

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Livello 3

Regione Emilia-Romagna Comune di Montiano



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Soggetto incaricato: Dott. Geol. Aldo Antoniazzi Collaboratori: Dott. Geol. Alberto Domenico Antoniazzi Dott. Geol. Marco Baldi Dott. Geol. Stefano Castagnetti Dott. Luca Castellucci Dott. Geol. Maurizio Moroni Dott. Geol. Alfredo Ricci	Dicembre 2023

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

INDICE

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO	3
GRUPPO DI LAVORO	3
ELABORATI	4
ALLEGATI ALLA RELAZIONE ILLUSTRATIVA.....	4
1. INTRODUZIONE	5
2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1. Inquadramento geografico	7
2.2. Inquadramento geologico	8
2.3. Inquadramento tettonico	12
2.4. Caratteristiche sismotettoniche	12
2.5. Storia sismica	15
2.6. Classificazione sismica	18
3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI	20
3.1. Acquisizione ed elaborazione dei dati.....	20
3.2. Sondaggi e penetrometrie.....	21
3.3. Prove geofisiche	21
4. MODELLO DEL SOTTOSUOLO	22
5. DETERMINAZIONI ED INCERTEZZE	23
6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI	25
6.1. Prima fase del lavoro	25
6.2. Seconda fase del lavoro	25
6.3. Terza fase del lavoro	25
7. ELABORATI CARTOGRAFICI	27
7.1. Carta delle indagini	27
7.2. Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica	27
7.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni	28
7.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica	28
7.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S	33
7.6. Carte di microzonazione sismica	33
8. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE - INSTABILITÀ SEZIONE 3	37
8.1. Area considerata	37
8.2. Metodologia	37
8.3. Modello geofisico del sottosuolo	37
8.3.1. Litologia.....	38
8.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico	38
8.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G ₀)	38
8.3.4. Descrizione dei modelli	42
8.3.4.1. Microzona 2007 Id _i =3	42
8.3.5. Azioni sismiche in ingresso	42
8.4. Procedura di analisi RSL	43
8.5. Analisi dei risultati	43
8.5.1. Accelerogrammi di output - Microzona 2007 Id _i =3	45
9. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE - INSTABILITÀ SEZIONE 4	48
9.1. Area considerata	48
9.2. Metodologia	48
9.3. Modello geofisico del sottosuolo	48
9.3.1. Litologia.....	49
9.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico	49
9.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G ₀)	49
9.3.4. Descrizione dei modelli	53
9.3.4.1. Microzona 2007 Id _i =4	53
9.3.5. Azioni sismiche in ingresso	53
9.4. Procedura di analisi RSL	54
9.5. Analisi dei risultati	54

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	1 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

9.5.1. Accelerogrammi di output - Microzona 2007 Id_i=4	55
10. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA PER FRANOSITÀ.....	59
10.1. Verifica della pericolosità sismica per franosità	59
10.1.1. Determinazioni e metodologie.....	59
10.1.2. Condizioni di stabilità: Montiano (Sezione 3)	61
10.1.2.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma	61
10.1.2.2. Condizioni non drenate durante il sisma	62
10.1.2.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.	62
10.1.2.4. Considerazioni.....	63
10.1.3. Condizioni di stabilità: Montiano (Sezione 4)	63
10.1.3.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma	63
10.1.3.2. Condizioni non drenate durante il sisma	63
10.1.3.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.	64
10.1.3.4. Considerazioni.....	64
11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Paola Sabbatini
Servizio Associato Edilizia - Urbanistica, dell'Unione dei Comuni Valle Savio

GRUPPO DI LAVORO

Soggetto Incaricato

GEOLOGO DOTT. ALDO ANTONIAZZI
Studio di Geologia Tecnica e Ambientale



Professionisti	Professione	Principali competenze
Dott. Alberto Domenico Antoniazzi	Geologo	Pianificazione territoriale, geopedologia e geomorfologia applicata.
Dott. Aldo Antoniazzi (Coordinatore)	Geologo	Pianificazione territoriale, idrogeologia, meccanica delle terre e rocce, Protezione Civile, Microzonazione sismica, sistemi informativi territoriali e coordinamento generale.
Dott. Geol. Marco Baldi	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, sistemi informativi territoriali (GIS) e telerilevamento
Dott. Stefano Castagnetti	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, Protezione Civile e CLE.
Dott. Maurizio Moroni	Geologo	Geofisica applicata alla pianificazione territoriale e progettazione ed analisi Microzonazione Sismica.
Dott. Alfredo Ricci	Geologo	Pianificazione territoriale, idrogeologia, esplorazione del sottosuolo e geotecnica.

Collaboratori e specialisti

Dott. Luca Castellucci
Dott. Geol. Massimo Mosconi

Esecuzione indagini

Dott. Geol. Maurizio Moroni (indagini geognostiche e geofisiche)

Fonte dati

Uffici Tecnici Comunali - Comune di Montiano
Provincia di Forlì-Cesena
Area geologia, suoli e sismica - Regione Emilia-Romagna
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	3 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

ELABORATI

- Relazione illustrativa
- Analisi del potenziale di liquefazione
- Carta delle indagini in scala 1:4.000
- Carta geologico-tecnica in scala 1:10.000
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:10.000
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica in scala 1:10.000
- Carta delle velocità delle onde di taglio S in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{0,1 - 0,5 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{0,4 - 0,8 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{0,7 - 1,1 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{0,5 - 1,5 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH_{0,1 - 0,5 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH_{0,5 - 1,0 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH_{0,5 - 1,5 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,4 - 0,8 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,7 - 1,1 s} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,5 - 1,5 s} in scala 1:10.000

ALLEGATI ALLA RELAZIONE ILLUSTRATIVA

- Analisi di stabilità
 - Metodologia di calcolo
 - Calcoli Montiano (Sezione 3) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma
 - Calcoli Montiano (Sezione 3) - Condizioni non drenate durante il sisma
 - Calcoli Montiano (Sezione 4) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma
 - Calcoli Montiano (Sezione 4) - Condizioni non drenate durante il sisma
 - Validazione del codice di calcolo

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	4 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione illustrativa sono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nell'ambito dello studio di Microzonazione sismica di III livello del Comune di Montiano (Provincia di Forlì-Cesena), effettuato su incarico di cui alla Determinazione n. 69/2022 del Comune di Montiano, CUP: C42C22000000006, CIG: Z8537162D8.

Questo studio è stato finanziato con il contributo attribuito dalla Regione Emilia-Romagna derivante dalla DGR 1885 del 15/11/2021 portante ad oggetto "OCDPC 20 MAGGIO 2021, N. 780 - ATTUAZIONE DELL'ART.2, COMMA 1, LETT. A) E COMMA 2. APPROVAZIONE DEI CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE, LA CONCESSIONE E LA LIQUIDAZIONE DI CONTRIBUTI E PER LA REALIZZAZIONE E PRESENTAZIONE DEGLI ELABORATI RELATIVI A STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA" e dalla DGR 1899/2022.

Il Comune di Montiano è dotato di uno studio di Microzonazione Sismica di I e II Livello realizzato nel maggio 2019, dallo scrivente professionista. Tale studio è stato finanziato con il contributo attribuito dalla Regione Emilia-Romagna con determinazione dirigenziale n. 12555 del 31/07/2017, pubblicata sul B.U.R. n. 239 del 23/08/2017, portante ad oggetto "Approvazione del secondo elenco di Comuni destinatari dei contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite di emergenza di cui all'O.C.D.P.C. n. 344/2016 e D.C.D.P.C. del 21 giugno 2016" che modificando la precedente Determina n. 8757/2017 ha approvato l'assegnazione al Comune di Montiano di un contributo per interventi di prevenzione del rischio sismico e precisamente per la redazione della microzonazione sismica del territorio comunale con approfondimenti del I e II livello, con analisi della Condizione Limite per l'Emergenza secondo i criteri e le indicazioni fissate dalla D.G.R. 2188 del 13/12/2016, con particolare riferimento a quanto precisato negli Allegati A e B della sopracitata deliberazione ed è stato validato dalla riunione della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica del 24 ottobre 2019 (Regione Emilia-Romagna, prot. n. PG/2019/0838315 del 12/11/2019).

Il presente studio di Livello 3 è stato condotto a partire dallo studio di Livello 1 e 2 citato in precedenza, provvedendo ad aggiornare ed integrare gli elaborati precedentemente realizzati, in modo da renderli conformi alle nuove specifiche tecniche.

Le attività di ricerca, acquisizione ed implementazione dati oltre che la predisposizione degli elaborati prodotti nell'ambito del presente studio, sono stati condotti in ottemperanza delle direttive e agli atti tecnici sottoelencati:

- D.G.R. n° 476 del 12.04.2021 aggiornamento Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017);
- D.G.R. n° 564 del 26.04.2021 "Integrazione della propria Deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)";
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2, Roma, dicembre 2020 - Elaborato e approvato

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	5 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (SRAI).

- “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (ICMS).

Gli elaborati redatti sono stati predisposti in versione cartacea e in versione digitale (PDF con risoluzione di 300 dpi). I dati cartografici sono stati allestiti anche in formato vettoriale (shapefile).

Per l'archiviazione dei dati e l'editing dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento forniti dagli SRAI (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica) versione 4.2.

Per l'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri è stato utilizzato l'apposito software: “MS - SoftMS”, versione 4.2.

L'area oggetto della precedente microzonazione sismica (Livello 1 e 2) nel Comune di Montiano riguarda le zone evidenziate nella figura n. 1.1. Ha una superficie pari a 1.021.935 metri quadri, che equivale all'11% dell'estensione del territorio comunale. In essa risiede circa l'80% della popolazione del Comune.

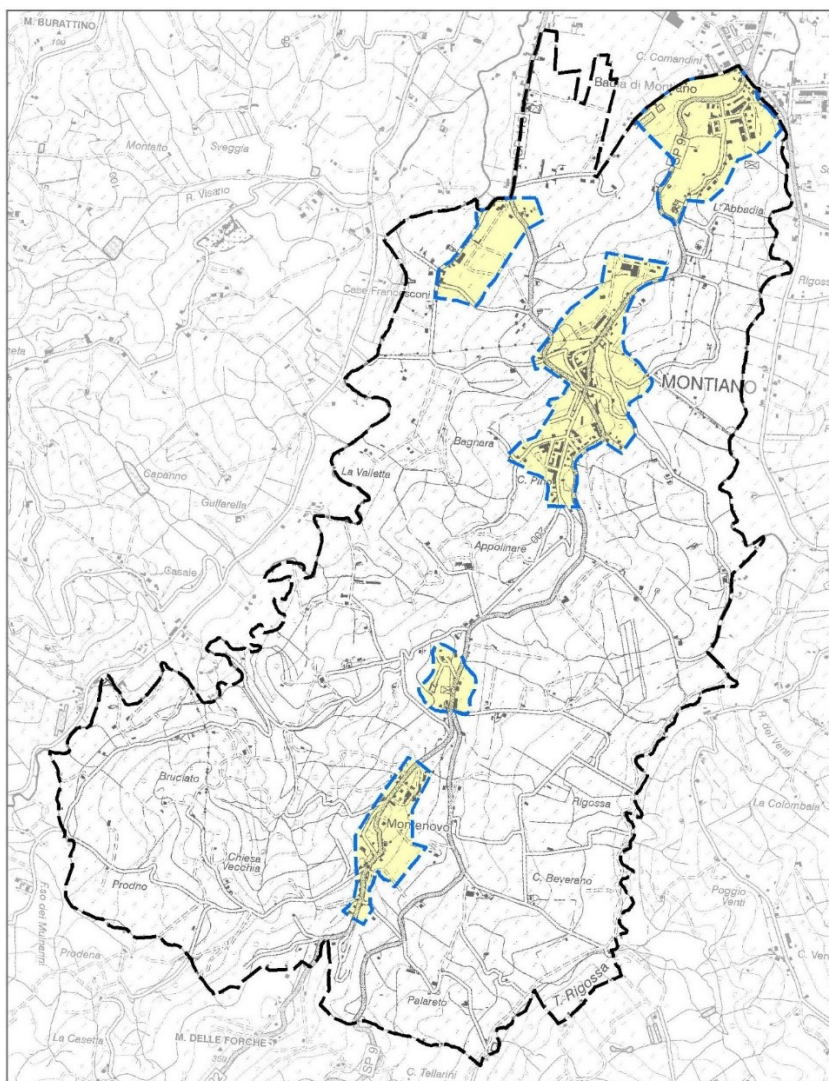


Figura n. 1.1 - Area oggetto di microzonazione sismica di Livello 1 e 2 del Comune di Montiano.

Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	6 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il Comune di Montiano appartiene alla Regione Emilia-Romagna e ricade nella Provincia di Forlì-Cesena (figura 2.1). Il suo territorio, di 9,26 chilometri quadrati, è prevalentemente collinare. L'altitudine massima del Comune (293 m s.l.m.) ricade nei pressi di C. Faedi, quella minima (48 m s.l.m.) è in corrispondenza dell'alveo del torrente Rigossa. L'altitudine media è di circa 150 metri. La pendenza media del territorio comunale è di circa il 21, 88%.



Figura n. 2.1 - Ubicazione di Montiano nell'ambito della Regione Emilia-Romagna.

L'ambito territoriale del Comune di Montiano ricade, in parte, nei seguenti elementi, in scala 1:5.000, dalla CTR della Regione Emilia-Romagna: 255121, 255122, 255123 e 255124. Alla scala 1:10.000, del CTR regionale, ricade nella sezione 255120 Longiano.

Nella figura n. 2.2 è evidente la posizione del Comune di Montiano nell'ambito della Provincia di Forlì-Cesena. Procedendo in senso orario, questo Comune confina a ovest e a nord col Comune di Cesena, ad ovest col Comune di Longiano e a sud col Comune di Roncofreddo.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	7 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

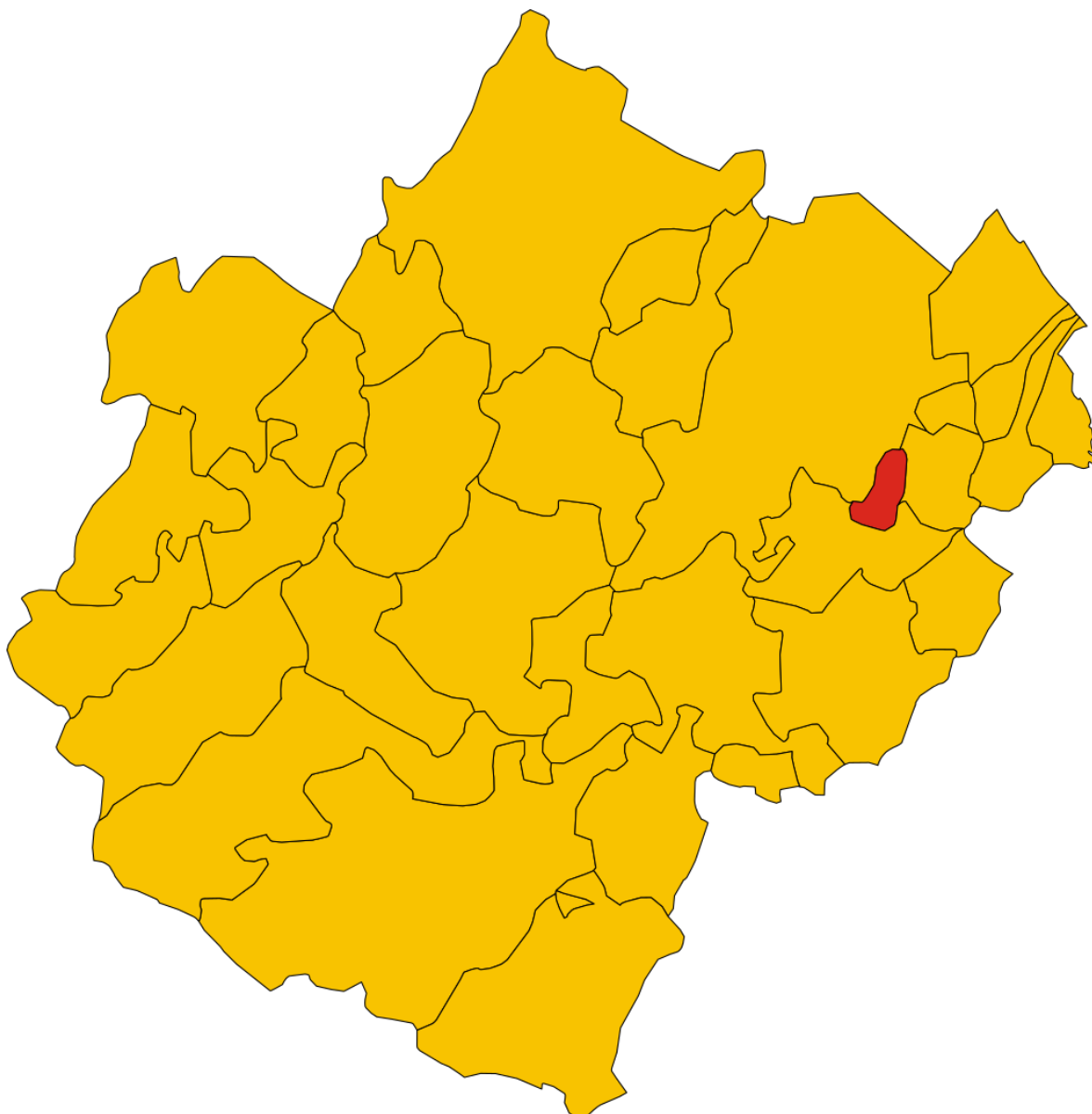


Figura n. 2.2 - Inquadramento del Comune di Montiano (area in rosso) nell'ambito della Provincia di Forlì-Cesena.

2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Per quanto concerne la cartografia ufficiale, il territorio comunale di Montiano ricade:

- nel foglio 255 (Cesena) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, pubblicata nel 2009 dal Servizio Geologico d'Italia (ISPRA);
- nella sezione 255120 Longiano della Carta geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo in scala 1:10.000, edita dalla Regione Emilia-Romagna.

Un inquadramento geologico generale del territorio ove ricade il Comune di Montiano è fornito dallo Schema d'inquadramento regionale, riportato nella figura n. 2.3, tratto del foglio 256 (Rimini) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	8 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

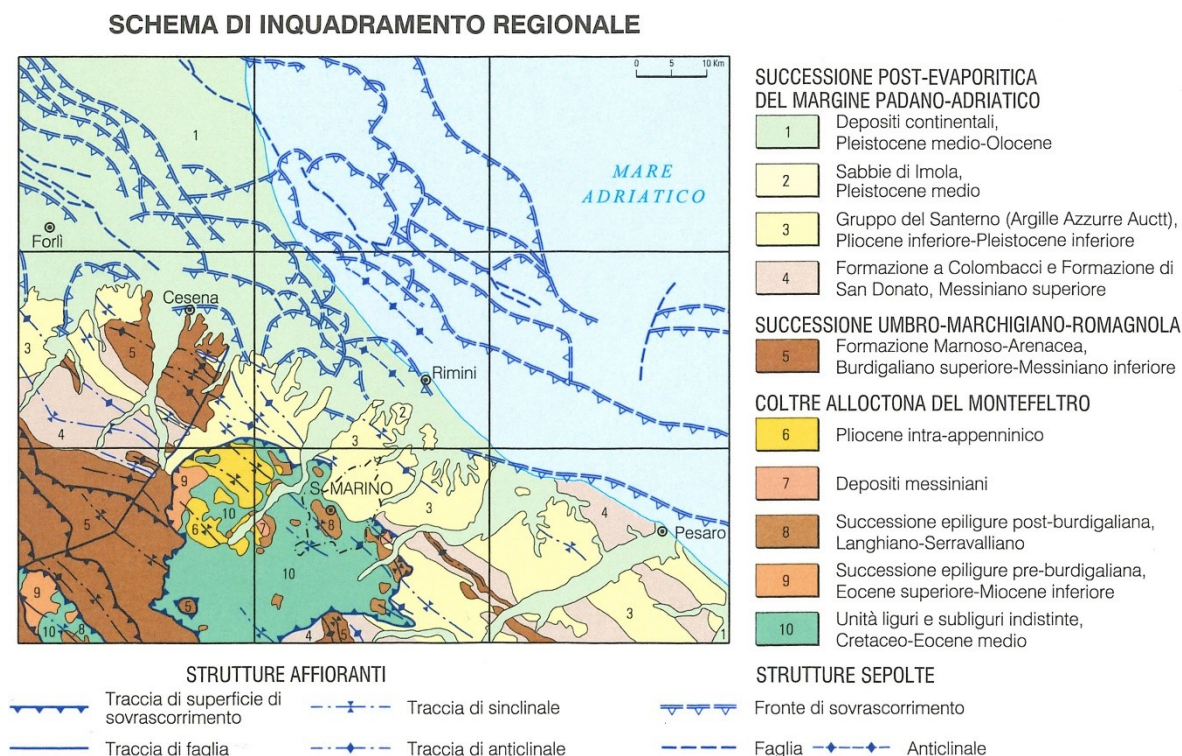


Figura n. 2.3 - Inquadramento geologico generale del territorio in cui ricade il Comune di Montiano.

Nel Comune di Montiano affiorano rocce sedimentarie d'origine marina o continentale formatesi dal Miocene ad oggi. Le particolarità geologiche del territorio in esame sono precisate nella figura n. 2.4, ove è riportato il corrispondente stralcio del foglio 255 (Cesena) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000.

I depositi continentali più significativi, presenti nella zona in esame, sono costituiti dai sedimenti alluvionali quaternari, riguardanti:

- le aree di pianura ad ovest dell'abitato di Montiano, ove affiorano il Subsistema di Ravenna (AES8), del Pleistocene superiore-Olocene, o l'Unità di Modena (AES8a) olocenica;
- le aree collinari ove si estendono a fascia ai margini dei corsi d'acqua, presentandosi come una successione di ripiani, terrazzati a diversa altezza rispetto al fondovalle e separati l'un l'altro da un più o meno ripido dislivello. Questi depositi, oltre che al Subsistema di Ravenna, sono riconducibili al Subsistema di Villa Verucchio (AES7), del Pleistocene superiore, e al Subsistema di Bazzano (AES6) del Pleistocene medio.

Nel Subsistema di Ravenna, a seconda dei luoghi, sono presenti: ghiaie da molto grossolane a fini con matrice sabbiosa, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi argillosi, limi e limi sabbiosi, rispettivamente depositi di conoide ghiaiosa, intravallivi terrazzati e di interconoide; argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di tracimazione fluviale (piana inondabile, argine, e tracimazioni indifferenziate). Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico. Al tetto si trovano suoli, variabili da non calcarei a calcarei, a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente meno di 150 centimetri, talvolta con parziale decarbonatazione; gli orizzonti superficiali sono di colore giallo-bruno.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	9 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo



Figura n. 2.4 - Estratto della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 concernente il territorio comunale di Montiano.

L'Unità di Modena, ove presente, costituisce la parte superiore terminale del Subsistema di Ravenna è costituita essenzialmente da ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, talora organizzate in corpi a geometrie lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi. Depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, deltizi, litorali, di conoide e, localmente, di piana inondabile. Limite superiore coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro.

Nel Subsistema di Villa Verucchio sono presenti ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale, piana intravalliva e conoide alluvionale. Depositi organizzati in diversi ordini di terrazzo. Il tetto dell'unità è generalmente rappresentato da suoli non calcarei molto evoluti di colore bruno scuro. Il limite inferiore è erosivo e discordante sui depositi sottostanti.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	10 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Il Subsintema di Bazzano è costituito da depositi ghiaiosi, sabbiosi e limo-argillosi di terrazzo intravallivo e di conoide alluvionale. Al tetto presenta suoli decarbonatati con fronte di alterazione fino a 5-7 metri, colore variabile da rosso bruno a giallo bruno. Il contatto inferiore è in discontinuità su unità più antiche. La sua potenza in affioramento è inferiore ai 20 metri.

Gli accumuli detritici continentali olocenici, presenti in modo sporadico e localizzato nelle pendici collinari, sono riconducibili a:

- depositi alluvionali o di conoide torrentizia in evoluzione;
- depositi di frane quiescenti o in evoluzione;
- depositi eluvio-colluviali.

Le formazioni d'origine marina, affioranti nelle aree in rilievo del Comune di Montiano e sedimentatesi dal Tortoniano al Pleistocene, sono ascrivibili:

- alle Argille Azzurre (FAA), del Zancleano-Calabrianico;
- alla Formazione Marnoso-Arenacea (FMA), col suo Membro di Castel del Rio, litofacies arenacea (FMA12a) del Tortoniano.

Le Argille Azzurre, dominanti nel territorio collinare di Montiano, sono un deposito marino costituito essenzialmente da argille, argille marnose e marne argillose grigie e grigio-azzurre. Nella loro stratificazione, per lo più media, figurano anche lamine siltose e sottili strati arenacei. Entro questa Formazione si presentano, inoltre, intercalazioni di Membri informali come quello delle Arenarie di Borello (FAA2) del Zancleano: un'alternanza metrica di sequenze marnoso-argillose e sequenze arenacee torbiditiche. Le arenarie, di color grigio-giallastre, sono in genere poco cementate e presentano una forte lenticolarità; gli strati sono da sottili a medi, e solo raramente spessi; di frequente contengono numerosi biosomi e bioclasti, anche grossolani. A queste arenarie si intercalano calcareniti con clasti quarzosi, argille marnose, siltose e sabbiose. Nel territorio in esame questo Membro si presenta, a seconda dei luoghi, con la litofacies arenaceo-pelitica (FAA2ap), con la litofacies conglomeratica (FAA2d) o con la litofacies pelitico-arenacea (FAA2p).

La Formazione Marnoso-Arenacea (Burdigaliano - Messiniano superiore), presente nel territorio in esame con un limitato affioramento ad ovest di Montenovio, è costituita da torbiditi pelitico-arenacee, con subordinate intercalazioni di marne emipelagiche e talvolta con livelli torbiditici carbonatici. La sua successione presenta variabili rapporti arenaria pelite (A/P) ed è stata suddivisa in vari Membri e Litofacies, a volte in parte eteropici. Le areniti, in prevalenza di provenienza alpina e subordinatamente appenninica, hanno in genere una composizione feldspatica e litica, talvolta calcarea. Le loro dimensioni raramente scendono a valori inferiori ai venti centimetri oppure superano il metro. La potenza delle intercalazioni marnose può, invece, ridursi in modo estremo, oppure assumere una netta prevalenza nella sequenza. In casi limite si riscontrano rocce quasi completamente arenacee oppure decisamente marnose.

Nella zona in esame affiora il Membro di Castel del Rio, litofacies arenacea (FMA12a) della Formazione Marnoso-Arenacea, risalente al Tortoniano, contraddistinto da una stratificazione sottile e media, raramente spessa; con strati mal strutturati e poco cementati. Il rapporto A/P è <1.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	11 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

2.3. INQUADRAMENTO TETTONICO

Il territorio comunale di Montiano appartiene strutturalmente all'Appennino Settentrionale¹, la cui tettonica è contraddistinta da ampi fronti di scorrimento, che individuano alcune unità tettoniche fondamentali, e da importanti accavallamenti.

Una sintesi schematica della situazione globale della crosta terrestre, indicativamente valida anche per quanto concerne il territorio del Comune di Montiano, è fornita dalla sezione geologica schematica (figura n. 2.5), che taglia trasversalmente la penisola italiana dalla Toscana alla Romagna e si estende dalla superficie fino alla parte superiore del mantello terrestre².

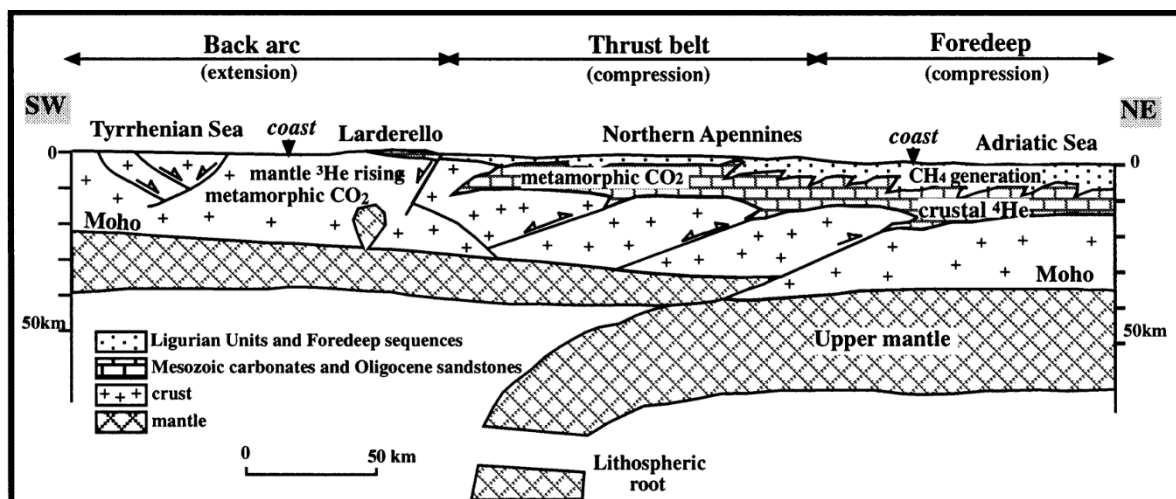


Figura n. 2.5 - Sezione geologica schematica attraverso l'Appennino Settentrionale, estesa dal Tirreno all'Adriatico e dalla superficie al Mantello superiore (da A. MINISSALE E ALTRI, 2.000).

2.4. CARATTERISTICHE SISMOTETTONICHE

Un inquadramento generale delle principali strutture attive sismogenetiche dell'Emilia-Romagna, quindi anche della zona in esame, è fornito dall'apposita carta (figura n. 2.6), a cura del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna.

¹ L'Appennino settentrionale è una catena a falde derivata dal corrugamento e dalla sovrapposizione di prismi sedimentari, depositatisi nel paleo oceano ligure-piemontese e sul margine continentale della microplacca dell'Adria, durante la collisione tra la placca africana e quella europea. L'orogenesi, iniziata nell'Eocene medio e sviluppata soprattutto a partire dall'Oligocene, ha dato luogo a pieghe e a sovrascorrimenti lungo faglie inverse con spostamento generale verso nord-est.

² MINISSALE A., MAGRO G., MARTINELLI G., VASELLI G., TASSI G.F., *Fluid geochemical transect in the Northern Apennines (central-northern Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications*, «Tectonophysics», 319, (2000), p. 218.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	12 di 65

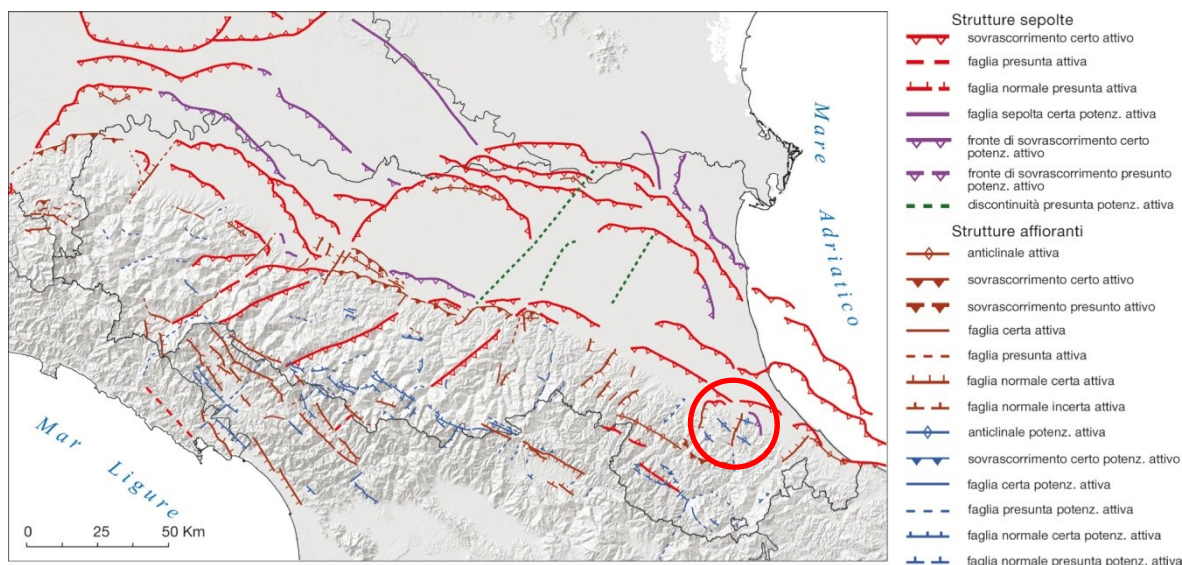


Figura n. 2.6 - Strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute in Emilia-Romagna.

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti specificatamente il territorio comunale di Montiano, sono state ricavate dal *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Version 3.2.0, ossia dal database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area italiana³. La loro distribuzione geografica è evidente nella figura n. 2.7.

Nel territorio di pertinenza di Montiano figura la seguente sorgente sismogenetica composita:

- ♦ ITCS039 - Riminese onshore con Mw max (magnitudo momento massima) 5,9.

³ BASILI R., G. VALENSISE, P. VANNOLI, P. BURRATO, U. FRACASSI, S. MARIANO, M.M. TIBERTI, E. BOSCHI (2008), The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, *Tectonophysics*.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	13 di 65



- ♦ Rimini-Ancona 917 con Mw max_gr (magnitudo momento massima) di 6,14;
- ♦ Medio-Marchigiana/Abruzzese 918 con Mw max_gr (magnitudo momento massima) di 6,37.



⁴ MELETTI C. E VALENSISE G. (a cura) del 2004, Zonazione sismogenetica ZS9 - App. 2 al Rapporto conclusivo.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Nella mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, redatta a cura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (figura n. 2.9) la pericolosità di ciascuna zona è espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi contraddistinti da $V_{s30} > 800$ m/s.

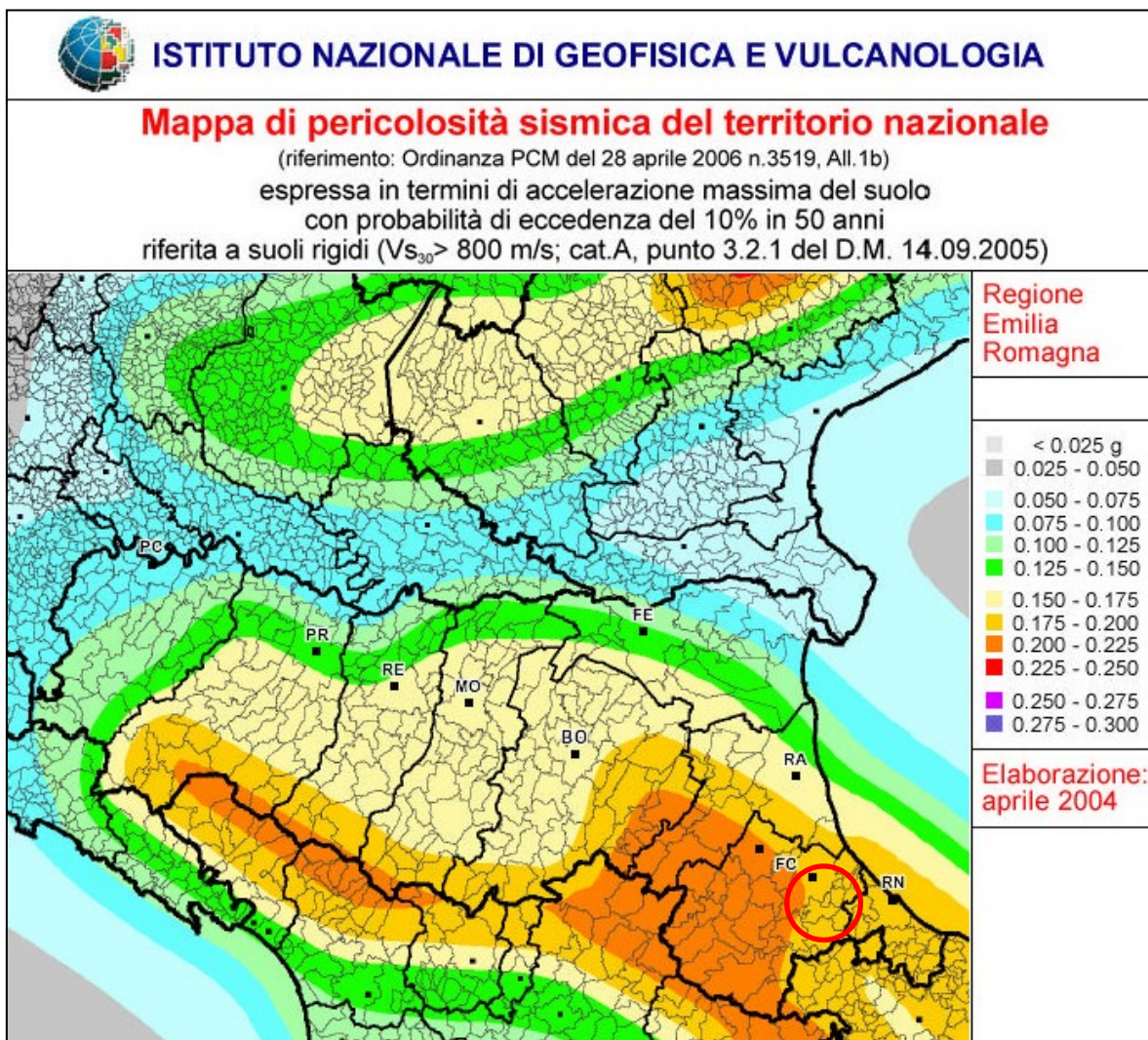


Figura n. 2.9 - Estratto della Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale.

In questa mappa il territorio in esame ricade in un'area caratterizzata da un'accelerazione sismica orizzontale massima a_g pari a 0,175-0,200 g.

2.5. STORIA SISMICA

La storia sismica del Comune di Montiano è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano, versione DBMI15 versione 4.0⁵. Nella tabella n. 2.1 sono riportati gli eventi di maggiore intensità verificatisi a Montiano indicando per

⁵ Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2022). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato Relazione illustrativa	Data Dicembre 2023	Agg. 0	Pag. 15 di 65
---	-------------------------------------	-----------------------	-----------	------------------

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

ciascuno di essi, oltre agli effetti provocati al sito, espressi come intensità (MCS), quando si è verificato, l'area epicentrale, il numero di località coinvolte (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io), e la magnitudo momento (Mw).

TABELLA N. 2.1 - MAGGIORE SISMICITÀ STORICA DEL COMUNE DI MONTIANO

Effetti	In occasione del terremoto del:				
Intensità [MCS]	Data Anno Me Gi Ho Mi Se	Area epicentrale Ax	NMDP	Io	Mw
6-7	1870 10 30 18 34	Forlivese	41	8	5,61
6	1911 02 19 07 18 30.00	Forlivese	181	7	5,26
3	1952 07 04 20 35 12.00	Appennino forlivese	64	7	4,94
F	1952 12 02 06 13 22.00	Appennino forlivese	53	5	4,42
4	1953 12 14 07 11 06.00	Appennino forlivese	48	5-6	4,7
4	1985 11 24 06 54 04.08	Appennino forlivese	29	5-6	4,29
NF	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4,43
4	1987 07 05 13 12 37.46	Montefeltro	90	6	4,44
3-4	1993 11 05 02 01 03.79	Cesenate	10		3,99
3-4	1993 11 07 23 21 11.72	Cesenate	36	4-5	3,95
3	1993 11 09 13 46 24.39	Cesenate	28	4-5	3,93
3-4	1995 12 27 23 44 27.69	Forlivese	37	5	3,97
3	1997 09 26 00 33 12.88	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5,66
4-5	1997 09 26 09 40 26.60	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5,97
3-4	1999 01 25 22 45 58.08	Appennino forlivese	97	5	4,36
NF	2000 05 06 22 07 03.78	Faentino	85	5	4,08
2-3	2000 05 08 12 29 56.20	Faentino	126	5	4,67
NF	2000 05 10 16 52 11.60	Faentino	151	5-6	4,82
4-5	2000 08 01 02 34 31.00	Montefeltro	84	5-6	4,27
NF	2001 11 26 00 56 55.46	Casentino	211	5-6	4,63
NF	2002 11 02 10 57 44.89	Ferrarese	79	4	4,21
4	2003 01 26 20 15 03.07	Appennino forlivese	63	5-6	4,5
3	2003 01 29 23 50 16.38	Appennino forlivese	71	4-5	4,06
3-4	2003 12 07 10 20 33.04	Forlivese	165	5	4,18
NF	2006 10 21 07 04 10.01	Anconetano	287	5	4,21

DEFINIZIONI DELLE SIGLE UTILIZZATE NELLA TABELLA N. 2.1

I [MCS]	Intensità macrosismica espressa in scala MCS. Alcuni effetti non sono esprimibili con la scala MCS per cui vengono utilizzati dei codici alternativi (si veda la relativa tabella)
Data	Data del terremoto
Ax	Area epicentrale, area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto
NMDP	Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto
Io	Intensità macrosismica epicentrale, da CPTI15, espressa in scala MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg [dettagli]
Mw	Magnitudo momento, da CPTI15

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

CODICI ALTERNATIVI MCS UTILIZZATI NELLA TABELLA N. 2.1

Codice	Descrizione
D	danno (damage): danno di entità non precisabile (indicativamente $\text{Int} \geq 6$)
F	avvertito (felt): si ritiene di escludere che si siano verificati danni ($3 \leq \text{Int} \leq 5$)
NC	non classificato (not classified): indica una informazione non classificabile in termini di intensità ovvero con i codici utilizzati
EE	effetti sull'ambiente (environment effects): effetti sull'ambiente in prossimità della località cui vengono riferiti
SW	effetti marini anomali (sea waves): indica maremoto o comunque effetti anomali in mare, in prossimità della località cui vengono riferiti
NR	non segnalato (not reported): utilizzato a volte per segnalare che nelle fonti non vi è menzione di effetti per quella data località
NF	non avvertito (not felt): in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a $\text{Int}=1$
RS	registrazione strumentale: alcuni studi riportano questa informazione, non utilizzabile dal punto di vista macrosismico, che tuttavia si è preferito conservare

A Montiano, com'è evidente nella figura n. 2.10, il maggiore terremoto noto in epoca recente si è verificato nel 1870.

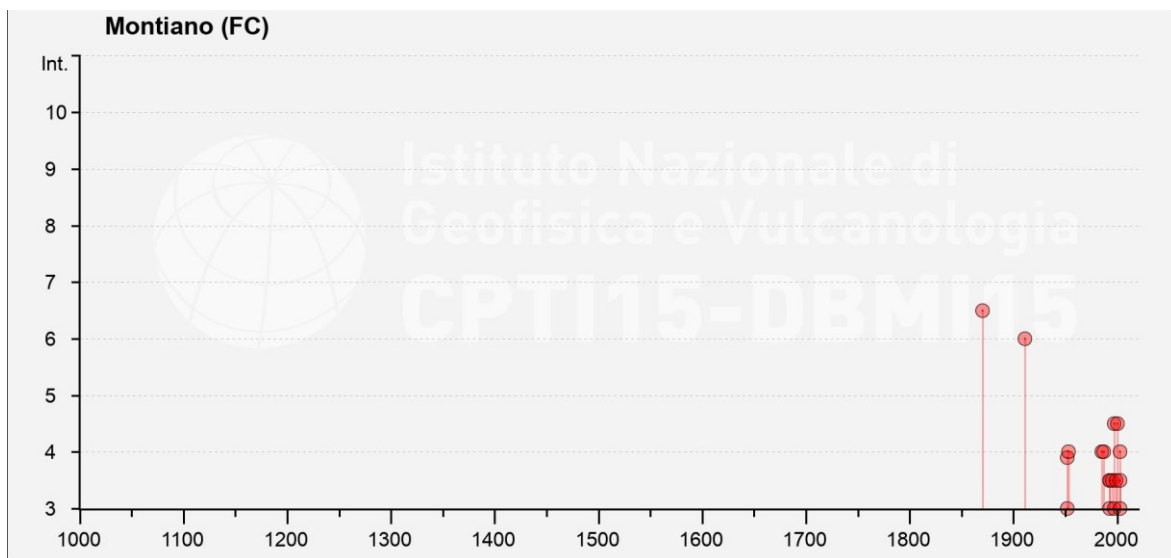


Figura n. 2.10 - I maggiori terremoti storici che hanno colpito Montiano.

Nella figura 2.11, sono riportati i terremoti con magnitudo maggiore di 3 verificatisi nella zona di pertinenza di Montiano dall'inizio del 1985 ad oggi, entro il raggio di 20 chilometri⁶.

⁶ ISIDe Italian Seismological Instrumental and parametric database: <http://iside.rm.ingv.it>

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	17 di 65

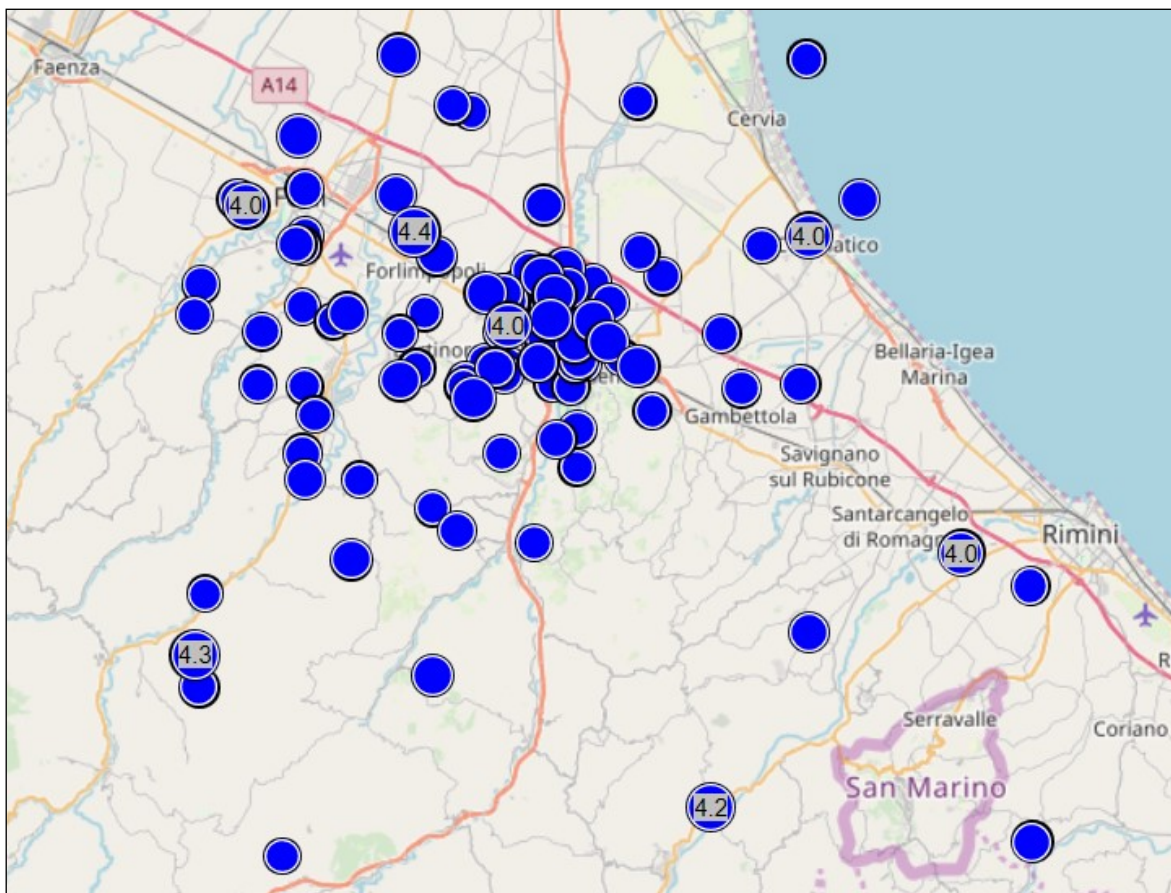


Figura n. 2.11 - Magnitudo e profondità dei sismi verificatisi nella zona di pertinenza di Montiano dall'inizio del 1985 ad oggi.

2.6. CLASSIFICAZIONE SISMICA

Il territorio del Comune di Montiano era classificato sismico di seconda categoria ($S=9$). In base alla classificazione nazionale dei Comuni italiani, stabilita dall'Allegato 1, punto 3 dell'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, i Comuni sismici italiani sono pertanto distinti in 4 zone. Le prime, con sismicità alta ($S=12$), media ($S=9$) e bassa ($S=6$), erano già state definite dalla Legge 64/74. Viceversa, la zona 4 è di nuova introduzione. A ciascuna di queste zone è stato assegnato uno specifico valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (tabella n. 2.2).

TABELLA N. 2.2 - ZONE SISMICHE E MASSIMI VALORI DI a_g

ZONA	VALORI MASSIMI DI a_g
1	$>0,25$
2	$0,15 \div 0,25$
3	$0,05 \div 0,15$
4	$<0,05$

In base alla Classificazione sismica della Regione Emilia-Romagna, evidente nella figura n. 2.12, il territorio comunale di Montiano appartiene alla zona 2.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

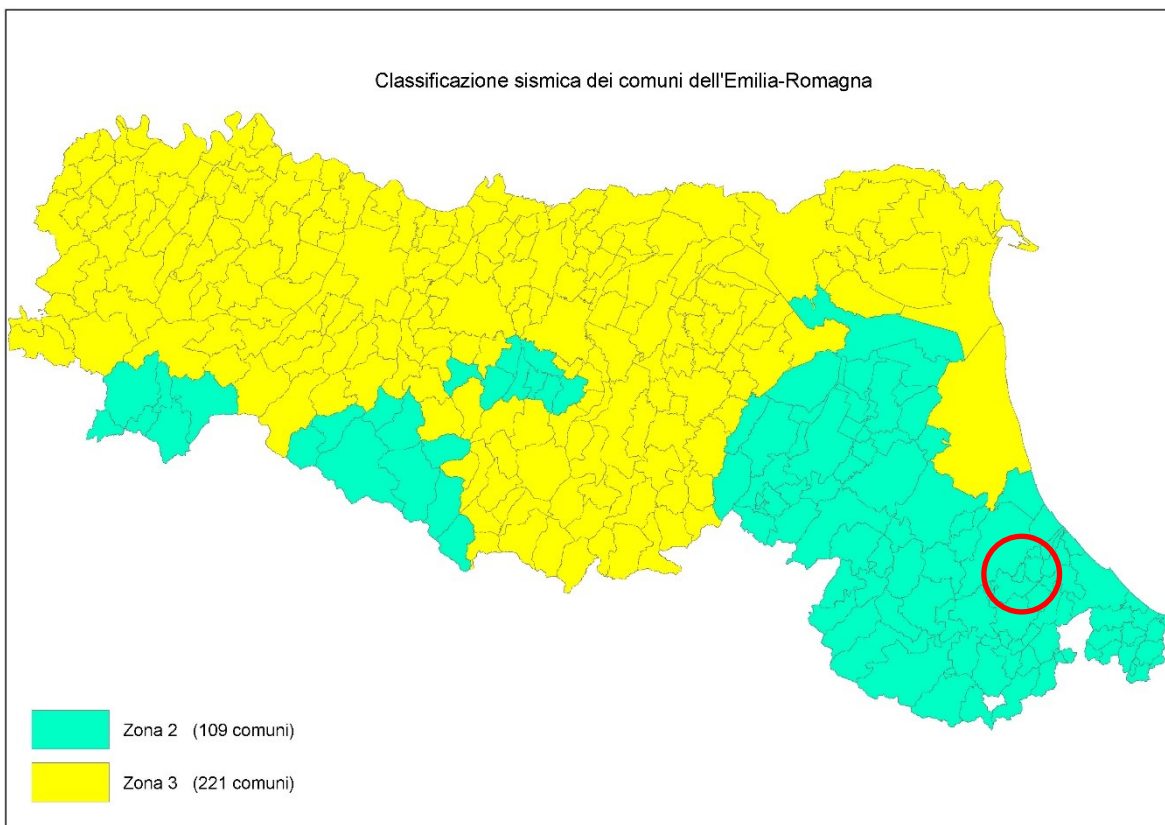


Figura n. 2.12 - Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna. DGR n° 146 del 06/02/2023 "Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna".

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	19 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

3.1. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

I dati acquisiti ed elaborati in questa sede derivano:

- dalla raccolta ed elaborazione di quanto disponibile in merito alle aree considerate presso l'Ufficio Tecnico comunale, la Provincia di Forlì-Cesena, il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e gli archivi personali dei partecipanti a questo studio;
- da un'apposita campagna d'indagini, attuata allo scopo di acquisire un'adeguata conoscenza della specifica situazione locale.

Nella tabella n. 3.1 è fornito il quadro d'assieme delle prove acquisite o appositamente realizzate per gli studi di microzonazione del Comune di Montiano.

TABELLA N. 3.1 - PROVE IN SITO DISPONIBILI (COMUNE DI MONTIANO)

Tipo di prova in sito	Archivio				Prove realizzate nel 2019	Prove aggiunte nel presente studio	Totale
	RER	Provincia	Comune	Geol. Moroni			
Sondaggi a carotaggio continuo	2	3					5
Prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DS)				2			2
Prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP)		3					3
Prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)	19	14	1	1			35
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)			1				1
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)		4					4
Prove penetrometriche statiche con punta mecc. (CPT)	4	9	11	5	3		32
Microtremori (HVSr)		2		2	20	2	26
MASW		3		2	4		9
REMI		1		1	8	2	12
Totale	25	39	13	13	35	4	129

Delle 129 prove in sito acquisite (sondaggi, penetrometrie e prove geofisiche):

- 77 provengono dagli archivi degli Enti, di cui 13 da quello del Comune di Montiano, 39 da quello della Provincia e 25 da quello della Regione Emilia-Romagna;
- 13 derivano da archivi personali;
- 35 sono state effettuate nell'ambito dell'indagine di II livello;
- 4 nell'ambito della presente indagine.

L'insieme dei dati geologici e geofisici così acquisiti, unitamente alle informazioni presenti nella letteratura ed ai risultati dei numerosi sopralluoghi effettuati nell'ambito di Montiano, hanno permesso di ricostruire il modello geologico del territorio interessato dallo studio di microzonazione sismica.

L'ubicazione degli elementi stratigrafici e geofisici acquisiti è riportata nella **Carta delle indagini** in scala 1:4.000. Tutti i dati acquisiti sono stati inoltre trasformati in formato digitale con modalità georiferita, al fine di consentirne l'elaborazione in ambiente GIS. Sia i dati di base, sia quelli elaborati sono stati

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	20 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

inoltre organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto di quanto indicato negli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2.

3.2. SONDAGGI E PENETROMETRIE

In merito al territorio comunale in oggetto, com'è evidente nella tabella n. 3, sono disponibili complessivamente 5 sondaggi a carotaggio continuo, 37 prove penetrometriche statiche (3 CPT sono state realizzate nel presente studio) e 40 prove penetrometriche dinamiche. I sondaggi e le penetrometrie hanno raggiunto rispettivamente profondità massime di 15,5 metri e di 15 metri.

3.3. PROVE GEOFISICHE

L'insieme delle prove geofisiche, raccolte o appositamente realizzate nell'area in esame, è ascrivibile ai seguenti tipi:

- Microtremori a stazione singola (HVSr), prove complessive n. 26, di cui 20 eseguite per lo studio di II livello e 2 in questa sede;
- Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), prove complessive n. 9, di cui 4 effettuate durante lo studio di II livello;
- Refraction Microtremor (Re.Mi.) prove complessive n. 12, di cui 8 attuate nell'ambito dello studio di II livello e 2 di questa ricerca.

I dati registrati sono stati poi elaborati e restituiti graficamente con le usuali procedure. L'ubicazione di queste prove è precisata nella **Carta delle indagini** in scala 1:4.000.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	21 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

4. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Basilare, in uno studio di Microzonazione sismica, è la definizione, più accurata possibile, del modello geologico del sottosuolo locale con particolare riferimento all'individuazione della profondità del substrato rigido.

Mentre si rimanda ad una seguente parte della presente relazione la descrizione della situazione dei vari settori del Comune di Montiano, distinti in base all'elaborazione dell'insieme dei dati acquisiti nell'ambito della presente ricerca, è opportuno soffermarsi, a questo punto, sull'assetto generale del sottosuolo locale, che può modificare il moto sismico in superficie e condizionare gli effetti sismici locali.

Nell'ambito territoriale di Montiano, com'è già stato fatto rilevare, domina l'affioramento delle Argille Azzurre (FAA), seguito, in ordine d'importanza dai depositi continentali del Pleistocene medio - Olocene, di cui i più recenti sono particolarmente diffusi nel settore ovest e nord ovest dell'area considerata, mentre quelli più antichi sono riconducibili alle alluvioni terrazzate collinari. Un limitato affioramento del Membro di Castel del Rio - litofacies arenacea (FMA12a) della Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) si presenta infine ad ovest di Montenovio.

In gran parte del territorio di Montiano emergono rocce di pertinenza delle Argille Azzurre e molto subordinatamente marnoso-arenacee. Su di esse poggiano le alluvioni terrazzate collinari. I depositi alluvionali della pianura poggiano invece anche su sedimenti continentali più antichi. Si vedano, in proposito, le sezioni geologiche, raccolte nella Carta geologico-tecnica in scala 1:10.000 allegata.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	22 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

5. DETERMINAZIONI ED INCERTEZZE

Nel **rilievo dei microtremori** per analisi dei rapporti spettrali delle componenti orizzontale e verticale del moto (HVSr) e nelle relative analisi sono state seguite le linee guida del progetto SESAME (European research project - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration) con le tecniche di acquisizione e le modalità di elaborazione esplicitate negli indirizzi e criteri per la microzonazione sismica.

Questo metodo (HVSr o di Nakamura) si basa sul rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del noise, assumendo che la componente verticale (V) nel passare dal *bedrock* alla superficie non subisce amplificazione, e consente di determinare la “*frequenza di risonanza*” di uno strato caratteristico del sito, per il quale assume il valore massimo il rapporto $RHV = HS/VS$ (*Horizontal to Vertical Ratio*) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo.

Ciascuna prova realizzata ha fornito, in particolare, un grafico del rapporto spettrale H/V - frequenza, in cui si possono osservare il picco o i picchi caratteristici, in corrispondenza di determinate frequenze.

Per determinare la qualità delle singole misure HVSr effettuate e la loro relativa affidabilità, si è proceduto all'analisi della durata complessiva delle singole registrazioni, utilizzando quelle capaci di produrre stime “robuste” del campo medio delle vibrazioni ambientali. Solo la misura 040028P99HVSr99 non rispetta i primi 3 criteri del progetto SESAME (linee guida 2005), relativi alla robustezza statistica del segnale.

Per ogni singola acquisizione è stato inoltre valutato l'andamento complessivo della curva H/V, prestando particolare attenzione, durante la fase di elaborazione, alla plausibilità fisica della curva stessa, verificabile attraverso l'individuazione di massimi caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale.

In fase di elaborazione, sfruttando le possibilità di analisi direzionale e temporale del software utilizzato (Grilla), è stata valutata la stazionarietà temporale dei rapporti spettrali misurati, prestando inoltre particolare attenzione alle variazioni azimuthali di ampiezza, nel rispetto della condizione di isotropia del segnale.

Con riferimento ai criteri delle linee guida SESAME 2005, relativi alla “chiarezza” del picco di possibile risonanza, si osserva che:

- le misure realizzate nel 2019 in soli quattro casi soddisfano almeno 5 su 6 criteri (040028P18HVSr18, 040028P19HVSr19, 040028P76HVSr76, 040028P97HVSr97);
- entrambe le misure effettuate nel 2023, non soddisfano questi criteri.

Nei **rilievi in array** effettuati è stato utilizzato un sismografo marca MICROMED modello SoilSpy Rosina a 24 canali (matricola SAA---0027/4-12) collegato ad un pc *netbook*. Operativamente è stata realizzata una stesa di 7 - 10 geofoni verticali da 4,5 Hz, a seconda della disponibilità di spazio, interspaziati 3,0 m.

In campagna si è svolto quindi un rilievo in attivo energizzando un punto a 3,0 m dal primo geofono (*offset*) per la tecnica **M.A.S.W.** ed uno in passivo per la tecnica **Re.Mi.** I dati sono acquisiti con frequenza di campionamento pari a 1024 Hz per la **M.A.S.W.** e pari a 256 Hz per la **Re.Mi.** tramite il *software* Rosina.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	23 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

I dati acquisiti sono stati analizzati con l'ausilio del *software* Grilla scegliendo, di volta in volta, a giudizio dell'operatore, la tecnica che ha meglio approssimato la condizione sismostratigrafica reale.

L'acronimo **M.A.S.W.** significa *Multichannel Analysis of Surface Waves* mentre **Re.Mi.** significa *Refraction Microtremor* e sono tecniche superficiali non invasive per il calcolo del profilo di velocità delle onde di taglio Vs a partire da una acquisizione attiva nel primo caso e passiva nel secondo.

In entrambe i metodi si utilizza una analisi della dispersione delle onde superficiali di *Rayleigh*, in particolare per la loro componente verticale, nel primo caso utilizzando il tempo dei primi arrivi, mentre nel secondo analizzando l'intera curva rilevata.

Utilizzando la componente Z per le onde di *Rayleigh* si ottiene quindi una curva di dispersione dalla quale ricavare un profilo di Vs in condizioni di 1 D e strati pian paralleli. Questa curva è stata realizzata con il *software Grilla* che analizza per ogni singola frequenza una velocità di prova compresa in un *range* (ad esempio 50 m/s - 350 m/s) ad un passo (per esempio 2 m/s) preimpostati dall'operatore.

Per la tecnica **M.A.S.W.** per ogni Vs di prova il programma calcola il tempo di arrivo dell'impulso ai vari geofoni (G2, G3, Gn), nota la distanza tra i ricevitori.

A questo punto con l'operazione di *slant* si arretrano le varie tracce (G2, G3, Gn) del tempo corrispondente, sommando poi le serie temporali, ovvero le tracce (*stacking*).

La correlazione massima per le velocità di prova più prossime a quella reale, ovvero la massima ampiezza del segnale sommato, sarà quella in cui le onde saranno riposizionate in fase.

Dopodiché si giunge alla curva di dispersione avente alle ascisse la frequenza ed alle ordinate la Vs.

Per la **Re.Mi.** l'elaborazione del segnale è data da una trasformata bidimensionale *Slowness – Frequency* che analizza l'energia di propagazione del rumore in entrambe le direzioni della linea sismica rappresentando lo spettro di potenza su di un grafico *p – f*. La zona colorata in rosso è quella in cui, attraverso l'operazione di *slant/stack* si giunge a trovare la Vs che meglio fitta le varie serie temporali alle finestre di frequenza.

Si può arrivare ad assimilare la zona rossa con una spezzata passante per la **M.A.S.W.** al centro mentre per la **Re.Mi.** nel limite inferiore.

La retta presenta pendenze variabili e ad ogni cambio di pendenza si rilevano Vs e profondità che andranno poi a ricostruire i sismostrati.

La retta tende all'infinito quando per tutte le velocità di prova si ha lo stesso grado di correlazione, ovvero si hanno infinite soluzioni.

La massima lunghezza d'onda indagata è data quindi dalla relazione:

$$\lambda_{\max} = V_{\max} / f_{\min}$$

con: $\lambda_{\max}$ = massima lunghezza d'onda indagata; $V_{\max}$ = massima velocità prima che la retta tenda all'infinito; $f_{\min}$ = frequenza corrispondente alla $V_{\max}$.

I rilievi in array sono stati implementati da rilievi **H.V.S.R.** quando la vicinanza dei rilievi può garantire l'univocità di risultati.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	24 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

6.1. PRIMA FASE DEL LAVORO

Nella prima fase di lavoro, concernente le aree del Comune di Montiano da sottoporre allo studio di Microzonazione Sismica (territorio urbanizzato e urbanizzabile), sono stati acquisiti tutti i dati bibliografici e di archivio disponibili, sono stati condotti puntuali rilievi sul territorio ed è stata analizzata la cartografia geologica e geomorfologica fruibile. In seguito, tenendo conto dell'insieme degli elementi acquisiti, è stata predisposta ed eseguita un'attenta campagna di rilievi integrativi e di controllo.

A conclusione di questa prima fase d'indagini, come in seguito precisato, sono stati predisposti i seguenti elaborati:

- **Carta delle indagini (scala 1:4.000)** - In questa carta è riportata l'ubicazione, di tutte le indagini in sito acquisite o realizzate in questa sede, distinte in base alla specifica tipologia (sondaggi, penetrometrie, prove geofisiche);
- **Carta geologico-tecnica (scala 1:10.000)** - Questa carta, estesa a tutto il territorio comunale, prende in esame i terreni di copertura, il substrato geologico, le instabilità dei versanti, gli elementi geologici e idrogeologici e gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura.
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:10.000)** - In questa carta sono riportate le ubicazioni dei punti ove sono state eseguite le indagini sismiche HVSR, con simbolicamente precisato il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (*frequenza principale*). A fianco di ciascun simbolo è riportata la frequenza relativa al primo picco significativo (in rosso). Nel caso sia presente, è indicata anche la frequenza (in blu) di un secondo picco (*frequenza secondaria*). Le misure inoltre sono state suddivise in classi sulla base delle frequenze ($F_0 \leq 0.6$ Hz; $0.6 < F_0 < 1$; $1 < F_0 \leq 2$ Hz; $2 < F_0 \leq 8$ Hz; $F_0 > 8$ Hz) e dell'ampiezza del picco ($1,5 \leq \text{HVSR} < 2$; $2 \leq \text{HVSR} < 3$; $\text{HVSR} \geq 3$).
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000)** - In questa carta, estesa a tutto il territorio comunale, sono state individuate le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, distinte in tre zone, le zone di attenzione per instabilità, i punti di misura di rumore ambientale e le tracce utilizzate per gli approfondimenti delle amplificazioni topografiche.

6.2. SECONDA FASE DEL LAVORO

La seconda fase del presente lavoro, la cui esecuzione ha seguito in continuità l'esecuzione della prima, ha portato alla realizzazione della **Carta delle velocità delle onde di taglio S** in scala 1:10.000. In questa carta è precisata l'ubicazione degli stendimenti per determinazioni MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), concernenti il territorio in esame, con precisato il rispettivo valore di V_{s30} .

6.3. TERZA FASE DEL LAVORO

Nella terza ed ultima fase di lavoro si è, infine, proceduto con la riproposizione di un'analisi semplificata nelle aree sottoposte a microzonazione sismica di Livello 2 ed un'analisi approfondita per gli areali sottoposti a microzonazione sismica di Livello 3.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	25 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

La microzonazione sismica di Livello 3 è stata sviluppata sulla zona di attenzione per instabilità di versante - Zona 8 (ZAFR), limitatamente a due movimenti franosi presenti nel settore ovest dell'abitato di Montiano.

In questa fase è stata, pertanto, sviluppata l'analisi approfondita che ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione che hanno permesso di realizzare la verifica di stabilità. In questa sede sono stati prodotti i seguenti elaborati:

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,1 - 0,5 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,4 - 0,8 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,7 - 1,1 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,5 - 1,5 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,1 - 0,5 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,0 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,5 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,4 - 0,8 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,7 - 1,1 s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,5 - 1,5 s}$ in scala 1:10.000

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	26 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

7. ELABORATI CARTOGRAFICI

7.1. CARTA DELLE INDAGINI

Nella **Carta delle indagini** in scala 1:4.000, composta da n. 2 tavole, concernente il territorio di Montiano è riportata l'ubicazione di tutte indagini in sito disponibili. Pertanto, nella relativa legenda figurano i seguenti elementi:

- Sondaggio a carotaggio continuo;
- Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT);
- Prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPTE);
- Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU);
- Prova penetrometrica dinamica superpesante (DPSH);
- Prova penetrometrica dinamica pesante (DPH);
- Prova penetrometrica dinamica leggera (DL);
- Stazione microtremore a stazione singola (HVSr);
- Stratigrafia zona MS (teorica);
- MASW;
- Re.Mi;
- Confine comunale;
- Aree oggetto di microzonazione.

7.2. CARTA GEOLOGICO-TECNICA PER MICROZONAZIONE SISMICA

La realizzazione della **Carta geologico-tecnica** in scala 1:10.000 del territorio del Comune di Montiano ha consentito di definire il modello del sottosuolo del Comune in oggetto ed è stata funzionale anche alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000). In essa sono stati distinti:

- terreni di copertura,
- substrato geologico,
- instabilità di versante,
- elementi tettonico strutturali,
- forme di superficie e sepolte,
- elementi geologici e idrogeologici,
- ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura,
- confine comunale,
- aree oggetto di microzonazione.

Dovendo attenersi agli standard di rappresentazione dettati dagli SRAI, i terreni di copertura sono stati distinti sulla base delle caratteristiche tessiturali, come di seguito specificato:

- **CL** - Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre: ricomprendono i depositi alluvionali e i depositi eluvio colluviali del Pleistocene medio-Olocene.

Il substrato geologico affiorante o subaffiorante è classificabile come:

- **SFALS** - Alternanza di litotipi stratificati fratturati o alterati, coincidente con le Argille Azzurre.
- **SFCOS** - Coesivo sovraconsolidato fratturato o alterato.
- **ALS** - Alternanza di litotipi stratificati.

L'instabilità di versante è stata distinta in:

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	27 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

- Scorrimento - attiva,
- Scorrimento - quiescente,
- Colata - attiva,
- Colata - quiescente,
- Complessa - attiva,
- Complessa - quiescente,
- Non definita - attiva,
- Non definita - quiescente.

Gli elementi tettonico strutturali sono stati così ripartiti:

- faglia inversa non attiva (incerta),
- faglia a cinematismo non definito non attiva (certa),
- faglia a cinematismo non definito non attiva (incerta),
- sinclinale,
- anticlinale.

Le forme di superficie e sepolte sono:

- conoide alluvionale.

Gli elementi geologici e idrogeologici comprendono:

- profondità (m) substrato geologico raggiunto da pozzo o sondaggio,
- traccia di sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo;
- giacitura degli strati.

Gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura sono suddivisi in:

- terrazzo fluviale,
- eluvi-colluvi,
- argine/barre/canali.

7.3. CARTA DELLE FREQUENZE NATURALI DEI TERRENI

La **Carta delle frequenze naturali dei terreni** in scala 1:10.000, del territorio del Comune di Montiano è stata realizzata utilizzando i dati sui microtremori disponibili e ubicando i punti ove sono state effettuate le misure HVSR. Nella relativa legenda, con riferimento a ciascuna prova, sono state precisate:

- la frequenza di picco significativa;
- l'ampiezza di picco;
- lo spessore atteso.

Al lato di ciascun simbolo sono riportate le frequenze relative al primo picco significativo (in rosso) e al secondo picco (in blu) se presente.

Sono inoltre indicati:

- il confine comunale;
- le aree oggetto di microzonazione.

L'esame della carta evidenzia la presenza di picchi H/V in prevalenza compresi tra 1 e >8 Hz, con ampiezza generalmente tra 2 e ≥ 3 .

7.4. CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA

La **Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica** (MOPS) in scala 1:10.000 del territorio del Comune di Montiano, individua:

- le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (zone da 1 a 6);
- le zone di attenzione per instabilità con instabilità di versante (zona 7);

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	28 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

- i punti di misura di rumore ambientale (con indicazione del valore f_0 in rosso);
- la traccia per gli approfondimenti delle amplificazioni topografiche;
- il confine comunale;
- le aree oggetto di microzonazione.

Le figure da 7.1 a 7.7 mostrano le colonne stratigrafiche sintetiche rappresentanti le MOPS (zone da 1 a 7).

MOPS - ZONA 1 - Codice 2001

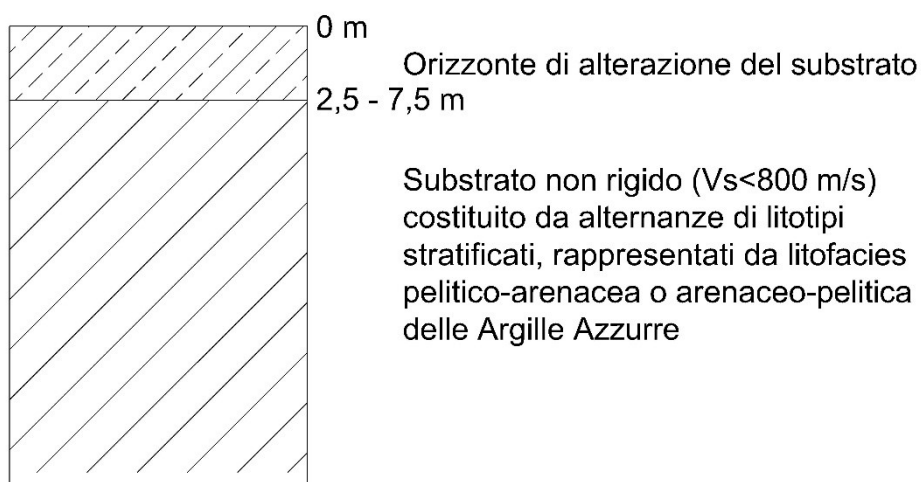


Figura n. 7.1 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 1 Cod. 2001.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	29 di 65

MOPS - ZONA 2 - Codice 2002

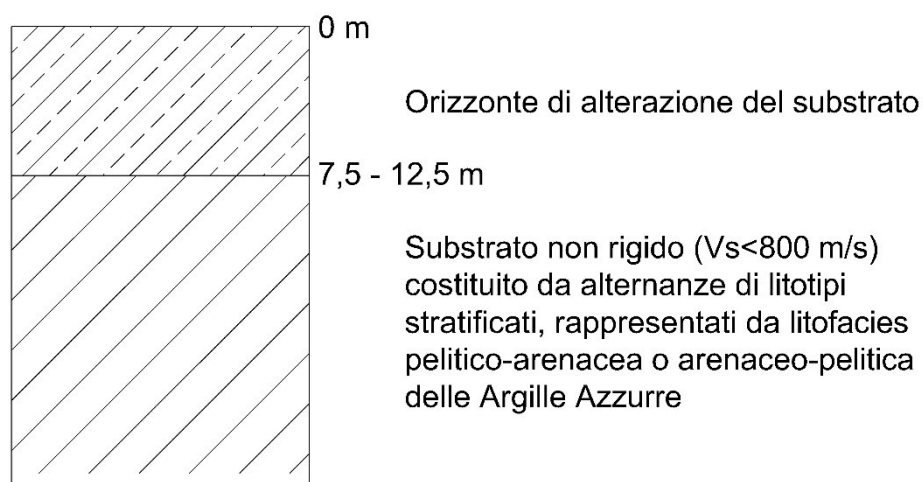


Figura n. 7.2 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 2 Cod. 2002.

MOPS - ZONA 3 - Codice 2003

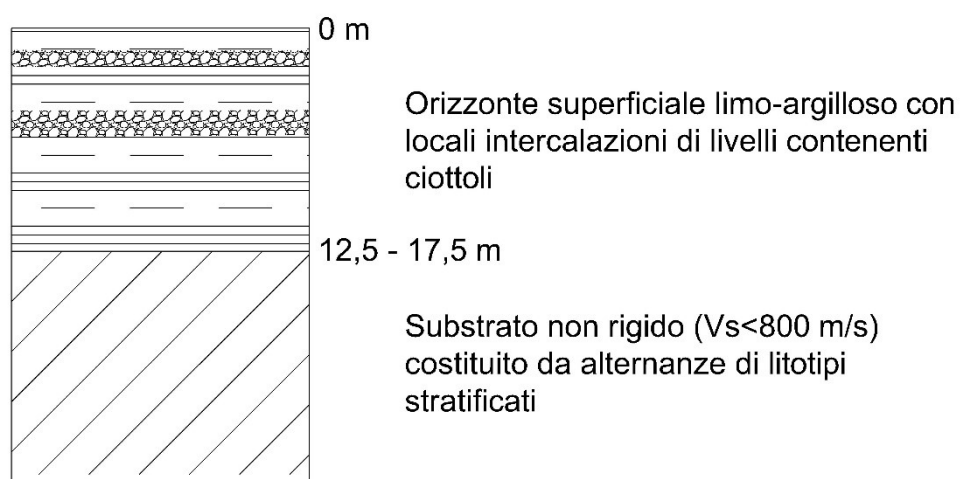


Figura n. 7.3 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 3 Cod. 2003.

MOPS - ZONA 4 - Codice 2004

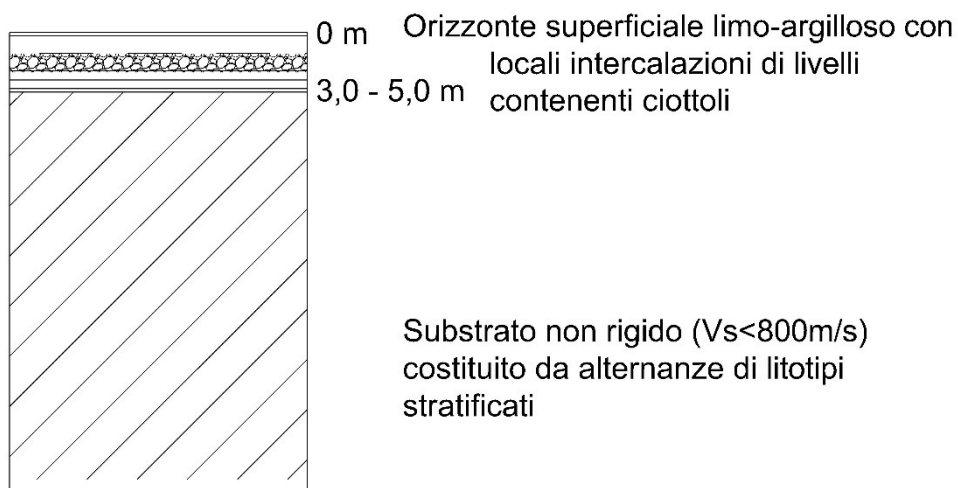


Figura n. 7.4 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 4 Cod. 2004.

MOPS - ZONA 5 - Codice 2005

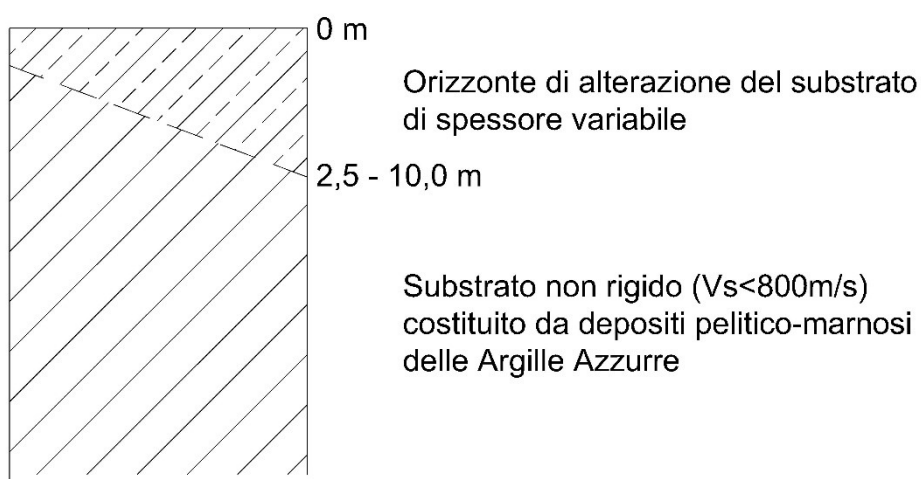


Figura n. 7.5 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 5 Cod. 2005.

MOPS - ZONA 6 - Codice 2006



Figura n. 7.6 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 6 Cod. 2006.

MOPS - ZONA 7 - Codice 2007 - ZAFR

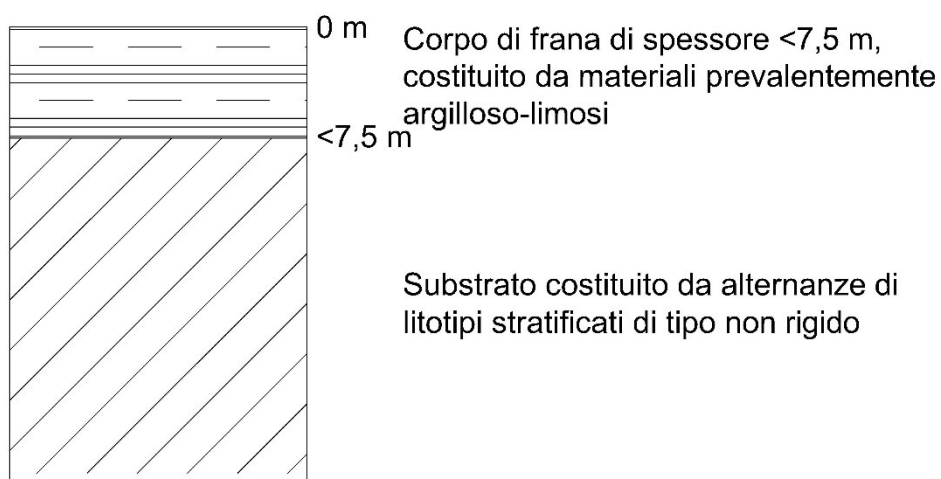


Figura n. 7.7 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 7 Cod. 2007 - ZAFR.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

7.5. CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S

Nella **Carta delle velocità delle onde di taglio S** in scala 1:10.000 del territorio del Comune di Montiano sono indicate:

- le MASW, con indicato il valore di V_{sh} in m/s,
- le Re.Mi., con indicato il valore di V_{sh} in m/s,
- il confine comunale,
- le aree oggetto di microzonazione.

7.6. CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA

Nelle seguenti tavole, conclusive del presente studio:

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,1 - 0,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,4 - 0,8 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,7 - 1,1 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,5 - 1,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $0,1 - 0,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $0,5 - 1,0 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $0,5 - 1,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $0,4 - 0,8 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $0,7 - 1,1 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $0,5 - 1,5 s$ in scala 1:10.000

sono riportati i seguenti elementi:

- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali;
- Zone di attenzione per instabilità di versante (livello 2);
- Zone suscettibili di instabilità (livello 3);
- Confine comunale;
- Aree oggetto di microzonazione.

Nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (livello 2) viene raffigurata la stima dell'amplificazione effettuata tramite procedure semplificate (utilizzo di abachi e formule), possibile laddove l'assetto geologico è assimilabile ad un modello fisico monodimensionale.

L'amplificazione è stata quantificata in termini di:

- $F_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito;
- $FA = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T : SA_1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SA_2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$, SA_3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$, SA_4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
- $FH = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T : SI_1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SI_2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$, SI_3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	33 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

La scelta dell'abaco per la stima è stata effettuata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo. Per quanto riguarda le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e per quelle di attenzione per instabilità di versante (Livello 2) sono state impiegate le tabelle degli indirizzi regionali denominate "Appennino", riferite alla presenza di substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) con sovrastanti depositi di copertura con spessore maggiore di 3,0 metri. Si vedano le seguenti tabelle.

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

Fattore di Amplificazione **PGA**

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

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

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

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

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	34 di 65

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

Fattore di Amplificazione SA3 (0,7s≤T≤1,1s)

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

Fattore di Amplificazione SI1 (0,1s≤T≤0,5s)

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

Fattore di Amplificazione SI2 (0,5s≤T≤1,0s)

Per le Zone suscettibili di instabilità (Livello 3), i valori dei fattori di Amplificazione sono stati calcolati attraverso un'analisi di Risposta Sismica Locale evidente nel capitolo successivo. La tabella n. 7.1 riporta la sintesi dei Fattori di Amplificazione delle varie microzone.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

TABELLA N. 7.1 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DETERMINATI - III LIVELLO

MOPS	ZONA	VS	FORMAZIONE GEOLOGICA	FATTORI DI AMPLIFICAZIONE								NOTE
				FPGA	FA 0,1-0,5 S	FA 0,4-0,8 S	FA 0,7-1,1 S	FA 0,5-1,5 S	FH 0,1-0,5 S	FH 0,5-1,0 S	FH 0,5-1,5 S	
STAB	2001	Vs5=200	FAA	2,0	1,8	1,4	1,3	-	1,7	1,4	-	Livello 2
	2002	Vs10=200	FAA - ec	2,2	2,3	1,8	1,5	-	2,3	1,6	-	Livello 2
	2002*	Vs10=250	FAA	2,0	1,9	1,5	1,4	-	1,9	1,4	-	Livello 2
	2003	Vs15=250	AES8 - ec	2,1	2,2	1,9	1,5	-	2,3	1,6	-	Livello 2
	2003	Vs15=200	AES8	2,2	2,5	2,3	1,7	-	2,6	1,9	-	Livello 2
INSTAB	2007	Vs5=200	a1 - a2	2,0	1,8	1,4	1,3	-	1,7	1,4	-	Livello 2
	2007 Id_i=3		a1	1,83	1,85	1,94	1,77	1,74	1,98	1,82	1,69	Livello 3 - RSL
	2007 Id_i=4		a1	1,79	1,68	2,24	2,12	2,1	1,86	2,2	2,04	Livello 3 - RSL

*zone caratterizzate da amplificazione stratigrafica e topografica

Lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in g) è stato espresso attraverso il parametro H, dato dal prodotto dell'Acceleration Spectrum Intensity (ASI), integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per determinati intervalli di periodi, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H = \frac{ASI}{\Delta T} \times FA$$

I valori di ASI sono stati determinati attraverso gli spettri di risposta a pericolosità uniforme in pseudo-accelerazione con Tr pari a 475 anni, riferiti al baricentro di ogni MOPS.

I periodi considerati per la determinazione dello scuotimento atteso sono i seguenti:

- $0,1s \leq T \leq 0,5s \rightarrow H_{sm}$
- $0,4s \leq T \leq 0,8s \rightarrow H_{0,4-0,8s}$
- $0,7s \leq T \leq 1,1s \rightarrow H_{0,7-1,1s}$
- $0,5s \leq T \leq 1,5s \rightarrow H_{0,5-1,5s}$

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

8. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE - INSTABILITÀ SEZIONE 3

8.1. AREA CONSIDERATA

Gli approfondimenti di terzo livello sono stati eseguiti su di un'area di frana attiva (sezione 3). Si tratta dell'area che, nel primo e secondo livello di approfondimento, è risultata soggetta a potenziale instabilità per fenomeni gravitativi. È stata, in particolare, definita una successione sismostratigrafica tipo, coerente con i risultati delle indagini specificatamente condotte su tale area, risultata globalmente omogenea dal punto di vista della risposta sismostratigrafica. Questo consente d'interpretare l'intero sottosuolo considerato, ai fini delle specifiche verifiche, secondo un modello 1D.

8.2. METODOLOGIA

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

In altre parole, le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa delle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

- 1) definizione del modello geofisico del sottosuolo;
- 2) stima dell'accelerazione di base;
- 3) esecuzione dell'analisi e restituzione grafica in termini di:
 - a) serie temporali;
 - b) spettri di risposta elastica in superficie.

Nel presente studio, la procedura di analisi di RSL è stata condotta con metodo monodimensionale in riferimento allo scenario della Microzona "MOPS 7" codice 2007 ZAFR definita da un profilo sismo stratigrafico specifico, emerso dall'analisi dei dati stratigrafici e geofisici disponibili e integrativi.

8.3. MODELLO GEOFISICO DEL SOTTOSUOLO

La valutazione della risposta sismica locale richiede un'accurata modellazione delle caratteristiche geofisiche del sottosuolo, principalmente basata sui seguenti parametri:

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (VS);
- densità dei litotipi indagati;
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0) in funzione della deformazione e densità in situ.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	37 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Tale modellazione va spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico definito come lo stato rigido del sottosuolo con $V_s > 800$ m/sec, al tetto del quale riferire l'input sismico caratteristico dell'area di studio da impiegare per le analisi di risposta locale.

8.3.1. Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati di prove penetrometriche e di sondaggi a carotaggio continuo disponibili nell'areale.

Nella Microzona 2007 Id_i=3 le indagini hanno evidenziato la presenza di terreni prevalentemente argillosi (corpo di frana) con velocità delle onde di taglio di 116 - 164 m/sec nei primi m 4 dal p.d.p. A maggiore profondità si interpretano argille limose (detrito eluvio colluviale) con velocità delle onde di taglio di 196 m/sec sino a m 5,2, che passano ad un substrato alterato e da m 7,4 a argille limose da dure a molto dure con livelli di sabbia debolmente cementata (substrato litologico). Il substrato rigido di riferimento si individua a profondità di circa m 270, confermato dal picco caratteristico di risonanza rilevato dalla campagna geofisica condotta con l'acquisizione dei microtremori e l'analisi HVSR dei dati.

8.3.2. Determinazione della V_s e del *bedrock* sismico

La valutazione della risposta sismica locale è stata definita considerando le sismostratigrafie derivanti dall'interpretazione delle indagini pregresse e di quelle appositamente realizzate nel corso di questo studio.

Le verticali analizzate hanno evidenziato la presenza di un contrasto di impedenza, localizzato al passaggio tra i terreni fini di copertura ($V_s = 116 \div 196$ m/s) ed il substrato da alterato a compatto. Il substrato sismico rigido di riferimento è confermato dal marcato gradiente evidenziato dall'analisi HVSR dei microtremori e dal relativo picco delle componenti vibrazionali del suolo a circa 0,5 Hz, dove è riferita una velocità delle onde di taglio di 776 m/sec.

8.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G_0)

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento, una relativa a G ed una D .

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidità, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio (γ), si è fatto riferimento alle curve di letteratura determinate per differenti litologie di terreni.

In particolare, sono state utilizzate le curve di degradazione EPRI(93) che utilizzano come variabile la profondità, quindi la pressione di confinamento (figure da n. 8.1 a n. 8.6).

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	38 di 65

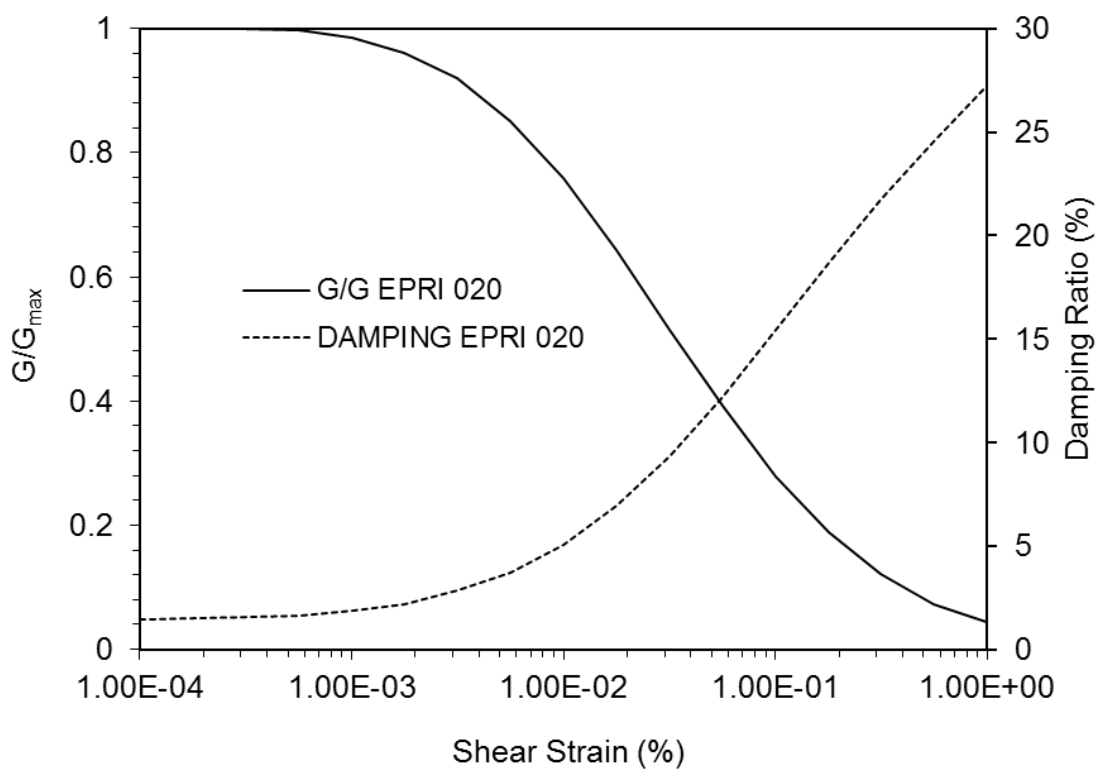


Figura n. 8.1 - Grafico delle curve EPRI (93) 0 – 20 ft.

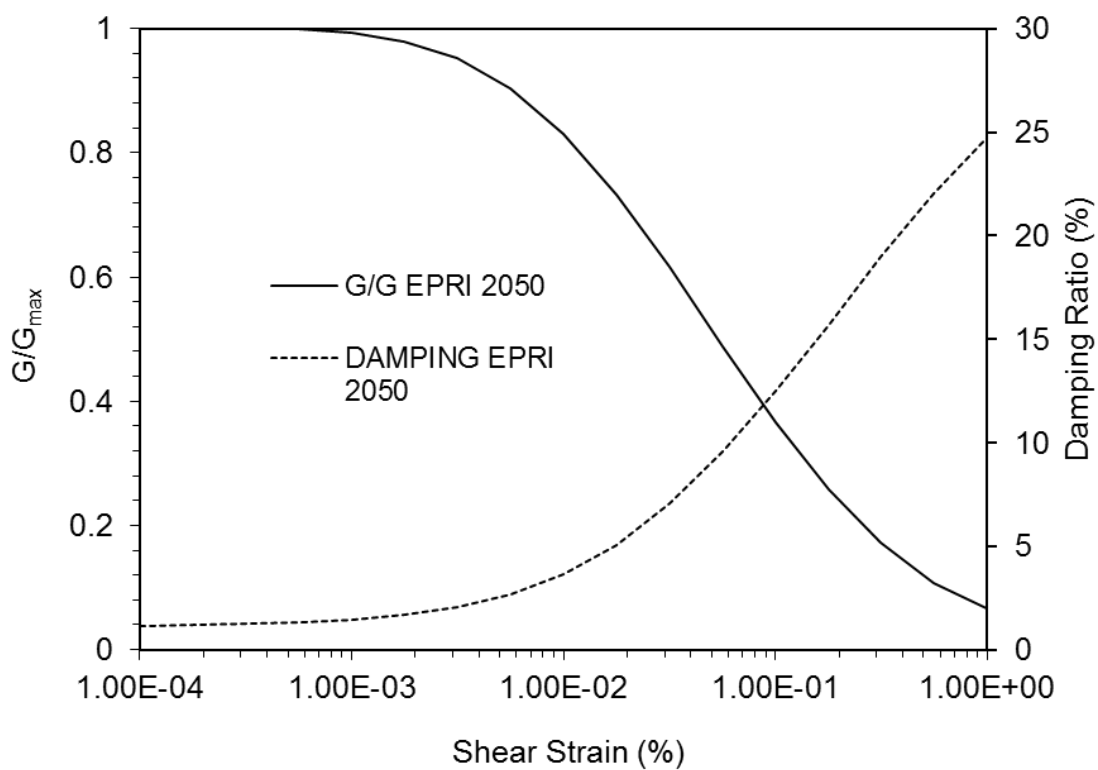


Figura n. 8.2 - Grafico delle curve EPRI (93) 20 – 50 ft.

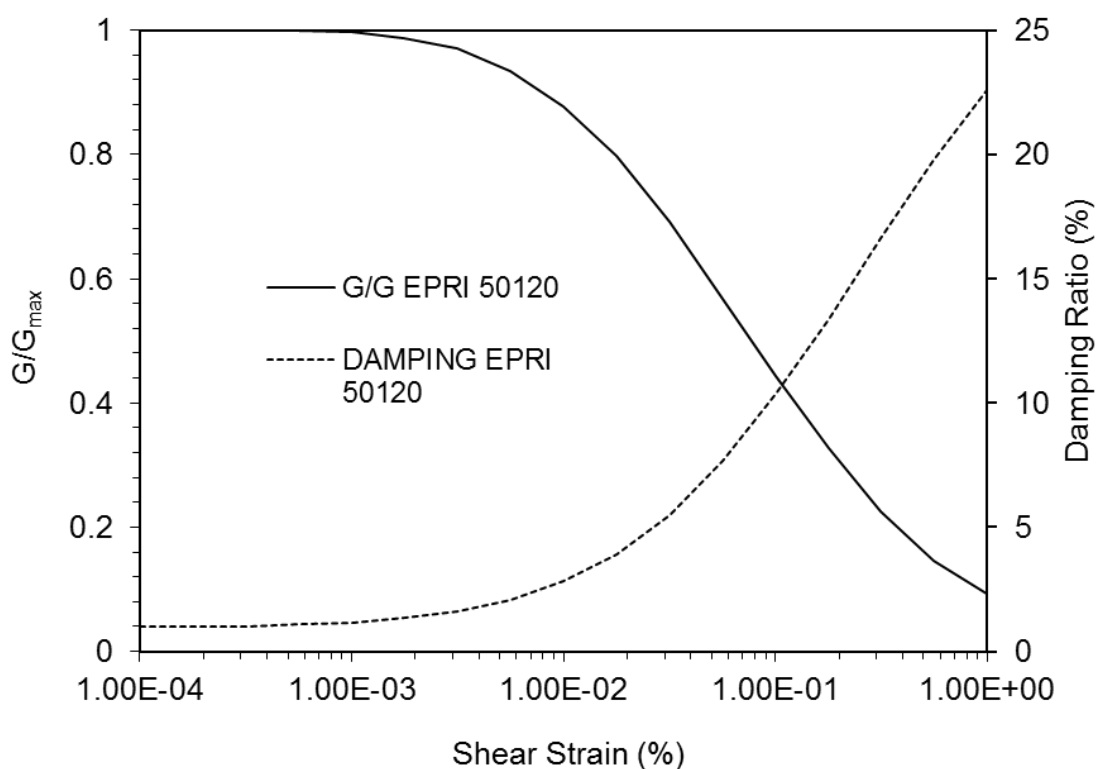


Figura n. 8.3 - Grafico delle curve EPRI (93) 50 – 120 ft.

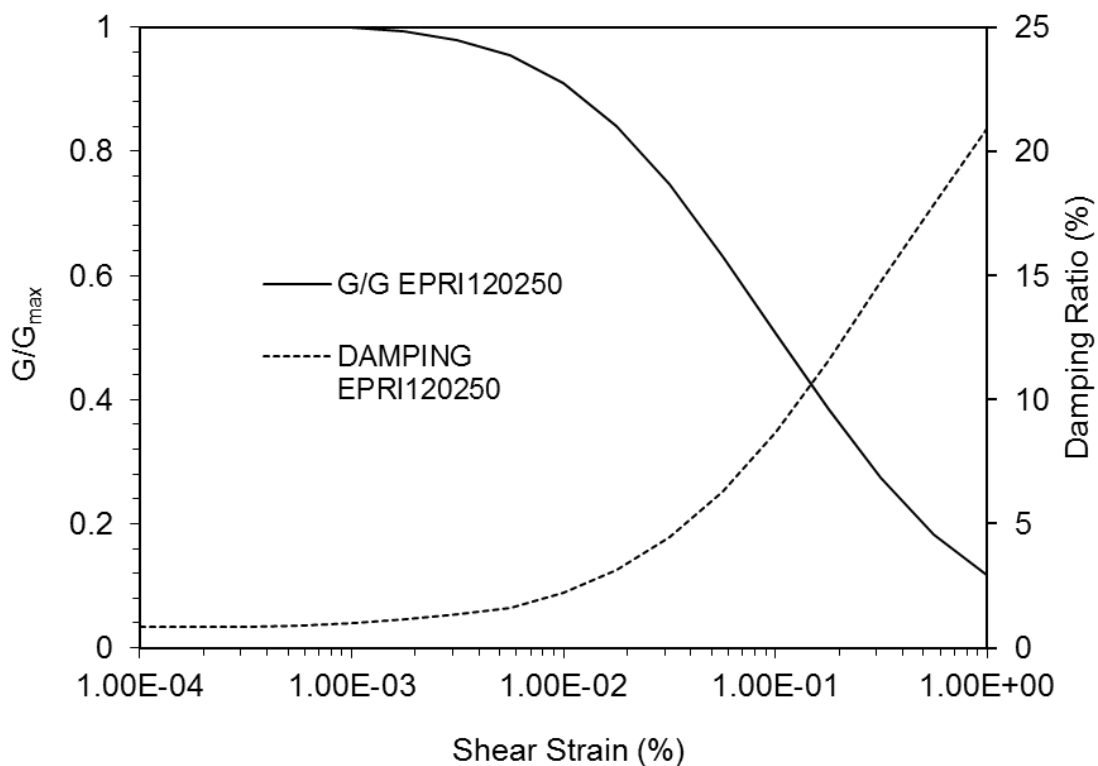


Figura n. 8.4 - Grafico delle curve EPRI (93) 120 – 250 ft.

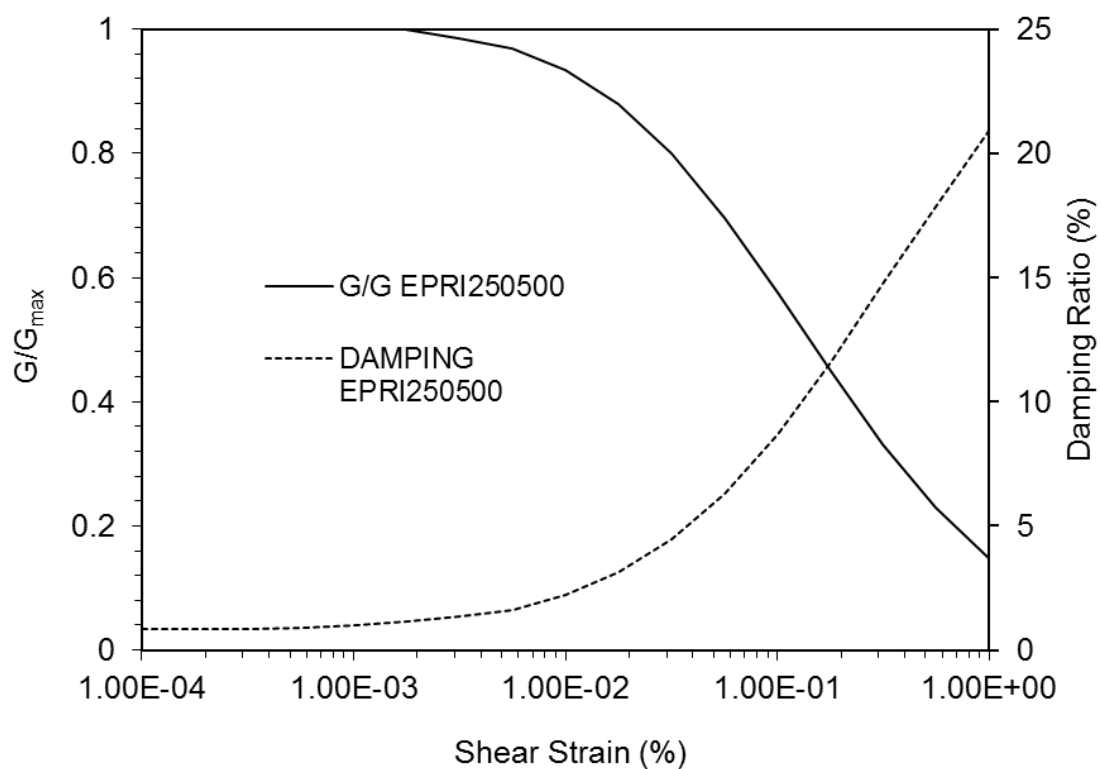


Figura n. 8.5 - Grafico delle curve EPRI (93) 250 – 500 ft.

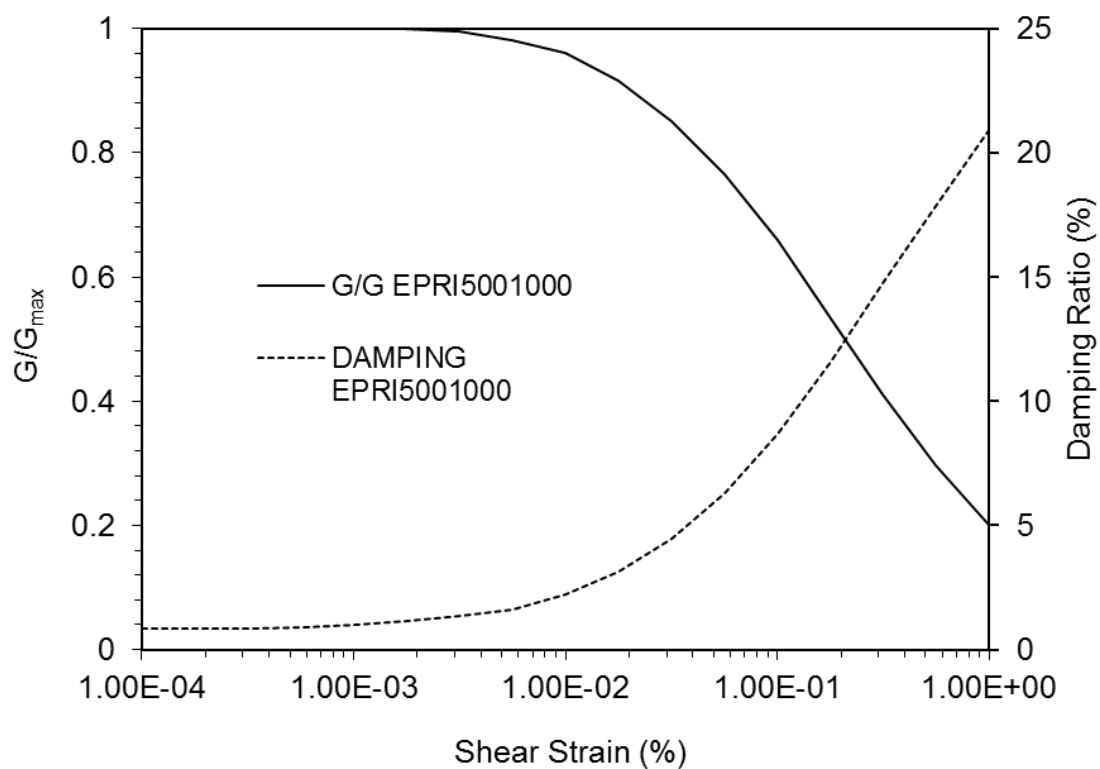


Figura n. 8.6 - Grafico delle curve EPRI (93) 500 – 1000 ft.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

8.3.4. Descrizione dei modelli

8.3.4.1. Microzona 2007 Id_i =3

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (V_s) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi su misure dirette di V_s effettuate attraverso MASW e ReMiTM disponibili ed eseguite nell'ambito dell'area riferita a tale microzona, ed attraverso l'interpretazione delle misure HVSR di supporto allo studio.

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato nella figura n. 8.7.

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kg/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla 1 (frana)	0.0	-1.2	1.2	1850	116	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 2 (frana)	-1.2	-2.4	1.20	1850	123	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 3 (frana)	-2.4	-4.0	1.60	1850	164	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 4 (elluvio colluviale)	-4.0	-5.2	1.2	1850	196	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 3 (substrato da alter. a compatto)	-5.2	-12.6	7.4	1850	286	EPRI (93) 20-50ft
Argilla 4 (substrato compatto)	-12.6	-26.6	14.0	1900	326	EPRI (93) 50-120ft
Argilla 5 (substrato compatto)	-26.6	-81.6	55.0	2000	444	EPRI (93) 120-250ft
Argilla 6 (substrato compatto)	-81.6	-269.6	188	2100	596	EPRI (93) 250-500ft
Bedrock	-269.60	-	-	2200	776,00	-

Figura n. 8.7 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della Microzona 2007 Id_i=3.

8.3.5. Azioni sismiche in ingresso

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dalla piattaforma WebGIS sviluppata da EUCENTRE per la Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'accordo "Acquisizione del servizio di rilevamento a scala regionale del rischio sismico degli edifici residenziali ordinari e aggiornamento dei segnali di riferimento per la stima della risposta sismica locale negli studi di microzonazione sismica di terzo livello di approfondimento"⁷.

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati.

Il servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per il sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino: il n° 18299.

⁷ R.E.R. (eucentre.it)

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	42 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni (figura n. 8.8).

Tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto per la localizzazione del sito.

Mw	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.9	62.9	0.72	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.58	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	1.99	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.22	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6.6	31	0.74	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.6	62	1.32	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.1	97	1.51	KiKnet MYGH041103280724.EW2

Figura n. 8.8 - Sismi con tempo di ritorno di 475 anni.

8.4. PROCEDURA DI ANALISI RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo Shake 91 utilizzando il software STRATA applicandolo al modello di sottosuolo 1D discretizzato ed utilizzando come moto di input la settupla dei terremoti elencati in precedenza.

8.5. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo Shake 91 attraverso il software Strata, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- gli accelerogrammi di output;
- lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output;
- il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- i fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in accelerazione (FA) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.5-1.5 e 0.7-1.1 s;
- i fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in velocità (FH) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s.

Tali fattori di amplificazione in accelerazione e velocità sono ottenuti direttamente dal programma di calcolo confrontando lo spettro medio degli accelerogrammi in input con quello ottenuto dagli accelerogrammi in output.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	43 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Nella figura n. 8.9 che segue sono riportati i grafici con gli spettri in output (in tonalità di grigio), gli spettri medi in input (in verde) e in output (in rosso) per la Microzona 2007.

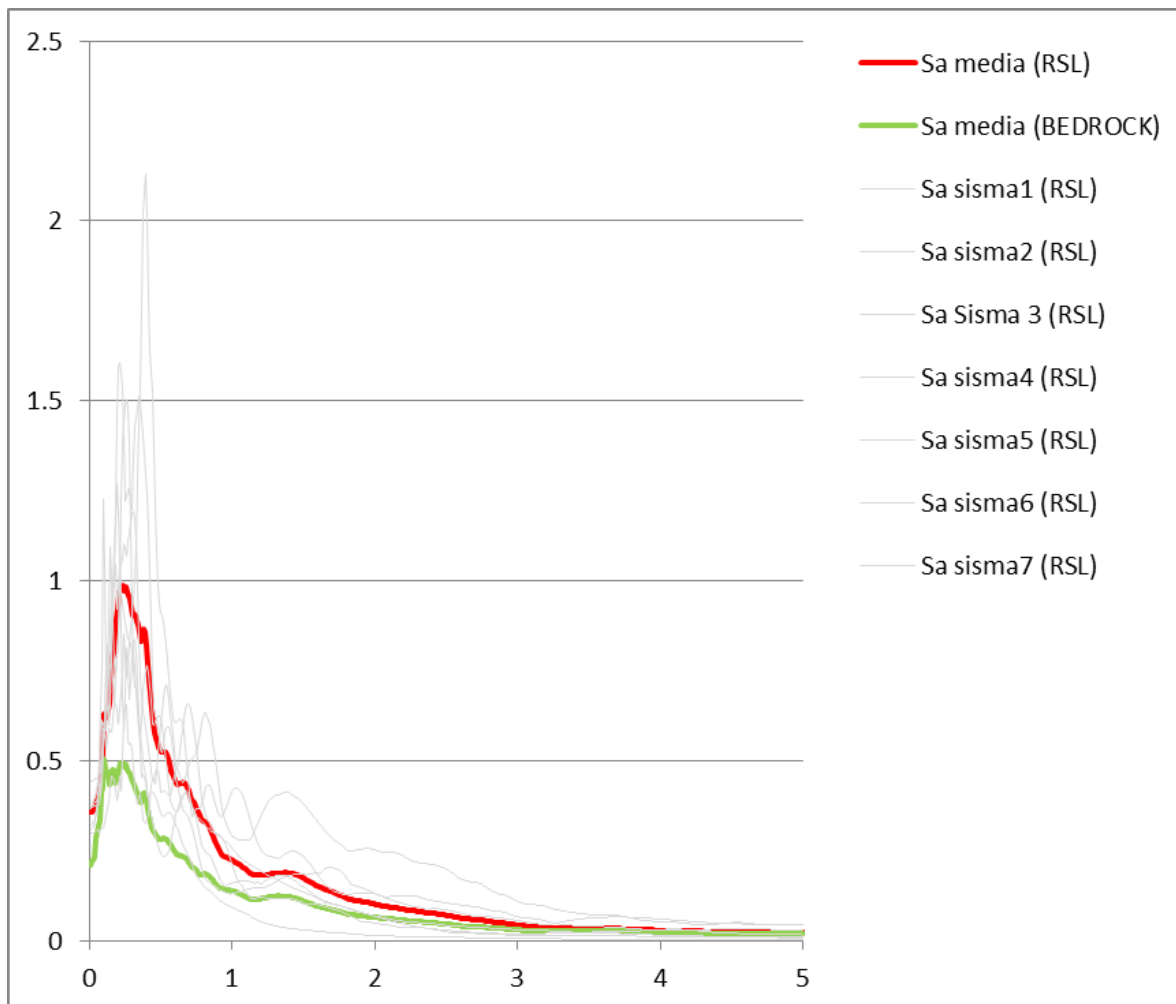


Figura n. 8.9 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input e lo spettro medio in accelerazione in output per la Microzona 2007 Id_i=3

Nelle tabelle dei fattori di amplificazione, oltre a quelli ottenuti con la procedura di RSL, sono riportati, per confronto, anche i fattori di amplificazione ottenuti applicando gli abachi proposti dalla Regione Emilia-Romagna per la stima semplificata dell'amplificazione e le differenze percentuali tra i valori.

Per la Microzona 2007 Id_i=3 sono state impiegate le tabelle degli indirizzi regionali denominate "Appennino", riferite alla presenza di substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) con sovrastanti depositi di copertura maggiori di 3,0 m, con V_{s5} pari a 150 m/s.

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per tutti i siti indagati:

- gli accelerogrammi di output scalati sulla base del sito di indagine;
- il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo C;

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	44 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

- la tabella con i fattori di amplificazione calcolati, confrontati con quelli da normativa.

8.5.1. Accelerogrammi di output - Microzona 2007 Id_i=3

La figura n. 8.10 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2007 Id_i=3.

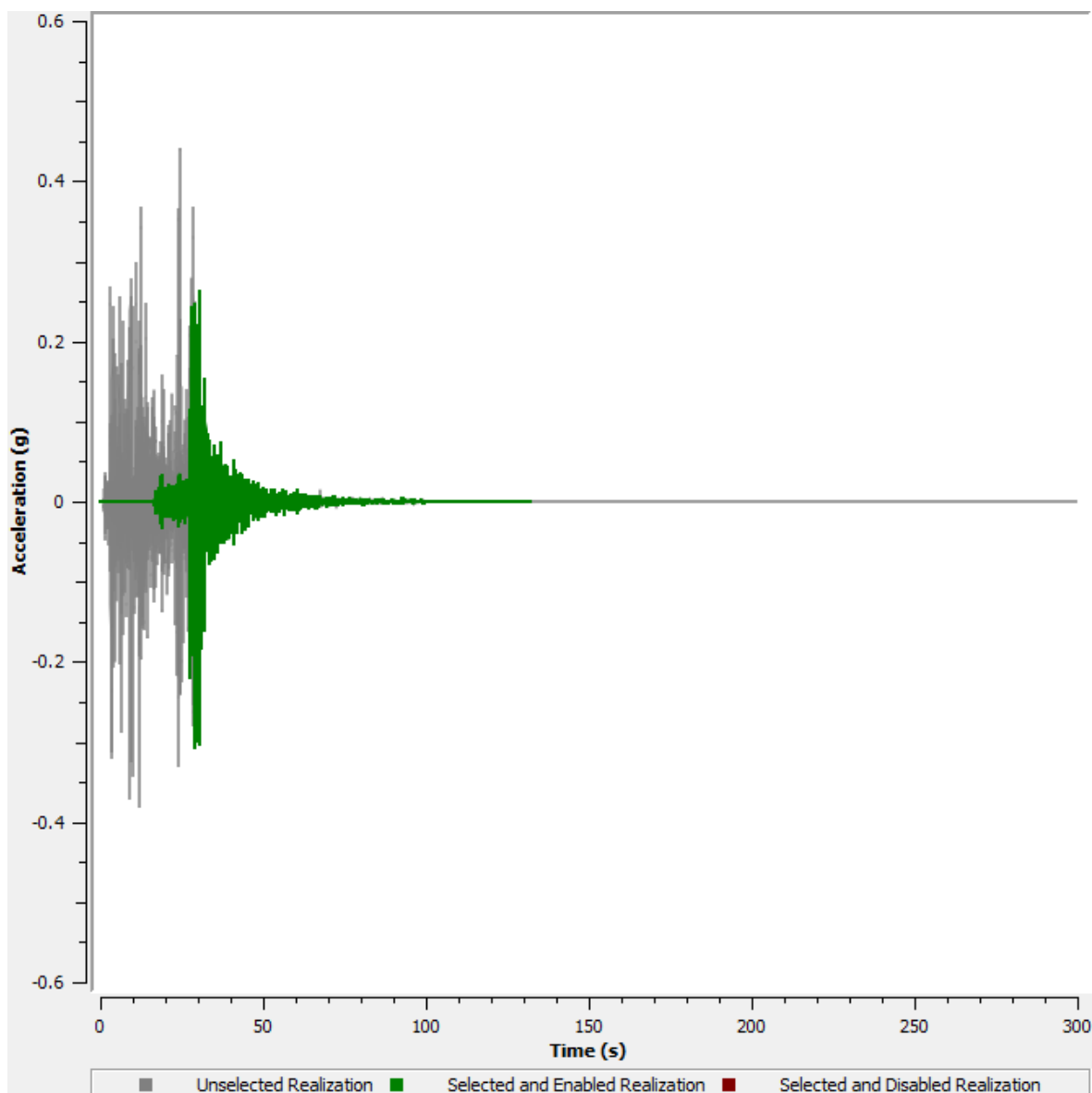


Figura n. 8.10 - Accelerogrammi di output della Microzona 2007 Id_i=3.

La figura n. 8.11 contiene il confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per Microzona 2007 Id_i=3.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	45 di 65

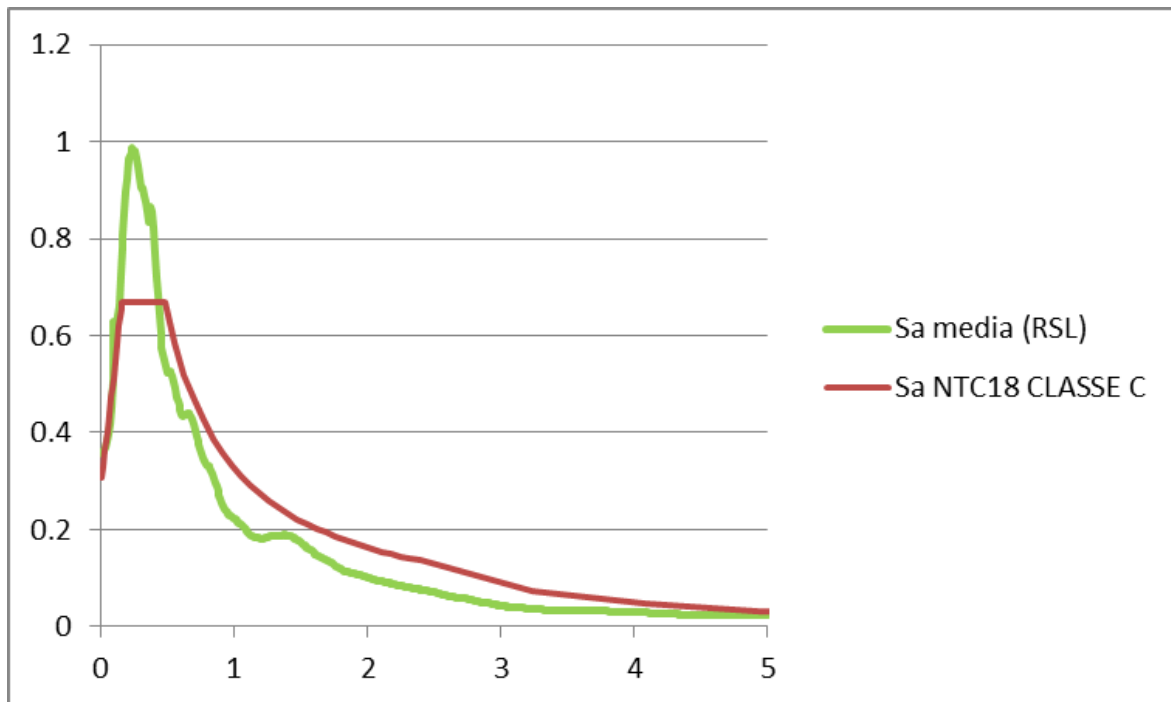


Figura n. 8.11 - Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per Microzona 2007 Id_i=3

La figura n. 8.12 contiene i fattori di amplificazione calcolati per la Microzona 2007 Id_i=3.

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FA PGA	1,83	2,3	-20,43
FA SA1 0.1-0.5	1,85	2,2	-15,91
FA SA2 0.4-0.8	1,94	1,6	+21,25
FA SA3 0.7-1.1	1,77	1,4	+26,43
FA SA4 0.5-1.5	1,74		
FH SI1 0.1-0.5	1,98	2,1	-5,71
FH SI2 0.5-1.0	1,82	1,4	+30,00
FH SI3 0.5-1.5	1,69		

Figura n. 8.12 - Fattori di amplificazione calcolati nella Microzona 2007 Id_i=3.

La parametrizzazione dello spettro di risposta ottenuto viene condotta mediante la procedura suggerita dagli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" (GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione (TA);
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione (SA) nell'intorno tra $0.5 TA - 1.5 TA$;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità (TV);
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità (SV) nell'intorno tra $0.8 TV - 1.2 TV$;

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

- il calcolo del valore di $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$;
- il calcolo del valore di $T_b = 1/3 T_c$;
- il calcolo del valore $T_d = 4 a_g + 1.6$ con a_g uguale al valore di accelerazione a T uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra T_0 , T_b , T_c , T_d , T_4 .

Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri dello spettro parametrizzato per la Microzona in esame.

$F0$	S	$A_{max} [g]$	$T_b [sec]$	$T_c [sec]$	$T_d [sec]$
3.03	1.83	0.356	0.106	0.319	1.357

dove:

- $F0$: valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione;
- A_{max} : punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output;
- T_b : periodo inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d : periodo inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

La figura n. 8.13 contiene il grafico della parametrizzazione dello spettro della Microzona 2007 $Id_i=3$.

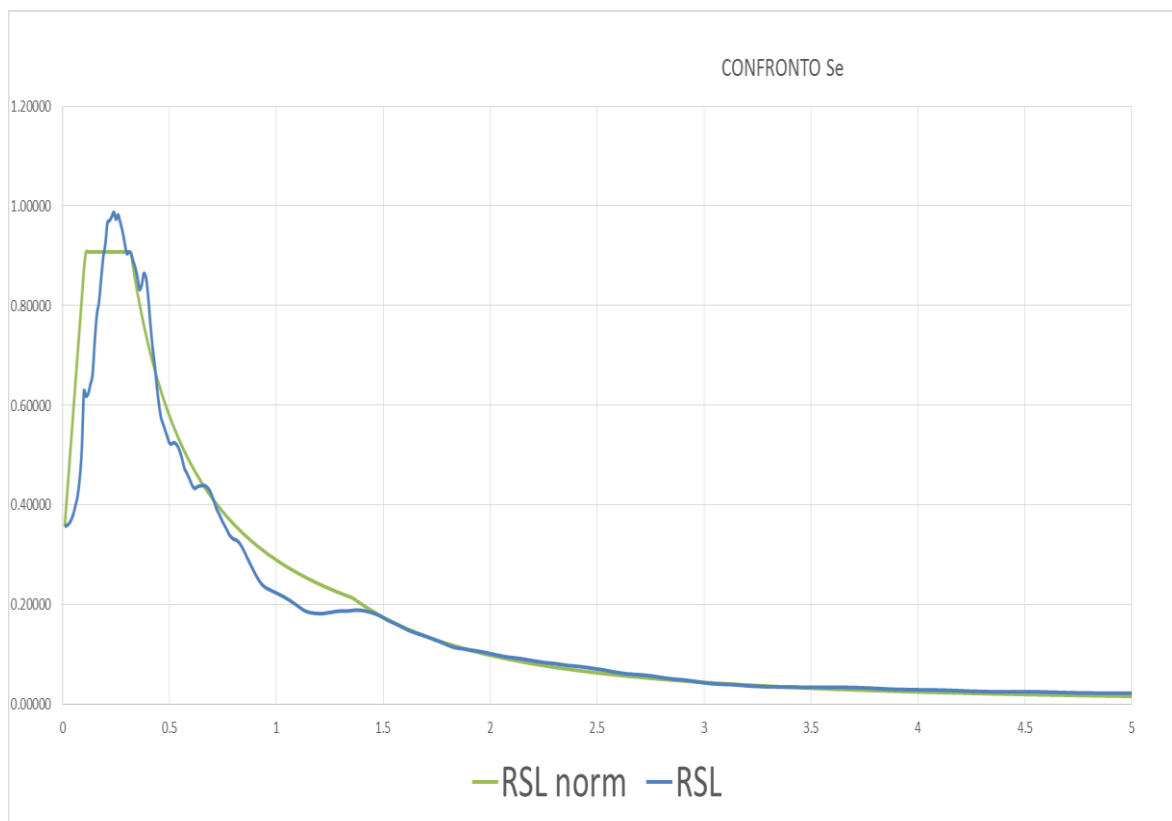


Figura n. 8.13 - Parametrizzazione dello spettro della Microzona 2007 $Id_i=3$.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	47 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

9. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE - INSTABILITÀ SEZIONE 4

9.1. AREA CONSIDERATA

Gli approfondimenti di terzo livello sono stati eseguiti su di un'area di frana attiva. Si tratta dell'area che, nel primo e secondo livello di approfondimento, è risultata soggetta a potenziale instabilità per fenomeni gravitativi. È stata, in particolare, definita una successione sismostratigrafica tipo, coerente con i risultati delle indagini specificatamente condotte su tale area, risultata globalmente omogenea dal punto di vista della risposta sismostratigrafica. Questo consente d'interpretare l'intero sottosuolo considerato, ai fini delle specifiche verifiche, secondo un modello 1D.

9.2. METODOLOGIA

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

In altre parole, le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa delle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

- 4) definizione del modello geofisico del sottosuolo;
- 5) stima dell'accelerazione di base;
- 6) esecuzione dell'analisi e restituzione grafica in termini di:
 - c) serie temporali;
 - d) spettri di risposta elastica in superficie.

Nel presente studio la procedura di analisi di RSL è stata condotta con metodo monodimensionale in riferimento allo scenario della Microzona "MOPS 7" codice 2007 ZAFR definita da un profilo sismo stratigrafico specifico, emerso dall'analisi dei dati stratigrafici e geofisici disponibili e integrativi.

9.3. MODELLO GEOFISICO DEL SOTTOSUOLO

La valutazione della risposta sismica locale richiede un'accurata modellazione delle caratteristiche geofisiche del sottosuolo, principalmente basata sui seguenti parametri:

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (VS);
- densità dei litotipi indagati;
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	48 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Tale modellazione va spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico definito come lo stato rigido del sottosuolo con $V_s > 800$ m/sec, al tetto del quale riferire l'input sismico caratteristico dell'area di studio da impiegare per le analisi di risposta locale.

9.3.1. Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati di prove penetrometriche e di sondaggi a carotaggio continuo disponibili nell'areale.

Nella Microzona 2007 Id_i=4 le indagini hanno evidenziato la presenza di terreni prevalentemente argillosi (corpo di frana) con velocità delle onde di taglio di 93 - 164 m/sec nei primi m 5,6 dal p.d.p. A maggiore profondità si interpretano argille limose (detrito eluvio colluviale) con velocità delle onde di taglio di 212 m/sec sino a m 12,6, che passano ad un substrato alterato e da m 37,6 a argille limose da dure a molto dure con livelli di sabbia debolmente cementata (substrato litologico). Il substrato rigido di riferimento si individua a profondità di circa m 245, confermato dal picco caratteristico di risonanza rilevato dalla campagna geofisica condotta con l'acquisizione dei microtremori e l'analisi HVSr dei dati.

9.3.2. Determinazione della V_s e del *bedrock* sismico

La valutazione della risposta sismica locale è stata definita considerando le sismostratigrafie derivanti dall'interpretazione delle indagini pregresse e di quelle appositamente realizzate nel corso di questo studio.

Le verticali analizzate hanno evidenziato la presenza di un contrasto di impedenza, localizzato al passaggio tra i terreni fini di copertura ($V_s = 93 \div 212$ m/s) ed il substrato da alterato a compatto. Il substrato sismico rigido di riferimento è confermato dal marcato gradiente evidenziato dall'analisi HVSr dei microtremori e dal relativo picco delle componenti vibrazionali del suolo a circa 0,5 Hz, dove è riferita una velocità delle onde di taglio di 725 m/sec.

9.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0)

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento, una relativa a G ed una D .

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio (γ), si è fatto riferimento alle curve di letteratura determinate per differenti litologie di terreni.

In particolare, sono state utilizzate le curve di degradazione EPRI(93) che utilizzano come variabile la profondità, quindi la pressione di confinamento (figure da n. 9.1 a n. 9.6).

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	49 di 65

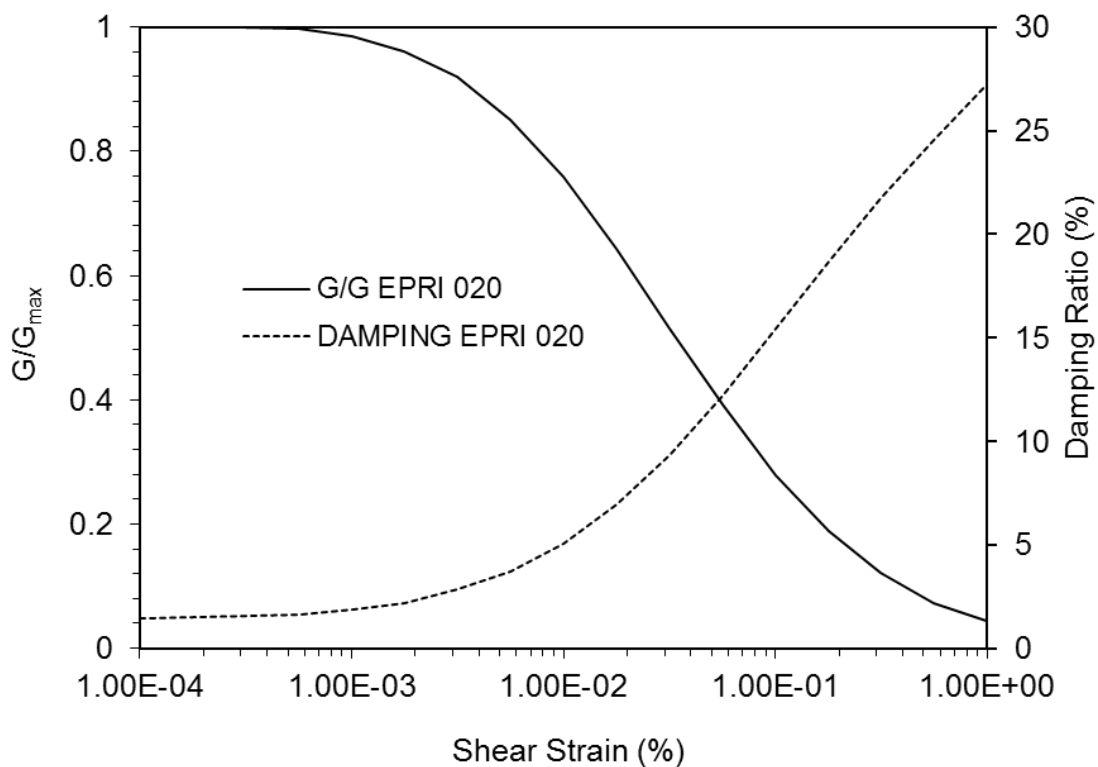


Figura n. 9.1 - Grafico delle curve EPRI (93) 0 – 20 ft.

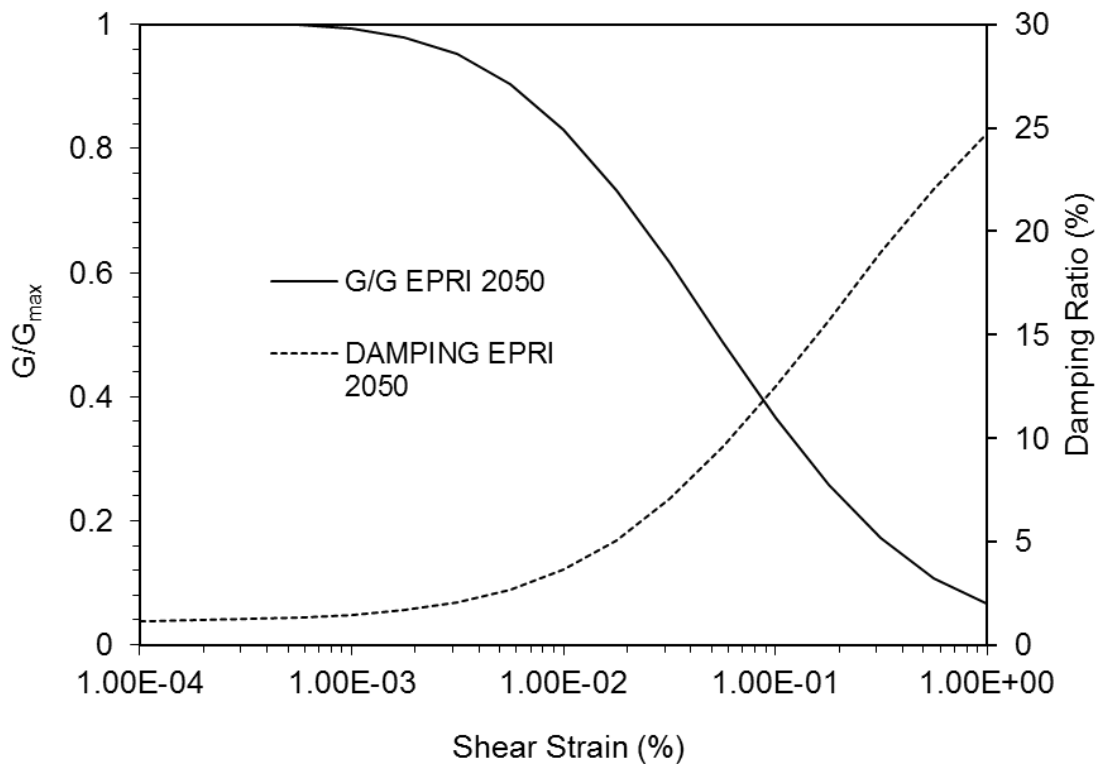


Figura n. 9.2 - Grafico delle curve EPRI (93) 20 – 50 ft.

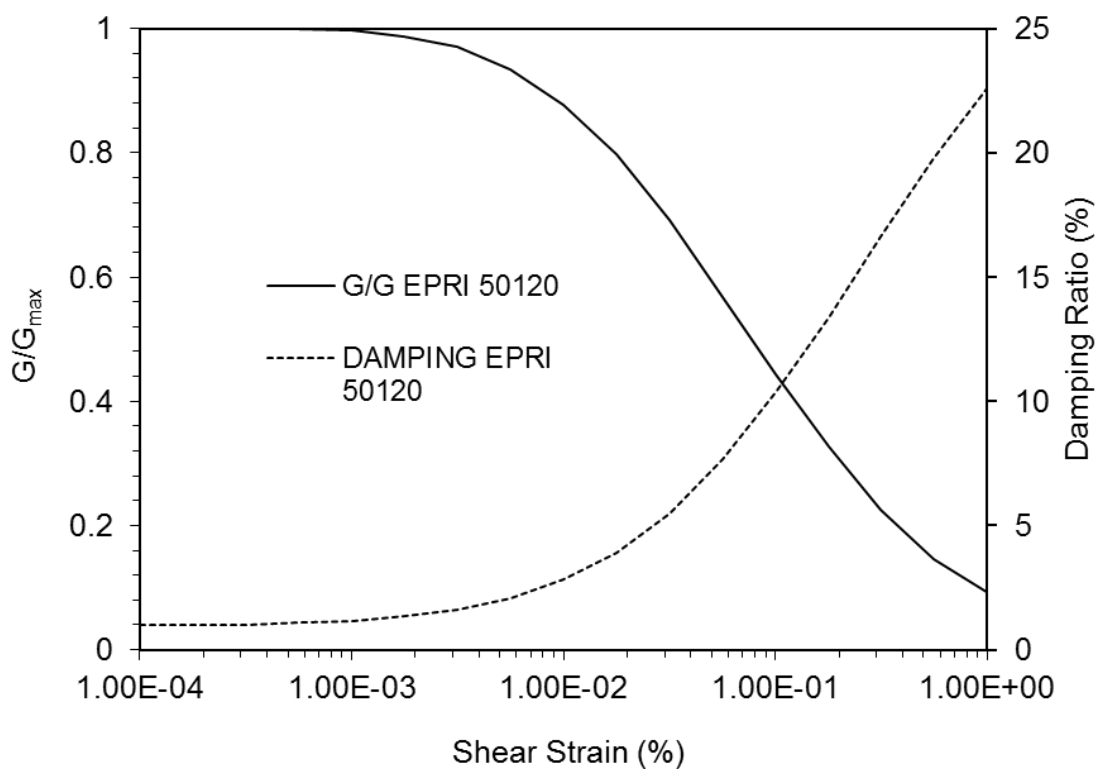


Figura n. 9.3 - Grafico delle curve EPRI (93) 50 – 120 ft.

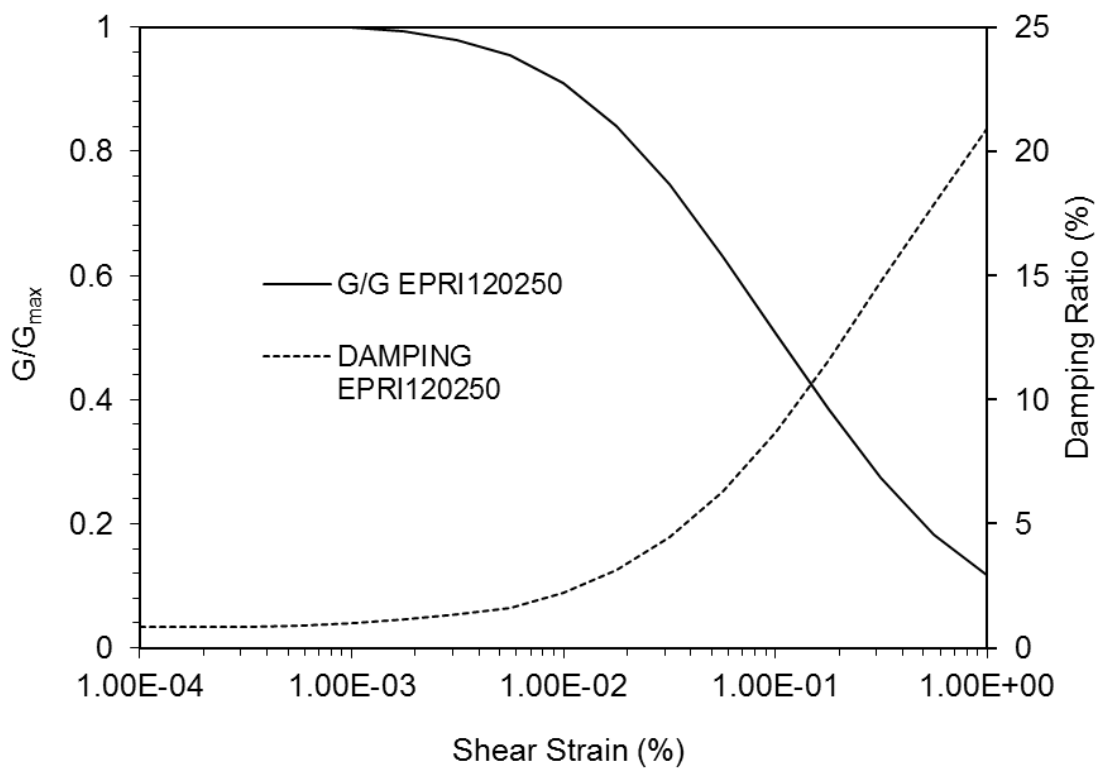


Figura n. 9.4 - Grafico delle curve EPRI (93) 120 – 250 ft.

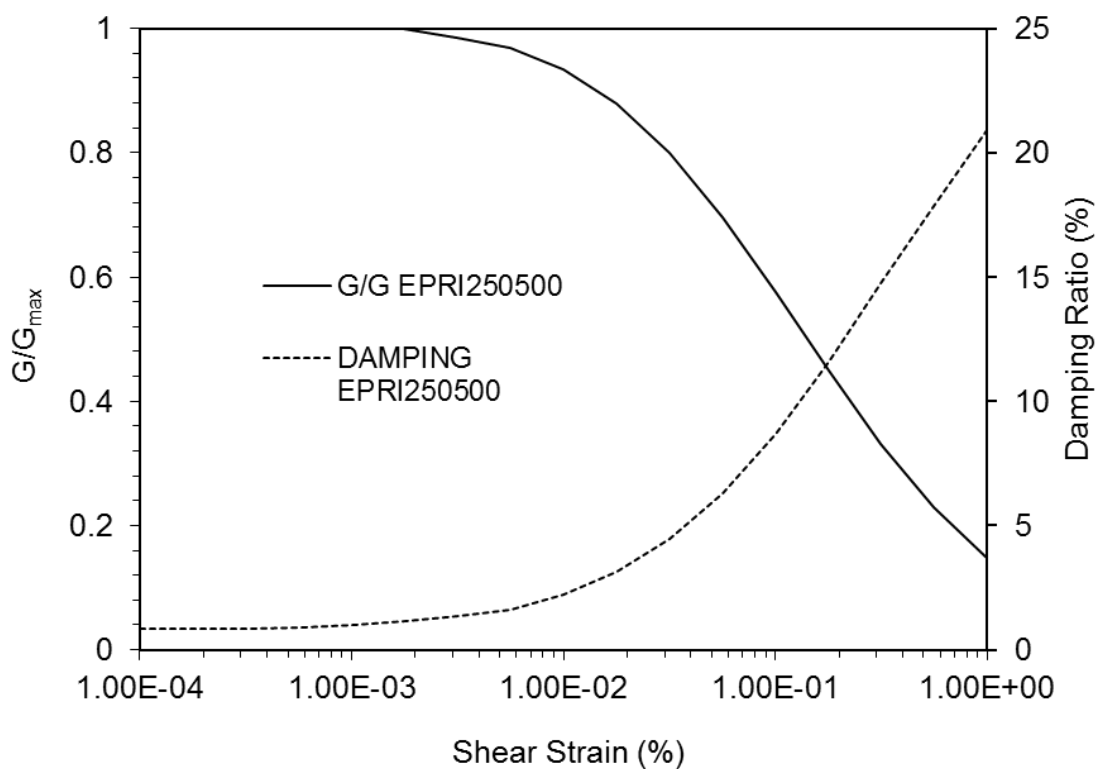


Figura n. 9.5 - Grafico delle curve EPRI (93) 250 – 500 ft.

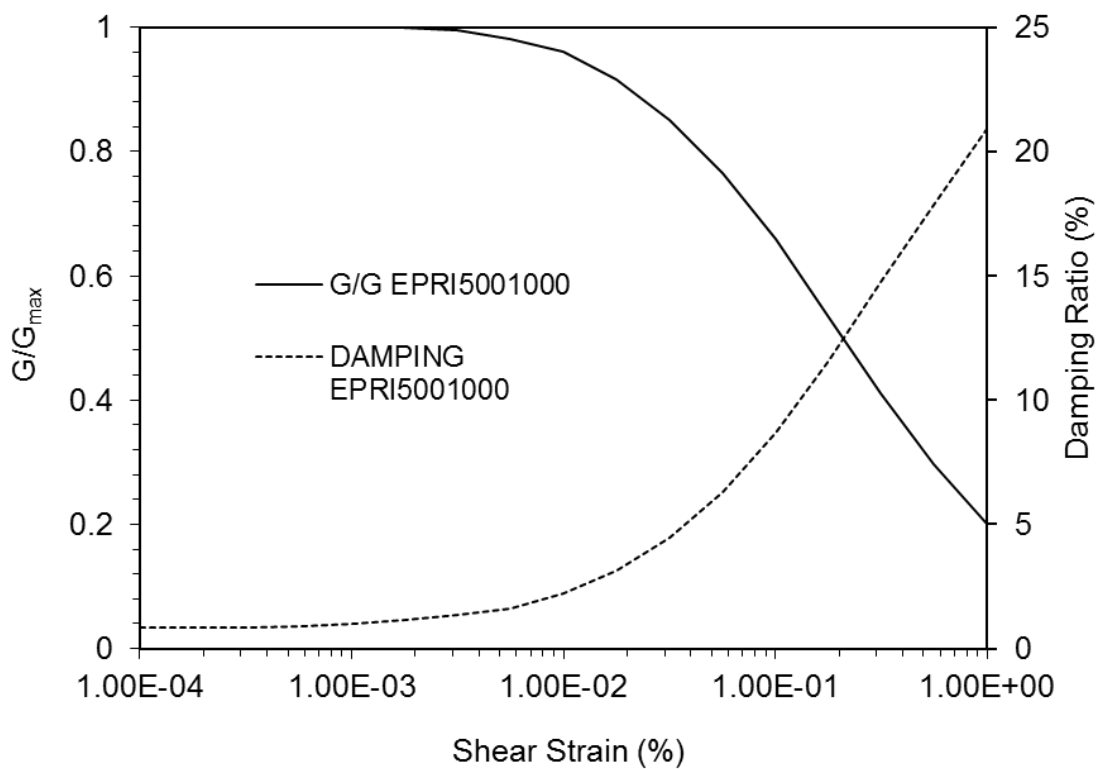


Figura n. 9.6 - Grafico delle curve EPRI (93) 500 – 1000 ft.

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

9.3.4. Descrizione dei modelli

9.3.4.1. Microzona 2007 Id_j=4

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (V_s) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi su misure dirette di V_s effettuate attraverso MASW e ReMiTM disponibili ed eseguite nell'ambito dell'area riferita a tale microzona, ed attraverso l'interpretazione delle misure HVSR di supporto allo studio.

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato nella figura n. 9.7.

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kg/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla 1 (frana)	0.0	-1.2	1.2	1850	93	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 2 (frana)	-1.2	-3.2	2.0	1850	131	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 3 (frana)	-3.2	-5.6	2.4	1850	164	EPRI (93) 0-20ft
Argilla 4 (elluvio colluviale)	-5.6	-12.6	7.0	1900	212	EPRI (93) 20-50ft
Argilla 3 (substrato da alter. a compatto)	-12.6	-37.6	25	2000	327	EPRI (93) 50-120ft
Argilla 4 (substrato compatto)	-37.6	-94.6	57	2000	431	EPRI (93) 120-250ft
Argilla 5 (substrato compatto)	-94.6	-244.6	150	2000	576	EPRI (93) 250-500ft
Bedrock	-244.6	-	-	2200	725.00	-

Figura n. 9.7 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della Microzona 2007 Id_j=4.

9.3.5. Azioni sismiche in ingresso

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dalla piattaforma WebGIS sviluppata da EUCENTRE per la Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'accordo "Acquisizione del servizio di rilevamento a scala regionale del rischio sismico degli edifici residenziali ordinari e aggiornamento dei segnali di riferimento per la stima della risposta sismica locale negli studi di microzonazione sismica di terzo livello di approfondimento"⁸.

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati.

Il servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per il sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino: il n° 18299.

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni (figura n. 9.8).

⁸ R.E.R. (eucentre.it)

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	53 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto per la localizzazione del sito.

Mw	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.9	62.9	0.72	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.58	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	1.99	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.22	NGA RSN1091_NORTH_VAS000.AT2
6.6	31	0.74	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.6	62	1.32	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.1	97	1.51	KiKnet MYGH041103280724.EW2

Figura n. 9.8 - Sismi con tempo di ritorno di 475 anni.

9.4. PROCEDURA DI ANALISI RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo Shake 91 utilizzando il software STRATA applicandolo al modello di sottosuolo 1D discretizzato ed utilizzando come moto di input la settupla dei terremoti elencati in precedenza.

9.5. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo Shake 91 attraverso il software Strata, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- gli accelerogrammi di output;
- lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output;
- il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- i fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in accelerazione (FA) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.5-1.5 e 0.7-1.1 s;
- i fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in velocità (FH) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s.

Tali fattori di amplificazione in accelerazione e velocità sono ottenuti direttamente dal programma di calcolo confrontando lo spettro medio degli accelerogrammi in input con quello ottenuto dagli accelerogrammi in output.

Nella figura n. 9.9 che segue sono riportati i grafici con gli spettri in output (in tonalità di grigio), gli spettri medi in input (in verde) e in output (in rosso) per la Microzona 2007 Id_i=4.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	54 di 65

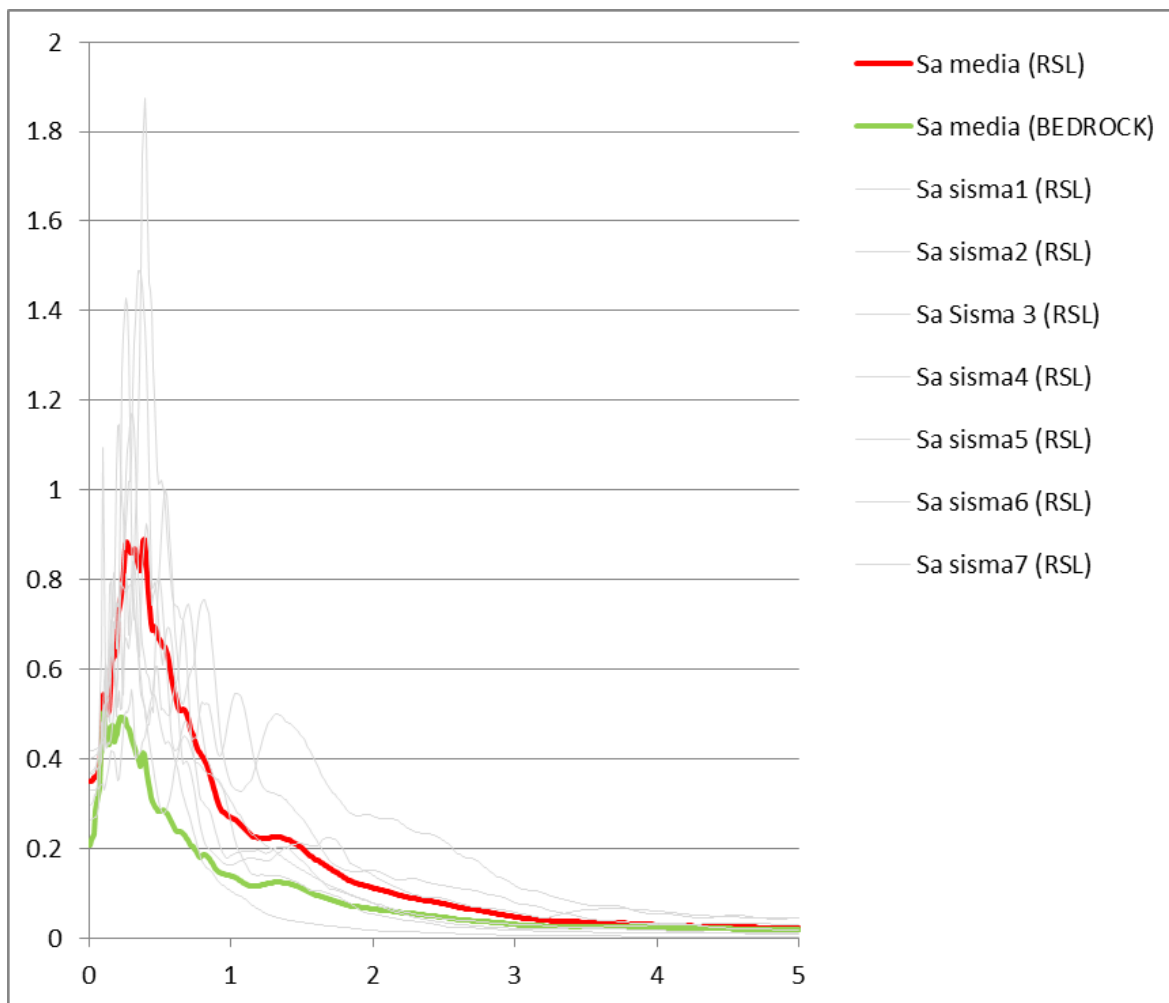


Figura n. 9.9 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input e lo spettro medio in accelerazione in output per la Microzona 2007 Id_i=4.

Nelle tabelle dei fattori di amplificazione, oltre a quelli ottenuti con la procedura di RSL, sono riportati, per confronto, anche i fattori di amplificazione ottenuti applicando gli abachi proposti dalla Regione Emilia-Romagna per la stima semplificata dell'amplificazione e le differenze percentuali tra i valori.

Per la Microzona 2007 Id_i=4 sono state impiegate le tabelle degli indirizzi regionali denominate "Appennino", riferite alla presenza di substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) con sovrastanti depositi di copertura maggiori di 3,0 m, con V_{s5} pari a 150 m/s.

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per tutti i siti indagati:

- gli accelerogrammi di output scalati sulla base del sito di indagine;
- il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo C;
- la tabella con i fattori di amplificazione calcolati, confrontati con quelli da normativa.

9.5.1. Accelerogrammi di output - Microzona 2007 Id_i=4

La figura n. 9.10 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2007.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	55 di 65

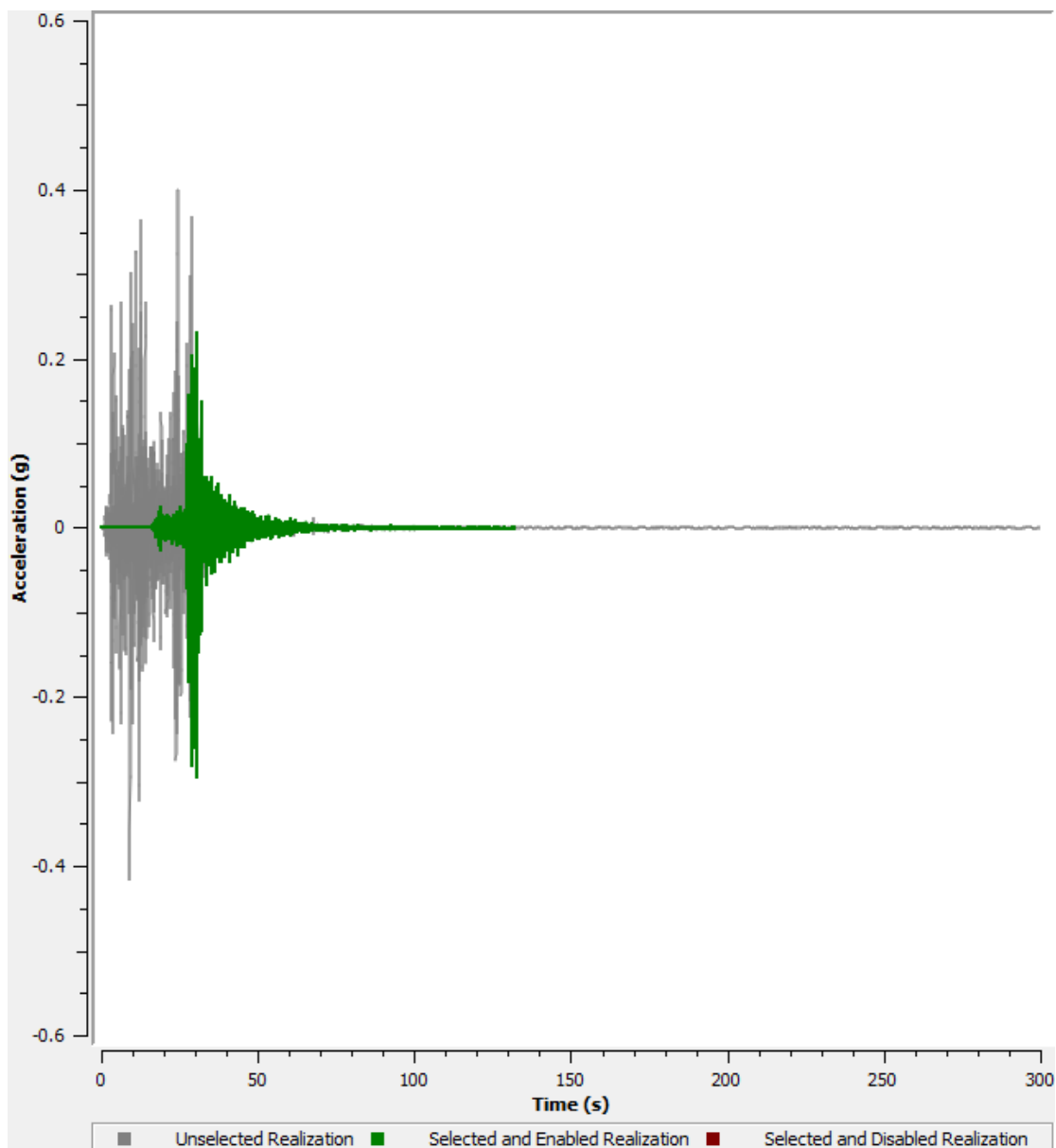


Figura n. 9.10 - Accelerogrammi di output della Microzona 2007 Id_i=4.

La figura n. 9.11 contiene il confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per Microzona 2007 Id_i=4.

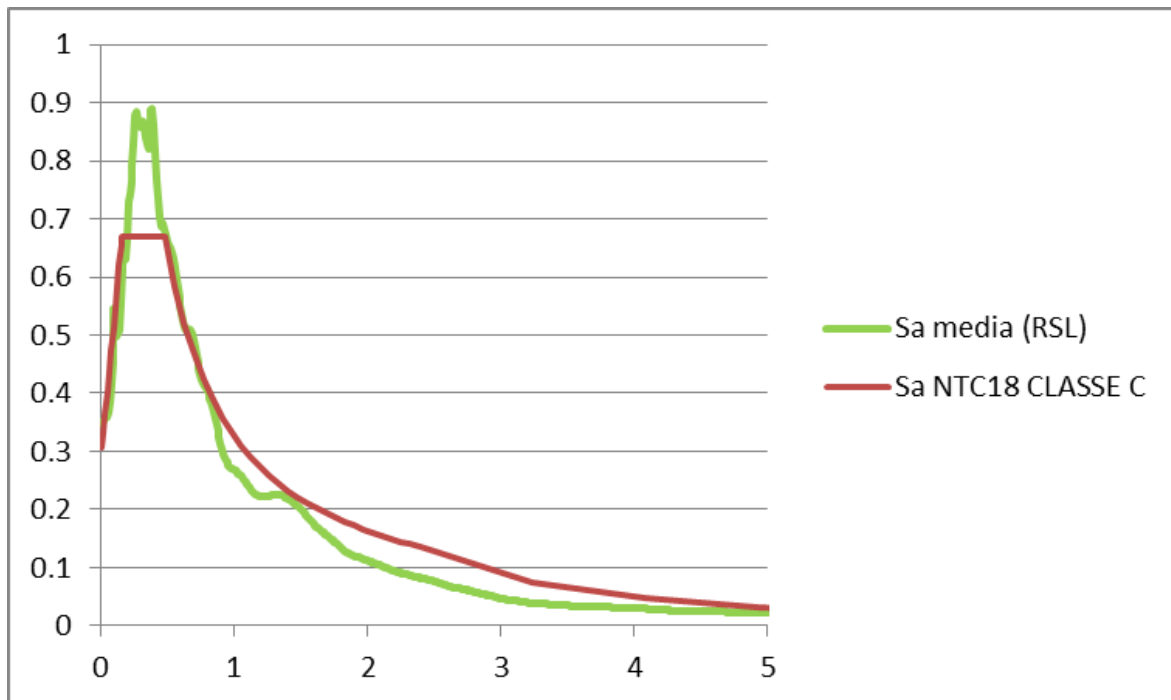


Figura n. 9.11 - Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per Microzona 2007 Id_i=4

La figura n. 9.12 contiene i fattori di amplificazione calcolati per la MOPS 2007 Id_i=4.

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FA PGA	1,79	2,3	-22,17
FA SA1 0.1-0.5	1,68	2,2	-23,64
FA SA2 0.4-0.8	2,24	1,6	+40,00
FA SA3 0.7-1.1	2,12	1,4	+51,43
FA SA4 0.5-1.5	2,10		
FH SI1 0.1-0.5	1,86	2,1	-11,43
FH SI2 0.5-1.0	2,20	1,4	+57,14
FH SI3 0.5-1.5	2,04		

Figura n. 9.12 - Fattori di amplificazione calcolati nella Microzona 2007 Id_i=4.

La parametrizzazione dello spettro di risposta ottenuto viene condotta mediante la procedura suggerita dagli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" (GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione (TA);
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione (SA) nell'intorno tra $0.5 TA - 1.5 TA$;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità (TV);
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità (SV) nell'intorno tra $0.8 TV - 1.2 TV$;

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

- il calcolo del valore di $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$;
- il calcolo del valore di $T_b = 1/3 T_c$;
- il calcolo del valore $T_d = 4 a_g + 1.6$ con a_g uguale al valore di accelerazione a T uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra T_0 , T_b , T_c , T_d , T_4 .

Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri dello spettro parametrizzato per la Microzona in esame.

$F0$	S	$A_{max} [g]$	$T_b [sec]$	$T_c [sec]$	$T_d [sec]$
2.37	1.79	0.348	0.152	0.457	1.440

dove:

- $F0$: valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione;
- A_{max} : punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output;
- T_b : periodo inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d : periodo inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

La figura n. 9.13 contiene il grafico della parametrizzazione dello spettro della Microzona 2007 Id_i=4.

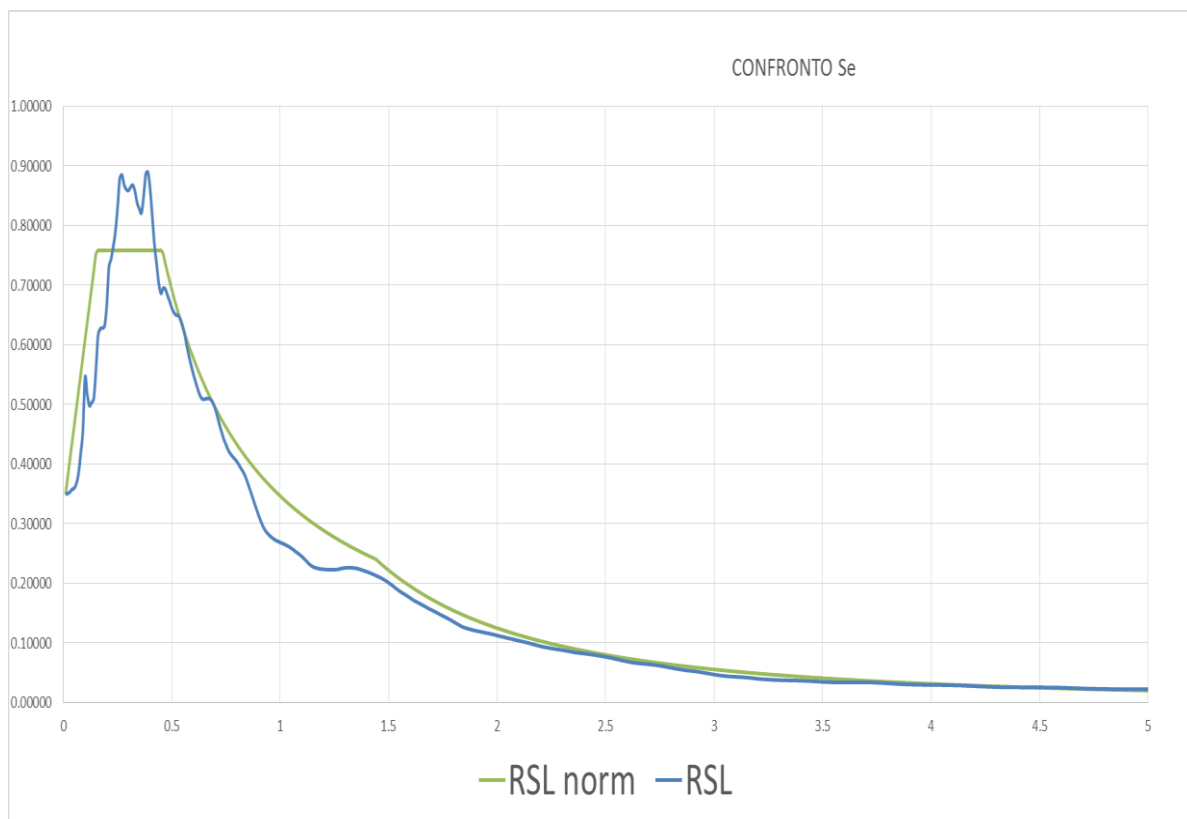


Figura n. 9.13 - Parametrizzazione dello spettro della Microzona 2007 Id_i=4.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	58 di 65

10. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA PER FRANOSITÀ

10.1. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA PER FRANOSITÀ

10.1.1. Determinazioni e metodologie

Il controllo di stabilità, nei casi considerati dal presente studio, è stato effettuato come previsto dalla D.G.R. n° 476 del 12.04.2021 "Aggiornamento Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)" e dalla D.G.R. n° 564 del 26.04.2021 "Integrazione della propria Deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)".

Le verifiche di stabilità hanno preso in considerazione le situazioni particolarmente onerose espresse dalle sezioni considerate, considerando in ciascun caso le specifiche condizioni geomorfologiche, stratigrafiche, geotecniche e idrogeologiche.

I parametri geotecnici, utilizzati nelle singole verifiche, sono stati definiti prudenzialmente tenendo conto dei dati forniti da prove in sito (sondaggi e penetrometrie), eseguite nei pressi delle aree considerate, nonché degli elementi forniti dalla letteratura geotecnica sui terreni in esame.

Le analisi dei pendii considerati sono state effettuate in condizioni statiche, sismiche e post-sismiche, con particolare attenzione alla determinazione della resistenza di picco e residua, in condizioni drenate e non drenate, assumendo, in particolare:

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

Le analisi sono state condotte con metodi pseudostatici globali o per conci, che prevedono di applicare alla massa potenzialmente in frana o ad ogni concio un'azione sismica proporzionale al relativo peso W , pari a $F_h = K_h \cdot W$ e $F_v = K_v \cdot W$, ove con K_h e K_v sono indicati rispettivamente i coefficienti sismici orizzontale e verticale. Sono stati, in particolare, assunti i seguenti valori: $K_h = \beta_s \cdot a_{\max s/g}$, in direzione orizzontale, e $K_v = \pm 0,5 \cdot K_h$, in direzione verticale, essendo $a_{\max s}$ l'accelerazione massima (in g) al piano di campagna attesa al sito, β_s un coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima e g l'accelerazione di gravità. I valori di β_s sono riportati nella tabella n. 10.1 in funzione dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito in condizioni di campo libero nell'ipotesi di sottosuolo rigido e superficie topografica orizzontale (a_g) e delle categorie di sottosuolo di riferimento come definite nel Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Tabella n. 10.1 - Valori del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima

	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g/g < 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g/g < 0,2$	0,27	0,24
$a_g/g \leq 0,1$	0,20	0,20

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

I fattori di sicurezza, nei casi in esame, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, impiegando il programma SLOPE, versione 2023.30.6.1546 di GeoStru S.a.s. di Bianco (RC). Nel valutare i risultati è stato considerato che un valore del fattore di sicurezza pari a $F_s = 1$ corrisponde ad una condizione di equilibrio limite o di collasso incipiente. Valori di $F_s > 1$ individuano condizioni caratterizzate da un certo margine di sicurezza rispetto al collasso. Un valore di $F_s > 1,2$ può essere ritenuto indicativo di una condizione di stabilità.

Nella tabella n. 10.2 sono indicate le classi di pericolosità di frana in condizioni statiche, mentre nella tabella n. 10.3 sono indicate quelle in condizioni dinamiche.

Tabella n. 10.2 - Classi di pericolosità di frana in condizioni statiche

FATTORE DI SICUREZZA F_s	RISCHIO DI FRANA
$F_s \leq 1,05$	Molto alto
$1,05 \leq F_s \leq 1,25$	Alto
$1,25 \leq F_s \leq 1,45$	Medio - alto
$1,45 \leq F_s \leq 1,75$	Medio - basso
$1,75 \leq F_s \leq 2,05$	Basso
$2,05 \leq F_s \leq 3,00$	Molto basso
$3,00 < F_s$	Praticamente nullo

Tabella n. 10.3 - Classi di pericolosità di frana in condizioni dinamiche

FATTORE DI SICUREZZA F_s	RISCHIO DI FRANA
$F_s \leq 1,05$	Molto alto
$1,05 \leq F_s \leq 1,15$	Alto
$1,15 \leq F_s \leq 1,25$	Medio - alto
$1,25 \leq F_s \leq 1,35$	Medio - basso
$1,35 \leq F_s \leq 1,50$	Basso
$1,50 \leq F_s \leq 1,70$	Molto basso
$1,70 < F_s$	Praticamente nullo

Nelle verifiche di stabilità effettuate, ove necessario, è stata considerata l'amplificazione topografica. In ogni caso è stata inoltre considerata la presenza della falda.

La metodologia di calcolo è allegata alla presente relazione unitamente alla validazione dei codici di calcolo.

Nell'ambito delle analisi di stabilità di versante in condizioni sismiche sono stati calcolati, con metodi dinamici semplificati, anche gli spostamenti permanenti attesi in corrispondenza dei tratti di sezione significativi. Anche se nei casi in esame i fattori di sicurezza non sono tutti maggiori di 1, è stato adottato un coefficiente sismico critico orizzontale K_c (coefficiente sismico pseudostatico) che corrisponde alla condizione $F_s = 1$). Tenuto conto delle specifiche caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo e delle condizioni geometriche del pendio, è stata inoltre utilizzata la metodologia di calcolo proposta da *Newmark*, che considera lo spostamento sismico del versante riferito alla superficie d'analisi S_α , approssimata ad un blocco rigido su piano inclinato vibrante di pendenza α e con angolo di attrito φ .

Lo spostamento atteso è espresso dalla seguente relazione:

$$S_\alpha = S_0 \cdot A$$

dove: $A = \cos(\varphi - \alpha) / \cos \varphi$; S_0 = spostamento del blocco sul piano orizzontale determinato dalla formula:

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	60 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

$$S_0 = \frac{37v_{\max}^2}{a_{\max}} \cdot e^{-9,4 \frac{a_c}{a_{\max}}}$$

dove: $a_{\max}$ = accelerazione massima del moto alla base del pendio (g); $v_{\max}$ = velocità massima del moto alla base; a_c = accelerazione critica = $K_c \cdot g$.

In base al valore di S_α il livello di danno atteso può essere valutato con la tabella n. 10.4.

Tabella n. 10.4 - Livelli di danno atteso per le strutture (indicazioni tratte dalla letteratura)

GRADO DI DANNO	LEGG & SLOSSON (1984) (in cm)	IDRISS (1985) (in cm)
Irrilevante	< 0,5	< 3
Modesto	0,5 - 5	15
Forte/moderato	5 - 50	30
Severo/elevato	50 - 500	90
Catastrofico	> 500	300

Nelle analisi di stabilità in condizioni post-sismiche, è stata valutata la possibilità che, durante l'azione sismica, possano manifestarsi all'interno del pendio fenomeni di incremento delle pressioni interstiziali e/o di degradazione dei parametri di resistenza per effetto della ciclicità del carico. Tali fenomeni sono significativi solo quando l'ampiezza della *deformazione di taglio ciclica equivalente* indotta dal terremoto (γ_c) è superiore alla *deformazione di soglia volumetrica* (γ_v), il cui valore può essere determinato, ad esempio, a partire dai risultati di prove di colonna risonante. Il valore della deformazione di taglio ciclica equivalente è stato stimato mediante la seguente relazione:

$$\gamma_c = \tau_{eq}/G = 0,65 \cdot (a_{\max}/g) \cdot \sigma_v \cdot rd/G$$

dove: $a_{\max}$ = accelerazione massima attesa al sito; σ_v = tensione litostatica verticale; rd = fattore di riduzione di $a_{\max}$ con la profondità (a scopo cautelativo si è considerata la profondità massima del piano di scorrimento); G = valore del modulo di taglio alla profondità del piano di scorrimento.

Per determinare la deformazione di soglia volumetrica (γ_v), poiché tale parametro dipende dalle variazioni del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento, sono stati analizzati gli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei materiali attraversati dall'analisi.

10.1.2. Condizioni di stabilità: Montiano (Sezione 3)

10.1.2.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

Nel caso in esame (sezione 3) i fattori di sicurezza in condizioni drenate pre-sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale e considerando la presenza idrica nel sottosuolo.

Nella tabella n. 10.5 sono indicati i parametri geotecnici medi utilizzati in queste verifiche.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	61 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Tabella n. 10.5 - Parametri geotecnici medi utilizzati nel settore di monte

Strato	Coesione (kg/cm ²)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m ³)	Peso unità di volume saturo (Kg/m ³)	Litologia
1	0.025	0.25	22	1850	2050	A - Frana attiva
2	0.065	0.65	25	1900	2100	B - Deposito eluvio colluviale
3	0.45	4.5	28	2200	2400	C - Substrato formazionale (FAA2ap)

Condizioni drenate - Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato $F_s = 0.889$ (tra 217 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

10.1.2.2. Condizioni non drenate durante il sisma

Nel caso in esame (sezione 3) i fattori di sicurezza in condizioni non drenate durante il sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale e considerando la presenza idrica nel sottosuolo.

Condizioni non drenate - Il fattore di sicurezza 0,838 (tra 217 superfici verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Nella tabella n. 10.5 sono indicati i parametri geotecnici utilizzati in queste verifiche e nella tabella n. 10.6 i coefficienti sismici inseriti.

Tabella n. 10.6 - Determinazione dei coefficienti sismici (K_h e K_v)

F_{APGA}	$A_{MAX S/G}$	β_s	K_H	$\pm K_V$
1,83	0,36	0,28	0,10	0,05

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

Lo spostamento atteso (S_a), calcolato come precedentemente indicato, è risultato:

- di 110,96 centimetri, quindi con un grado di danno severo/elevato.

10.1.2.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.

Lo studio degli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei terreni in esame ha permesso di determinare la deformazione di soglia volumetrica (γ_v) che, nella situazione considerata è pari allo 0,002%.

L'ampiezza della deformazione di taglio ciclica equivalente indotta dal terremoto (γ_c), calcolata, come indicato nel paragrafo precedente, quale media delle verticali considerate, è pari a 0,000175% e pertanto risulta inferiore a quella della soglia volumetrica (γ_v) della curva di degrado utilizzata nelle analisi.

In base ai risultati conseguiti, si può ritenere che le "coperture" soggette a fenomeni degradativi per effetto della sollecitazione dinamica ciclica durante eventi estremi, con la ricorrenza considerata, non siano soggette a deformazioni superiori alla soglia elastica e pertanto i parametri di resistenza al taglio non subiscono

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	62 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

riduzioni significative post evento. In conclusione, i parametri di resistenza al taglio caratteristici delle condizioni statiche pre-sismiche, possono ritenersi attendibili anche post-evento e quindi non si effettuano ulteriori verifiche.

10.1.2.4. Considerazioni

Il livello freatico considerato nelle verifiche, desunto da osservazioni effettuate in questa sede e dai dati disponibili, condiziona i fattori di sicurezza ottenuti. Va pertanto tenuto presente che un suo innalzamento ne riduce i valori.

10.1.3. Condizioni di stabilità: Montiano (Sezione 4)

10.1.3.1. Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

Nel caso in esame (sezione 4) i fattori di sicurezza in condizioni drenate pre-sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale e considerando la presenza idrica nel sottosuolo.

Nella tabella n. 10.7 sono indicati i parametri geotecnici medi utilizzati in queste verifiche.

Tabella n. 10.7 - Parametri geotecnici medi utilizzati nel settore di monte

Strato	Coesione (kg/cm ²)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m ³)	Peso unità di volume saturo (Kg/m ³)	Litologia
1	0	0.15	18	1850	2050	A - Frana attiva
2	0.065	0.65	25	1900	2100	B - Deposito eluvio colluviale
3	0.45	4.5	28	2200	2400	C - Substrato formazionale (FAA2ap)

Condizioni drenate - Il fattore di sicurezza minimo, nelle condizioni statiche considerate, è risultato $F_s = 1.021$ (tra 193 superfici circolari verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

10.1.3.2. Condizioni non drenate durante il sisma

Nel caso in esame (sezione 4) i fattori di sicurezza in condizioni non drenate durante il sisma, sono stati determinati col procedimento di Morgenstern-Price per superfici circolari, facendo riferimento alla sezione caratterizzante la più onerosa situazione geomorfologica locale e considerando la presenza idrica nel sottosuolo.

Condizioni non drenate - Il fattore di sicurezza 0.793 (tra 193 superfici verificate), quindi il rischio di frana è molto alto.

Nella tabella n. 10.7 sono indicati i parametri geotecnici utilizzati in queste verifiche e nella tabella n. 10.8 i coefficienti sismici inseriti.

Tabella n. 10.8 - Determinazione dei coefficienti sismici (K_h e K_v)

F_{APGA}	$A_{MAX S/G}$	β_s	K_H	$\pm K_V$
1.79	0,35	0,28	0,10	0,05

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	63 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

Per i particolari relativi a questa determinazione si rimanda alla documentazione di calcolo allegata.

Lo spostamento atteso (S_a), calcolato come precedentemente indicato, è risultato:

- di 48,39 centimetri, quindi con un grado di danno severo/elevato.

10.1.3.3. Condizioni drenate nella situazione post-sisma.

Lo studio degli andamenti delle curve di degrado caratteristiche dei terreni in esame ha permesso di determinare la deformazione di soglia volumetrica (γ_v) che, nella situazione considerata è pari allo 0,002%.

L'ampiezza della deformazione di taglio ciclica equivalente indotta dal terremoto (γ_c), calcolata, come indicato nel paragrafo precedente, quale media delle verticali considerate, è pari a 0,00017% e pertanto risulta inferiore a quella della soglia volumetrica (γ_v) della curva di degrado utilizzata nelle analisi.

In base ai risultati conseguiti, si può ritenere che le "coperture" soggette a fenomeni degradativi per effetto della sollecitazione dinamica ciclica durante eventi estremi, con la ricorrenza considerata, non siano soggette a deformazioni superiori alla soglia elastica e pertanto i parametri di resistenza al taglio non subiscono riduzioni significative post evento. In conclusione, i parametri di resistenza al taglio caratteristici delle condizioni statiche pre-sismiche, possono ritenersi attendibili anche post-evento e quindi non si effettuano ulteriori verifiche.

10.1.3.4. Considerazioni

Il livello freatico considerato nelle verifiche (piano campagna), desunto da osservazioni effettuate in questa sede e dai dati disponibili, condiziona i fattori di sicurezza ottenuti.

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	64 di 65

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI MONTIANO (FC) Studio di microzonazione sismica	Terzo

11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente studio di Microzonazione Sismica di III livello, concernente il Comune di Montiano, sono stati acquisiti tutti i dati bibliografici e di archivio disponibili, sono stati condotti puntuali rilievi sul territorio ed è stata analizzata la cartografia geologica e geomorfologica fruibile. Nelle zone di attenzione per instabilità per frana in terra in condizioni sismiche, sottoposte ad approfondimenti di Livello 3, è stata, pertanto, predisposta ed eseguita un'attenta campagna di rilievi integrativi e di controllo.

L'insieme di tutti i dati acquisiti ha consentito un approfondito studio della franosità dei terreni considerati.

Le analisi di stabilità sono state condotte con metodi pseudostatici globali o per conci ed effettuate in condizioni statiche, sismiche e post-sismiche, in condizioni drenate e non drenate, assumendo, in particolare le:

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

Utilizzando la metodologia di calcolo proposta da *Newmark*, che considera lo spostamento sismico del versante, sono stati anche calcolati anche gli spostamenti attesi in condizioni sismiche.

Le are franose studiate hanno mostrato un rischio di frana molto alto, gli spostamenti calcolati rivelano un grado di danno severo/elevato.

Nelle seguenti tavole allegate sono riportate le zone suscettibili di instabilità (Livello 3) con indicato il valore degli spostamenti attesi (FRT):

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,1 - 0,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,4 - 0,8 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,7 - 1,1 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $0,5 - 1,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $0,1 - 0,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $0,5 - 1,0 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $0,5 - 1,5 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $0,4 - 0,8 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $0,7 - 1,1 s$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $0,5 - 1,5 s$ in scala 1:10.000

Il presente studio evidenzia l'importanza della messa a punto del database geognostico, su cui basare le analisi di pericolosità, che contemplino anche il fenomeno di instabilità per frana in condizioni sismiche.

Infatti, con l'attuazione delle analisi di stabilità è stato possibile caratterizzare la suscettibilità delle aree indagate e calcolare diversi indicatori di pericolosità.

Forlì, 22 dicembre 2023

 Geologo Dott. Aldo Antoniazzi STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA E AMBIENTALE	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	Relazione illustrativa	Dicembre 2023	0	65 di 65

Analisi di stabilità - Metodologia di calcolo

Definizione

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

Introduzione all'analisi di stabilità

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

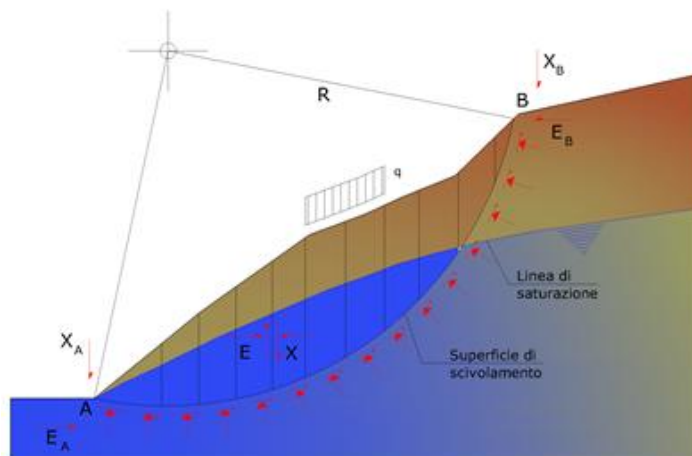
1. Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione (c) e angolo di resistenza al taglio (ϕ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.
2. In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

Metodo equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio (τ) e confrontate con la resistenza disponibile (τ_f), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza:

$$F = \tau_f / \tau$$

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Culman), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (Fellenius, Bishop, Janbu ecc.). Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei conci.



Metodo dei conci

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di conci. Se il numero dei conci è pari a n , il problema presenta le seguenti incognite:

- n valori delle forze normali N_i agenti sulla base di ciascun concio;
- n valori delle forze di taglio alla base del concio T_i ;
- $(n-1)$ forze normali E_i agenti sull'interfaccia dei conci;
- $(n-1)$ forze tangenziali X_i agenti sull'interfaccia dei conci;
- n valori della coordinata a che individua il punto di applicazione delle E_i ;
- $(n-1)$ valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle X_i ;
- una incognita costituita dal fattore di sicurezza F .

Complessivamente le incognite sono $(6n-2)$.

Mentre le equazioni a disposizione sono:

- equazioni di equilibrio dei momenti n ;
- equazioni di equilibrio alla traslazione verticale n ;
- equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale n ;
- equazioni relative al criterio di rottura n .

Totale numero di equazioni $4n$.

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a :

$$i = (6n - 2) - (4n) = 2n - 2$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a $(n-2)$ in quanto si fa l'assunzione che N_i sia applicato nel punto medio della striscia. Ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite.

I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le $(n-2)$ indeterminazioni.

Metodo di Fellenius (1927)

Con questo metodo (valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

- n valori delle forze normali N_i ;
- n valori delle forze da taglio T_i ;
- 1 fattore di sicurezza.

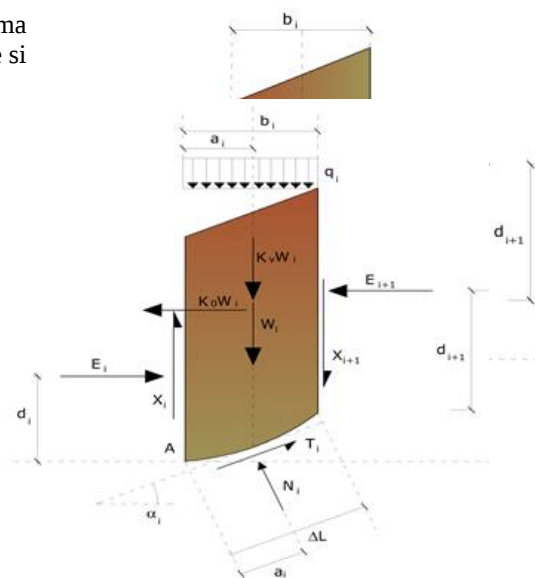
Incognite $(2n+1)$.

Le equazioni a disposizione sono:

- n equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;
- n equazioni relative al criterio di rottura;
- equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\sum \{ c_i \times l_i + (W_i \times \cos \alpha_i - u_i \times l_i) \times \tan \phi_i \}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$

Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.



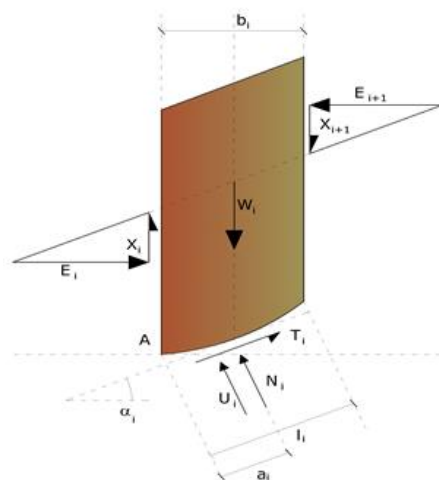
Metodo di Bishop (1955)

Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali. Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_y = 0, \quad \sum M_0 = 0 \quad \text{Criteri di rottura}$$

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b_i + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$

I valori di F e di ΔX per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre $\Delta X = 0$ ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario**, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

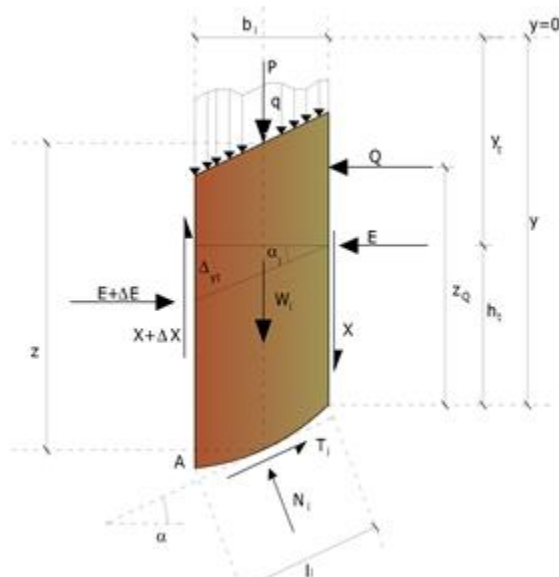
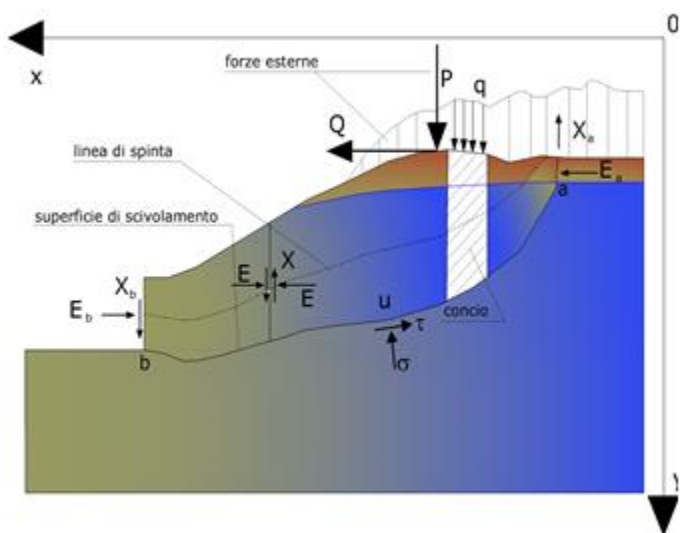


Metodo di Janbu (1967)

Janbu estese il metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio). A tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \tan \alpha_i}$$

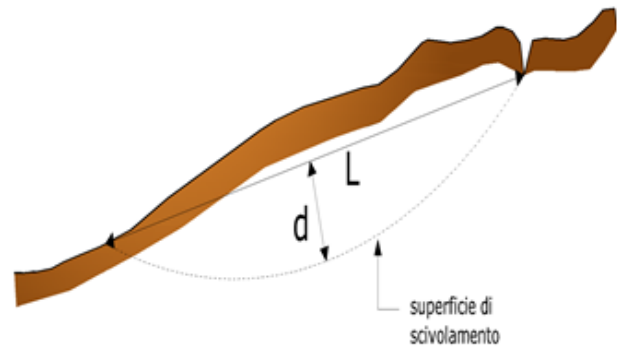
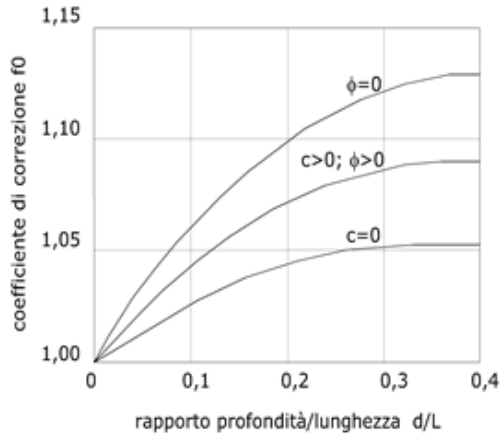


Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Assumendo $\Delta X_i = 0$ si ottiene il metodo ordinario. Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 \cdot F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici. Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.



Metodo di Bell (1968)

Le forze agenti sul corpo che scivola includono il peso effettivo del terreno, W , le forze sismiche pseudostatiche orizzontali e verticali $K_X W$ e $K_Z W$, le forze orizzontali e verticali X e Z applicate esternamente al profilo del pendio, infine, la risultante degli sforzi totali normali e di taglio σ e τ agenti sulla superficie potenziale di scivolamento.

Lo sforzo totale normale può includere un eccesso di pressione dei pori u che deve essere specificata con l'introduzione dei parametri di forza efficace.

In pratica questo metodo può essere considerato come un'estensione del metodo del cerchio di attrito per sezioni omogenee precedentemente descritto da Taylor.

In accordo con la legge della resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensione efficace, la forza di taglio agente sulla base dell' i -esimo concio è data da:

$$T_i = \frac{c_i L_i + (N_i - u_{ci} L_i) \tan \Phi_i}{F}$$

in cui:

F = il fattore di sicurezza;

c_i = la coesione efficace (o totale) alla base dell' i -esimo concio;

Φ_i = l'angolo di attrito efficace (= 0 con la coesione totale) alla base dell' i -esimo concio;

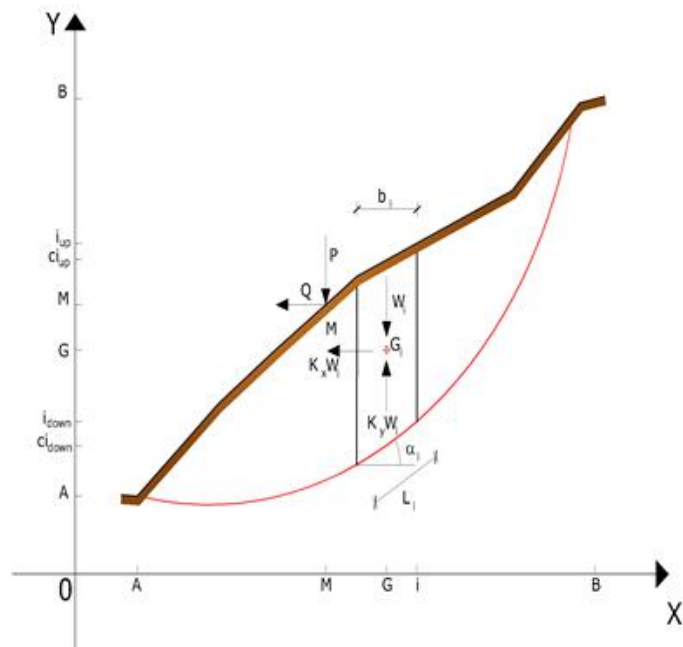
L_i = la lunghezza della base dell' i -esimo concio;

u_{ci} = la pressione dei pori al centro della base dell' i -esimo concio.

L'equilibrio risulta uguagliando a zero la somma delle forze orizzontali, la somma delle forze verticali e la somma dei momenti rispetto all'origine.

Viene adottata la seguente assunzione sulla variazione della tensione normale agente sulla potenziale superficie di scorrimento:

$$\sigma_{ci} = \left[C_1 (1 - K_z) \frac{W_i \cos \alpha_i}{L_i} \right] + C_2 f(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$$



in cui il primo termine dell'equazione include l'espressione:

$$W_i \cos \alpha_i / L_i = \text{valore dello sforzo normale totale associato con il metodo ordinario dei conci}$$

Il secondo termine dell'equazione include la funzione:

$$f = \sin 2\pi \left(\frac{x_n - x_{ci}}{x_n - x_0} \right)$$

dove x_0 ed x_n sono rispettivamente le ascisse del primo e dell'ultimo punto della superficie di scorrimento, mentre x_{ci} rappresenta l'ascissa del punto medio della base del concio i-esimo.

Una parte sensibile di riduzione del peso associata con una accelerazione verticale del terreno K_z g può essere trasmessa direttamente alla base e ciò è incluso nel fattore $(1 - K_z)$.

Lo sforzo normale totale alla base di un concio è dato da:

$$N_i = \sigma_{ci} L_i$$

La soluzione delle equazioni di equilibrio si ricava risolvendo un sistema lineare di tre equazioni ottenute moltiplicando le equazioni di equilibrio per il fattore di sicurezza F , sostituendo l'espressione di N_i e moltiplicando ciascun termine della coesione per un coefficiente arbitrario C_3 . Qualsiasi coppia di valori del fattore di sicurezza nell'intorno di una stima fisicamente ragionevole può essere usata per iniziare una soluzione iterativa.

Il numero necessario di iterazioni dipende sia dalla stima iniziale sia dalla desiderata precisione della soluzione; normalmente, il processo converge rapidamente.

Metodo di Sarma (1973)

Il metodo di Sarma è un semplice, ma accurato metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, che permette di determinare l'accelerazione sismica orizzontale richiesta affinché l'ammasso di terreno, delimitato dalla superficie di scivolamento e dal profilo topografico, raggiunga lo stato di equilibrio limite (accelerazione critica K_C) e, nello stesso tempo, consente di ricavare l'usuale fattore di sicurezza ottenuto come per gli altri metodi più comuni della geotecnica.

Si tratta di un metodo basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in n strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale N_i agisca nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio dei momenti.

Condizioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale:

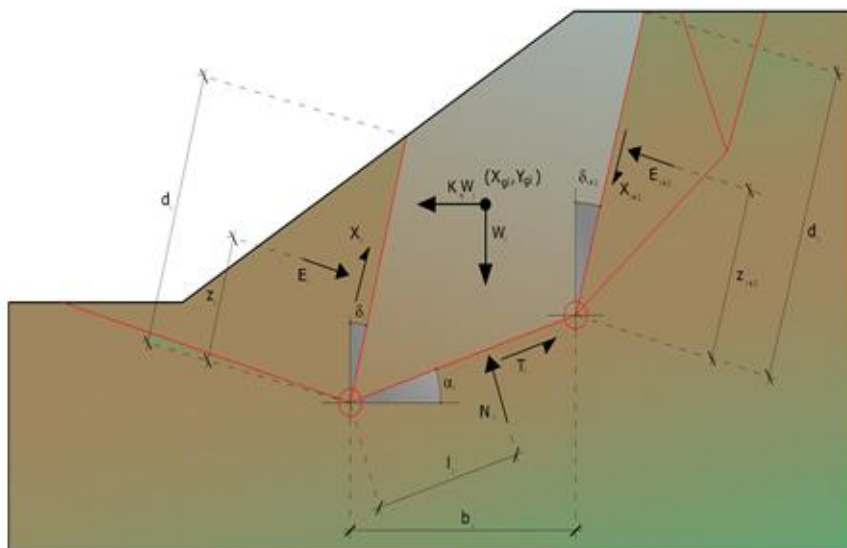
$$\begin{aligned} N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i &= W_i - \Delta X_i \\ T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i &= K W_i + \Delta E_i \end{aligned}$$

Viene, inoltre, assunto che in assenza di forze esterne sulla superficie libera dell'ammasso si ha:

$$\begin{aligned} \sum \Delta E_i &= 0 \\ \sum \Delta X_i &= 0 \end{aligned}$$

dove E_i e X_i rappresentano, rispettivamente, le forze orizzontale e verticale sulla faccia i-esima del concio generico i .

L'equazione di equilibrio dei momenti viene scritta scegliendo come punto di riferimento il baricentro dell'intero ammasso; sicché, dopo aver eseguito una serie di posizioni e trasformazioni trigonometriche ed algebriche, nel **metodo di Sarma** la soluzione del problema passa attraverso la risoluzione di due equazioni:



Azioni sull'iesimo concio, metodo di Sarma

$$\sum \Delta X_i \cdot \operatorname{tg}(\psi'_i - \alpha_i) + \sum \Delta E_i = \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i$$

$$\sum \Delta X_i \cdot [(y_{mi} - y_G) \cdot \operatorname{tg}(\psi'_i - \alpha'_i) + (x'_i - x_G)] = \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_G) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_G)$$

Ma l'approccio risolutivo, in questo caso, è completamente capovolto: il problema infatti impone di trovare un valore di **K** (accelerazione sismica) corrispondente ad un determinato fattore di sicurezza; ed in particolare, trovare il valore dell'accelerazione **K** corrispondente al fattore di sicurezza **F = 1**, ossia l'accelerazione critica.

Si ha pertanto:

$$\begin{aligned} K &= K_c & \text{Accelerazione critica se } F=1 \\ F &= F_s & \text{Fattore di sicurezza in condizioni statiche se } K=0 \end{aligned}$$

La seconda parte del problema del Metodo di Sarma è quella di trovare una distribuzione di forze interne X_i ed E_i tale da verificare l'equilibrio del concio e quello globale dell'intero ammasso, senza violazione del criterio di rottura.

E' stato trovato che una soluzione accettabile del problema si può ottenere assumendo la seguente distribuzione per le forze X_i :

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda \cdot (Q_{i+1} - Q_i)$$

dove Q_i è una funzione nota, in cui vengono presi in considerazione i parametri geotecnici medi sulla i -esima faccia del concio i , e λ rappresenta un'incognita.

La soluzione completa del problema si ottiene pertanto, dopo alcune iterazioni, con i valori di K_c , λ e F , che permettono di ottenere anche la distribuzione delle forze di interstriscia.

Metodo di Spencer (1967)

Il metodo è basato sull'assunzione:

1. le forze d'interfaccia lungo le superfici di divisione dei singoli concetti sono orientate parallelamente fra loro ed inclinate rispetto all'orizzontale di un angolo θ ;
2. tutti i momenti sono nulli $M_i = 0$ con $i=1, \dots, n$.

Sostanzialmente il metodo soddisfa tutte le equazioni della statica ed equivale al metodo di Morgenstern e Price quando la funzione $f(x) = 1$. Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro dell'arco descritto dalla superficie di scivolamento si ha:

$$1) \sum Q_i R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

dove:

$$Q_i = \frac{\frac{c}{F_s} (W \cos \alpha - \gamma_w h \sec \alpha) \frac{\tan \alpha}{F_s} - W \sec \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[\frac{F_s + \tan \phi \tan(\alpha - \theta)}{F_s} \right]}$$

forza d'interazione fra i conci;

R = raggio dell'arco di cerchio;

θ = angolo d'inclinazione della forza Q_i rispetto all'orizzontale.

Imponendo l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali si ha rispettivamente:

$$\begin{aligned} \sum (Q_i \cos \theta) &= 0 \\ \sum (Q_i \sin \theta) &= 0 \end{aligned}$$

Con l'assunzione delle forze Q_i parallele fra loro, si può anche scrivere:

$$2) \sum Q_i = 0$$

Il metodo propone di calcolare due coefficienti di sicurezza: il primo (F_{sm}) ottenibile dalla 1), legato all'equilibrio dei momenti; il secondo (F_{sf}) dalla 2) legato all'equilibrio delle forze. In pratica si procede risolvendo la 1) e la 2) per un dato intervallo di valori dell'angolo θ , considerando come valore unico del coefficiente di sicurezza quello per cui si abbia:

$$F_{sm} = F_{sf}$$

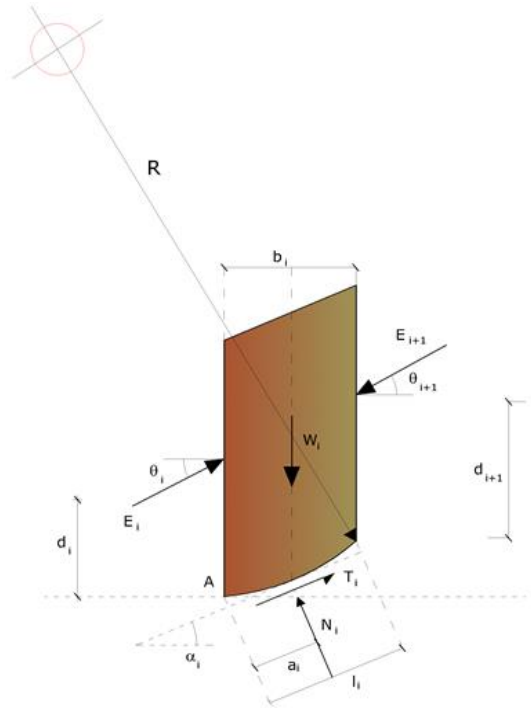
Metodo di Morgenstern e Price (1965)

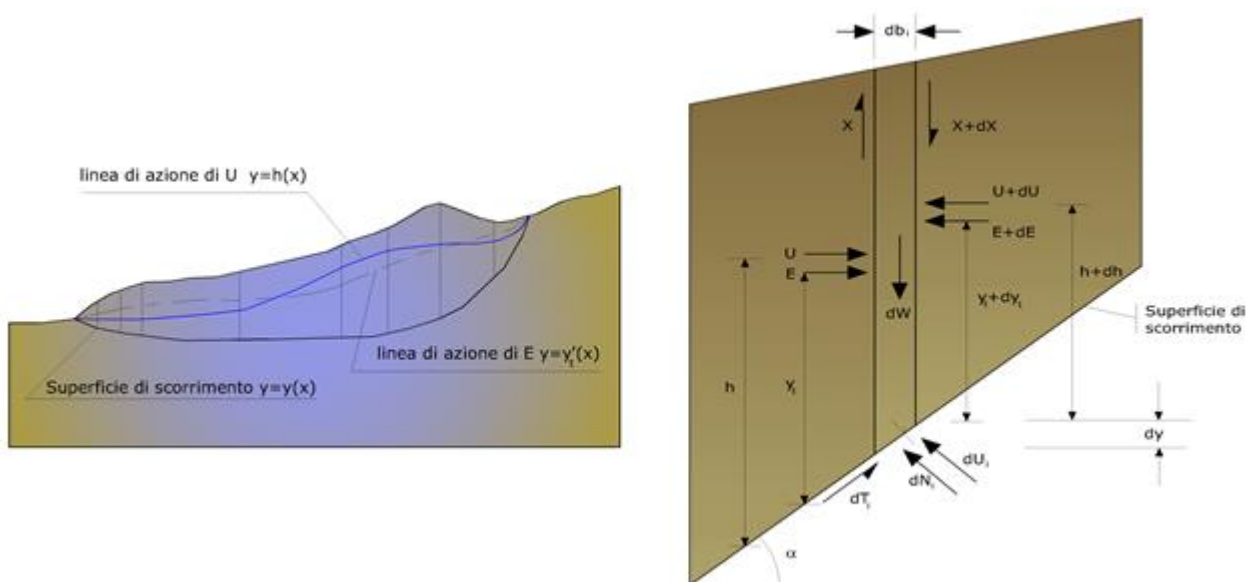
Si stabilisce una relazione tra le componenti delle forze di interfaccia del tipo $X = \lambda f(x)E$, dove λ è un fattore di scala e $f(x)$, funzione della posizione di E e di X , definisce una relazione tra la variazione della forza X e della forza E all'interno della massa scivolante. La funzione $f(x)$ è scelta arbitrariamente (costante, senoide, semisenoide, trapezia, spezzata...) e influenza poco il risultato, ma va verificato che i valori ricavati per le incognite siano fisicamente accettabili.

La particolarità del metodo è che la massa viene suddivisa in strisce infinitesime alle quali vengono imposte le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale e di rottura sulla base delle strisce stesse. Si perviene ad una prima equazione differenziale che lega le forze d'interfaccia incognite E , X , il coefficiente di sicurezza F_s , il peso della striscia infinitesima dW e la risultante delle pressioni neutra alla base dU .

Si ottiene la cosiddetta "equazione delle forze":

$$\begin{aligned} c' \sec^2 \frac{\alpha}{F_s} + \tan \phi' \left(\frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \tan \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) = \\ = \frac{dE}{dx} - \tan \alpha \left(\frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right) \end{aligned}$$





Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Morgenster e Price e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Una seconda equazione, detta “**equazione dei momenti**”, viene scritta imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione rispetto alla mezzeria della base:

$$X = \frac{d(E_\gamma)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx}$$

queste due equazioni vengono estese per integrazione a tutta la massa interessata dallo scivolamento.

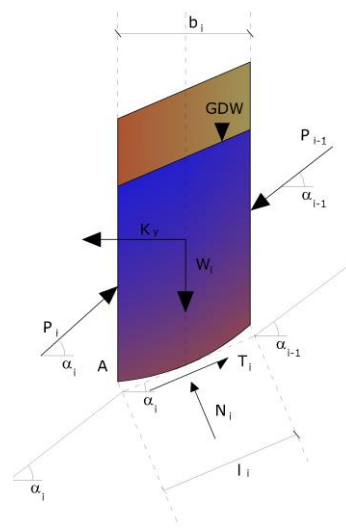
Il metodo di calcolo soddisfa tutte le equazioni di equilibrio ed è applicabile a superfici di qualsiasi forma, ma implica necessariamente l'uso di un calcolatore.

Metodo di Zeng e Liang (2002)

Zeng e Liang hanno effettuato una serie di analisi parametriche su un modello bidimensionale sviluppato con codice agli elementi finiti, che riproduce il caso di pali immersi in un terreno in movimento (drilled shafts). Il modello bidimensionale riproduce un striscia di terreno di spessore unitario e ipotizza che il fenomeno avvenga in condizioni di deformazione piana nella direzione parallela all'asse dei pali. Il modello è stato utilizzato per indagare l'influenza sulla formazione dell'effetto arco di alcuni parametri come l'interasse fra i pali, il diametro e la forma dei pali, e le proprietà meccaniche del terreno. Gli autori individuano nel rapporto tra l'interasse e il diametro dei i pali (s/d) il parametro adimensionale determinante per la formazione dell'effetto arco. Il problema risulta essere staticamente indeterminato, con grado di indeterminatezza pari a $(8n-4)$, ma nonostante ciò è possibile ottenere una soluzione riducendo il numero delle incognite e assumendo quindi delle ipotesi semplificative, in modo da rendere determinato il problema.

Le assunzioni che rendono il problema determinato sono:

- K_y sono assunte orizzontali per ridurre il numero totale delle incognite da $(n-1)$ a $(7n-3)$;
- Le forze normali alla base della striscia agiscono nel punto medio, riducendo le incognite da n a $(6n-3)$;
- La posizione delle spinte laterali è ad un terzo dell'altezza media dell'inter-striscia e riduce le incognite da $(n-1)$ a $(5n-2)$;
- Le forze (P_{i-1}) e P_i si assumono parallele all'inclinazione della base della striscia (α_i), riducendo il numero di incognite da $(n-1)$ a $(4n-1)$;
- Si assume un'unica costante di snervamento per tutte le strisce, riducendo le incognite da (n) a $(3n-1)$;



Il numero totale di incognite quindi è ridotto a $(3n)$, da calcolare utilizzando il fattore di trasferimento di carico. Inoltre si deve tener presente che la forza di stabilizzazione trasmessa sul terreno a valle dei pali risulta ridotta di una quantità R , chiamato fattore di riduzione, calcolabile come:

$$R = \frac{1}{s/d} + \left(1 - \frac{1}{s/d}\right) \cdot R_p$$

Il fattore R dipende quindi dal rapporto fra l'interasse presente fra i pali e il diametro dei pali stessi e dal fattore R_p che tiene conto dell'effetto arco.

Valutazione dell'azione sismica

La stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x W$$

$$F_V = K_y W$$

Essendo:

- F_H e F_V rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;
- W peso concio;
- K_x coefficiente sismico orizzontale;
- K_y coefficiente sismico verticale.

Ricerca della superficie di scorrimento critica

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici.

Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da m righe e n colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia $m \times n$ e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

Stabilizzazione di pendii con l'utilizzo di pali

La realizzazione di una cortina di pali, su pendio, serve a fare aumentare la resistenza al taglio su determinate superfici di scorrimento. L'intervento può essere conseguente ad una stabilità già accertata, per la quale si conosce la superficie di scorrimento oppure, agendo preventivamente, viene progettato in relazione alle ipotetiche superfici di rottura che responsabilmente possono essere assunte come quelle più probabili. In ogni caso si opera considerando una massa di terreno in movimento su un ammasso stabile sul quale attestare, per una certa lunghezza, l'allineamento di pali.

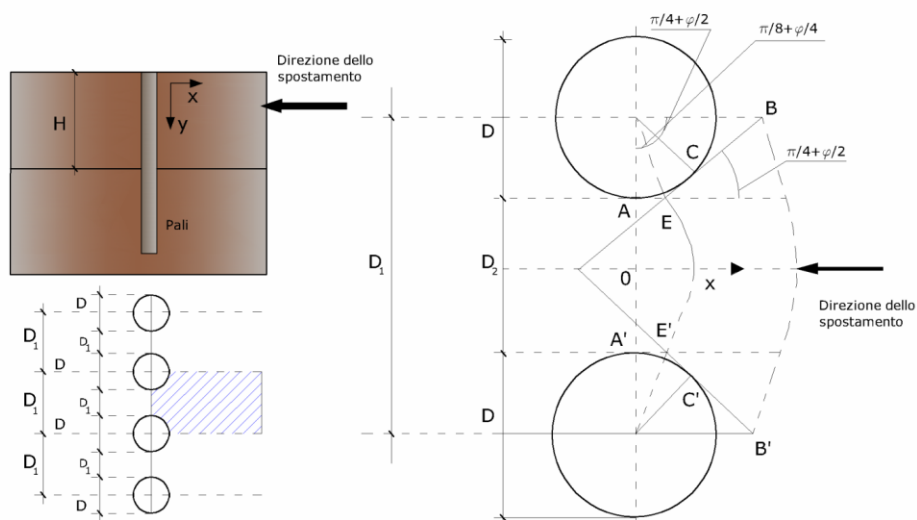
Il terreno, nelle due zone, ha una influenza diversa sull'elemento monoassiale (palo): di tipo sollecitativo nella parte superiore (palo passivo – terreno attivo) e di tipo resistivo nella zona sottostante (palo attivo – terreno passivo). Da questa interferenza, fra "sbarramento" e massa in movimento, scaturiscono le azioni stabilizzanti che devono perseguire le seguenti finalità:

1. conferire al pendio un coefficiente di sicurezza maggiore di quello posseduto;
2. essere assorbite dal manufatto garantendone l'integrità (le tensioni interne, derivanti dalle sollecitazioni massime trasmesse sulle varie sezioni del singolo palo, devono risultare inferiori a quelle ammissibili del materiale) e risultare inferiori al carico limite sopportabile dal terreno, calcolato, lateralmente considerando l'interazione (palo-terreno).

Carico limite relativo all'interazione fra i pali ed il terreno laterale

Nei vari tipi di terreno che non hanno un comportamento omogeneo, le deformazioni in corrispondenza della zona di contatto non sono legate fra di loro. Quindi, non potendo associare al materiale un modello di comportamento perfettamente elastico (ipotesi che potrebbe essere assunta per i materiali lapidei poco fratturati), generalmente si procede

imponendo che il movimento di massa sia nello stato iniziale e che il terreno in adiacenza ai pali sia nella fase massima consentita di plasticizzazione, oltre la quale si potrebbe verificare l'effetto indesiderato che il materiale possa defluire, attraverso la cortina di pali, nello spazio intercorrente fra un elemento e l'altro.



Imponendo inoltre che il carico assorbito dal terreno sia uguale a quello associato alla condizione limite ipotizzata e che fra due pali consecutivi, a seguito della spinta attiva, si instauri una sorta di effetto arco, gli autori T. Ito e T. Matsui (1975) hanno ricavato la relazione che permette di determinare il carico limite. A questa si è pervenuto facendo riferimento allo schema statico, disegnato nella figura precedente e alle ipotesi anzidette, che schematicamente si ribadiscono.

- Sotto l'azione della spinte attiva del terreno si formano due superfici di scorrimento localizzate in corrispondenza delle linee AEB ed A'E'B';
- Le direzioni EB ed E'B' formano con l'asse x rispettivamente angoli $+(45 + \varphi/2)$ e $-(45 + \varphi/2)$;
- Il volume di terreno, compreso nella zona delimitata dai vertici AEBB'E'A' ha un comportamento plastico, e quindi è consentita l'applicazione del criterio di rottura di Mohr-coulomb;
- La pressione attiva del terreno agisce sul piano A-A';
- I pali sono dotati di elevata rigidezza a flessione e taglio.

Detta espressione, riferita alla generica profondità Z, relativamente ad un spessore di terreno unitario, è la seguente:

$$P(Z) = C \cdot D_1 (D_1/D_2)^{K_1} \left[\frac{1}{N_\varphi \tan \varphi} \left(e^{K_2} - 2(N_\varphi)^{1/2} \tan \varphi - 1 \right) + K_3 \right] - C \left[D_1 \cdot K_3 - D_2 / (N_\varphi)^{1/2} \right] + \gamma Z / N_\varphi \left[D_1 (D_1/D_2)^{K_1} \cdot e^{K_2} - D_2 \right]$$

dove i simboli utilizzati assumono il significato che segue:

C = coesione terreno;

φ = angolo di attrito terreno;

γ = peso specifico terreno;

D₁ = interasse tra i pali;

D₂ = spazio libero fra due pali consecutivi;

N_φ = $\tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$

$$K_1 = (N_\varphi)^{1/2} \tan \varphi + N_\varphi - 1$$

$$K_2 = (D_1 - D_2) / D_2 \cdot N_\varphi \tan(\pi/8 + \varphi/4)$$

$$K_3 = \left[2 \tan \varphi + 2(N_\varphi)^{1/2} + 1 / (N_\varphi)^{1/2} \right] / \left[(N_\varphi)^{1/2} \tan \varphi + N_\varphi - 1 \right]$$

La forza totale, relativamente ad uno strato di terreno in movimento di spessore H , è stata ottenuta integrando l'espressione precedente.

In presenza di terreni granulari (condizione drenata), nei quali si può assumere $c = 0$, l'espressione diventa:

$$P = 1/2 \gamma \cdot H^2 / N_\phi \left[D_1 (D_1/D_2)^{k_1} \cdot e^{k_2} - D_2 \right]$$

Per terreni coesivi (condizioni non drenate), con $\phi = 0$ e $c \neq 0$, si ha:

$$P(z) = C \left[D_1 (3 \ln(D_1/D_2) + (D_1 - D_2)/D_2 \tan \pi/8) - 2(D_1 - D_2) \right] + \gamma \cdot Z(D_1 - D_2)$$
$$P = \int_0^H P(z) dz$$
$$P = C \cdot H \left[D_1 (3 \ln(D_1/D_2) + (D_1 - D_2)/D_2 \tan \pi/8) - 2(D_1 - D_2) \right] + 1/2 \gamma H^2 (D_1 - D_2)$$

Il dimensionamento della cortina di pali, che come già detto deve conferire al pendio un incremento del coefficiente di sicurezza e garantire l'integrità del meccanismo palo-terreno, è abbastanza problematica. Infatti tenuto conto della complessità dell'espressione del carico P , influenzata da diversi fattori legati sia alle caratteristiche meccaniche del terreno sia alla geometria del manufatto, non è facile con una sola elaborazione pervenire alla soluzione ottimale. Per raggiungere lo scopo è necessario pertanto eseguire diversi tentativi finalizzati:

- A trovare, sul profilo topografico del pendio, la posizione che garantisca, a parità di altre condizioni, una distribuzione dei coefficienti di sicurezza più confortante;
- A determinare la disposizione planimetrica dei pali, caratterizzata dal rapporto fra interasse e distanza fra i pali (D_2/D_1), che consenta di sfruttare al meglio la resistenza del complesso palo-terreno; sperimentalmente è stato riscontrato che, escludendo i casi limiti ($D_2 = 0 \rightarrow P \rightarrow \infty$ e $D_2 = D_1 \rightarrow P \rightarrow$ valore minimo), i valori più idonei allo scopo sono quelli per i quali tale rapporto risulta compreso fra 0,60 e 0,80;
- A valutare la possibilità di inserire più file di pali ed eventualmente, in caso affermativo, valutare, per le file successive, la posizione che dia più garanzie in termini di sicurezza e di spreco di materiali;
- Ad adottare il tipo di vincolo più idoneo che consente di ottenere una distribuzione più regolare delle sollecitazioni; sperimentalmente è stato constatato che quello che assolve, in maniera più soddisfacente, allo scopo è il vincolo che impedisce le rotazioni alla testa del palo.

Metodo del carico limite di Broms

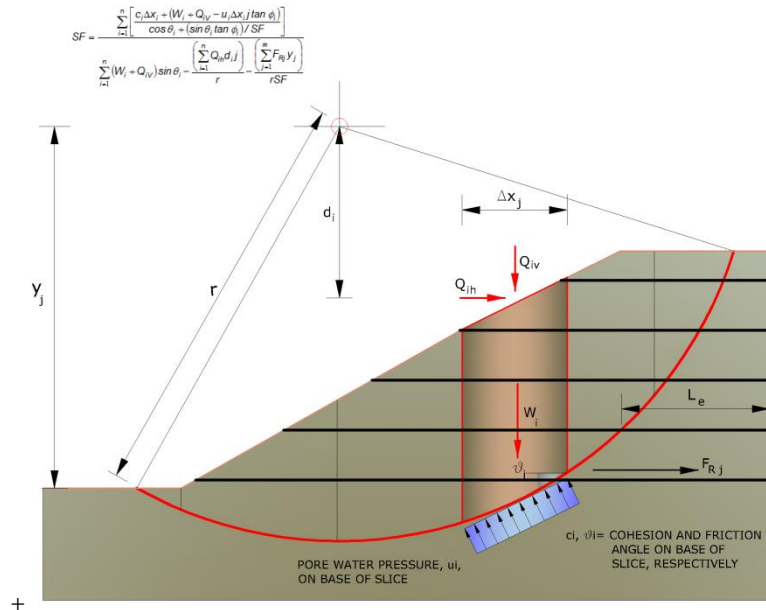
Nel caso in cui il palo sia caricato ortogonalmente all'asse, configurazione di carico presente se un palo inibisce il movimento di una massa in frana, la resistenza può essere affidata al suo carico limite orizzontale.

Il problema di calcolo del carico limite orizzontale è stato affrontato da Broms sia per il mezzo puramente coesivo che per il mezzo incoerente, il metodo di calcolo seguito è basato su alcune ipotesi semplificative per quanto attiene alla reazione esercitata dal terreno per unità di lunghezza di palo in condizioni limite e porta in conto anche la resistenza a rottura del palo (*Momento di plasticizzazione*).

Elemento Rinforzo

I Rinforzi sono degli elementi orizzontali, la loro messa in opera conferisce al terreno un incremento della resistenza allo scorrimento.

Se l'elemento di rinforzo interseca la superficie di scorrimento, la forza resistente sviluppata dall'elemento entra nell'equazione di equilibrio del singolo concio, in caso contrario l'elemento di rinforzo non ne influenza la stabilità.



Le verifiche di natura interna hanno lo scopo di valutare il livello di stabilità dell'ammasso rinforzato, quelle calcolate sono la verifica a rottura dell'elemento di rinforzo per trazione e la verifica a sfilamento (*Pullout*). Il parametro che fornisce la resistenza a trazione del rinforzo, T_{Allow} , si calcola dalla resistenza nominale del materiale con cui è realizzato il rinforzo ridotto da opportuni coefficienti che tengono conto dell'aggressività del terreno, danneggiamento per effetto creep e danneggiamento per installazione.

L'altro parametro è la resistenza a sfilamento (*Pullout*) che viene calcolata attraverso la seguente relazione:

$$T_{Pullout} = 2 \cdot L_e \cdot \sigma'_v \cdot f_b \cdot \tan(\delta)$$

Per geosintetico a maglie chiuse:

$$f_b = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)}$$

dove:

- δ Rappresenta l'angolo di attrito tra terreno e rinforzo;
- $T_{Pullout}$ Resistenza mobilitata da un rinforzo ancorato per una lunghezza L_e all'interno della parte stabile del terreno;
- L_e Lunghezza di ancoraggio del rinforzo all'interno della parte stabile;
- f_b Coefficiente di *Pullout*;
- σ'_v Tensione verticale, calcolata alla profondità media del tratto di rinforzo ancorato al terreno.

Ai fini della verifica si sceglie il valore minimo tra T_{Allow} e $T_{Pullout}$, la verifica interna verrà soddisfatta se la forza trasmessa dal rinforzo generata a tergo del tratto rinforzato non supera il valore della T' .

Ancoraggi

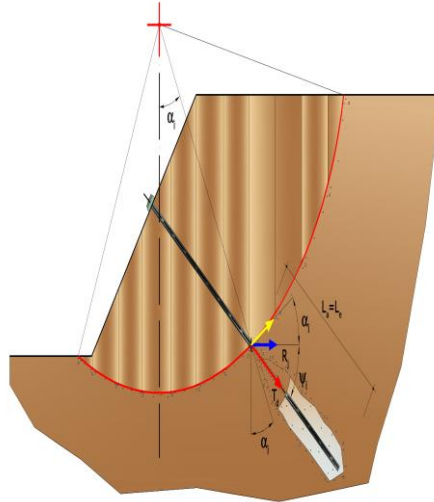
Gli ancoraggi, tiranti o chiodi, sono degli elementi strutturali in grado di sostenere forze di trazione in virtù di un'adeguata connessione al terreno.

Gli elementi caratterizzanti un tirante sono:

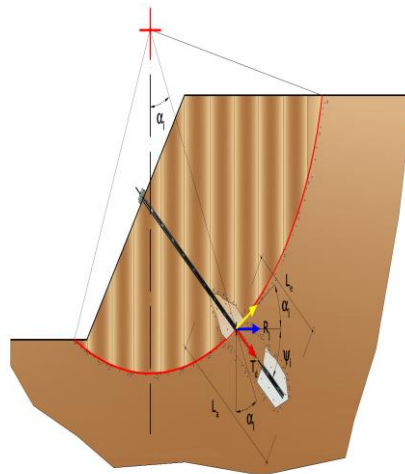
- **testata:** indica l'insieme degli elementi che hanno la funzione di trasmettere alla struttura ancorata la forza di trazione del tirante;
- **fondazione:** indica la parte del tirante che realizza la connessione con il terreno, trasmettendo al terreno stesso la forza di trazione del tirante.

Il tratto compreso tra la testata e la fondazione prende il nome di parte libera, mentre la fondazione (o bulbo) viene realizzata iniettando nel terreno, per un tratto terminale, tramite valvole a perdere, la malta, in genere cementizia. L'anima dell'ancoraggio è costituita da un'armatura, realizzata con barre, fili o trefoli.

Il tirante interviene nella stabilità in misura maggiore o minore efficacia a seconda se sarà totalmente o parzialmente (caso in cui è intercettato dalla superficie di scorrimento) ancorato alla parte stabile del terreno.



Bulbo completamente ancorato



Bulbo parzialmente ancorato

Le relazioni che esprimono la misura di sicurezza lungo una ipotetica superficie di scorrimento si modificheranno in presenza di ancoraggi (tirante attivo, passivo e chiodi) nel modo seguente:

- per i tiranti di *tipo attivo*, la loro resistenza si detrae dalle azioni (denominatore);

$$F_s = \frac{R_d}{E_d - \sum_{i,j} R_{i,j} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_i}}$$

- per tiranti di *tipo passivo* e per i *chiodi*, il loro contributo si somma alle resistenze (numeratore)

$$F_s = \frac{R_d + \sum_{i,j} R_{i,j} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_i}}{E_d}$$

Con R_j si indica la resistenza dell'ancoraggio e viene calcolata dalla seguente espressione:

$$R_j = T_d \cdot \cos \Psi_i \cdot \left(\frac{1}{i} \right) \cdot \left(\frac{L_e}{L_a} \right)$$

dove:

T_d tiro esercizio;

Ψ_i inclinazione del tirante rispetto all'orizzontale;

i interasse;

L_e lunghezza efficace;

L_a lunghezza d'ancoraggio.

I due indici (i, j) riportati in sommatoria rappresentano rispettivamente l' i -esimo concio e il j -esimo ancoraggio intercettato dalla superficie di scorrimento dell' i -esimo concio.

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 3) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

217 superfici circolari verificate

Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	3.0
Numero dei conci	30.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.3
Coefficiente parziale resistenza	1.0
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

Maglia dei Centri

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	48.32 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	79.06 m
Ascissa vertice destro superiore xs	178.51 m
Ordinata vertice destro superiore ys	169.24 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

Tipo opera:	
Classe d'uso:	
Vita nominale:	0.0 [anni]
Vita di riferimento:	0.0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:
Categoria topografica:

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera:

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 3) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

217 superfici circolari verificate

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	1.63	30.36
3	5.19	30.36
4	40.24	35.26
5	96.77	45.92
6	102.08	50.06
7	119.33	55.06
8	138.87	57.73
9	141.53	59.8
10	153.73	63.44
11	162.44	70.17
12	193.43	72.31
13	211.31	85.06
14	215.91	85.06
15	240.08	90.06
16	247.05	90.06
17	247.05	92.03
18	253.73	95.06

Falda

Nr.	X (m)	y (m)
1	-0.18	26.26
2	31.35	30.74
3	65.86	36.38
4	85.86	43.09
5	116.56	48.29
6	132.13	53.98
7	146.52	59.62
8	161.84	65.54
9	174.88	69.57
10	186.86	70.53
11	199.85	72.25

12	236.84	75.44
13	254.32	76.69

Vertici strato1

N	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	1.63	30.36
3	5.19	30.36
4	40.24	35.26
5	96.77	45.92
6	122.25	50.24
7	136.84	53.07
8	142.33	54.7
9	164.02	63.65
10	170.19	65.54
11	175.82	66.91
12	178.97	67.97
13	181.17	69.02
14	185.3	71.74
15	193.43	72.31
16	211.31	85.06
17	215.91	85.06
18	240.08	90.06
19	247.05	90.06
20	247.05	92.03
21	253.73	95.06

Vertici strato2

N	X (m)	y (m)
1	0.0	25.96
2	29.49	28.86
3	54.36	32.79
4	71.25	35.38
5	76.87	37.33
6	84.08	41.77
7	86.1	42.75
8	100.71	45.3
9	129.19	50.48
10	139.2	52.79
11	147.42	55.7
12	165.16	63.18
13	168.34	64.19

14	176.58	66.36
15	186.57	70.13
16	193.43	72.31
17	211.31	85.06
18	215.91	85.06
19	240.08	90.06
20	247.05	90.06
21	247.05	92.06
22	253.73	95.06

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm ²)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m ³)	Peso unità di volume saturo (Kg/m ³)	Litologia	
1	0.025	0.25	22	1850	2050	A - Frana attiva	
2	0.065	0.65	25	1900	2100	B - Deposito eluvio colluviale	
3	0.45	4.5	28	2200	2400	C - Substrato formazionale (FAA2ap)	

Risultati analisi pendio

Fs minimo individuato	0.89
Ascissa centro superficie	152.47 m
Ordinata centro superficie	79.06 m
Raggio superficie	15.38 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio ; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Ei, Ei-1: Forze agenti normalmente alle facce del concio; Xi, Xi-1: Forze di tipo tagliente applicate sulle facce laterali .

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 3) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

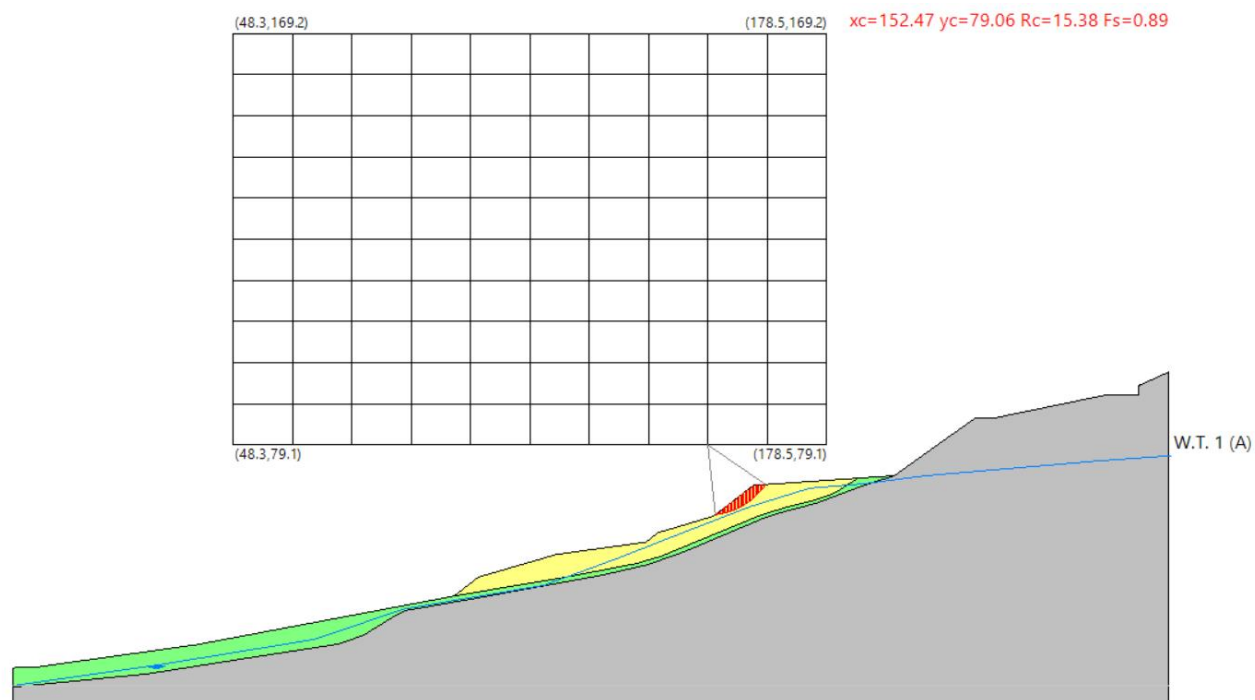
217 superfici circolari verificate

$x_c = 152.473$ $y_c = 79.062$ $R_c = 15.381$ $F_s = 0.889$
 Lambda = 0.00

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	0.37	7.01	0.37	81.41
2	0.37	8.38	0.37	239.84
3	0.37	9.75	0.37	392.12
4	0.37	11.14	0.37	538.26
5	0.37	12.54	0.38	678.11
6	0.37	13.93	0.38	811.61
7	0.37	15.35	0.38	938.66
8	0.37	16.77	0.38	1059.04
9	0.37	18.19	0.39	1172.74
10	0.37	19.64	0.39	1279.57
11	0.37	21.1	0.39	1379.25
12	0.37	22.57	0.4	1471.65
13	0.37	24.06	0.4	1556.5
14	0.37	25.56	0.41	1633.68
15	0.37	27.09	0.41	1702.76
16	0.37	28.63	0.42	1763.43
17	0.37	30.19	0.42	1815.37
18	0.37	31.79	0.43	1858.03
19	0.37	33.4	0.44	1891.24
20	0.37	35.06	0.45	1914.17
21	0.37	36.74	0.46	1926.33
22	0.37	38.47	0.47	1927.01
23	0.22	39.87	0.28	1136.06
24	0.52	41.68	0.69	2496.83
25	0.37	43.91	0.51	1517.43
26	0.37	45.84	0.53	1287.34
27	0.37	47.83	0.55	1039.75
28	0.37	49.91	0.57	772.59
29	0.37	52.09	0.6	483.25
30	0.37	54.35	0.63	168.34

Sforzi sui conci

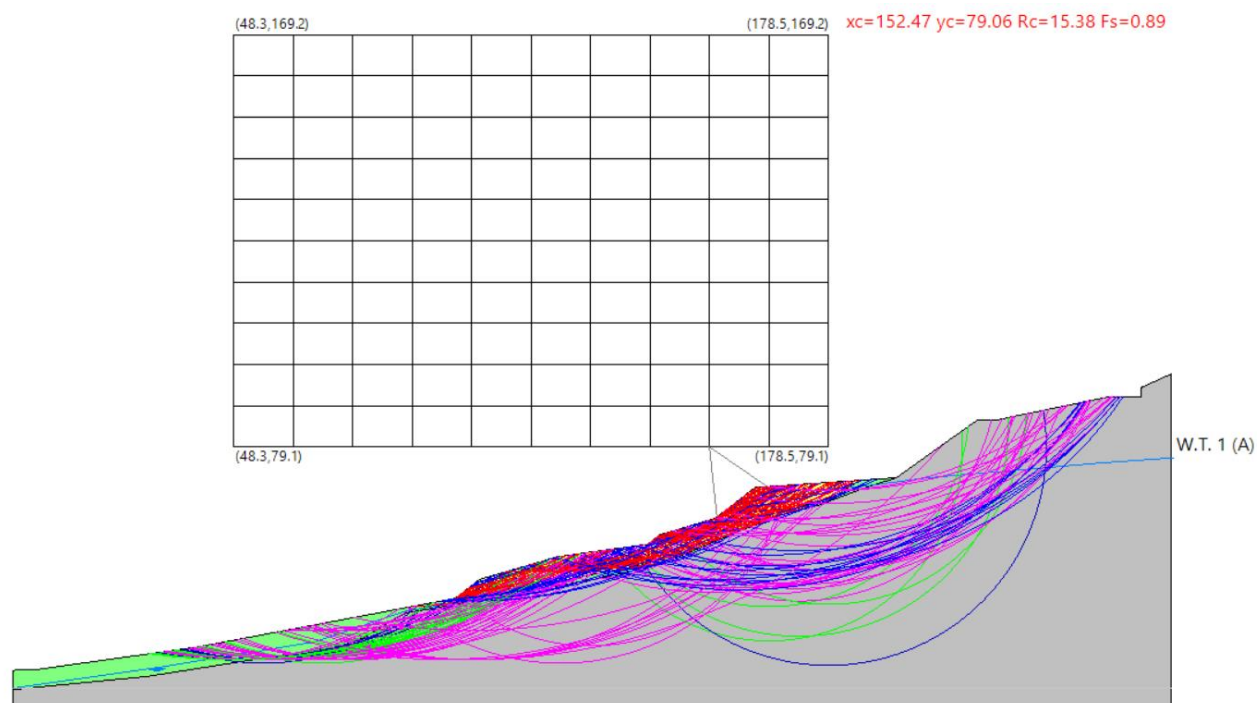
Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	79.6	149.67	0.0	0.0	20.06	112.98	0.0
2	185.0	347.85	79.6	149.67	161.87	177.79	0.0
3	309.43	581.8	185.0	347.85	303.44	242.55	0.0
4	446.71	839.93	309.43	581.8	443.28	306.6	0.0
5	591.27	1111.73	446.71	839.93	579.83	369.23	0.0
6	738.19	1387.98	591.27	1111.73	711.64	429.77	0.0
7	882.89	1660.05	738.19	1387.98	837.66	487.75	0.0
8	1021.38	1920.46	882.89	1660.05	956.53	542.55	0.0
9	1150.12	2162.52	1021.38	1920.46	1067.39	593.81	0.0
10	1265.73	2379.9	1150.12	2162.52	1169.31	641.09	0.0
11	1365.33	2567.16	1265.73	2379.9	1261.26	683.94	0.0
12	1446.55	2719.87	1365.33	2567.16	1342.58	722.05	0.0
13	1507.12	2833.77	1446.55	2719.87	1412.44	755.06	0.0
14	1545.26	2905.48	1507.12	2833.77	1470.36	782.78	0.0
15	1559.32	2931.92	1545.26	2905.48	1515.52	804.83	0.0
16	1548.29	2911.17	1559.32	2931.92	1547.63	821.09	0.0
17	1511.26	2841.55	1548.29	2911.17	1566.15	831.33	0.0
18	1447.54	2721.75	1511.26	2841.55	1570.37	835.26	0.0
19	1357.19	2551.85	1447.54	2721.75	1560.78	833.1	0.0
20	1240.2	2331.88	1357.19	2551.85	1536.31	824.43	0.0
21	1097.29	2063.19	1240.2	2331.88	1497.48	809.48	0.0
22	929.42	1747.54	1097.29	2063.19	1443.88	788.13	0.0
23	842.93	1584.92	929.42	1747.54	834.11	458.76	0.0
24	549.48	1033.17	842.93	1584.92	1717.16	975.03	0.0
25	371.29	698.12	549.48	1033.17	989.25	592.85	0.0
26	213.01	400.51	371.29	698.12	793.63	508.8	0.0
27	84.46	158.8	213.01	400.51	605.14	428.69	0.0
28	-3.16	-5.94	84.46	158.8	427.95	354.63	0.0
29	-36.71	-69.03	-3.16	-5.94	267.8	289.51	0.0
30	-0.49	-0.92	-36.71	-69.03	132.34	237.05	0.0



A - Frana attiva
 Peso unità di volume 1850Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2050Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 22°
 Coesione 0.025 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.25 kg/cm²

B - Deposito eluvio colluviale
 Peso unità di volume 1900Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2100Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 25°
 Coesione 0.065 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.65 kg/cm²

C - Substrato formazionale (FAA2ap)
 Peso unità di volume 2200Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2400Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 28°
 Coesione 0.45 kg/cm²
 Coesione non drenata 4.5 kg/cm²



A - Frana attiva
 Peso unità di volume 1850Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2050Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 22°
 Coesione 0.025 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.25 kg/cm²

B - Deposito eluvio colluviale
 Peso unità di volume 1900Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2100Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 25°
 Coesione 0.065 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.65 kg/cm²

C - Substrato formazionale (FAA2ap)
 Peso unità di volume 2200Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2400Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 28°
 Coesione 0.45 kg/cm²
 Coesione non drenata 4.5 kg/cm²

Analisi di stabilità**Montiano (Sezione 3) - Condizioni non drenate durante il sisma****217 superfici circolari verificate**

Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	3.0
Numero dei conci	30.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.3
Coefficiente parziale resistenza	1.0
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

Maglia dei Centri

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	48.32 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	79.06 m
Ascissa vertice destro superiore xs	178.51 m
Ordinata vertice destro superiore ys	169.24 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

Coefficienti sismici [N.T.C.]**Dati generali**

Tipo opera:	
Classe d'uso:	
Vita nominale:	0.0 [anni]
Vita di riferimento:	0.0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:
 Categoria topografica:

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera:

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Coefficiente azione sismica orizzontale 0.1
 Coefficiente azione sismica verticale 0.05

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	1.63	30.36
3	5.19	30.36
4	40.24	35.26
5	96.77	45.92
6	102.08	50.06
7	119.33	55.06
8	138.87	57.73
9	141.53	59.8
10	153.73	63.44
11	162.44	70.17
12	193.43	72.31
13	211.31	85.06
14	215.91	85.06
15	240.08	90.06
16	247.05	90.06
17	247.05	92.03
18	253.73	95.06

Falda

Nr.	X (m)	y (m)
1	-0.18	26.26
2	31.35	30.74
3	65.86	36.38
4	85.86	43.09
5	116.56	48.29
6	132.13	53.98
7	146.52	59.62
8	161.84	65.54
9	174.88	69.57

10	186.86	70.53
11	199.85	72.25
12	236.84	75.44
13	254.32	76.69

Vertici strato1

N	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	1.63	30.36
3	5.19	30.36
4	40.24	35.26
5	96.77	45.92
6	122.25	50.24
7	136.84	53.07
8	142.33	54.7
9	164.02	63.65
10	170.19	65.54
11	175.82	66.91
12	178.97	67.97
13	181.17	69.02
14	185.3	71.74
15	193.43	72.31
16	211.31	85.06
17	215.91	85.06
18	240.08	90.06
19	247.05	90.06
20	247.05	92.03
21	253.73	95.06

Vertici strato2

N	X (m)	y (m)
1	0.0	25.96
2	29.49	28.86
3	54.36	32.79
4	71.25	35.38
5	76.87	37.33
6	84.08	41.77
7	86.1	42.75
8	100.71	45.3
9	129.19	50.48
10	139.2	52.79

11	147.42	55.7
12	165.16	63.18
13	168.34	64.19
14	176.58	66.36
15	186.57	70.13
16	193.43	72.31
17	211.31	85.06
18	215.91	85.06
19	240.08	90.06
20	247.05	90.06
21	247.05	92.06
22	253.73	95.06

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm²)	Coesione non drenata (kg/cm²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m³)	Peso unità di volume saturo (Kg/m³)	Litologia	
1	0.025	0.25	22	1850	2050	A - Frana attiva	
2	0.065	0.65	25	1900	2100	B - Deposito eluvio colluviale	
3	0.45	4.5	28	2200	2400	C - Substrato formazionale (FAA2ap)	

Risultati analisi pendio

Fs minimo individuato	0.84
Ascissa centro superficie	139.45 m
Ordinata centro superficie	106.11 m
Raggio superficie	48.01 m

$xc = 139.454$ $yc = 106.114$ $Rc = 48.009$ $Fs=0.838$

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 3) - Condizioni non drenate durante il sisma
217 superfici circolari verificate

Lambda = 0.00

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	1.09	0.52	1.09	941.13
2	1.09	1.83	1.09	2783.97
3	1.09	3.13	1.09	3983.08
4	1.09	4.43	1.09	4549.57
5	1.09	5.73	1.09	5058.41
6	1.09	7.04	1.1	5511.26
7	1.09	8.35	1.1	5907.84
8	1.09	9.67	1.1	6247.4
9	1.09	10.99	1.11	6529.57
10	1.09	12.32	1.11	6753.35
11	1.09	13.65	1.12	6918.22
12	1.09	14.99	1.13	7022.84
13	1.31	16.48	1.37	8531.51
14	0.86	17.84	0.91	5945.53
15	1.09	19.07	1.15	8455.13
16	1.09	20.45	1.16	9459.63
17	1.09	21.84	1.17	10397.39
18	1.09	23.25	1.18	11266.1
19	1.09	24.67	1.2	12063.62
20	1.09	26.11	1.21	12788.0
21	1.31	27.72	1.49	16305.52
22	0.86	29.19	0.99	10600.14
23	1.09	30.54	1.26	12282.72
24	1.09	32.06	1.28	10973.67
25	1.09	33.61	1.31	9573.81
26	1.09	35.18	1.33	8078.77
27	1.09	36.79	1.36	6482.58
28	1.09	38.43	1.39	4779.24
29	1.09	40.11	1.42	2961.09
30	1.09	41.83	1.46	1019.84

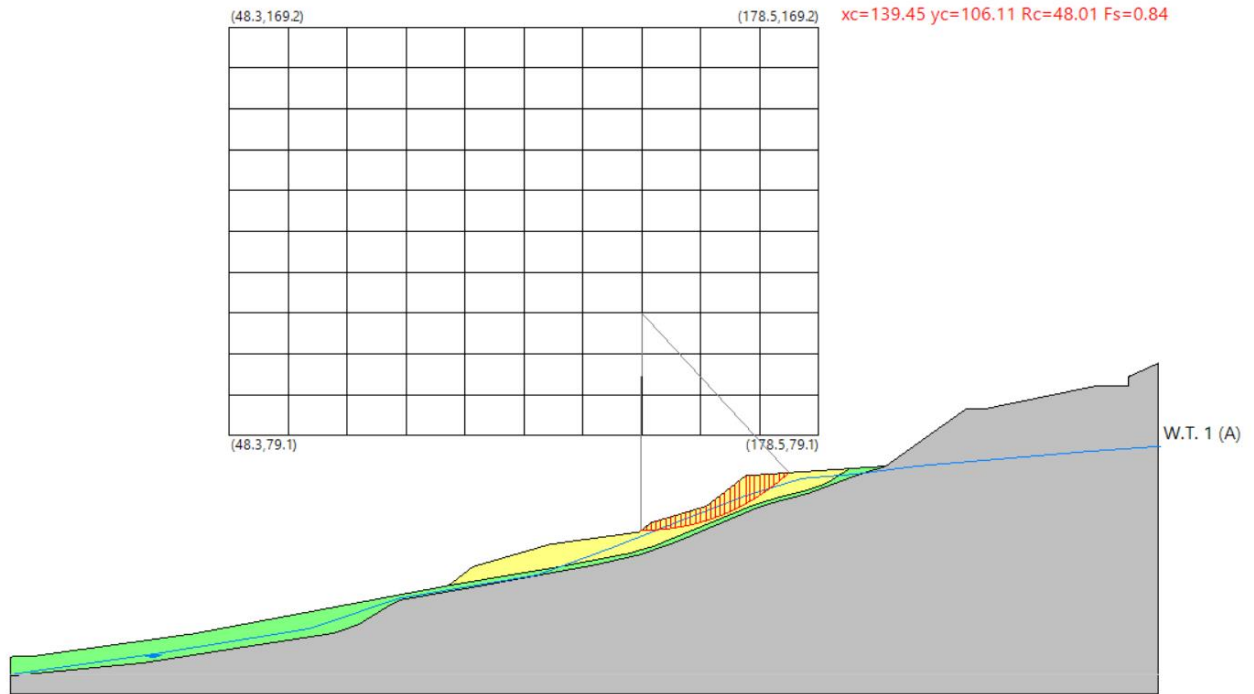
Sforzi sui conci

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	1203.82	3134.53	0.0	0.0	-187.76	3248.59	0.0
2	2296.52	5979.74	1203.82	3134.53	1911.41	3251.93	0.0
3	3286.27	8556.87	2296.52	5979.74	3306.65	3251.44	0.0
4	4197.37	10929.21	3286.27	8556.87	4002.49	3258.14	0.0
5	5026.45	13087.98	4197.37	10929.21	4624.98	3264.79	0.0
6	5771.5	15027.95	5026.45	13087.98	5174.02	3273.11	0.0

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 3) - Condizioni non drenate durante il sisma
217 superfici circolari verificate

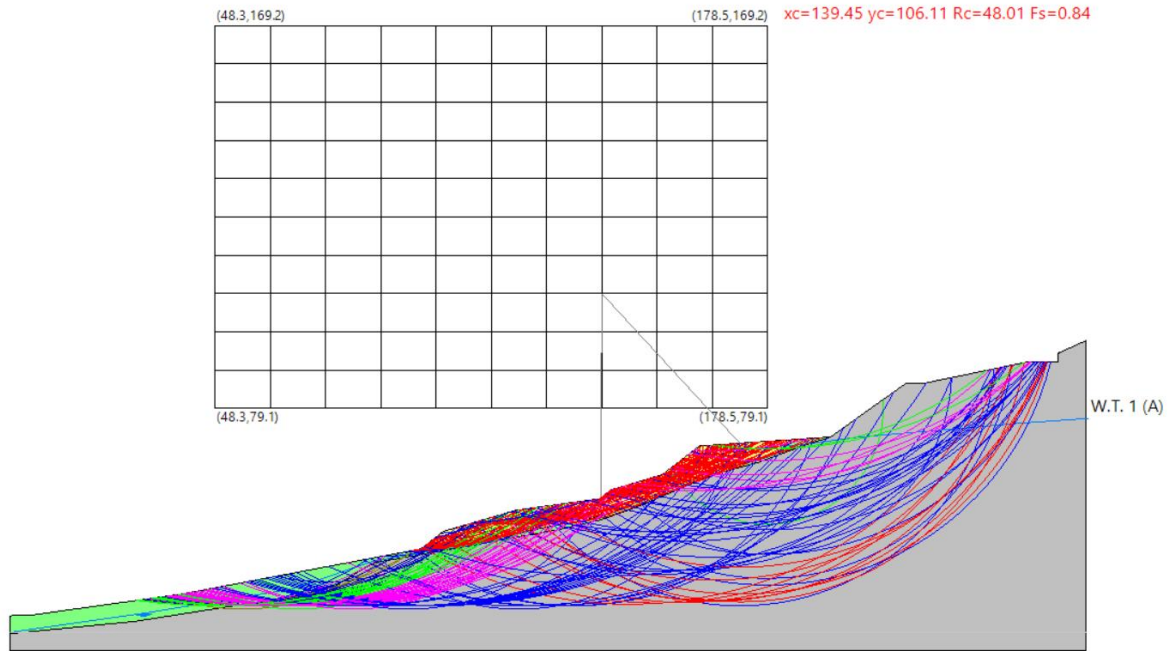
7	6432.03	16747.86	5771.5	15027.95	5647.93	3283.29	0.0
8	7008.93	18250.0	6432.03	16747.86	6045.24	3295.22	0.0
9	7504.48	19540.32	7008.93	18250.0	6365.35	3309.15	0.0
10	7922.51	20628.8	7504.48	19540.32	6607.53	3324.94	0.0
11	8268.24	21529.03	7922.51	20628.8	6772.18	3342.87	0.0
12	8548.41	22258.54	8268.24	21529.03	6859.43	3362.86	0.0
13	8558.52	22284.87	8548.41	22258.54	8345.76	4089.38	0.0
14	8893.94	23158.22	8558.52	22284.87	5708.78	2705.59	0.0
15	8799.75	22912.98	8893.94	23158.22	8123.36	3437.07	0.0
16	8480.83	22082.56	8799.75	22912.98	8984.98	3466.86	0.0
17	7933.19	20656.62	8480.83	22082.56	9724.4	3499.71	0.0
18	7154.97	18630.28	7933.19	20656.62	10339.32	3535.55	0.0
19	6145.93	16002.9	7154.97	18630.28	10827.28	3574.71	0.0
20	4907.7	12778.78	6145.93	16002.9	11187.33	3617.63	0.0
21	2836.52	7385.79	4907.7	12778.78	13722.55	4432.5	0.0
22	1882.71	4902.25	2836.52	7385.79	8820.41	2947.48	0.0
23	486.91	1267.84	1882.71	4902.25	9839.23	3771.59	0.0
24	-686.85	-1788.43	486.91	1267.84	8555.07	3833.02	0.0
25	-1590.92	-4142.48	-686.85	-1788.43	7292.42	3900.32	0.0
26	-2172.68	-5657.28	-1590.92	-4142.48	6070.49	3974.44	0.0
27	-2373.54	-6180.27	-2172.68	-5657.28	4910.82	4056.07	0.0
28	-2128.05	-5541.07	-2373.54	-6180.27	3839.13	4146.67	0.0
29	-1362.5	-3547.71	-2128.05	-5541.07	2885.89	4247.11	0.0
30	6.51	16.96	-1362.5	-3547.71	2086.92	4359.27	0.0



A - Frana attiva
 Peso unità di volume 1850Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2050Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 22°
 Coesione 0.025 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.25 kg/cm²

B - Deposito eluvio colluviale
 Peso unità di volume 1900Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2100Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 25°
 Coesione 0.065 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.65 kg/cm²

C - Substrato formazionale (FAA2ap)
 Peso unità di volume 2200Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2400Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 28°
 Coesione 0.45 kg/cm²
 Coesione non drenata 4.5 kg/cm²



A - Frana attiva
 Peso unità di volume 1850Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2050Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 22°
 Coesione 0.025 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.25 kg/cm²

B - Deposito eluvio colluviale
 Peso unità di volume 1900Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2100Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 25°
 Coesione 0.065 kg/cm²
 Coesione non drenata 0.65 kg/cm²

C - Substrato formazionale (FAA2ap)
 Peso unità di volume 2200Kg/m³
 Peso unità di volume saturo 2400Kg/m³
 Angolo di resistenza a taglio 28°
 Coesione 0.45 kg/cm²
 Coesione non drenata 4.5 kg/cm²

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 4) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

193 superfici circolari verificate

Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	3.0
Numero dei conci	30.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.3
Coefficiente parziale resistenza	1.0
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

Maglia dei Centri

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	115.28 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	96.29 m
Ascissa vertice destro superiore xs	245.47 m
Ordinata vertice destro superiore ys	186.47 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

Tipo opera:

Classe d'uso:

Vita nominale: 0.0 [anni]

Vita di riferimento: 0.0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:

Categoria topografica:

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera:

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	15.85	35.15
3	21.72	35.15
4	31.15	40.15
5	50.63	45.15
6	84.87	50.15
7	98.4	55.15
8	122.52	60.15
9	159.72	65.15
10	183.81	70.15
11	212.18	72.71
12	275.12	74.12

Falda

Nr.	X (m)	y (m)
1	0.0	30.14
2	15.85	35.14
3	21.72	35.14
4	31.15	40.14
5	50.63	45.14
6	84.87	50.14
7	98.4	55.14
8	122.52	60.14
9	159.72	65.14
10	183.81	70.14
11	212.18	72.7
12	275.12	74.11

Vertici strato1

N	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	15.85	35.15

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 4) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma

193 superfici circolari verificate

3	21.72	35.15
4	31.15	40.15
5	50.63	45.15
6	84.87	50.15
7	98.4	55.15
8	118.45	59.31
9	125.33	58.43
10	136.8	57.82
11	143.86	58.18
12	157.71	59.51
13	181.03	63.75
14	194.27	67.19
15	199.61	70.01
16	203.17	71.9
17	212.18	72.71
18	275.12	74.12

Vertici strato2

N	X (m)	y (m)
1	0.0	23.15
2	52.46	36.68
3	86.23	43.91
4	131.61	50.41
5	177.63	55.87
6	231.15	62.02
7	275.12	64.51

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm ²)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m ³)	Peso unità di volume saturato (Kg/m ³)	Litologia	
1	0	0.15	18	1850	2050	A - Frana attiva	
2	0.065	0.65	25	1900	2100	B - Deposito eluvio colluviale	
3	0.45	4.5	28	2200	2400	C - Substrato formazionale (FAA2ap)	

Risultati analisi pendio

Fs minimo individuato	1.02
Ascissa centro superficie	167.36 m
Ordinata centro superficie	105.31 m
Raggio superficie	42.7 m

$x_c = 167.358$ $y_c = 105.312$ $R_c = 42.699$ $F_s = 1.021$
 $\Lambda = 0.00$

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	1.26	-16.18	1.31	704.11
2	1.26	-14.43	1.3	2040.04
3	1.26	-12.68	1.29	3266.57
4	1.1	-11.06	1.12	3777.8
5	1.42	-9.34	1.44	6171.63
6	1.26	-7.52	1.27	6719.97
7	1.26	-5.81	1.27	7780.24
8	1.26	-4.11	1.27	8742.37
9	1.26	-2.41	1.26	9607.02
10	1.26	-0.72	1.26	10374.75
11	1.26	0.98	1.26	11045.78
12	1.26	2.67	1.26	11620.04
13	1.26	4.37	1.27	12097.37
14	1.26	6.07	1.27	12477.13
15	1.26	7.78	1.27	12758.58
16	1.26	9.49	1.28	12940.63
17	1.26	11.22	1.29	13021.72
18	1.26	12.95	1.3	13000.72
19	1.26	14.7	1.31	12872.1
20	1.26	16.45	1.32	12639.6
21	1.26	18.23	1.33	12297.51

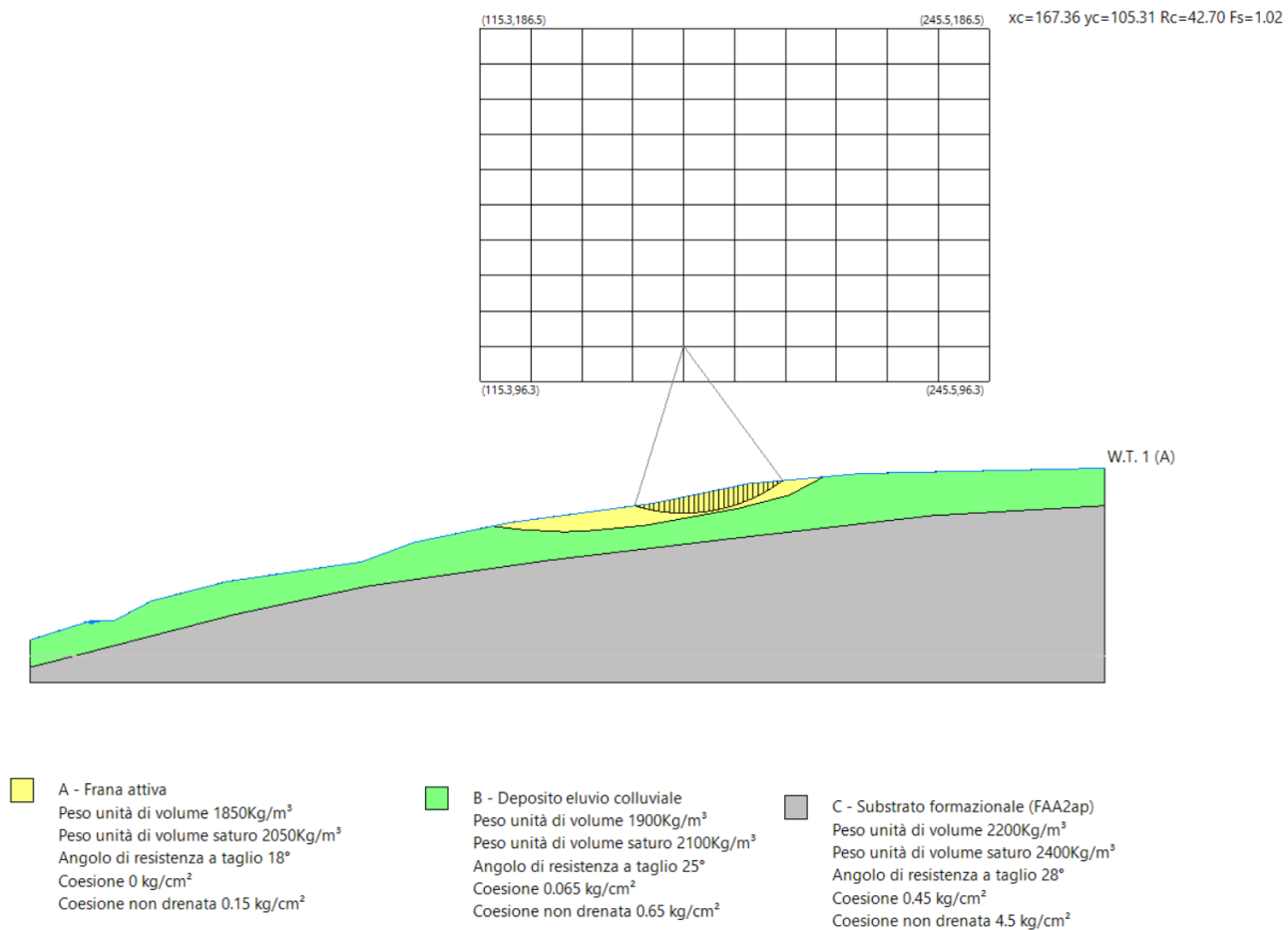
Analisi di stabilità

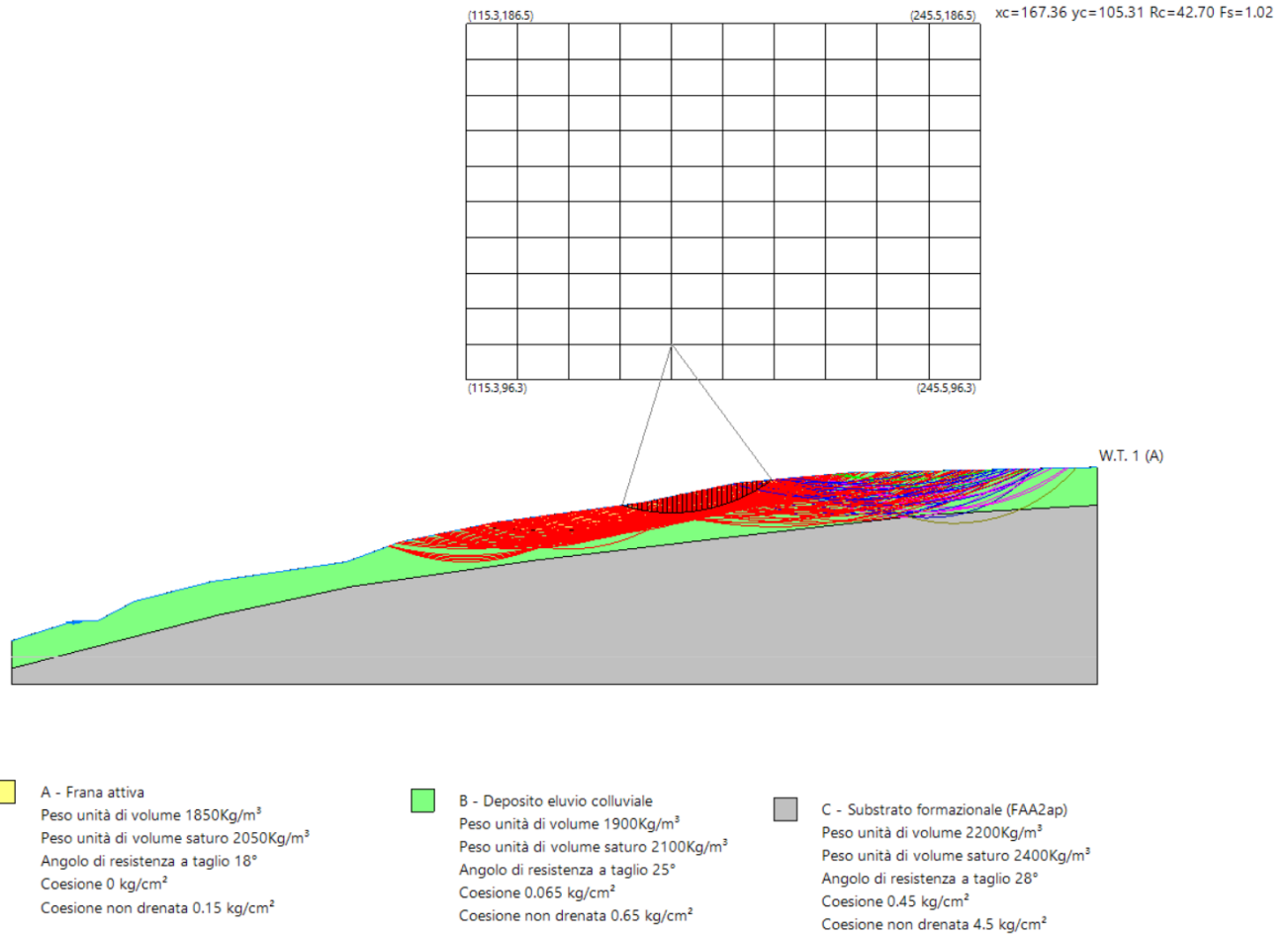
Montiano (Sezione 4) - Condizioni drenate nella situazione pre-sisma
 193 superfici circolari verificate

22	1.26	20.02	1.34	11842.67
23	1.2	21.79	1.3	10749.23
24	1.32	23.63	1.44	10893.23
25	1.26	25.54	1.4	9169.0
26	1.26	27.43	1.42	7833.82
27	1.26	29.36	1.45	6363.38
28	1.26	31.32	1.48	4743.78
29	1.26	33.33	1.51	2972.17
30	1.26	35.38	1.55	1034.51

Sforzi sui conci

Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	66.58	401.8	0.0	0.0	185.78	59.12	239.2
2	239.59	1445.94	66.58	401.8	589.71	187.66	735.0
3	490.65	2961.08	239.59	1445.94	1063.38	338.39	1194.45
4	738.23	4455.3	490.65	2961.08	1381.0	439.46	1597.57
5	1145.5	6913.17	738.23	4455.3	2336.06	743.37	2050.01
6	1517.69	9159.35	1145.5	6913.17	2756.63	877.21	2546.02
7	1898.15	11455.47	1517.69	9159.35	3360.52	1069.37	2969.36
8	2271.36	13707.81	1898.15	11455.47	3939.37	1253.57	3354.63
9	2623.99	15835.97	2271.36	13707.81	4480.99	1425.93	3699.58
10	2944.88	17772.56	2623.99	15835.97	4974.76	1583.05	4002.26
11	3224.74	19461.57	2944.88	17772.56	5411.91	1722.16	4261.04
12	3455.96	20856.95	3224.74	19461.57	5785.32	1840.99	4474.53
13	3632.51	21922.48	3455.96	20856.95	6089.1	1937.65	4641.73
14	3749.99	22631.49	3632.51	21922.48	6318.57	2010.67	4761.83
15	3805.29	22965.19	3749.99	22631.49	6470.41	2058.99	4834.38
16	3796.68	22913.25	3805.29	22965.19	6542.32	2081.88	4859.19
17	3723.89	22473.94	3796.68	22913.25	6533.06	2078.93	4836.46
18	3587.89	21653.16	3723.89	22473.94	6442.79	2050.2	4766.62
19	3391.67	20468.99	3587.89	21653.16	6284.28	1999.77	4639.26
20	3138.27	18939.72	3391.67	20468.99	6035.84	1920.71	4478.09
21	2832.83	17096.36	3138.27	18939.72	5712.97	1817.96	4273.23
22	2481.86	14978.21	2832.83	17096.36	5320.05	1692.93	4026.42
23	2100.38	12675.95	2481.86	14978.21	4620.67	1470.37	3752.63
24	1684.25	10164.58	2100.38	12675.95	4496.35	1430.81	3363.95
25	1278.74	7717.29	1684.25	10164.58	3555.35	1131.37	2878.67
26	893.75	5393.85	1278.74	7717.29	2846.27	905.73	2374.36
27	548.69	3311.41	893.75	5393.85	2128.64	677.37	1861.65
28	267.37	1613.62	548.69	3311.41	1447.86	460.73	1327.48
29	75.35	454.75	267.37	1613.62	804.89	256.13	795.47
30	2.89	17.44	75.35	454.75	241.95	76.99	262.99





Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 4) - Condizioni non drenate durante il sisma

193 superfici circolari verificate

Analisi di stabilità dei pendii con: MORGENSTERN-PRICE (1965)

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	3.0
Numero dei conci	30.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.3
Coefficiente parziale resistenza	1.0
Analisi	Condizione non drenata
Superficie di forma circolare	

Maglia dei Centri

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	115.28 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	96.29 m
Ascissa vertice destro superiore xs	245.47 m
Ordinata vertice destro superiore ys	186.47 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

Tipo opera:	
Classe d'uso:	
Vita nominale:	0.0 [anni]
Vita di riferimento:	0.0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:
Categoria topografica:

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera:

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

Coefficiente azione sismica orizzontale 0.1
 Coefficiente azione sismica verticale 0.05

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	15.85	35.15
3	21.72	35.15
4	31.15	40.15
5	50.63	45.15
6	84.87	50.15
7	98.4	55.15
8	122.52	60.15
9	159.72	65.15
10	183.81	70.15
11	212.18	72.71
12	275.12	74.12

Falda

Nr.	X (m)	y (m)
1	0.0	30.14
2	15.85	35.14
3	21.72	35.14
4	31.15	40.14
5	50.63	45.14
6	84.87	50.14
7	98.4	55.14
8	122.52	60.14
9	159.72	65.14
10	183.81	70.14
11	212.18	72.7
12	275.12	74.11

Vertici strato1

N	X (m)	y (m)
1	0.0	30.15
2	15.85	35.15
3	21.72	35.15
4	31.15	40.15
5	50.63	45.15
6	84.87	50.15
7	98.4	55.15
8	118.45	59.31
9	125.33	58.43
10	136.8	57.82
11	143.86	58.18
12	157.71	59.51
13	181.03	63.75
14	194.27	67.19
15	199.61	70.01
16	203.17	71.9
17	212.18	72.71
18	275.12	74.12

Vertici strato2

N	X (m)	y (m)
1	0.0	23.15
2	52.46	36.68
3	86.23	43.91
4	131.61	50.41
5	177.63	55.87
6	231.15	62.02
7	275.12	64.51

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 4) - Condizioni non drenate durante il sisma
193 superfici circolari verificate

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm ²)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m ³)	Peso unità di volume saturato (Kg/m ³)	Litologia	
1	0	0.15	18	1850	2050	A - Frana attiva	
2	0.065	0.65	25	1900	2100	B - Deposito eluvio colluviale	
3	0.45	4.5	28	2200	2400	C - Substrato formazionale (FAA2ap)	

Risultati analisi pendio

Fs minimo individuato	0.79
Ascissa centro superficie	147.83 m
Ordinata centro superficie	172.94 m
Raggio superficie	113.14 m

$x_c = 147.829$ $y_c = 172.943$ $R_c = 113.141$ $F_s = 0.793$
 $\Lambda = 0.00$

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)
1	2.25	-8.39	2.28	1490.75
2	2.25	-7.23	2.27	4312.33
3	2.25	-6.09	2.26	6922.04
4	2.25	-4.94	2.26	9321.45
5	2.25	-3.8	2.26	11511.88
6	2.25	-2.66	2.25	13494.07
7	2.25	-1.51	2.25	15269.0
8	2.25	-0.37	2.25	16836.68
9	2.25	0.77	2.25	18197.73
10	2.25	1.91	2.25	19352.11
11	2.25	3.05	2.25	20299.14
12	2.25	4.19	2.26	21038.6
13	2.5	5.4	2.51	23978.58
14	2.0	6.54	2.02	19783.79
15	2.25	7.63	2.27	23058.14
16	2.25	8.78	2.28	23716.74
17	2.25	9.94	2.29	24160.83
18	2.25	11.1	2.29	24388.71
19	2.25	12.26	2.3	24398.0
20	2.25	13.43	2.31	24185.3
21	2.25	14.6	2.33	23748.32

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 4) - Condizioni non drenate durante il sisma
 193 superfici circolari verificate

22	2.25	15.79	2.34	23082.72
23	2.25	16.97	2.35	22185.34
24	1.83	18.06	1.92	17168.6
25	2.68	19.26	2.84	22700.64
26	2.25	20.59	2.4	15996.93
27	2.25	21.81	2.42	12904.92
28	2.25	23.04	2.45	9554.3
29	2.25	24.29	2.47	5938.41
30	2.25	25.55	2.5	2049.52

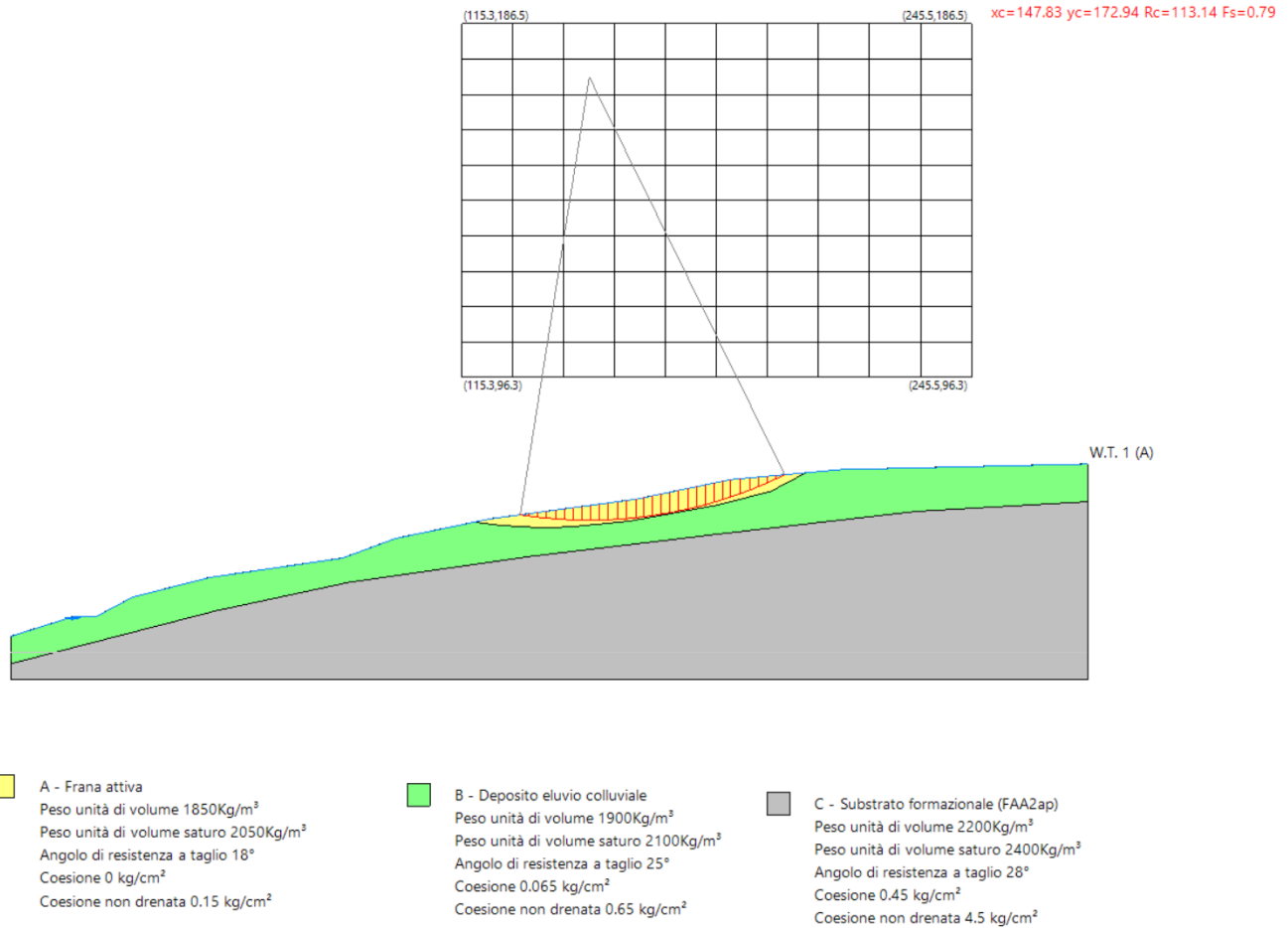
Sforzi sui conci

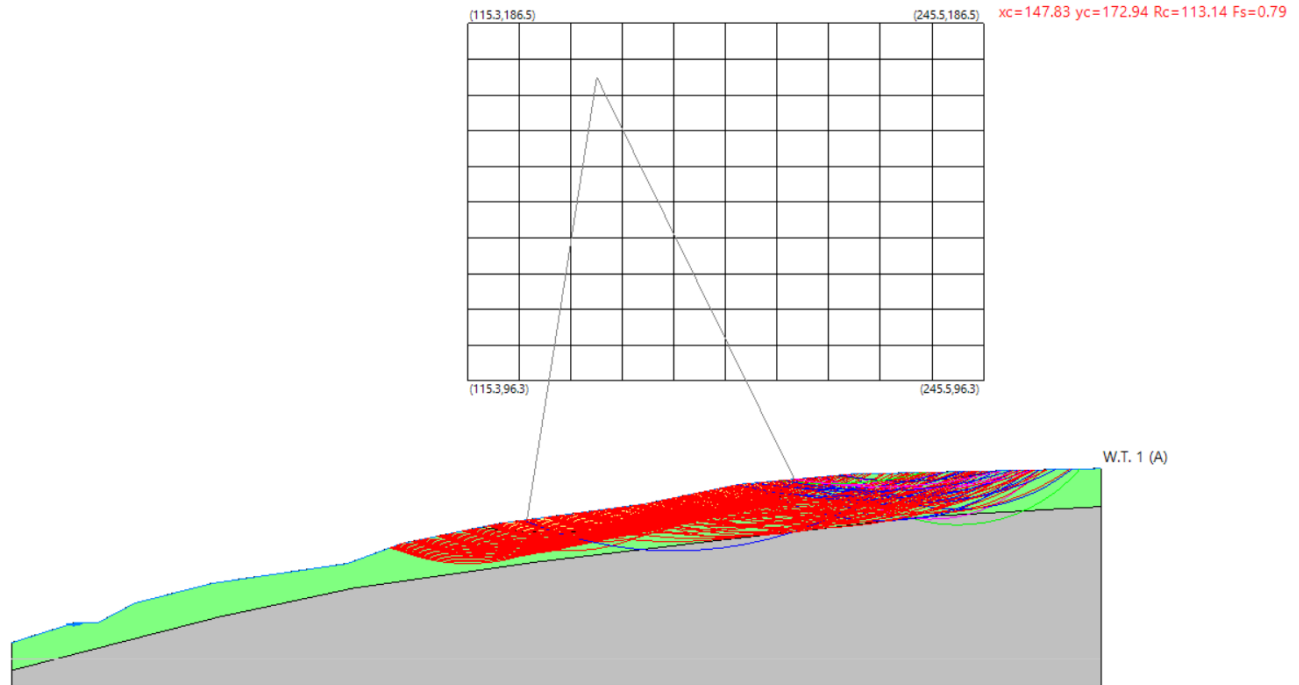
Nr.	Xi (Kg)	Ei (Kg)	Xi-1 (Kg)	Ei-1 (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)	Ui (Kg)
1	759.71	4542.51	0.0	0.0	156.25	4302.34	0.0
2	1523.26	9107.93	759.71	4542.51	3213.81	4290.52	0.0
3	2270.38	13575.21	1523.26	9107.93	6083.96	4280.47	0.0
4	2983.5	17839.11	2270.38	13575.21	8753.7	4272.22	0.0
5	3647.53	21809.5	2983.5	17839.11	11211.62	4265.74	0.0
6	4249.82	25410.76	3647.53	21809.5	13447.57	4260.92	0.0
7	4780.06	28581.24	4249.82	25410.76	15453.33	4257.86	0.0
8	5230.18	31272.57	4780.06	28581.24	17221.46	4256.43	0.0
9	5594.31	33449.8	5230.18	31272.57	18746.59	4256.72	0.0
10	5868.67	35090.32	5594.31	33449.8	20024.45	4258.72	0.0
11	6051.67	36184.48	5868.67	35090.32	21051.48	4262.37	0.0
12	6143.73	36734.92	6051.67	36184.48	21826.2	4267.74	0.0
13	6064.33	36260.19	6143.73	36734.92	24874.73	4747.65	0.0
14	6056.34	36212.39	6064.33	36260.19	20414.71	3810.93	0.0
15	5857.44	35023.12	6056.34	36212.39	23729.9	4294.35	0.0
16	5554.13	33209.54	5857.44	35023.12	24271.54	4306.85	0.0
17	5152.27	30806.73	5554.13	33209.54	24552.67	4321.15	0.0
18	4659.82	27862.25	5152.27	30806.73	24576.63	4337.42	0.0
19	4087.01	24437.29	4659.82	27862.25	24347.98	4355.71	0.0
20	3446.43	20607.06	4087.01	24437.29	23871.97	4376.0	0.0
21	2752.97	16460.73	3446.43	20607.06	23156.73	4398.49	0.0
22	2024.17	12103.05	2752.97	16460.73	22210.59	4423.16	0.0
23	1280.08	7653.94	2024.17	12103.05	21044.79	4450.22	0.0
24	822.5	4917.95	1280.08	7653.94	16194.05	3630.83	0.0
25	-97.59	-583.53	822.5	4917.95	20806.41	5360.77	0.0
26	-577.9	-3455.39	-97.59	-583.53	14601.21	4546.73	0.0
27	-856.16	-5119.18	-577.9	-3455.39	11740.87	4584.56	0.0
28	-886.81	-5302.48	-856.16	-5119.18	8813.95	4625.44	0.0
29	-620.05	-3707.46	-886.81	-5302.48	5852.05	4669.72	0.0
30	-1.33	-7.95	-620.05	-3707.46	2890.39	4717.59	0.0

Analisi di stabilità

Montiano (Sezione 4) - Condizioni non drenate durante il sisma

193 superfici circolari verificate





A - Frana attiva
Peso unità di volume 1850Kg/m³
Peso unità di volume saturo 2050Kg/m³
Angolo di resistenza a taglio 18°
Coesione 0 kg/cm²
Coesione non drenata 0.15 kg/cm²



B - Deposito eluvio colluviale
Peso unità di volume 1900Kg/m³
Peso unità di volume saturo 2100Kg/m³
Angolo di resistenza a taglio 25°
Coesione 0.065 kg/cm²
Coesione non drenata 0.65 kg/cm²



C - Substrato formazionale (FAA2ap)
Peso unità di volume 2200Kg/m³
Peso unità di volume saturo 2400Kg/m³
Angolo di resistenza a taglio 28°
Coesione 0.45 kg/cm²
Coesione non drenata 4.5 kg/cm²

Validazione del codice di calcolo

Informativa sull'affidabilità dei codici di calcolo D.M. 17-01-2018 paragrafo 10.2.

Sono stati forniti degli esempi di calcolo, in allegato a questo documento, al fine di verificare la validità delle procedure di calcolo ed effettuare le procedure di controllo con altri strumenti di calcolo.

I **software GeoStru** sono dotati di sistemi di controllo dei dati di input e di output molto sofisticati i quali sono in grado di rilevare errori gravi tali da non consentire le corrette elaborazioni.



SLOPE

INDICE

Validazione del codice di calcolo	1
1 - NORMATIVE DI RIFERIMENTO	3
2- DEFINIZIONE	3
3-INTRODUZIONE ALL'ANALISI DI STABILITA'	3
3.1 - Metodo equilibrio limite (LEM)	3
3.1.1 - Metodo dei conci	4
3.1.1 - Metodo di FELLENIUS (1927)	5
3.1.3 - Metodo di BISHOP (1955)	5
3.1.4 - Metodo di JANBU (1967)	5
3.1.5 - Metodo di BELL (1968)	6
3.1.6 - Metodo di SARMA	7
3.1.7 - Metodo di SPENCER	8
3.1.8 - Metodo di MORGENSTERN E PRICE	9
4-VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA	10
5-RICERCA DELLA SUPERFICIE DI SCORRIMENTO CRITICA	10
Esempio 11.5 – Colleselli-Soranzo [FILE: EX11.5 Colleselli-Soranzo]	11
Esempio 15.A.2 – Cestelli - Guidi [FILE: EX15.A.2 - Cestelli Guidi]	11
Conclusioni	11

1 - NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Norme tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)

Norme tecniche per le Costruzioni (NTC 2008)

Eurocodice 7

Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali. Eurocodice 8

Eurocodice 8

Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

2- DEFINIZIONE

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

3-INTRODUZIONE ALL'ANALISI DI STABILITA'

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale.

A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

- a) Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione (c) e angolo di resistenza al taglio (ϕ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.
- b) In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

3.1 - Metodo equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio (τ) e confrontate

con la resistenza disponibile (τ_f), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza $F = \tau_f / \tau$. Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Culman), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (*Fellenius, Bishop, Janbu ecc.*). Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei conci

3.1.1 - Metodo dei conci

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di conci. Se il numero dei conci è pari a n , il problema presenta le seguenti incognite:

- n valori delle forze normali
- N_i agenti sulla base di ciascun concio;
- n valori delle forze di taglio alla base del concio T_i
- $(n-1)$ forze normali E_i agenti sull'interfaccia dei conci;
- $(n-1)$ forze tangenziali X_i agenti sull'interfaccia dei conci;
- n valori della coordinata a che individua il punto di applicazione delle E_i ;
- $(n-1)$ valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle X_i ;
- una incognita costituita dal fattore di sicurezza F .

Complessivamente le incognite sono $(6n-2)$.

mentre le equazioni a disposizione sono:

- Equazioni di equilibrio dei momenti n
- Equazioni di equilibrio alla traslazione verticale n
- Equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale n
- Equazioni relative al criterio di rottura n
- Totale numero di equazioni $4n$

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a

$$i = (6n-2)-(4n) = 2n-2$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a $(n-2)$ in quando si fa l'assunzione che N_i sia applicato nel punto medio della striscia, ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite. I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le $(n-2)$ indeterminazioni.

3.1.1 - Metodo di FELLENIUS (1927)

Con questo metodo (*valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare*) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

- n valori delle forze normali N_i ;
 - n valori delle forze da taglio T_i ;
 - 1 fattore di sicurezza.
- Incognite ($2n+1$)

Le equazioni a disposizione sono:

- n equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;
- n equazioni relative al criterio di rottura;
- 1 equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\sum \{c_i \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot l_i) \cdot \tan \varphi_i\}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$

Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.

3.1.3 - Metodo di BISHOP (1955)

Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali.

Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_v = 0, \sum M_0 = 0, \text{ Criterio di rottura}$$

$$F = \frac{\sum \{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i + \Delta X_i) \cdot \tan \varphi_i\} \cdot \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$

I valori di F e di ΔX per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre $\Delta X = 0$ ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario**, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

3.1.4 - Metodo di JANBU (1967)

Janbu estese il metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi. Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio) a tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

$$F = \frac{\sum \{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i + \Delta X_i) \cdot \tan \varphi_i\} \cdot \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \cdot \tan \alpha_i}$$

Assumendo $\Delta X_i = 0$ si ottiene il metodo ordinario.

Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici.

Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.

3.1.5 - Metodo di BELL (1968)

Le forze agenti sul corpo che scivola includono il peso effettivo del terreno, W , le forze sismiche pseudostatiche orizzontali e verticali $K_x W$ e $K_z W$, le forze orizzontali e verticali X e Z applicate esternamente al profilo del pendio, infine, la risultante degli sforzi totali normali e di taglio s e t agenti sulla superficie potenziale di scivolamento.

Lo sforzo totale normale può includere un eccesso di pressione dei pori u che deve essere specificata con l'introduzione dei parametri di forza efficace.

In pratica questo metodo può essere considerato come un'estensione del metodo del cerchio di attrito per sezioni omogenee precedentemente descritto da *Taylor*.

In accordo con la legge della resistenza di *Mohr-Coulomb* in termini di tensione efficace, la forza di taglio agente sulla base dell' i -esimo concio è data da:

$$T_i = \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{F}$$

in cui:

F = il fattore di sicurezza;

c_i = l'angolo di attrito efficace (= 0 con la coesione totale) alla base dell' i -esimo concio;

L_i = la lunghezza della base dell' i -esimo concio;

u_{ci} = la pressione dei pori al centro della base dell' i -esimo concio.

L'equilibrio risulta uguagliando a zero la somma delle forze orizzontali, la somma delle forze verticali e la somma dei momenti rispetto all'origine.

Viene adottata la seguente assunzione sulla variazione della tensione normale agente sulla potenziale superficie di scorrimento:

$$\sigma_{ci} = \left[C_1 \cdot (1 - K_z) \frac{W_i \cdot \cos \alpha_i}{L_i} \right] + C_2 \cdot f(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$$

in cui il primo termine dell'equazione include l'espressione: $W_i \cos \alpha_i / L_i$ = valore dello sforzo normale totale associato con il metodo ordinario dei conci. Il secondo termine dell'equazione include la funzione:

$$f = \sin 2\pi \left(\frac{x_n - x_{ci}}{x_n - x_0} \right)$$

Dove x_0 ed x_n sono rispettivamente le ascisse del primo e dell'ultimo punto della superficie di scorrimento, mentre x_{ci} rappresenta l'ascissa del punto medio della base del concio i -esimo.

Una parte sensibile di riduzione del peso associata con una accelerazione verticale del terreno $K_z g$ può essere trasmessa direttamente alla base e ciò è incluso nel fattore $(1 - K_z)$. Lo sforzo normale totale alla base di un concio è dato da:

$$N_i = \sigma_{ci} \cdot L_i$$

La soluzione delle equazioni di equilibrio si ricava risolvendo un sistema lineare di tre equazioni ottenute moltiplicando le equazioni di equilibrio per il fattore di sicurezza F , sostituendo l'espressione di N_i e moltiplicando ciascun termine della coesione per un coefficiente arbitrario C_3 .

Si assume una relazione di linearità tra detto coefficiente, determinabile tramite la regola di Cramer, ed il fattore di sicurezza

$$F = F(2) + \left(\frac{1 - c_3(2)}{c_3(2) - c_3(1)} \right) (F(2) - F(1))$$

Il corretto valore di F può essere ottenuto dalla formula di interpolazione lineare:

dove i numeri in parentesi (1) e (2) indicano i valori iniziale e successivo dei parametri F e C_3 .

Qualsiasi coppia di valori del fattore di sicurezza nell'intorno di una stima fisicamente ragionevole può essere usata per iniziare una soluzione iterativa.

Il numero necessario di iterazioni dipende sia dalla stima iniziale sia dalla desiderata precisione della soluzione; normalmente, il processo converge rapidamente.

3.1.6 - Metodo di SARMA

Il metodo di **Sarma** è un semplice, ma accurato metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, che permette di determinare l'accelerazione sismica orizzontale richiesta affinché l'ammasso di terreno, delimitato dalla superficie di scivolamento e dal profilo topografico, raggiunga lo stato di equilibrio limite (accelerazione critica K_c) e, nello stesso tempo, consente di ricavare l'usuale fattore di sicurezza ottenuto come per gli altri metodi più comuni della geotecnica.

Si tratta di un metodo basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in n strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale N_i agisce nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio dei momenti.

Condizioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale:

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = W_i - \Delta X_i$$

$$T_i \cos \alpha_i + N_i \sin \alpha_i = W_i - \Delta E_i$$

Viene, inoltre, assunto che in assenza di forze esterne sulla superficie libera dell'ammasso si ha:

$$\Delta E_i = 0$$

$$\Delta X_i = 0$$

dove E_i e X_i rappresentano, rispettivamente, le forze orizzontale e verticale sulla faccia i -esima del concio generico i .

L'equazione di equilibrio dei momenti viene scritta scegliendo come punto di riferimento il baricentro dell'intero ammasso; sicché, dopo aver eseguito una serie di posizioni e trasformazioni trigonometriche ed algebriche, nel metodo di **Sarma** la soluzione del problema passa attraverso la risoluzione di due equazioni:

$$* \sum \Delta X_i \cdot \tan(\Psi'_i - \alpha_i) + \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i$$

$$** \sum \Delta X_i \cdot [(y_{mi} - y_G) \cdot \tan(\Psi'_i - \alpha') + (x'_i - x_G)] = \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_G) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_G)$$

Ma l'approccio risolutivo, in questo caso, è completamente capovolto: il problema infatti impone di trovare un valore di K (accelerazione sismica) corrispondente ad un determinato fattore di sicurezza; ed in particolare, trovare il valore dell'accelerazione K corrispondente al fattore di sicurezza $F = 1$, ossia *l'accelerazione critica*.

Si ha pertanto:

$$K = K_c \text{ accelerazione critica se } F = 1$$

$$F = F_s \text{ fattore di sicurezza in condizioni statiche se } K = 0$$

La seconda parte del problema del Metodo di **Sarma** è quella di trovare una distribuzione di forze interne X_i ed E_i tale da verificare l'equilibrio del concio e quello globale dell'intero ammasso, senza violazione del criterio di rottura.

E' stato trovato che una soluzione accettabile del problema si può ottenere assumendo la seguente distribuzione per le forze X_i :

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda \cdot (Q_{i+1} - Q_i)$$

dove Q_i è una funzione nota, in cui vengono presi in considerazione i parametri geotecnici medi sulla i -esima faccia del concio i , e λ rappresenta un'incognita.

La soluzione completa del problema si ottiene pertanto, dopo alcune iterazioni, con i valori di K_c , λ e F , che permettono di ottenere anche la distribuzione delle forze di interstriscia.

3.1.7 - Metodo di SPENCER

Il metodo è basato sull'assunzione:

- a) le forze d'interfaccia lungo le superfici di divisione dei singoli conci sono orientate parallelamente fra loro ed inclinate rispetto all'orizzontale di un angolo θ .

b) tutti i momenti sono nulli $M_i = 0 \quad i=1.....n$

Sostanzialmente il metodo soddisfa tutte le equazioni della statica ed equivale al metodo di Morgenstern e Price quando la funzione $f(x) = 1$.

Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro dell'arco descritto dalla superficie di scivolamento si ha:

$$1) \sum Q_i R \cdot \cos(\alpha - \theta) = 0$$

dove:

$$Q_i = \frac{\frac{c}{F} (W \cos \alpha - \gamma_w h \sec \alpha) \frac{\tan \alpha}{F} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[\frac{F + \tan \phi \tan(\alpha - \theta)}{F} \right]}$$

forza d'interazione fra i conci;

R = raggio dell'arco di cerchio;

θ = angolo d'inclinazione della forza Q_i rispetto all'orizzontale.

Imponendo l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali si ha rispettivamente:

$$\sum (Q_i R \cos \theta) = 0$$

$$\sum (Q_i R \sin \theta) = 0$$

Con l'assunzione delle forze Q_i parallele fra loro, si può anche scrivere:

$$2) \sum Q_i = 0$$

Il metodo propone di calcolare due coefficienti di sicurezza: il primo (F_{sm}) ottenibile dalla 1), legato all'equilibrio dei momenti; il secondo (F_{sf}) dalla 2) legato all'equilibrio delle forze.

In pratica si procede risolvendo la 1) e la 2) per un dato intervallo di valori dell'angolo θ , considerando come valore unico del coefficiente di sicurezza quello per cui si abbia $F_{sm} = F_{sf}$.

3.1.8 - Metodo di MORGENSTERN E PRICE

Si stabilisce una relazione tra le componenti delle forze di interfaccia del tipo $X = \lambda f(x)E$, dove λ è un fattore di scala e $f(x)$, funzione della posizione di E e di X, definisce una relazione tra la variazione della forza X e della forza E all'interno della massa scivolante.

La funzione $f(x)$ è scelta arbitrariamente (costante, senoide, semisenoide, trapezia, spezzata...) e influenza poco il risultato, ma va verificato che i valori ricavati per le incognite siano fisicamente accettabili.

La particolarità del metodo è che la massa viene suddivisa in strisce infinitesime alle quali vengono imposte le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale e di rottura sulla base delle strisce stesse.

Si perviene ad una prima equazione differenziale che lega le forze d'interfaccia incognite E, X, il coefficiente di sicurezza Fs, il peso della striscia infinitesima dW e la risultante delle pressioni neutra alla base dU.

Si ottiene la cosiddetta "equazione delle forze":

$$c' \sec^2 \frac{\alpha}{F} + \tan \varphi' \left(\frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \tan \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \frac{dU}{dx} \right) = \frac{dE}{dx} - \tan \alpha \left(\frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right)$$

Una seconda equazione, detta "equazione dei momenti", viene scritta imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione rispetto alla mezzzeria della base:

$$X = \frac{d(E_\gamma)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx}$$

Queste due equazioni vengono estese per integrazione a tutta la massa interessata dallo scivolamento.

Il metodo di calcolo soddisfa tutte le equazioni di equilibrio ed è applicabile a superfici di qualsiasi forma, ma implica necessariamente l'uso di un calcolatore.

4-VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

La stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudostatico.

Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x \cdot W$$

$$F_V = K_y \cdot W$$

Essendo:

- F_H e F_V rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;
- W : peso concio
- K_x : Coefficiente sismico orizzontale
- K_y : Coefficiente sismico verticale

I risultati, in termini di carico limite al netto del fattore di sicurezza, sono

5-RICERCA DELLA SUPERFICIE DI SCORRIMENTO CRITICA

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici. Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da m righe e n colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia

mxn e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

Esempio 11.5 – Colleselli-Soranzo [FILE: EX11.5 Colleselli-Soranzo]

Il caso si riferisce ad uno scavo in terreno costituito da argilla con una resistenza di taglio senza drenaggio $c_u=3\text{t/m}^2$, con angolo di attrito interno $\phi=0$ e con un peso di volume $\gamma=1.8\text{ t/m}^3$.

Si esamini il problema della verifica di stabilità con il metodo dei conci o svedese. Il risultato, presentato in termini di fattore di sicurezza, è il seguente:

$$FS_{\text{SLOPE}}=1.63$$

$$FS_{\text{TESTO}}=1.66$$

$$\frac{FS_{\text{SLOPE}} - FS_{\text{TESTO}}}{FS_{\text{TESTO}}} \% = -1.84\%$$

Esempio 15.A.2 – Cestelli - Guidi [FILE: EX15.A.2 - Cestelli Guidi]

Si verifica, con riferimento alle condizioni di rottura (equilibrio limite ultimo), la stabilità di una scarpata, a lungo termine od in condizioni drenate (condizioni più svantaggiose), in una argilla sovraconsolidata non fessurata microscopicamente avente $c' = 1\text{ bar}$, $\phi'=18^\circ$ e $\gamma=1.7\text{ t/m}^3$.

Il risultato, presentato in termini di fattore di sicurezza, è il seguente:

$$FS_{\text{SLOPE}}=1.77$$

$$FS_{\text{TESTO}}=1.82$$

$$\frac{FS_{\text{SLOPE}} - FS_{\text{TESTO}}}{FS_{\text{TESTO}}} \% = -2.47\%$$

Conclusioni

Si evidenzia dai test effettuati l'affidabilità del software in oggetto. Si riscontrano scarti minimi nella valutazione del fattore di sicurezza dovuti ad approssimazioni di tipo numerico.