità/connessione. Gli identificativi relativi ad aggregati strutturali ed edifici isolati dovranno provenire dalla CTR (cassoni edilizi) in loro assenza questi vengono attribuiti ex novo in linea con gli identificativi più prossimi;
9. Compilazione delle schede su software SoftCle 3.1:
 - ES Edificio Strategico;
 - AE Area di Emergenza;
 - AC Infrastruttura Accessibilità/Connessione;
 - AS Aggregato Strutturale;
 - US Unità Strutturale.

Per la rappresentazione del sistema individuato sono stati prodotti e inviati agli organi revisori competenti i seguenti elaborati:

- Tavole in formato PDF
 - Carta degli Elementi scala 1:15000
 - Stralci scala 1:2000 n.12 (A, B, C, D, E, F, G, H, I, L, M, N)
- Shapefile (open source QGIS-Quantum Gis)
 - Shape ES

- Shape AE
- Shape AC
- Shape AS
- Shape US
- Schede specifiche di rilevamento archiviate su software SoftCLE 3.1, in dettaglio:
 - schede ES n.38
 - schede AE n.14
 - schede AC n.111
 - schede AS n.125
 - schede US n.962
- Relazione Tecnica

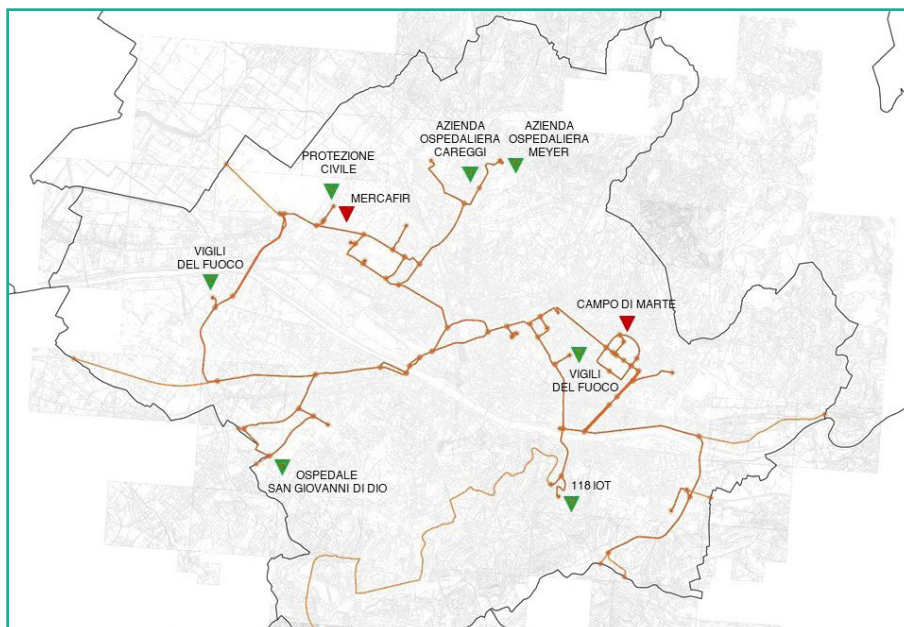
A conclusione di tale percorso, la Condizione Limite per l'Emergenza è risultata essere correttamente individuata, rappresentata e catalogata, approvata nel corso della Commissione Tecnica Nazionale del dicembre 2021.

12.3.2 La Condizione Limite per l'Emergenza

La Condizione Limite per l'Emergenza del Comune di Firenze risulta composta da 19 strutture di interesse strategico e 14 aree di emergenza desunte dal Piano di Protezione Civile ad oggi in vigore.

Alla localizzazione su CTR delle Funzioni Strategiche e delle Aree di Emergenza sopracitate è seguita l'individuazione della viabilità AC di connessione e delle infrastrutture di accessibilità con il territorio circostante. A completamento, si è proceduto ad individuare le unità strutturali (US) con i relativi aggregati (AS) e/o gli edifici isolati (US) risultati interferenti con le infrastrutture stradali e/o le aree di emergenza per la condizione HEdificio>LSede Stradale per le AC, e per le AE H>DAE/Edificio.

*Figura 12.2 –
Tracciato Generale
Condizione Limite
per l'Emergenza
Comune di Firenze,
principali
riferimenti in
evidenza.*



La totalità delle componenti individuati è cartograficamente rappresentata nella Carta degli Elementi scala 1:15000 e nei relativi stralci n.12 (A, B, C, D, E, F, G, H, I, L, M, N) in scala 1:2000.

12.3.2.1 Edifici Strategici ES

Individuate le 19 strutture strategiche in accordo con le autorità competenti, grazie alla costante collaborazione con il Dott. Luca Ciarleglio-Responsabile SOC del Comune e all'interessamento dell'Arch. Gianni Bordini-Responsabile P.O. Energia, valutazione ambientale e bonifiche del Comune di Firenze, sono state reperite le informazioni e i dati necessari alla compilazione delle schede Edificio Strategico ES, relative alle caratteristiche geometriche e strutturali dei manufatti nonché geologiche e idrogeologiche specifiche del sito.

Tabella 12.1 –
Strutture
strategiche
selezionate

	EDIFICIO STRATEGICO		STRUTTURA DI GESTIONE DELL'EMERGENZA
1	PROTEZIONE CIVILE	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	CCS, COM, COC
2	CAREGGI OSPEDALE PRONTO SOCCORSO	SOCCORSO SANITARIO 002	
3	VIGILI DEL FUOCO VIA LA FARINA	INTERVENTO OPERATIVO 003	
4	MEYER	SOCCORSO SANITARIO 002	
5	TORREGALLI OSPEDALE	SOCCORSO SANITARIO 002	
6	VIGILI DEL FUOCO FI OVEST	INTERVENTO OPERATIVO 003	
7	118 IOT	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	
8	QUESTURA	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	
9	CARABINIERI	INTERVENTO OPERATIVO 003	
10	GDF	INTERVENTO OPERATIVO 003	
11	PREFETTURA	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	
12	POLIZIA MUNICIPALE	INTERVENTO OPERATIVO 003	
13	SALA OPERATIVA REGIONE	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	
14	MERCAFIR	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	DICOMAC
15	MANDELA FORUM	COORDINAMENTO INTERVENTI 001	DICOMAC
16	PALAROTELLE	CENTRO ASSISTENZA COPERTO 004	49B RICOVERO IN EMERGENZA
17	PALESTRA VAMBA	CENTRO ASSISTENZA COPERTO 004	49B RICOVERO IN EMERGENZA
18	PALESTRA SALVI CRISTIANI	CENTRO ASSISTENZA COPERTO 004	49B RICOVERO IN EMERGENZA
19	PALESTRA GUCCIARDINI	CENTRO ASSISTENZA COPERTO 004	49B RICOVERO IN EMERGENZA

Secondo le indicazioni presenti nel Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano è prevista la compilazione n.1 scheda ES per ogni unità strutturale individuata. Analizzato ogni singolo Edificio Strategico e verificato che si tratti o meno di un aggregato di più unità strutturali o di una singola unità, sono state redatte e archiviate le specifiche schede di rilevamento ES per un ammontare totale di 38 schede.

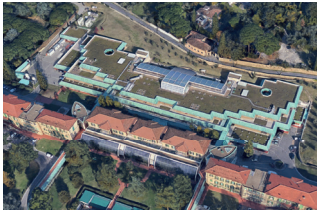
A seguire il report degli edifici strategici inseriti all'interno della Condizione Limite per l'Emergenza del Comune di Firenze.

La caratterizzazione del campo 49 Struttura di Gestione dell'Emergenza, che specifica la funzione di gestione dell'emergenza svolta dalla struttura in caso di evento sismico.

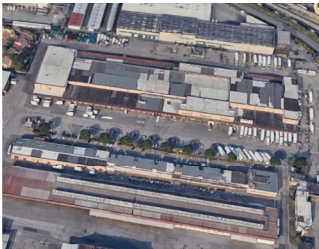
- **DICOMAC (direzione di comando e controllo)**
- **CCS (centro di coordinamento soccorsi)**
- **COM (centro operativo misto)**
- **COI (centro operativo intercomunale)**
- **COC (centro operativo comunale)**

è stata attribuita in accordo con il PCPC in vigore.

DENOMINAZIONE	Protezione Civile Centro Operativo Comunale	
INDIRIZZO	via dell'Olmattello n.25	
NOTE	Individuazione di N.2 Edifici Isolati e N.1 Aggregato Strutturale composto da N.4 US con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Azienda Ospedaliera Careggi Pronto Soccorso	
INDIRIZZO	via Gaetano Pieraccini n.17	
NOTE	Individuazione di N.2 US Edifici Isolati (corpi di fabbrica con giunto sismico) con Funzioni Strategiche	

DENOMINAZIONE	Dipartimento Vigili del Fuoco	
INDIRIZZO	via Giuseppe La Farina n.28	
NOTE	Individuazione di N.1 Aggregato Strutturale composto da N.21 US	
DENOMINAZIONE	Azienda Ospedaliera Universitaria Meyer	
INDIRIZZO	via Gaetano Pieraccini n.24	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche (AS non presente per edifici giuntati)	
DENOMINAZIONE	Ospedale San Giovanni di Dio	
Pronto Soccorso		
INDIRIZZO	via Torregalli n.3	
DENOMINAZIONE	Vigili del Fuoco Firenze Ovest	
INDIRIZZO	viuzzo dei Sarti n.3a	
NOTE	Individuazione di N.2 Aggregati Strutturali	

DENOMINAZIONE	Ospedale Piero Palagi IOT Centrale Operativa 118	
INDIRIZZO	viale Michelangiolo n.41	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Questura	
INDIRIZZO	via Zara n.2	
NOTE	Individuazione di N.1 Aggregato Strutturale composto da N.2 US con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Carabinieri Caserma Antonio Baldissera	
INDIRIZZO	Lungarno Pecori Giraldi n.4	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Guardia di Finanza	
INDIRIZZO	via Santa Reparata n.97	
NOTE	Individuazione di N.1 Aggregato Strutturale composto da N.13 US	

DENOMINAZIONE	Prefettura	
INDIRIZZO	via Antonio Giacomini n.8	
NOTE	Individuazione di N.1 Aggregato Strutturale composto da N.13 US	
DENOMINAZIONE	Polizia Municipale	
INDIRIZZO	piazzale della Porta al Prato n.6	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Sala Operativa Unificata Permanente (SOUP)-RT	
INDIRIZZO	via Val di Pesa n.7	
NOTE	Individuazione di N.1 Aggregato Strutturale composto da N.3 US	
DENOMINAZIONE	MercaFir Centro Alimentare Polivalente	
INDIRIZZO	via dell'Olmatello n. 2	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche	

DENOMINAZIONE	Nelson Mandela Forum	
INDIRIZZO	viale Pasquale Paoli n.9-11	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Palarotelle	
INDIRIZZO	via dell'Olmattello n.116	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Palestra Scuola Vamba	
INDIRIZZO	via del Giardino della Bizzarria n.39	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato (corpi di fabbrica con giunto sismico) con Funzioni Strategiche	
DENOMINAZIONE	Palestra I.C.	
Santa Maria a Coverciano		
INDIRIZZO	via Salvi Cristiani n.3	

DENOMINAZIONE	Palestra Scuola Guicciardini	
INDIRIZZO	via Eleonora Martinez di Montalvo n.1	
NOTE	Individuazione di N.1 US Edificio Isolato (corpi di fabbrica con giunto sismico) con Funzioni Strategiche	

12.3.2.2 Aree di Emergenza AE

Le informazioni e i dati utilizzati per la compilazione delle schede Aree di Emergenza AE sono contenuti nel PCPC del comune di Firenze attualmente in vigore, la Condizione Limite per l'Emergenza non prevede la distinzione delle aree secondo la funzione di ammassamento o ricovero, pertanto, queste presentano la stessa denominazione.

	AREA DI EMERGENZA	FUNZIONE
a	PIAZZALE CAMPIONI DEL '56	AMMASSAMENTO
b	IMPIANTO SPORTIVO SAN MARCELLINO	AMMASSAMENTO E RICOVERO
c	IMPIANTO SPORTIVO SAN MARCELLINO b	AMMASSAMENTO E RICOVERO
d	MERCAFIR	AMMASSAMENTO
e	CAMPO DI ATLETICA RIDOLFI	RICOVERO
f	RUGBY PADOVANI	RICOVERO
g	CAMPO DI CALCIO GRAZIANO GRAZZINI	RICOVERO
h	CAMPO DI CALCIO AFFRICO	RICOVERO
i	CAMPI DI CALCIO CERRETTI	RICOVERO
l	CAMPI DA BASEBALL CERRETTI	RICOVERO
m	CAMPI DI ATLETICA ASSI GIGLIO ROSSO	RICOVERO
n	CAMPO DI ATLETICA B. BETTI-FILARETE	RICOVERO
o	CAMPO DI CALCIO FRANCO NANNOTTI-RIFREDI	RICOVERO
p	CAMPO DI CALCIO PAGANELLI	RICOVERO

Sul territorio comunale sono state individuate 13 aree idonee ai fini di protezione civile, catalogate come 14 elementi (2 aree su Impianto Sportivo San Marcellino AE2, AE14) per coerenza con gli standard di archiviazione previsti dalla CLE.

12.3.2.3 Infrastrutture di Connessione e Accessibilità AC

I dati necessari alla catalogazione delle Infrastrutture di Connessione e Accessibilità sono stati ricavati dall'analisi della Carta Tecnica Regionale (CTR) scala 1:2000, 1:5000 e 1:10000 e integrate con gli strumenti urbanistici e i Database GIS (celerimetrico) di cui si è dotato il Comune di Firenze.

Fondamentale, per la lettura del tracciato e l'individuazione di eventuali criticità, è stato l'utilizzo di ortofoto provenienti da banche dati di enti pubblici e di cartografia web costantemente aggiornata e di dettaglio. A conclusione, le AC individuate e le specifiche schede di rilevamento redatte ed archiviate risultano ammontare a 97.

*Figura 12.3 –
Analisi
della viabilità
per la compilazione
della scheda AC,
sovrapposizione
CTR e cartografia
web.*



12.3.2.4 Aggregati Strutturali AS e Unità Strutturali US interferenti

L'individuazione degli Aggregati Strutturali AS interferenti è seguita alla determinazione della presenza o meno di edifici interferenti con infrastrutture di Accessibilità o Connessione e Aree di Emergenza AE. Questo è avvenuto con la verifica della condizione $H_{\text{Edificio}} > L_{\text{Sede Stradale}}$ per le AC, e per le AE $H > D_{\text{AE/Edificio}}$ di tutte le unità strutturali localizzate lungo il tracciato stradale analizzato.

I cassoni edilizi, codici univoci fondamentali alla catalogazione, sono stati ricavati dalla CTR, ove questi fossero risultati assenti, in accordo con le autorità competenti si è provveduto ad integrare proseguendo la numerazione del cassone edilizio più prossimo.

Per il reperimento dei dati necessari alla compilazione della scheda AS, è stato necessario e talvolta non sufficiente l'utilizzo di tutto il materiale cartografico e dei database a nostra disposizione.

Fanno parte degli AS catalogati, anche gli aggregati non interferenti con il sistema infrastrutturale, ma che presentano al loro interno Unità Strutturali US con funzioni strategiche per un totale di 135 schede.

*Figura 12.4 –
Unità strutturali
US interferenti
(in giallo) con le
infrastrutture di
connessione (in
rosso).*



*Figura 12.5 –
Compilazione
della scheda AS,
aggregati edilizi
analizzati lungo il
percorso
e cassone edilizio
associato.*



In seguito alla catalogazione degli Aggregati Strutturali AS si è proceduto con la compilazione di una scheda US per ogni singola unità strutturale individuata sia essa isolata o facente parte di un aggregato.

Ad ogni US, è stato attribuito un "identificativo" composto da tre cifre, progressivo a partire da "001" per le unità in aggregato e standard "999" per

gli edifici isolati. Questi, associati ai cassoni edilizi, generano un codice univoco che identifica una e una sola unità strutturale, coerentemente alle direttive contenute nel Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano.

Il reperimento delle informazioni e dei dati necessari al completamento della scheda in ogni sua parte ha destato notevoli difficoltà per l'assenza di database specifici e inaccessibilità al dato dovuta alla normativa sulla privacy, specifiche riportate in dettaglio in Tabella 12.4.

*Tab. 12.4 –
Modalità e
problematiche
riscontrate nel
reperimento dati*

CAMPO	NOTA
10 indirizzo, 11 civico	Verifica in loco dei database informatici.
19 piani interrati	Indagine visiva esterna, verifica non sempre possibile.
24 struttura portante verticale	Assenza di database tematico, caratteristica attribuita con indagine visiva esterna e solo in caso di presenza di attività commerciali anche interna.
26 CORDOLI O CATENE	Compilazione previa assunzioni basate sulla conoscenza acquisita grazie a indagini riguardanti l'edilizia ordinaria presente sul territorio nazionale. Edificato in muratura ante 1940 assenza o scarsa probabilità di presenza di cordoli, edificato post 1940 presenza di cordoli.
29 sopraelevazioni	Impossibile da accertare se non in presenza di evidenti discontinuità morfologico strutturali, database tematico non disponibile.
30 danno strutturale	Verifica possibile solo sul perimetro esterno.
31 stato manutentivo	Verifica possibile solo sul perimetro esterno.
32, 33 proprietà	Visura catastale inaccessibile per la normativa sulla privacy.
48 destinazione d'uso (uso attuale)	Visura catastale inaccessibile per la normativa sulla privacy. Dato da indagine visiva esterna, verifica non sempre possibile.
49 tipo e numero unità d'uso	Visura catastale inaccessibile per la normativa sulla privacy.
50 epoca di costruzione e ristrutturazione	Costruzione, dato verificato con l'utilizzo di cartografia storica (IGM) e ortofoto area Comune di Firenze disponibili su http://www.regione.toscana.it/-/geoscopio . Ristrutturazione, database tematico non disponibile.
51 utilizzazione	Dato desunto dai campi 48 e 49
52 occupanti	Dato proveniente dal database GIS "residenti", assenza di specifiche riguardanti i possibili domiciliati. Informazione parzialmente attendibile.

Al termine dell'indagine condotta sull'edificato in oggetto, le schede di rilevamento specifiche US redatte e archiviate esse singoli edifici isolati o appartenenti ad aggregati strutturali sono risultate essere pari a 1067.

12.3.3 Fonti cartografiche e strumenti digitali

L'analisi della CLE dell'insediamento urbano viene effettuata utilizzando la modulistica predisposta dalla Commissione Tecnica di cui all'articolo 5 commi 7 e 8 dell'O.P.C.M. 3907/2010 ed emanata con apposito decreto del Capo del Dipartimento della protezione civile. Tale analisi comporta:

- a) l'individuazione degli edifici e delle aree che garantiscono le funzioni strategiche per l'emergenza;
- b) l'individuazione delle infrastrutture di accessibilità e di connessione con il contesto territoriale, degli edifici e delle aree di cui al punto a) egli eventuali elementi critici;
- c) l'individuazione degli aggregati strutturali e delle singole unità strutturali che possono interferire con le infrastrutture di accessibilità e di connessione con il contesto territoriale (articolo 18, O.P.C.M.4007/2012). (Istruzioni per la compilazione delle schede versione 3.1)

La redazione dell'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza del Comune di Firenze ha reso necessario l'utilizzo di elaborati cartografici e database informatici di proprietà di vari enti amministrativi Regione, Comune e Università.

- Carta Tecnica Regionale (CTR) scala 1:2000, 1:5000 e 1:10000
- IGM storiche
- Ortofoto area Comune di Firenze

Disponibili su Geoportale Geoscopio Regione Toscana

- Microzonazione sismica del Comune di Firenze
- Dati relativi alla geologia e alla microzonazione sismica di concerto con il DST e in linea con la Relazione MZS. Utilizzo della cartografia di loro competenza Carta Geomorfologica, Carta Geologica e delle MOPS relative del Comune di Firenze

Fornite dal Dipartimento di Scienze della Terra

- Cartografia PAI del Bacino del Fiume Arno
- Piano Comunale di Protezione Civile in vigore e relativi allegati
- Database informatici GIS
 - Catasto
 - Edificato Totale
 - Edificato Abitazione
 - Numeri Civici e Residenti
 - Celerimetrico

Fornite dal Servizio di Protezione Civile o reperiti su indicazione di funzionari del Comune di Firenze sulla piattaforma <https://www.comune.fi.it/> e <https://opendata.comune.fi.it/>

Ringraziamenti

Si ringrazia per la continua e costante disponibilità e collaborazione la Direzione Ambiente Servizio Sostenibilità, Valutazione Ambientale, Geologia e Bonifiche del Comune di Firenze, Dirigente l'Arch. Marcello Cocchi, il Referente l'Arch. Gianni Bordoni, l'Arch. Antonino Polistena e il Dott. Luca Ciarleglio Responsabile Sala Operativa della Protezione Civile. Per il Settore Sismica-Prevenzione Sismica Regione Toscana il Dott. Massimo Baglione e il Dott. Daniele Giomarelli. La Dott.ssa Martina Cecilia Benossi per la collaborazione nel corso della tesi di laurea (Benossi, 2019).

La valutazione del rischio sismico su scala territoriale

Barbara Paoletti⁽¹⁾, Mario De Stefano⁽¹⁾, Marco Tanganelli⁽¹⁾

⁽¹⁾Dipartimento di Architettura - Università degli Studi di Firenze

13.1 Rischio sismico e scenari di danno

Ai fini di una efficace pianificazione di Protezione Civile sono di fondamentale importanza i concetti di conoscenza e previsione dei rischi naturali e antropici incombenti. Una tempestiva e capace azione di soccorso necessita a priori della consapevolezza dei fattori che possono condizionarla, della determinazione delle criticità che interessano il territorio e della previsione dei possibili effetti al verificarsi di una calamità.

La base conoscitiva per dimensionare le risorse da mettere in campo è costituita dagli scenari di danno, ossia strumenti di previsione del possibile danneggiamento e del conseguente coinvolgimento della popolazione. Tali scenari sono definiti sulla scorta dei dati territoriali di esposizione e vulnerabilità e sulla base di eventi di riferimento il cui verificarsi sia ritenuto più probabile a seconda dell'intervallo temporale selezionato.

<https://rischi.protezionecivile.gov.it/>

In ambito di rischio sismico, la definizione degli scenari di danno e la programmazione di opportuni interventi di mitigazione passa attraverso la valutazione della Vulnerabilità che interessa le componenti del sistema urbano. La Vulnerabilità e altre componenti quali la Pericolosità Sismica e l'Esposizione sono i fattori vanno a determinare il grado di rischio che interessa un territorio.

Nello specifico si definisce la *Pericolosità Sismica* come la stima dello scuotimento atteso in una certa area in un dato tempo di osservazione. Questa dipende esclusivamente dalle caratteristiche geologiche ed è determinata con analisi di tipo probabilistico, che valutano, per una data area, la probabilità di occorrenza di un possibile evento di una certa intensità, magnitudo o accelerazione di picco (Pga) in un prestabilito intervallo di tempo definito periodo di ritorno. Con *Esposizione*, si fa riferimento al possibile danno prodotto da un terremoto. Ovvero tutti i beni che potenzialmente potrebbero subire perdite, a partire dalle vite umane, ma includendo anche le abitazioni, i beni culturali, le industrie, la rete impiantistica e infrastrutturale, concorrono alla sua quantificazione. Mentre con la *Vulnerabilità Sismica* si intende la propensione di una struttura a subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento sismico di una data intensità. Il danno atteso è valutabile in svariati termini come quello economico, es: il costo necessario per la riparazione del volume edilizio danneggiato, o di impatto funzionale, come accade qualora il danno implichi la sospensione di un servizio erogato.

Uno scenario di danno implica una valutazione della vulnerabilità sismica a scala territoriale che non si limita alle sole caratteristiche proprie del comparto edificatorio ma coinvolgere caratteristiche quali l'organizzazione spaziale e funzionale del sistema urbano.

La vulnerabilità può essere di fatto distinta in diretta, indotta o differita e mentre la vulnerabilità diretta si riferisce alla propensione dell'elemento a subire un danno e una conseguente riduzione o perdita dell'efficienza funzionale, la vulnerabilità indotta e differita fanno riferimento alle conseguenze che il collasso o/e la perdita di funzionalità di un soggetto possono comportare per il sistema urbano nell'immediato o per il post sisma una volta superata la fase di emergenza.

e Trattandosi di valutazioni su larga scala sono utilizzate metodologie di indagine semplificate su base probabilistica e/o statistica evolute dalla schedatura analisi post sisma dei danneggiamenti avvenuti e dei fattori di vulnerabilità, in generale definibile *vulnerabilità osservata* trattandosi di un'interpretazione empirica degli effetti di un'azione sismica su una determinata classe tipologica di edifici.

Alla questione della vulnerabilità sismica territoriale è affiancato il tema della resilienza degli insediamenti urbani. In origine riferita alla capacità dei materiali di resistere agli urti senza spezzarsi e a tematiche sociali, in ambito urbano la tematica si è consolidata in tempi recenti, principalmente in ambito di sistemi infrastrutturali di comunicazione e lifelines. Nel corso della pandemia di COVID-19 il concetto di resilienza è stato ampiamente dibattuto in riferimento alla funzionalità del sistema sanitario. Mentre la vulnerabilità sismica, come abbiamo specificato, misura l'attitudine di una struttura a subire un danno, la resilienza urbana è intesa come la misura della capacità di un sistema o di un sottosistema di far fronte a un disastro naturale e declinata in ambito sismico, a far fronte a uno shock quale il verificarsi di un terremoto.

13.2 Pianificazione e mitigazione del rischio sismico, alcune esperienze italiane

L'Italia è notoriamente un Paese a medio-elevato rischio sismico con circa il 40% del territorio e il 35% dei comuni classificati in zona sismica 1-2, un patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale e produttivo altamente vulnerabile e un'esposizione oltremisura non solo per la densità abitativa ma per il possedere il patrimonio storico, artistico e monumentale tra i più grandi al mondo.

L'importanza di una pianificazione urbana finalizzata alla mitigazione del rischio sismico è stata colta per prima dalla Regione Emilia Romagna con la Legge Regionale 35/1984 che incentivava indagini della vulnerabilità sismica dell'edificato storico per la definizione di specifiche strategie urbanistiche di intervento. Iniziativa finalizzata alla messa in sicurezza e alla va-

lorizzazione dei centri storici promossa con la Legge Regionale 2/1974 che regolava l'assegnazione dei contributi agli enti locali per la redazione di piani particolareggiati destinati ai centri storici e al restauro del patrimonio culturale di proprietà comunale. Tali iniziative nacquero dalla presa di coscienza dell'importanza culturale e sociologica dei centri storici e dalla conseguente sensibilizzazione delle normative regionali verso la tutela dell'edilizia storica, interessata per sua natura da un'elevata vulnerabilità sismica e di frequente alterata nei suoi caratteri tipologici, costruttivi e materici da interventi antisismici invasivi e non sempre efficaci.

Un'altra esperienza degna di nota è quella sviluppata dalla Regione Calabria nei primi anni Duemila con la sperimentazione di Piani di Recupero Urbanistici Antisismici destinati a borghi storici in zone ad elevata sismicità interessate da dinamiche di spopolamento per questioni economiche. Anche in questo caso, lo strumento urbanistico è stato preceduto e calibrato in base ad accurate indagini della vulnerabilità sismica su scala urbana, interessando sia aspetti normativi che operativi con obbiettivi di sviluppo socioeconomico dell'area e messa in sicurezza dei centri storici.

Di recente, come primo caso in Italia, la Regione Toscana (Regolamento 5/R del 30 gennaio 2020) ha introdotto la valutazione del rischio sismico propedeutica all'approvazione degli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, la nuova delibera non è indirizzata ai soli comuni situati in aree notoriamente interessate da un'elevata pericolosità sismica, centri o borghi storici di particolare pregio e bisognosi di un rilancio socio-economico ma a tutte le municipalità che intendano dotarsi di un piano operativo e/o di una loro variante generale. La metodologia di indagine da adottare prevede l'utilizzo di un protocollo strutturato su tre livelli di approfondimento, Livello 0 a scala regionale, Livello 1 a scala comunale e Livello 2 a scala urbana messo a punto dal Settore Sismica – Prevenzione sismica della Regione Toscana. Dove, per la scala comunale (Livello 1) è stato elaborato un modello di valutazione speditivo e semplificato di tipo statistico basato sui dati Istat e/o all'occorrenza su un rilievo diretto.

I futuri strumenti urbanistici dovranno pertanto tener conto anche del rischio sismico incombente sul territorio e di conseguenza incentivare interventi di mitigazione e messa in sicurezza.

13.3 Classi tipologiche e vulnerabilità di insieme

Per l'ampiezza della dimensione territoriale, la valutazione della vulnerabilità sismica a scala urbana necessita del ricorso a ipotesi semplificative quali la classificazione del patrimonio edilizio in macro-cluster tipologico-strutturali e l'utilizzo di metodologie di indagine statistiche probabilistiche.

La verifica strutturale e per azioni sismiche secondo normativa vigente (NTC 2018) di una singola costruzione è un'operazione di notevole complessità (in particolare per il patrimonio storico e monumentale) sia per

l'elevato impatto economico che per la necessità di una conoscenza approfondita dello scheletro strutturale e delle caratteristiche meccaniche dei materiali. Operazione impossibile da compiere per indagini a larga scala.

Lo studio dei danneggiamenti in seguito ai terremoti distruttivi a partire dall'evento sismico che colpì il Friuli nel 1976 ha evidenziato una certa uniformità nella risposta a una determinata azione sismica nell'edificato afferente a una stessa classe tipologica e strutturale appartenente alla stessa epoca costruttiva. Rendendo ragionevole, con un'attendibilità ritenuta accettabile, attribuire a un determinato "insieme di edifici" un certo livello di danno e di vulnerabilità. Di conseguenza per le indagini sulla vulnerabilità a scala territoriale, vista la dimensione del soggetto e la necessità di ricorrere a metodi 'semplificati', si ritiene opportuno ridurre un patrimonio edilizio notoriamente complesso a un numero contenuto di tipologie dal comportamento noto con principali discriminanti la tecnica costruttiva e la periodizzazione temporale.

A fronte di un patrimonio abitativo italiano vasto e variegato, stime al 2011 individuano 12.187.698 unità, l'individuazione di macro-cluster risulta essere non immediata in particolare per la natura delle banche dati disponibili. A livello nazionale la catalogazione dell'edificato è riferita essenzialmente alle rilevazioni ISTAT, ultimo dato al 2011, che però contengono informazioni limitate (periodo di costruzione, numero di piani e materiale strutturale) e scarsamente attendibili di frequente raccolte da rilevatori non esperti o del settore.

Sui dati ISTAT 1991 relativi al patrimonio edilizio si basano le ricerche trattate nel contributo di Meroni et al. (Meroni et al., 2000), utilizzati dagli autori per individuare le principali tipologie strutturali diffuse sul territorio. A queste è stata associata una vulnerabilità statistico probabilistica costruita dall'analisi e catalogazione di circa 13.000 schede di vulnerabilità di I e II livello del GNDT compilate nel terremoto di Parma del 1983 integrate nel 1999 e con circa 15.000 schede LSU (sempre GNDT) raccolte a partire dal 1996 con il "Progetto per la rilevazione della vulnerabilità di edifici pubblici e strategici a rischio sismico e di formazione di tecnici per l'attività di prevenzione sismica connessa alle politiche di mitigazione del rischio" (LSU) su scala nazionale (regioni Abruzzo, Campania, Molise, Basilicata, Calabria e Sicilia). Progetto dedicato alla mitigazione del rischio sismico e dedicato allo studio dei centri storici con il fine di formare personale tecnico, amministrativo ed informatico, qualificato.

Consapevoli della limitata affidabilità e scarsa completezza del censimento ISTAT, nell'ambito di ReLUI "Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica" 2014-2016 Area Tematica "Temi territoriali", è stato avviato su scala nazionale il progetto di ricerca "Inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti" finanziato dal Dipartimento della Protezione

Un'ulteriore proposta di classificazione tipologica e strutturale del patrimonio edilizio è quella esposta nel lavoro di Calderoni et al. (Calderoni et al., 2017). Anch'essa basata sul principio di *vulnerabilità di insieme*, la classificazione è impostata previo l'analisi dei danneggiamenti rilevati in seguito a eventi sismici e la ricostruzione di modelli teorici delle classi individuate. Essendo confermata nella quasi totalità dei casi la correlazione fra epoca costruttiva, caratteristiche strutturali e danneggiamento subito, la classificazione proposta individua 5 classi per le costruzioni in muratura e 4 classi per quelli in c.a. indicando per ciascuna un range di capacità sismica espressa in termini di massima accelerazione sopportabile al suolo utile a definire il livello di vulnerabilità della corrispondente tipologia costruttiva.

La capacità individuata sia per la muratura che per c.a. è intesa per suoli di tipo A (A: ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi).

Gli autori specificano che i valori indicati possono essere incrementati anche fino al 50% per edifici non superiori ai 2 piani e ridotti sempre fino al 50% per quelli di altezza superiore ai 4 piani.

Emerge quindi l'assegnazione della stessa capacità sismica per le prime tre tipologie, caratterizzate da differenti peculiarità migliorative e deficit strutturali, il bilanciamento di queste indica una certa uniformità nella capacità sismica.

13.4 Metodi di valutazione della vulnerabilità sismica su scala territoriale

In letteratura sono presenti varie classificazioni dei metodi di valutazione della vulnerabilità sismica, in un breve excursus è opportuno citare la nota trattazione di Corsanego (Corsanego, 1985).

L'autore propone quattro possibili raggruppamenti, nel primo usa come metro di differenziazione i risultati prodotti distinguendo tre tecniche generali:

- Tecniche dirette: Immediata previsione del danno senza risultati intermedi;
- Tecniche indirette: Previsione del danno previa valutazione di un indice di vulnerabilità;
- Tecniche convenzionali: Come per le tecniche dirette si ha un solo step ma si limitano alla stima di un indice di vulnerabilità senza previsione del danno.

Una seconda classificazione si basa sempre sul risultato ma sulla tipo di misura ovvero se numerica o semplicemente qualitativa distinguendo le metodologie in quantitative o qualitative. Le prime che esprimono la probabilità in termini numerici, le qualitative fanno invece ricorso a descrizioni es. "Bassa", "Media", "Alta".

In una terza classificazione l'autore fonda la distinzione sulla fonte di conoscenza prevalente individuando quattro classi metodologiche:

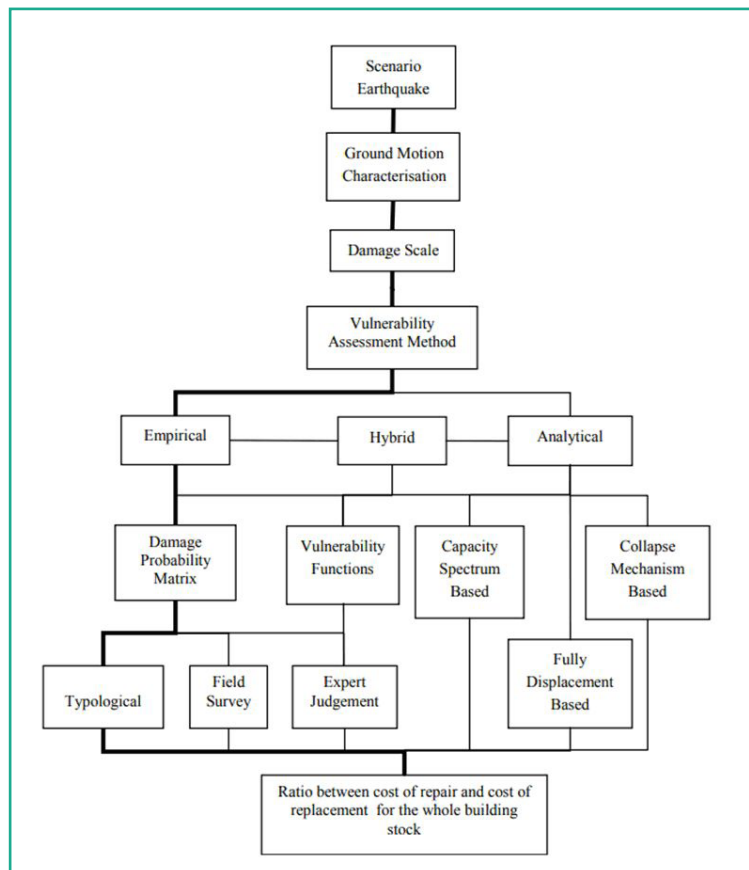
- Analisi statistiche di dati rilevati;
- Calcolo della risposta sismica;
- Giudizio degli esperti;
- Tecniche ibride.

Infine, in una quarta va a distinguere l'approccio di analisi all'edificio in tre tecniche:

- Tecniche tipologiche: edificio concepito come un membro indifferenziato di una classe tipologica;
- Tecniche meccanicistiche: approccio ingegneristico con il ricorso a un modello meccanico teorico;
- Tecniche semeiotiche: peso dei fattori di vulnerabilità propri del fabbricato, più fattori sono presenti più l'indice è crescente.

Il panorama delle metodologie di indagine è presentato chiaramente nel contributo di Calvi et al. (Calvi et al., 2006), sintetizzato dagli autori in un workflow (Figura 13.2) che vede suddividere le varie tecniche in empiriche o analitiche, ibride se usate entrambe.

Figura 13.2 – Classificazione delle metodologie di indagine della vulnerabilità, in evidenza la tecnica di valutazione più tradizionale e diffusa (Calvi et al., 2006).



Al concetto di vulnerabilità di insieme, quindi di indagine a scala territoriale, ben si prestano metodologie consolidate quali le Scale di Intensità Macrosismica nella sua versione più completa l'EMS 98, le Matrici di Probabilità Danno (DMP), le schede di Il Livello del GNDT, le curve di vulnerabilità e le tecniche ibride quali il Metodo Macrosismico di Giovinazzi e Lagormarsino.

EMS 98

Evolutesi nel corso del Novecento con la scala Mercalli nel 1902 da cui è derivata la MCS del 1930 e le scale MSK 64, 76 e 81, fino ad arrivare alla EMS (European Macroseismic Scale) con la sua ultima versione risalente al 1998, le scale macrosismiche, che consentono di correlare intensità sismica e livello di danneggiamento a determinate tipologie edilizie (Grünthal, 1998).

Essendo l'edificato ordinario, ovvero a destinazione residenziale, ascrivibile a un numero molto ristretto di classi tipologiche perlopiù in muratura portante fino al Secondo Dopoguerra, le scale macrosismiche come la MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) non facevano distinzioni fra tipologie strutturali ma stabilivano una semplice relazione funzionale $I = f(D)$ fra intensità e danno. La diversificazione delle tipologie e la distinzione di tre classi di vulnerabilità con l'utilizzo di lettere ebbe inizio con la versione della scala Mercalli del 1956 e ripresa nella scala MSK-64.

La scala EMS 98, ultima evoluzione delle Scale di Intensità Macrosismica, individua sei classi di vulnerabilità ("A, B, C, D, E ed F") correlate 15 tipologie edilizie (si cui 7 in muratura e 6 in c.a.), allo stato di conservazione, e alla qualità strutturale, in particolare alla progettazione secondo norme antisismiche.

L'evoluzione ha significato l'inclusione fra le tipologie edilizie delle strutture progettate secondo criteri antisismici, assenti in precedenza, le classi D ed E tengono conto dei miglioramenti dovuti all'introduzione della progettazione antisismica e con la classe F si fa riferimento alla vulnerabilità di strutture con un alto livello di progettazione antisismica. Di particolare utilità risulta l'inserimento di illustrazioni rappresentative dei diversi livelli di danno e gli allegati fotografici esplicativi a migliorare la standardizzazione dell'applicazione.

Matrici di Probabilità Danno (DMP)

Le Matrici di Probabilità di Danno (DPM) in Italia fanno il loro ingresso nel 1982 con la versione proposta dal gruppo di ricerca di Braga, Dolce e Liberatore (Braga et al. 1982) e di fatto rappresentano la prima analisi della vulnerabilità sismica a scala territoriale del nostro Paese. Oggetto fino ad oggi di vari aggiornamenti, la prima versione fu tarata sull'analisi dei danneggiamenti dovuti al terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 1980 (36.000 edifici di 41 comuni) ed era rappresentativa delle principali tipologie edilizie a destinazione residenziale diffuse nell'area colpita.

Possono essere definite una metodologia di tipo quantitativo, tipologico,

statistico e diretto, un'evoluzione delle scale macrosismiche e consentono anch'esse di correlare intensità sismica e livello di danneggiamento a determinate tipologie edilizie:

- Quantitativo: il danno probabile espresso in valore numerico.
- Tipologico: la classificazione dell'edificio e l'elaborazione basata su tipologie strutturali.
- Statistico: il danno probabile definito è frutto di un'elaborazione statistica dei danneggiamenti osservati e rilevati.
- Diretto: il danno probabile è relazionato con l'intensità sismica.

Schede di II Livello del GNDT

La metodologia utilizzata sono le già citate schede GNDT di II LIVELLO (Gruppo Nazionale Difesa Terremoti-CNR) ([GNDT-SSN, 1994](#)). Evolute dal procedimento proposto da Benedetti-Petrini nel 1984, che consentiva di valutare l'indice di vulnerabilità sismica di un edificio in funzione di una serie di parametri ritenuti significativi nel comportamento sismico di una struttura, il GNDT (Gruppo Nazionale di Difesa dai Terremoti) ha elaborato la scheda di I e II livello per gli edifici isolati in muratura e in cemento armato, ad oggi uno dei metodi di indagine più diffusi e utilizzati in Italia e a livello internazionale. Mentre la scheda di I livello si limita a inventariare l'edificio, la scheda di II livello consente di elaborare un indice di vulnerabilità statistico individuando 11 parametri a cui è attribuito un peso variabile tra 0 ed 1 in funzione dell'influenza sul comportamento sismico globale, la valutazione consiste nell'assegnazione di una classe (A, B, C, D) e quindi di un punteggio ai vari parametri. La procedura è stata validata a sua volta analizzando i dati post-terremoto, con la catalogazione dei meccanismi di danno individuati per tipologia strutturale, e l'analisi della correlazione tra indice di vulnerabilità e indice di misura del danneggiamento. L'indice di vulnerabilità della struttura si ottiene dalla somma pesata di ogni singolo parametro, il valore ottenuto appartiene all'intervallo 0 – 382.5, che in conclusione viene normalizzato su una scala tra 0 e 100.

Curve di fragilità

Da considerarsi un'evoluzione storica delle metodologie finora citate, modelli previsionali oggi ampiamente utilizzati nelle indagini a scala territoriale ([Del Gaudio et al. 2019](#)).

Le curve di fragilità sono descritte da una funzione di distribuzione cumulativa lognormale ed esprimono per una specifica tipologia edilizia la probabilità di subire o superare uno specifico livello di danno in funzione di un evento sismico di una determinata intensità.

In riferimento alla tecnica utilizzata per crearle si possono distinguere in:

1. Empiriche. Dedotte da metodologie basate sulla vulnerabilità osservata;
2. Analitico. Derivate dalle analisi di modelli strutturali (modelli meccanici sui quali è stata simulata l'azione sismica);
3. Basate sul giudizio di esperti;
4. Ibride. Basate su risultati ottenuti dalla combinazione dei primi tre metodi.

Capaci di fornire stime delle possibili perdite economiche e sociali mediante appropriate funzioni di trasformazione, le curve di fragilità ricoprono un ruolo fondamentale nelle attività di previsione, prevenzione e mitigazione del rischio sismico a scala territoriale.

Metodo Macrosismico di Giovinazzi e Lagomarsino

Evoluto dalla Scala di Intensità Macrosismica EMS 98, la metodologia proposta partendo da un indice di vulnerabilità associato alla tipologia strutturale e da un indice di vulnerabilità regionale, propone un'implementazione, andando a caratterizzare le tipologie costruttive locali con l'utilizzo di modificatori della risposta sismica dovuti presenti di determinati fattori (Giovinazzi, Lagomarsino 2004) e in conclusione andando a determinare la probabile distribuzione di danno sul costruito.

Basandosi su ispezioni visive esterne di professionisti esperti in materia, per ogni edificio si prevede la catalogazione di peculiarità fondamentali ai fini della vulnerabilità sismica (modificatori) che vanno ad aumentare o diminuire gli indici iniziali fra quali lo stato di conservazione, la collocazione all'interno dell'aggregato, la morfologia del fabbricato e la presenza di presidi antisismici. L'influenza dei modificatori sulla vulnerabilità di partenza è studiata a partire dalle Matrici di Probabilità di Danno implicite nella Scala EMS-98.

13.5 Esperienze d'indagine nell'area fiorentina

Il patrimonio edilizio della città di Firenze è stato recentemente oggetto di vari progetti di ricerca finalizzati ad indagarne la vulnerabilità del patrimonio edilizio.

- I progetti di ricerca Sismed e Sismed II (Progetti SISMED, 2016-2021), possibili grazie al contributo della Fondazione CARIFI, sono nati della collaborazione fra i Dipartimenti di Architettura, di Scienze della Terra e di Statistica Informatica e Applicazioni dell'Università di Firenze con l'obiettivo di fornire una base conoscitiva per la Pianificazione Urbanistica, una stima probabilistica dell'esposizione al danno e la redazione di Linee Guida per lo sviluppo urbanistico della città. Incentrati su aree urbane evolutesi nel corso del XX secolo i progetti hanno classificato e studiato e catalogato alcune delle principali tipologie edilizie presenti nel tessuto fiorentino (Ripepe et. al., 2018).

I principi e i risultati parziali dei Progetti Sismed sono parzialmente confluiti e implementati in tesi di laurea e di dottorato tutt'ora in corso. Analizzando prima la distribuzione del sistema di Protezione Civile nel tessuto urbano di Firenze (Benossi, 2019) e in seguito, previa la definizione di specifici scenari di danno dell'edificato, andando a verificare l'effettiva funzionalità del sistema di gestione dell'Emergenza.

Figura 13.3 –
Risonance map,
uno degli strumenti
acquisiti nel corso
dei progetti Sismed



- Il centro storico e nello specifico l'area racchiusa all'interno della quarta cerchia muraria "cerchia antica" è stato tema del National Research Project PRIN 2015 "MITIGATING THE IMPACTS OF NATURAL HAZARDS ON CULTURAL HERITAGE SITES, STRUCTURES AND ARTEFACTS (MICHe)". L'area, patrimonio UNESCO, è stata interessata da un'analisi multirischio che ha combinato il verificarsi di un'emergenza sismica e alluvionale (Arrighi et al., 2022). In riferimento all'accadimento di un evento sismico sono stati valutati i possibili scenari di danno, la perdita annuale media attesa e la stima dei costi di ricostruzione.

Figura 13.4 –
Mappa dell'Indice
di Danno - RP=475
anni - condizione
attuale

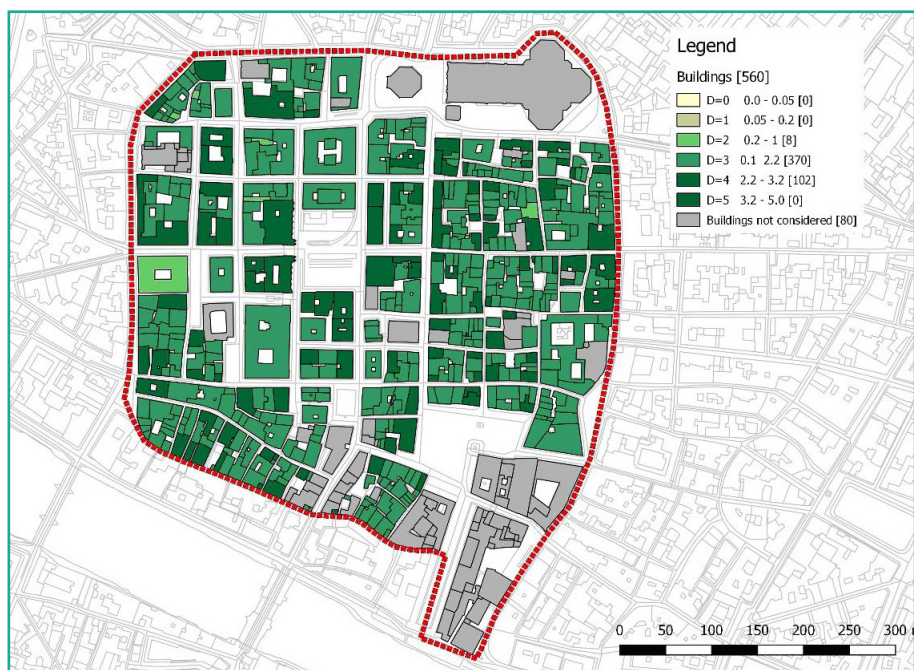
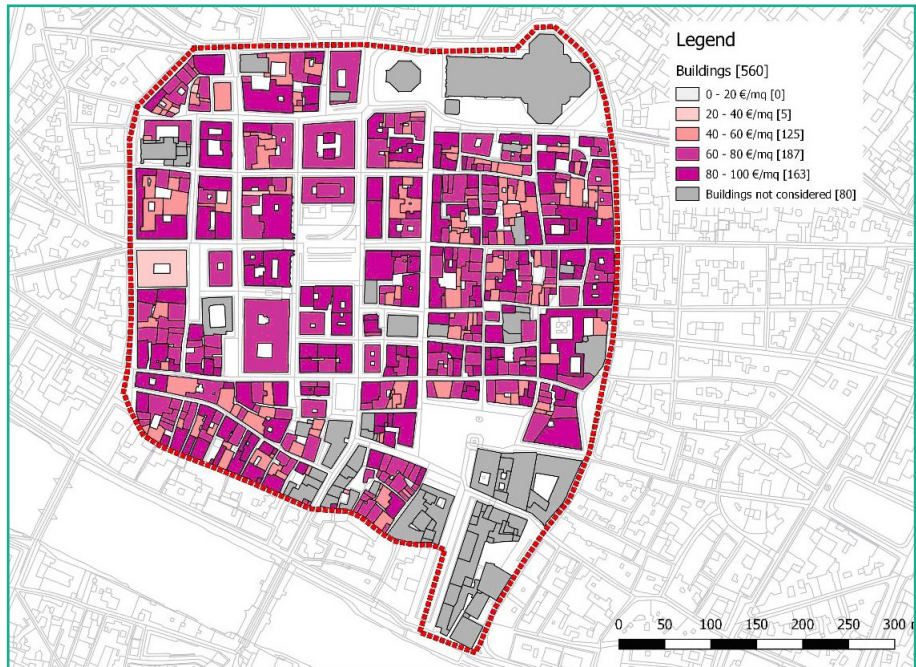


Figura 13.5 –
Mappa della
Perdita Annua
Media Attesa –
condizione attuale

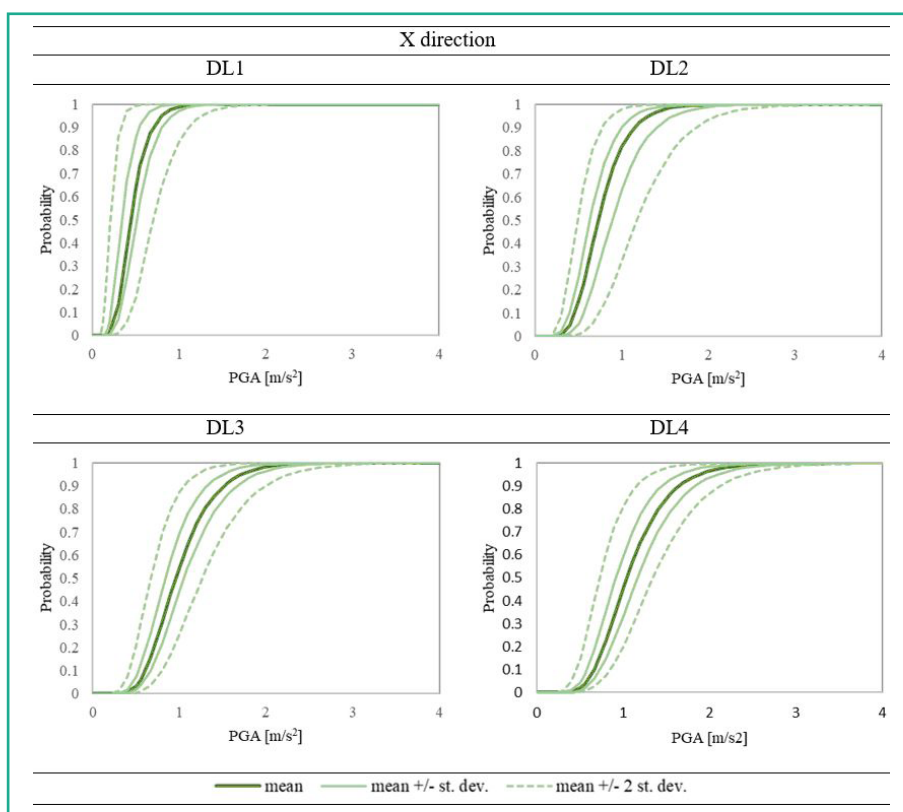


- Un'indagine tipologica, diretta agli interventi di edilizia residenziale pubblica, è stata oggetto di Tesi di Dottorato (Cardinali, 2021).

L'area comunale fiorentina nel corso del XIX secolo è stata interessata da numerosi gli interventi sia in muratura che in cemento armato, gestiti da un susseguirsi di istituti oggi confluiti nell'ente Casa SPA.

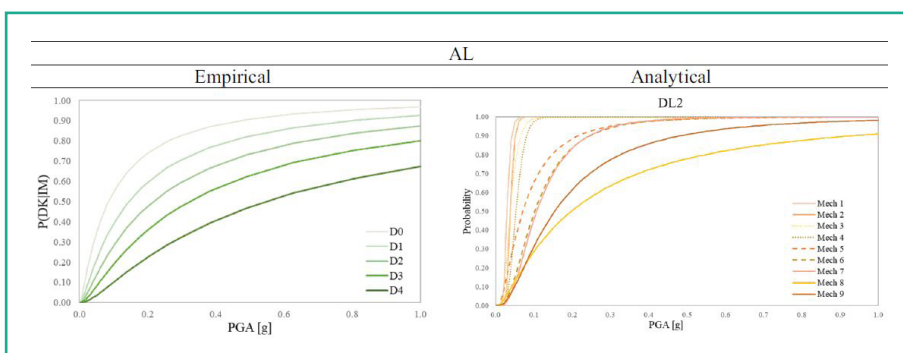
In contemporanea, le stesse Ferrovie dello Stato sono stati i fautori di una serie di interventi di edilizia economica e popolare per i suoi dipendenti, diffusi in tutta Italia e anche nella città di Firenze. Un cospicuo patrimonio, realizzato in un'ampia fascia temporale che rispecchia in sé il susseguirsi di norme, tecniche e qualità costruttiva. L'indagine della vulnerabilità ha riguardato il comparto in muratura del quale sono state definite curve di fragilità ibride combinando metodi di valutazione empirici e analitici.

Figura 13.6 –
Curve di fragilità
ibride dell'edilizia
residenziale
pubblica in
muratura



- Un'ulteriore esperienza di indagine condotta nell'area fiorentina ha visto l'applicazione di un approccio olistico multiscala al centro storico di Scarperia, in un'area notoriamente caratterizzata da una sismicità di medio livello (Cardinali et al., 2020). La valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi in muratura del piccolo borgo ha visto la combinazione di diverse metodologie di analisi attraverso prospettive interdisciplinari. Due i diversi livelli di indagine, quello urbano e di singolo aggregato, con l'acquisizione di differenti informazioni, l'utilizzo di metodologie distinte e l'adozione di più sistemi di gestione di dati.

Figura 13.7 –
Curve di
vulnerabilità
empiriche e
analitiche degli
aggregati edilizi
di Scarperia



A diversi livelli di conoscenza caratterizzati da un differente approfondimento di indagine sono corrisposte appropriate valutazioni della vulnerabilità sismica dell'edificato.

Gli esiti della ricerca hanno sottolineato le differenze che intercorrono fra i vari livelli di conoscenza e di analisi applicati andando ad evidenziare il graduale, relativo non trascurabile impatto sui risultati ottenuti.

Bibliografia

Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. (2002). *Internet-Site for European Strong-Motion Data*. European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>

Arrighi C., Tanganelli M., Cristofaro M.T., Cardinali V., Marra A., Castelli F., De Stefano M. 2022. Multi-risk assessment in a historical city. NATURAL HAZARDS, pp. 0-0, ISSN:0921-030X.

AA. VV. 2014. Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano. Versione 1.1, Roma, Italia.

Baglione M., D'Intinosante V. & Fabbroni P. (2015). *La conoscenza del rischio sismico attraverso gli studi di microzonazione sismica della regione Toscana: risultati, strumenti e metodologie proposte per la pianificazione territoriale*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.

Bonilla et al. (1997). Site amplification in the San Fernando Valley California: variabilità of the site effect estimation using the S wave, and H/V methods. Bull. Seism. Am., Vol 87, No 3, pp 710 -730.

Boccaletti, M., Corti, G., Gargini, A., Gasperini, P., Piccardi, L., Pranzini, G., Vanni Desideri, A., Vannini, G., Vannucci, G., Moratti, G., Minissale, A, Vaselli, O., Tassi, F., Abbado, D. (1997) Geologia Urbana di Firenze. Atti Convegno CNR "Geologia delle grandi Aree Urbane - Relazioni sul lavoro svolto ed i primi risultati ottenuti dalle Unità Operative CNR", Bologna 4-5/11/1997

Bramerini F., Cavinato G.P., Fabietti V. 2013. Strategie di mitigazione del rischio sismico e pianificazione CLE: Condizione Limite per l'Emergenza. Urbanistica Dossier, 130, INU Edizioni, Anno XVII, ISSN 1128-8019, Roma, Italia.

Benossi M.C. 2019. Valutazione della condizione limite per l'emergenza (CLE) di aree urbane: analisi e applicazione all'area urbana di Firenze. Tesi di Laurea, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Firenze

Bell F.D. (1993) Engineering geology. Blackwell Sc. Publ., Oxford, UK, 359 pp.

Briganti, R., Ciufegni S., Coli M., Polimeni S., Pranzini G. (2003) Underground Florence: Plio-quaternary evolution of the Firenze area. Boll. Soc. Geol. It.,122, 435-445.

Braga F., Dolce M., Liberatore D. 1982. A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale. In: Proceedings of the 7th European conference on earthquake engineering, Athens, Greece, pp 431-450.

CARGT (2012) Carta geologica in scala 1:10.000 della Regione Toscana, <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>

Calderoni B., E.A. Cordasco, A. Sandoli 2016. Una classificazione tipologica strutturale degli edifici esistenti in muratura ed in c.a. finalizzata alla valutazione della vulnerabilità sismica su scala territoriale. Progettazione sismica n.1. IussPress, Italy.

Calvi G.M., Pinho R., Magenes G., Bommer J.J., Restrepo-Vélez L.F. and Crowley H. 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years.

ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 472, Vol. 43, No. 3, pp. 75-104.

Cardinali V. 2021. Seismic vulnerability assessment of the residential URM buildings built during the XX century in Florence. Tesi di Dottorato, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Cardinali, V., M.T. Cristofaro, M. Ferrini, R. Nudo, B. Paoletti, and M. Tanganelli. 2020. AN INTERDISCIPLINARY APPROACH FOR THE SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF HISTORICAL CENTRES IN MASONRY BUILDING AGGREGATES: APPLICATION TO THE CITY OF SCARPERIA, ITALY. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIV-M-1-2020, 667-674, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-667-2020>.

Coli, M., Rubellini, P. (2007) Note di geologia fiorentina. SELCA, 37 pp.

Coli M., Rubellini P. (2013) Geological anamnesis of the Florence area, Italy. Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geosci.), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, 581-589.

Coli M., Guerri L. & Rubellini P. (2015) Geotechnical characterization of the Florence (Italy) soils. Proc. ISARC 2015, "Geotechnical Engineering for Conservation of Heritage Structure and Historical Sites", Fukuoka, Japan.

Codice della protezione civile. (18G00011) GU n.17 del 22-1-2018

Circolare NTC (2009). Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008".

Cioppi E. (1995) 18 Maggio 1895, storia di un terremoto fiorentino. Osservatorio Ximeniano, Firenze, 305 pp.

Commissione tecnica MS3907 (2014). *Microzonazione sismica. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, versione 4.0*, giugno 2015; Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma.

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp

Commissione tecnica MS3907 (2015a). *Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, Microzonazione sismica, Statistiche, dicembre 2014*, Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma.

[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp]

Commissione tecnica MS3907 (2015b). *Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma.

[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp]

Commissione tecnica MS3907; 2015c. *Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma.

[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp]

Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2016). *Microzonazione sismica – Statistiche dicembre 2015. Versione 1.0*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, gennaio 2016.

Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2016). *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Versione 4.0b*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, ottobre 2015.

Corsanego A. 1985. A review of methodologies for seismic vulnerability assessment. Proc. Int. Conf. on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje.

Crespellani T., G. Vannucchi, X. Zeng, *Seismic hazard analysis. Chapter 2 of Seismic hazard and site effects in Florence area*, proceedings of X ECSMFE (Florence, 26-30 May 1991), Associazione Geotecnica Italiana, Padova, 1991.

Del Gaudio C., De Martino G., Di Ludovico M., Manfredi G., Prota A., Ricci P., Verderame G.M. 2019. Empirical fragility curves for masonry buildings after the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. Bull EarthqEng. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00683-4>.

D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2014). *Definizione del modello integrato di sottosuolo propedeutico alla realizzazione di studi di microzonazione sismica di livello 3 nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIII Convegno Nazionale NGTGS, Bologna.

D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2015a). *Analisi di risposta sismica locale del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale NGTGS, Trieste.

D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2015b). *La microzonazione sismica nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale NGTGS, Trieste.

D'Amico V., Albarello D., Baliva F., Gasperini P., Picozzi M. & Vannucci G. (2016) Misure di rumore ambientale per la microzonazione sismica della città di Firenze. NGTTS, Atti 23° Convegno Nazionale.

Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017). *Microzonazione sismica di livello 3: il caso del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Roma, 2017.

Gruppo di lavoro MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle regioni e delle Province autonome. Dipartimento della protezione civile, Roma. 3 vol. e Dvd.

Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010). *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.

Ghinelli A., G. Vannucchi, *Condizioni stratigrafiche e fondazioni della zona absidale di Santa Maria del Fiore in Firenze*, «Bollettino Ingegneri», 1991, pp. 1-2.

Grünthal G. 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: Volume 15 – European Macroseismic Scale 1998. European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg.

Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - GNDT-SSN 1994. Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo e secondo livello (muratura e c. a.). Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rome.

Giovinazzi S., Lagomarsino S. 2004. A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 896.

Housner G.W. (1959). *Behaviour of structures during earthquakes*. Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE, Vol.85, N. EM14, pp. 109-129.

Hudson, M., Idriss, I.M. & Beikae, M. (1994). *QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis, Davis California.

Idriss I.M. & Sun J.I. (1992). *SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*. User's Guide, University of California, Davis, California.

Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R. & Seed, H. B. (1973). *QUAD-4: A computer Program for Evaluating the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element*. Procedures, Earthquake Engineering Research Center, Report N. EERC 73-16, University of California, Berkeley.

Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. (2010). *REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010. DOI 10.1007/s10518-009-9146-1.

Yokota, K., Imai, T., and Konno, M. (1981). *Dynamic deformation characteristics of soils determined by laboratory tests*. Tokyo OYO Technical Reports, no.3, 13-37.

Lacanna G., Deguy P., Ripepe M., Coli M., Paoletti B., Barducci S., Tanganelli M., Viti., De Stefano M. 2016. SEISMIC HAZARD OF URBAN AREAS: A CASE-STUDY. In: ECCOMAS Congress 2016 - VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete Island, Greece, 5-10 June 2016, M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, G. Stefanou, V. Plevris (eds.), pp. 0-0.

Lachet C., P.Y. Bard (1994). Numerical and theoretical investigation on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42, 377 -397.

Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Cenni N., Tamburelli C., Vannucchi A., Falciani F., Fianchisti G., Baglione M., D'Intinosante V., Fabbroni P. (2012) Potenzialità sismica della Toscana e definizione di criteri di priorità per interventi di prevenzione. Regione Toscana, Centro Stampa Giunta Regione Toscana, 141 pp.

Nakamura (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors a ground surface. *Quarterly report railway technical research institute of Japan*.

ORDINANZA N.55 del Commissario Straordinario Ricostruzione Sisma 2016 (2018). *Disciplina per la delocalizzazione temporanea delle attività economiche o produttive e dei servizi pubblici danneggiati dal sisma eseguiti e conclusi in data anteriore a quella di entrata in vigore del decreto legge n.189 del 2016. Modifiche alle ordinanze n.24 del 12 maggio 2017, n.39 dell'8 settembre 2017 e n.51 del 29 marzo 2018. Proroga del termine di cui all'articolo 8, comma 4, del decreto - legge 17 ottobre 2016, n.189, convertito con modificazioni dalla legge 15 dicembre 2016, n.229 e s.m.i. Termine per il deposito delle schede AeDES.*

Paoletti B., Tanganelli M. 2021. Multiscale analysis of the seismic vulnerability for the specific anti-seismic recovery plans. In: REUSO 2021, Artemide, pp. 286-298, ISBN:978-88-7575-405-1.

Progetto Reluis 2014-2016 e Dipartimenti della Protezione Civile (A cura di). Manuale per la compilazione della scheda di primo livello per la CARatterizzazione TIpologico-Strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari (CARTIS 2014).

Progetti SISMED (2016-2021) Modelli sperimentali di valutazione della vulnerabilità sismica di aree urbane complesse: il caso della città di Firenze. Responsabile scientifico DST M. Ripepe, DIDA M. De Stefano, DISIA B. Bertaccini. Finanziato da Ente Cassa di Risparmio di Firenze.

Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G. & Penna A. (2012). Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms. *Bull Earthquake Eng* (2012) 10:1357–1375. DOI 10.1007/s10518-012-9369-4.

Ripepe M. et al 2018. Rischio sismico di aree urbane complesse: Progetto Sismed. VI Convegno Internazionale ReUSO, Messina 11-13 ottobre.

Ufficio Prevenzione sismica – Regione Toscana (2018). *MICROZONAZIONE SISMICA REGIONALE Redazione delle specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di microzonazione sismica e prescrizioni per le analisi della Condizione Limite per l'Emergenza*

Vannucci, G., Gasperini, P. (1997) Zonazione sismica della città di Firenze attraverso lo studio dei terremoti del 18 maggio 1895 e 29 giugno 1919. In *Geologia delle grandi aree urbane*, Vol. A, Bologna - Firenze, C.N.R.-Regione Emilia-Romagna, 43-51.

West G. (1985) *Engineering soils and rocks*. Geol. Soc. Prof. Handbook, Open Un. Press, Milton Keynes, UK, 129 pp.

Zuccolo E., Corigliano M., Taverna L. & Lai C.G. (2011). *Meso-zonazione di un territorio per la definizione di accelerogrammi reali spettro-compatibili*. XIV Convegno ANIDIS “L'Ingegneria Sismica in Italia”. Bari, 18 - 22 settembre 2011.

Zuccolo E., Rota M., Lai C.G., Taverna L., Corigliano M. & Penna A. (2012). *Definition of Spectrum-Compatible Natural Records for the Italian Territory*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 24-28 september 2012.

Zuccolo E., Corigliano M. & Lai C.G. (2014). *Selection of spectrum- and seismo-compatible accelerograms for the Tuscany region in Central Italy*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 305-313