

Buone pratiche per lo studio della potenziale interazione tra attività produttive in una piattaforma offshore e sorgenti sismogeniche e tsunamigeniche (quali faglie e frane) presenti nelle vicinanze, nonché degli impatti e delle perdite causate da una loro eventuale attività

Report integrato di fine progetto

Una collaborazione tra

Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE ex MISE) e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - INGV, Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR ISMAR, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna – DIFA, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica - EUCENTRE, Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale - ReLUIS, Società Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A., con il supporto tecnico del Dipartimento della Protezione Civile (DPC)



I contenuti di questo report sono tutelati dalla licenza Creative Commons 4.0 International (CC BY 4.0). Il permesso di utilizzare tali contenuti viene concesso con il pieno riconoscimento della fonte, utilizzando la seguente citazione raccomandata:

Antoncecchi I., Fagiani A., Vico G., Corneli D., Sterpa S., Di Bucci D., Rovere M., Argnani A., Armigliato A., Zaniboni F., Molinari I., Lipparini L., Sgattoni G., Faenza L., Bozzoni F., Borzi B., Faravelli M., Famà A., Pascale V., Quaroni D., Germagnoli F., Belliazzi S., Del Zoppo M., Di Ludovico M., Lignola G.P., Prota A., Colucci F., Vadacca L., Agate G. (2023) – *Buone Pratiche per lo studio della potenziale interazione tra attività produttive in una piattaforma offshore e sorgenti sismogeniche e tsunamigeniche (quali faglie e frane) presenti nelle vicinanze, nonché degli impatti e delle perdite causate da una loro eventuale attività.*

ISBN: 9788894366914

2

Progetto Hazard and Risk Analysis H&RA – Buone Pratiche e Report integrato di fine progetto
Ministero dell’Ambiente e Sicurezza Energetica - MASE
Direzione Sicurezza e Infrastrutture - DGIS
Via Sallustiana, 53 – 00187 Roma
Tel. (+39) 06 5722 5190
PEC: is@pec.mite.gov.it

dicembre 2023

Nome	Affiliazione	ORCID	e-mail
Antoncecchi Ilaria	1,8*	0000-0002-3164-0794	antoncecchi.ilaria@mase.gov.it
Fagiani Alessandra	1	-	fagiani.alessandra@mase.gov.it
Vico Giuseppe	1,5*	0000-0002-2040-0154	giuseppe.vico@ingv.it
Corneli Davide	1	-	corneli.davide@mase.gov.it
Sterpa Stefano	1	-	sterpa.stefano@mase.gov.it
Di Bucci Daniela	2	0000-0003-1290-4456	daniela.dibucci@protezionecivile.it
Rovere Marzia	3	0000-0002-1397-7086	marzia.rovere@bo.ismar.cnr.it
Argnani Andrea	3	0000-0003-0729-2782	andrea.argnani@ismar.cnr.it
Armigliato Alberto	4	0000-0002-8058-0361	alberto.armigliato@unibo.it
Zaniboni Filippo	4	0000-0003-2107-9865	filippo.zaniboni@unibo.it
Irene Molinari	5	0000-0002-8314-1444	irene.molinari@ingv.it
Lorenzo Lipparini	5	0000-0001-7456-0260	Lorenzo.lipparini@ingv.it
Giulia Sgattoni	5	0000-0002-9923-6827	giulia.sgattoni@ingv.it
Licia Faenza	5	0000-0002-6135-1141	licia.faenza@ingv.it
Bozzoni Francesca	6	0000-0002-3770-5157	francesca.bozzoni@eueucent.it
Borzi Barbara	6	0000-0001-6823-8793	barbara.borzi@eucentre.it
Faravelli Marta	6	0000-0001-8996-5404	marta.faravelli@eucentre.it
Famà Antonino	6	0009-0004-1487-0717	antonino.fama@eucentre.it
Pascale Venanzio	6	-	venanzio.pascale@eucentre.it
Quaroni Davide	6	0009-0005-7399-4223	davide.quaroni@eucentre.it
Germagnoli Fabio	6	-	fabio.germagnoli@eucentre.it
Belliazzi Stefano	7	0000-0002-0471-3601	stefano.belliazzi@unina.it
Del Zoppo Marta	7	0000-0002-3396-9825	marta.delzoppo@unina.it
Di Ludovico Marco	7	0000-0003-3697-3923	marco.diludovico@unina.it
Lignola Gian Piero	7	0000-0001-6027-9291	gianpiero.lignola@unina.it
Prota Andrea	7	0000-0003-3820-663X	andrea.prota@unina.it
Colucci Francesca	8	0000-0003-3751-4542	francesca.colucci@rse-web.it
Vadacca Luigi	8	0000-0001-6053-4125	luigi.vadacca@rse-web.it
Agate Giordano	8	0009-0007-3927-4104	giordano.agate@rse-web.it

1. Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica – MASE (ex Ministero dello Sviluppo Economico – MISE), DGIS
2. Presidenza del Consiglio dei ministri – Dipartimento della Protezione Civile
3. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Marine (CNR-ISMAR)
4. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna – Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi” (DIFA)
5. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)
6. Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (EUCENTRE)
7. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale (ReLUIS)
8. Ricerca sul Sistema Energetico S.p.A. (RSE)

* Affiliazione secondaria

Attività svolta nell'ambito degli accordi di ricerca finanziati dal Ministero dell’Ambiente e Sicurezza Energetica DGIS su fondi per la "sicurezza offshore" ai sensi dell'art.35 D.L. 83/2012

Sommario

Sommario	4
1. Introduzione	6
2. Caratterizzazione del contesto sismo-tettonico dell'area	7
2.1. Creazione Database Geologico e Geofisico	7
2.1.1. Definizione dell'area di studio (AOI)	7
2.1.2. Database geologico/geofisico	7
2.1.3. Progetto GIS	9
2.1.4. Progetto geologico/geofisico	9
2.1.5. Database geofisico/sismologico	9
2.2. Interpretazione geologico/geofisica e strutturale	10
2.2.1. Interpretazione dei dati di sismica a riflessione e dei dati di pozzo	11
2.2.2. Interpretazione e integrazione in senso geologico-strutturale dei dati sismologici	11
2.2.3. Interpretazione e integrazione dei dati sul campo di stress locale e regionale	12
2.3. Costruzione del modello crostale regionale (modelling 3D geologico e di velocità)	12
2.3.1. Step 1 – Analisi di dati di velocità	12
2.3.2. Step 2 – Costruzione del modello 3D	13
2.4. Caratterizzazione di dettaglio delle faglie nell'area AOI-Target	13
3. Modellazione dello scuotimento che tali faglie, muovendosi, sarebbero in grado di generare ..	14
3.1. Definizione delle sorgenti sismiche	15
3.2. Mappe di scuotimento con metodi empirici	17
3.3. Modellazione dello scuotimento con metodi ibridi broadband	18
3.3.1. Definizione della griglia di output	18
3.3.2. Simulazioni 3D (basse frequenze)	18
3.3.3. Simulazioni stocastiche (alte frequenze)	19
3.3.4. Creazione dei segnali broadband e stima dei parametri di scuotimento	20
4. Modellazione dei maremoti potenzialmente generati dall'attivazione delle faglie identificate .	20
4.1.1. Fase di generazione	20
4.1.2. Fase di propagazione	22
4.1.3. Interazione con la costa	23
5. Caratterizzazione di frane sottomarine o miste prossime all'area di studio	25
5.1. Raccolta dati minimi necessari	25
5.2. Caratterizzazione delle frane sottomarine	27
6. Modellazione dei maremoti potenzialmente generati dall'attivazione delle frane sottomarine identificate	32
6.1. Considerazioni generali sulle differenze tra maremoti generati da frana e da terremoto ...	32

6.2.	Dati minimi necessari, dettaglio necessario nella ricostruzione, tipi di software	33
6.2.1.	Errori da non fare, limiti del metodo, risultati attesi	34
7.	Caratterizzazione della vulnerabilità ed esposizione rispetto ai terremoti dei territori prospicienti un campo di produzione offshore.....	35
7.1.	Costruzione database delle strutture e infrastrutture esposte al rischio sismico	36
7.2.	Definizione delle curve di fragilità.....	39
7.3.	Sviluppo dei motori per il calcolo degli scenari di danno e delle relative perdite	40
8.	Modellazione dell’impatto e delle perdite connesse ai terremoti modellati sui territori prospicienti un campo di produzione offshore.....	40
8.1.	Calcolo degli scenari di danno e perdite	41
8.2.	Rappresentazione dei risultati su piattaforma webGIS	44
9.	Caratterizzazione della vulnerabilità ed esposizione rispetto ai maremoti dei territori prospicienti un campo di produzione offshore.....	44
9.1.	Costruzione del database delle strutture e infrastrutture esposte al rischio di maremoto ...	44
9.2.	Caratterizzazione della vulnerabilità	45
10.	Modellazione dell’impatto e delle perdite connesse ai maremoti modellati sui territori prospicienti un campo di produzione offshore.....	48
11.	Caratterizzazione degli effetti geomeccanici e dinamici delle attività svolte in un campo di produzione offshore sul volume crostale circostante	50
11.1.	Costruzione del modello geologico statico	52
11.2.	Costruzione del modello fluidodinamico.....	52
11.2.1.	Inizializzazione del modello.....	53
11.2.2.	Simulazione della storia produttiva del giacimento	53
11.3.	Costruzione del modello geomeccanico	54
12.	Considerazioni conclusive	58
13.	Riferimenti bibliografici	59

1. Introduzione

Questo documento mira a descrivere le azioni che meglio di altre potrebbero essere intraprese per valutare la sicurezza esterna di un impianto *offshore* rispetto all'eventualità che le attività svolte possano interagire con i pericoli naturali caratteristici dell'area su cui sorge l'impianto, in particolare terremoti, frane sottomarine e maremoti. Per questo motivo queste sono da considerarsi come buone pratiche e non come linee guida per l'eventuale coltivazione di giacimenti di idrocarburi in mare. In casi specifici possono infatti essere necessari approfondimenti per meglio caratterizzare ogni singolo aspetto relativo alle criticità geologiche e ambientali.

Le presenti buone pratiche scaturiscono dalla prosecuzione del progetto SPOT che, alla scala nazionale, aveva portato avanti l'obiettivo generale di implementare alcuni degli approfondimenti suggeriti dalla Commissione Grandi Rischi dopo il terremoto dell'Emilia del 2012. Dopo l'analisi effettuata nell'ambito del progetto SPOT (Antoncecchi *et al.*, 2020), nel successivo biennio di attività, con il progetto H&RA Lacinia ci si è concentrati su un caso di studio più circoscritto, identificato nell'*offshore* ionico della Calabria, prospiciente il territorio crotonese.

Il progetto H&RA Lacinia è stato regolato dagli accordi operativi firmati tra la DGISSEG (ora DGIS) del Ministero per la Transizione Ecologica (ora Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - MASE) e gli enti per le attività di ricerca e di supporto istituzionale per lo studio di approcci innovativi in relazione alla tematica della sicurezza, anche ambientale, relativa alla ricerca e alla coltivazione di idrocarburi in mare, che hanno redatto questi indirizzi per le buone pratiche.

Il progetto, nello specifico, si è svolto nell'ambito del network "Clypea - sicurezza offshore", e ha beneficiato del supporto tecnico scientifico del Dipartimento della Protezione Civile.

Per l'indagine sulle metodologie da adottare e per la definizione di un workflow da seguire per la modellazione e l'analisi del rischio è stato usato un caso di studio reale, per il quale è stato effettuato un approfondimento di dettaglio anche grazie all'utilizzo di dati messi a disposizione dall'operatore presente nell'area. È stata quindi condotta un'analisi delle strutture geologiche presenti nell'area di studio, volta a caratterizzare meglio le potenziali faglie sismogeniche e alcuni corpi sedimentari potenzialmente instabili dal punto di vista gravitativo, e quindi suscettibili di attivazione o riattivazione a seguito di terremoti generati dalle suddette faglie.

Da un lato, da questa analisi è scaturita una valutazione del potenziale impatto e delle conseguenti perdite causate da terremoti e tsunami generati dalle strutture riconosciute, sia tettoniche sia gravitative. Per quanto riguarda i terremoti, sono stati elaborati diversi scenari di impatto e di perdite, a partire dal danneggiamento sull'edilizia residenziale e sulle principali infrastrutture dovuto alla potenziale attivazione delle faglie sismogeniche. In merito agli tsunami, è stata approfondita la caratterizzazione della relativa vulnerabilità dell'edilizia residenziale e delle principali strutture (ospedali, edifici scolastici, ecc.), e infrastrutture anche a rete (ponti, viadotti ecc.) presenti nell'area di studio. È anche valutata la presenza di beni culturali potenzialmente vulnerabili. Su questa base, sono state sviluppate metodologie per elaborare scenari di impatto e di perdite da maremoto.

Dall'altro lato, mediante la realizzazione di un modello dinamico del sottosuolo e del giacimento, sono stati investigati i valori di stress determinati dalle attività di coltivazione, analizzando la modalità e intensità con la quale lo stress si propaga nel volume crostale studiato, e se questo possa potenzialmente giungere ad interagire con le faglie identificate.

Queste buone pratiche possono rappresentare una valida traccia guida sulle metodologie e il workflow da adottare nel caso si intenda approfondire la potenziale interazione tra attività produttive in una piattaforma offshore e sorgenti sismogeniche e tsunamigeniche (nel secondo caso sia faglie che frane) presenti nelle vicinanze, nonché gli impatti e le perdite causate da una loro eventuale attività. Resta inteso che, nel caso di applicazione a situazioni onshore, queste buone pratiche dovranno essere adattate sia alle pericolosità naturali presenti nell'area di interesse, sia alle infrastrutture e criticità presenti, spesso ben diverse dalla situazione offshore.

Il Progetto H&RA Lacinia rappresenta una collaborazione tra vari enti, ognuno con uno specifico ruolo. Questo ha permesso il conseguimento dell'obiettivo finale del lavoro, che è stato la definizione di una metodologia per lo studio della sismicità potenzialmente innescabile e degli eventuali suoi effetti a cascata, come gli tsunami, applicata ad una data area offshore in cui siano presenti una o più attività produttive. Gli enti di ricerca coinvolti e i loro ambiti di competenza sono stati: INGV (modello geologico strutturale e scenari di scuotimento sismico), ISMAR (definizione e modellazione di corpi di frana), RSE S.p.A. (modello 3D dinamico del giacimento), Università di Bologna (simulazioni di tsunami da frana e da terremoto), EUCENTRE (impatti da terremoto), ReLUIS (impatti da tsunami).

2. Caratterizzazione del contesto sismo-tettonico dell'area

Di seguito vengono descritti i passi considerati necessari per investigare e valutare la possibile interazione che potrebbe prodursi tra attività estrattive off-shore (presenti e/o future) ed elementi tettonici naturali presenti in prossimità del fondo mare o nel sottosuolo dell'area in esame (fagliazione superficiale, deformazioni, faglie ecc.).

2.1. Creazione Database Geologico e Geofisico

2.1.1. Definizione dell'area di studio (AOI)

Definizione di un'area di interesse a scala regionale (AOI - ad es. 100 km x 100 km) e, al contempo, di un'area di interesse a scala locale (AOI-target - ad es. 25 km x 25 km). È importante che l'AOI comprenda sia l'offshore che ospita le attività in essere o future, sia il limitrofo onshore, che rappresenta geologicamente un continuo e una fonte fondamentale di dati e calibrizioni, nonché l'area soggetta ai potenziali impatti.

2.1.2. Database geologico/geofisico

Raccolta e predisposizione di un adeguato database per la caratterizzazione geologico/geofisica. È necessario procedere a raccogliere dati di diversa tipologia, sia geologici che geofisici, che andranno poi fatti confluire sia su un progetto cartografico di supporto (in ambiente GIS, ad es. tramite l'utilizzo del software ArcGIS, QGIS, Global Mapper, ecc.) sia caricati in un unico progetto interpretativo (utilizzando un'adeguata piattaforma software, quale ad es. IHS-kingdom™, Petrel™ Schlumberger) che ne permetta successivamente un'interpretazione integrata. I dati considerati sono della seguente natura:

- Dati cartografici
- Dati batimetrici e carte tematiche del fondo mare
- DEM (Digital Elevation Models) delle aree onshore circostanti
- Dati geologici (carte e sezioni geologiche)
- Dati di pozzi profondi (*composite logs* dei pozzi disponibili nell'area di interesse)

- Dati di velocità (da pozzo, da sismica, da studi tomografici, da letteratura, ecc.)
- Profili di sismica a riflessione (sia in formato *raster* che, ove disponibili, in formato. *segy*)

Una parte importante del database potrà inoltre essere costituita e costruita beneficiando, ove possibile, dei dati nelle disponibilità degli operatori che in tempi precedenti hanno investigato ed esplorato l'area, previa firma di un accordo di confidenzialità. In Tabella 1 è riportata la sintesi dei dati da richiedere ai concessionari, da adattare al contesto specifico del progetto e all'area di interesse.

Tabella 1: tabella di sintesi dei dati da richiedere ai concessionari

Tipologia DATI	Formato	Obiettivo primario
REPORT Report geologici/geofisici sull'area; report di interpretazione e strutturali.	PDF	Acquisire conoscenze pregresse per rafforzare e velocizzare il lavoro
DATI TOPOGRAFICI		
Topografie di dettaglio (Digital Elevation Models – DEM/DTM)	Raster e/o Grids / vettoriali visualizzabili in ambiente GIS	Prima superficie utile per il lavoro di interpretazione; costruzione delle griglie di calcolo
Batimetrie di fondo mare (Dati idroacustici) e batimetrie di dettaglio, in particolare nelle zone costiere	ASCII, ESRI ArcGIS, NetCDF ecc. a dati grezzi	Prima superficie utile per il lavoro di interpretazione; costruzione delle griglie di calcolo
Report e dati di Well Site Survey	PDF	
DATI DI POZZO		
Posizione, quota della tavola rotary, TD del pozzo, per i pozzi deviati "profilo di deviazione"	Tabelle Excel o PDF	Dato fondamentale
Composite logs dei pozzi	PDF	Dato fondamentale
Dati di Velocità (Check shots, VSP, log sonici)	PDF o ASCII	conversione tempi/profondità
Logs	digitali in formato LAS e/o cartacei	Dato utile per i lavori di interpretazione, per ricavare le funzioni di velocità, ecc.
Well tops	tabella in formato Excel o ASCII	Dato utile per i lavori di interpretazione
Report di pozzo	PDF	
DATI SISMICI		
Sismica 2D (Time/Depth)	Segy con navigazione (se già disponibili anche caricati su un progetto interpretativo Petrel e/o IHS-Kingdom)	Fondamentale per l'interpretazione geologico/strutturale
Sismica 3D (Time/Depth)		
Dati di Velocità Sismiche 2D e 3D (stacking, average o interval velocities)	SEGY o ASCII	Conversione tempi/profondità
Sismica ad alta risoluzione (es. sparker) eventualmente acquisita per well site survey	SEGY o Raster	
DATI DI GIACIMENTO		

Modello statico di giacimento	progetto Petrel	
Report di sintesi del giacimento (in termini di interpretazione G&G, modello statico e modello dinamico)	PDF	
Dati di temperatura	Come tabelle Excel, ASCII o incluse in un progetto Petrel	
Mappe di isocrone/isobate/isopache dei principali livelli	in formato digitale o in formato .SHP, o alternativamente come immagini	
Sezioni geologiche	Immagini / PDF	
Parametri petrofisici delle formazioni (porosità, permeabilità, densità, comprimibilità, net to gross e loro variabilità/eterogeneità).	Tabelle o PDF	

2.1.3. Progetto GIS

Costruzione di un progetto cartografico di supporto in ambiente GIS, ad es. tramite l'utilizzo del software ArcGIS, QGIS, Global Mapper, ecc.

Dalle pubblicazioni, articoli scientifici e dai report disponibili sul sito ViDEPI del MASE, possono essere estratte le mappe e le sezioni di interesse (es. geologiche, sismiche, tomografiche, ecc.), in formato raster, con o senza interpretazione, che possono essere quindi georiferite in ambiente GIS (per poi essere successivamente importate nel progetto interpretativo integrato 3D).

2.1.4. Progetto geologico/geofisico

Costruzione di un progetto interpretativo, mediante l'uso di un'adeguata piattaforma software (quale ad es. KingdomTM, PetrelTM).

Obiettivo principale è quello della costruzione di un progetto interpretativo 2D/3D, realizzato utilizzando una piattaforma interpretativa software integrata (ad es. il software KingdomTM e/o PetrelTM), adatta a effettuare la manipolazione e interpretazione di dati sismici e di pozzo, nei domini sia dei tempi che delle profondità, sia 2D che 3D. Nel progetto andranno caricati tutti i dati citati nei paragrafi precedenti, inclusi dati sismici, di pozzo, cartografici, sismologici, di stress, ecc.

2.1.5. Database geofisico/sismologico

Raccolta e predisposizione di un adeguato database per la caratterizzazione geofisica/sismologica.

Parte fondamentale nell'interpretazione dei dati geologici e di sismica attiva sono le informazioni riguardanti i cataloghi dei terremoti (strumentali e storici), i dati GPS e/o le mappe di spostamento derivate da dati GPS e da analisi interferometriche satellitari e i dati sul campo di stress.

L'analisi della sismicità strumentale e storica e la valutazione dei tassi di sismicità è importante per la caratterizzazione delle strutture tettoniche. Una raccolta e analisi dei cataloghi dei terremoti sia storici che strumentali è dunque raccomandata. Per un catalogo dei terremoti storici si rimanda, ad esempio, al Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/) e per i cataloghi strumentali si cita il bollettino sismico italiano della Rete Sismica Nazionale (BSI, <http://terremoti.ingv.it/>), oppure il catalogo HORUS (HORUS - HOmogenized instRumental Seismic catalog, <http://horus.bo.ingv.it/>, Lolli *et al.*, 2020), che può essere considerato un catalogo omogeneo dei terremoti strumentali, con valori di magnitudo uniformi per tutta la durata del catalogo. Inoltre, è fondamentale raccogliere le Moment Tensor Solutions disponibili per

gli eventi nella regione di interesse, che permettono di individuare lo stile di fagliazione associato ai terremoti di tale area. A questo proposito, si raccomanda la consultazione del Regional Centroid Moment Tensor catalog (<http://rcmt2.bo.ingv.it>, per eventi con $M_w > 4,5$) e del Time Domain Moment Tensor (<http://terremoti.ingv.it/tdmt>, per eventi con $M_w > 3,5$).

È importante ricordare che la qualità della localizzazione di questi eventi, soprattutto per quanto riguarda la profondità e per eventi offshore, dipende dalla copertura azimutale delle stazioni registranti al momento dell'evento.

Risulta utile ma non indispensabile, dato un catalogo di terremoti, individuare le sequenze di eventi che possono aver interessato certe strutture eventualmente visibili sulla sismica attiva. Per individuarle si possono applicare algoritmi di clustering temporale (finalizzati all'identificazione di eventi sismici che si verificano in tempi brevi e utilizzabili per identificare sequenze sismiche e sciami) e/o di clustering spaziale (basati invece sulla distribuzione spaziale di epicentri e/o ipocentri, utili per identificare le regioni sismogenetiche, la loro forma, orientamento ed estensione), per confrontare le geometrie dei cluster con faglie potenzialmente attive, per visualizzare reti di faglie complesse, per ricostruire le rotture sismiche su più segmenti di faglia (es. software Seiscloud; Cesca, 2020).

Dati e mappe di tassi di spostamento verticali e orizzontali da analisi di dati GPS e InSAR presenti in letteratura sono importanti per valutare la cinematica dell'area in esame e sono un elemento utile a supporto dell'interpretazione tettonica.

Per i dati sul campo di stress è importante raccogliere tutte le informazioni esistenti da break-out di pozzo, meccanismi focali, inversioni, ecc. In particolare, si raccomanda di consultare il database IPSI ("Italian Present-day Stress Indicators" - <http://ipsi.rm.ingv.it/>), che è una raccolta aggiornata di questo tipo di dato e riporta gli indicatori di stress (in particolare lo stress orizzontale minimo) associando ad essi anche un valore di profondità. L'origine del dato e l'associazione del valore e direzione dello stress ad uno specifico range di profondità è fondamentale per avere un'idea realistica e non fuorviante del campo di stress locale e regionale, che può essere diverso a seconda della profondità crostale a cui fa riferimento.

2.2. Interpretazione geologico/geofisica e strutturale

Il lavoro ha l'obiettivo di identificare, mappare e parametrizzare le principali faglie esistenti a livello crostale nell'area di interesse, considerando sia la parte offshore che quella onshore.

Lo studio geologico-strutturale andrà basato sull'integrazione di tutti i dati raccolti, inclusi dati di letteratura, dati estratti dai database di pubblico dominio quali ViDEPI, e i dati resi disponibili dagli operatori e dovrà includere, ove possibile, tutti i profili sismici a riflessione 2D e 3D, i composite logs di pozzo e le informazioni ottenute da relazioni provenienti da permessi di ricerca e concessioni di coltivazione.

Più in dettaglio, l'attività ha lo scopo di fornire una stima dei parametri geometrici (lunghezza, direzione e profondità minima e massima rilevabile, piano 3D ove possibile), delle principali superfici di faglia esistenti (e individuabili sulla base della tipologia e qualità dei dati disponibili) e al contempo considerati più significativi e, ove possibile, di quelli cinematici (entità del rigetto, senso e rateo del movimento), al fine di fornire elementi utili a valutarne il loro potenziale sismogenico in caso di attivazione.

Potranno essere portate avanti in parallelo le attività descritte qui di seguito.

2.2.1. Interpretazione dei dati di sismica a riflessione e dei dati di pozzo

Tale fase interpretativa, utile a caratterizzare la struttura crostale superficiale, sino a circa 8/10 km di profondità, può inizialmente avvalersi di prodotti già disponibili, quali ad esempio le interpretazioni e mappe strutturali (in tempi e in profondità) derivanti da progetti di interpretazione di dati sismici e di pozzo presenti all'interno delle relazioni tecniche disponibili sull'area (recuperabili dal sito ViDEPI) o nella letteratura scientifica; esse rappresentano in genere delle interpretazioni robuste, che andranno tenute in debita considerazione nella fase di interpretazione di dettaglio delle strutture identificate.

Nella prima fase del lavoro, andranno interpretati i principali elementi strutturali riconoscibili a scala regionale, sulla base dei dati di sismica a riflessione raccolti. Per ognuno dei singoli elementi strutturali che verranno individuati, andranno definiti i seguenti elementi:

- geometria completa in tempi e, successivamente, in profondità;
- possibile cinematica, con le relative incertezze.

Andrà inoltre effettuato, ove possibile, il loro confronto con dati sismologici strumentali, meccanismi focali e sequenze sismiche.

Il lavoro ha anche l'obiettivo di provare a definire lo stato di attività dei vari elementi o set di elementi tettonici individuati nel tempo geologico, specialmente recente (ad esempio ricercando evidenze di movimenti e coinvolgimento delle sequenze sedimentarie più superficiali e del fondo del mare in deformazione).

Dalla fase di interpretazione sismica e dei dati di pozzo, oltre alla caratterizzazione e definizione dei principali piani di faglia che saranno individuati, sarà utile produrre una o più mappe di sintesi, intese sia come mappe strutturali dell'area, sia come mappe (in tempi e/o profondità) dei livelli stratigrafici considerati più significativi nel contesto degli obiettivi del lavoro.

Sarà fondamentale individuare eventuali evidenze di deformazione recente mostrate dal dato sismico a riflessione, in particolare al fondo mare, o evidenziato dalle sequenze più recenti e superficiali. Sarà utile integrare queste informazioni con eventuali deformazioni superficiali registrate nell'onshore mediante altri dati geofisici, quali dati GPS e di interferometria satellitare.

2.2.2. Interpretazione e integrazione in senso geologico-strutturale dei dati sismologici

I dati sismologici, quali eventi e sequenze sismiche, sono spesso legati a strutture crostali più profonde, tra 10 e 40 e più chilometri di profondità. Sulla base del lavoro di raccolta di eventi sismici dalle diverse banche dati (es. RCMT e TDMT), e di estrazioni di sequenze sismiche significative, potrà essere creata una tabella di sintesi, di raccolta e raffronto di tutti i dati strumentali di natura sismologica.

Nel portare avanti questo lavoro, anche in parte interpretativo, andrà posta particolare attenzione a considerare separatamente gli elementi strutturali profondi rispetto agli elementi che interessano le porzioni crostali più superficiali, in modo da evitare errate sovrapposizioni e ricercare invece correlazioni legate alla cinematica e alla dinamica degli stessi, nel contesto del campo di stress attuale. Potrà quindi essere prodotta una mappa di sintesi dei principali domini geodinamici messi in evidenza dai meccanismi focali profondi, ed effettuato un confronto con le indicazioni sul campo di stress che da essi derivano.

2.2.3. Interpretazione e integrazione dei dati sul campo di stress locale e regionale

Per tale interpretazione è importante distinguere i dati in base alla loro diversa origine, quali ad esempio: dati di break-out di pozzo, generalmente utili a caratterizzare le strutture geologiche crostali superficiali, e dati sismologici legati a meccanismi focali di diversa profondità.

A tal fine, potrà essere consultato il database IPSI ("Italian Present-day Stress Indicators" - <http://ipsi.rm.ingv.it>) che riporta gli indicatori di stress (l'asse di stress orizzontale minimo) e l'origine/qualità del dato stesso.

12

I dati e le informazioni relative all'area di studio potranno essere inclusi nel progetto interpretativo a supporto del lavoro di caratterizzazione, ove possibile cinematica, degli elementi strutturali individuati. Il valore aggiunto degli indicatori di stress presenti nella banca dati IPSI è di riportare in maniera dettagliata l'origine del dato, permettendo quindi di dedurre correttamente l'informazione che se ne ricava sia in senso geografico che di profondità. In particolare, la disponibilità di dati di break-out, ottenuti da dati di pozzi a profondità in genere tra 1000 e 5000 m, dovrebbe contribuire a caratterizzare il campo di stress locale di specifiche strutture più facilmente visibili sul dato sismico, permettendo quindi di irrobustire le ipotesi sul comportamento e sulla cinematica di tali strutture e degli elementi tettonici ad esse associati. D'altra parte, i dati di stress ricavati da meccanismi focali contribuiranno a caratterizzare i settori crostali più profondi.

2.3. Costruzione del modello crostale regionale (modelling 3D geologico e di velocità)

L'obiettivo è quello di costruire, in maniera semplificata rispetto alla complessità geologica specifica di un'area, un modello 3D regionale crostale che integri tutti i risultati del lavoro di interpretazione dei dati sismici, dei dati di pozzo e delle informazioni geologiche disponibili, di superficie e di sottosuolo, inclusi i principali orizzonti stratigrafici e i piani di faglia. Il modello costruito dovrà inoltre utilizzare e integrare le numerose informazioni derivanti dalla letteratura disponibile sull'area a livello di studi crostali, geologici, tettonici e sismologici.

Il modello finale dovrà includere tutti i principali layer geologici e le loro proprietà fondamentali (quali età, litologia, velocità delle onde P, S, ecc.).

Ai fini della costruzione di un modello geologico strutturale crostale 3D a scala dell'intera area di interesse, in profondità, sarà inoltre necessario costruire, in parallelo al modello geologico, un modello 3D di velocità (intervallari e/o medie), sia per permettere conversioni tempi/profondità, sia per supportare utilizzi nel campo della localizzazione e interpretazione di eventi sismici.

Qui di seguito vengono indicati i principali step dell'approccio che potrà essere seguito.

2.3.1. Step 1 – Analisi di dati di velocità

- Analisi delle velocità di pozzo, necessaria a costruire un dataset di valori di velocità (intervallari e/o medie), da considerare alla base per una conversione tempi/profondità del modello di crosta superficiale
- Interpretazione sismica
- Studio delle variazioni laterali e verticali in termini di velocità intervallari e medie degli intervalli geologici investigati dai pozzi profondi e visibili sul dato di sismica a riflessione.

A questo scopo andranno innanzitutto raccolte tutte le informazioni di velocità derivanti dalle banche dati pubbliche (p.es. ViDEPI), da dati di pozzo, da letteratura ed eventualmente fornite dagli operatori/concessionari. In particolare, andranno raccolti, ove disponibili, dati diretti di velocità da

pozzo (VSP/Check shots), dati di log di velocità di pozzo (log sonico – DT) e dati di velocità sismica (ad es. migration velocities).

Si potrà inoltre procedere ad una correlazione delle stratigrafie dei pozzi disponibili nell'area con le principali mappe strutturali disponibili sull'area da precedenti o nuove interpretazioni. Sulla base dei tempi doppi derivanti dalla sismica a riflessione (Two-Way-Time in ms) e delle profondità corrispondenti riconosciute sui *composite logs* dei pozzi, sarà quindi possibile calcolare le velocità medie degli intervalli posti al di sopra di tali orizzonti. Come risultato di questa fase di lavoro, si dovrebbe arrivare a definire e caratterizzare le principali sequenze in termini di geometrie, spessori, velocità intervallari e medie e loro variazioni laterali nell'intera area di studio.

2.3.2. Step 2 – Costruzione del modello 3D

In questo step, le informazioni raccolte al punto precedente andranno implementate all'interno del software di modelling (es. Petrel™ Schlumberger): in pratica andranno costruiti superfici, poligoni e punti necessari a creare tutte le superfici considerate geologicamente più significative e necessarie ai fini del progetto, e le associate caratteristiche di velocità. Tale step dovrà tener conto, nella parte onshore, della geologia di superficie espressa dalle carte geologiche e dalla reale topografia rappresentata dal DEM disponibile e, ove necessario, potranno essere effettuati dei rilevamenti ad hoc.

Sulla base dei dati raccolti e così elaborati, sarà quindi possibile costruire un modello geocellulare 3D usando gli appositi moduli del software scelto. Al contempo, il modello 3D geocellulare e ogni principale layer del modello potranno essere popolati con le proprietà geologiche e di velocità che si riterranno utili ai fini del lavoro.

Come risultato di questo lavoro di modelling, in conclusione, andranno costruiti insieme un modello geologico regionale 3D a scala crostale e un modello 3D di velocità (intervallari e medie), su un volume di dimensioni dell'ordine di 100 km x 100 km x 60 km di profondità (da adattare alla geologia crostale dell'area di studio). Il modello 3D di velocità sarà di fondamentale importanza per sostenere il calcolo degli scenari di scuotimento 3D discusso ai punti successivi del lavoro.

2.4. Caratterizzazione di dettaglio delle faglie nell'area AOI-Target

Si tratta di un lavoro del tutto analogo a quanto descritto nel precedente capitolo “2.2. Interpretazione geologico/geofisica e strutturale”, ma ad una scala di dettaglio maggiore, sia verticale che orizzontale, sull'area denominata AOI-Target.

I seguenti criteri di scelta possono essere adottati per individuare le strutture importanti per lo studio:

1. disponibilità di sufficienti dati di input (sismica 2D/3D)
2. sufficienti dimensioni ed estensione, importanza e rappresentatività geologica delle tipologie principali di elementi tettonici (thrust, faglie estensionali, ecc.)
3. distanza dalle aree di interesse
4. associazione con evidenze di deformazione recente a fondo mare
5. possibile incidenza su scenari di instabilità gravitativa.

In questa fase, andrà anche presa in considerazione l'ipotesi di pianificare ed eventualmente procedere all'acquisizione di nuovi dati geofisici e sismologici. In particolare:

- l'acquisizione offshore di dati sismici e batimetrici ad alta risoluzione su eventuali evidenze di deformazioni attive e fagliazione superficiale (ad es. dati multibeam, SideScanSonar, sismica Chirp e Sparker, ecc.);
- la possibilità di installare nuove stazioni sismiche temporanee sia onshore che offshore per un'attività di monitoraggio degli eventi sismici vicini al campo, se non già presente.

Tale attività andrà svolta in accordo con le altre parti impegnate e/o interessate al progetto specifico, in modo da ricercare sinergie.

3. Modellazione dello scuotimento che tali faglie, muovendosi, sarebbero in grado di generare

Il calcolo dello scuotimento in superficie causato dall'ipotetico scorrimento sismico di tutto il piano di faglia delle strutture individuate (siano esse interpretate come attive o come potenzialmente attivabili) fornisce le accelerazioni/velocità di picco attese su una griglia di punti all'interno dell'area di studio. Queste sono fondamentali per stimare l'entità del danno al costruito o l'impatto sulle persone, per valutare l'attivazione o meno di frane, ecc. Si tratta di scenari di scuotimento ipotetici, definiti sotto un serie di semplificazioni e assunzioni che è bene considerare. È importante inoltre specificare che, al momento, lo stato dell'arte sulle sorgenti sismogeniche in Italia, ancor più nell'offshore, non è sufficiente a consentire una valutazione predittiva sulle possibilità di innesco delle stesse o di porzioni delle stesse da parte di attività naturale ed antropica. Tanto più questo è vero per faglie di cui non si conosce lo stato di attività.

Per il calcolo degli scenari di scuotimento si possono utilizzare diverse metodologie tra cui: *i*) metodi empirici con l'utilizzo di GMPE adatte al sito e, *ii*) metodi numerici ibridi broadband (p.es. van Ede *et al.*, 2020) per simulazioni di scuotimento in modelli tridimensionali di crosta e con modelli di faglia finita. Si raccomanda di adottare almeno una delle due metodologie per stimare lo scuotimento massimo nei punti della griglia di interesse.

Entrambi i metodi forniscono mappe di accelerazione/velocità/spostamento di picco campionate su una griglia lat/lon. La differenza principale tra le metodologie è che il metodo broadband ibrido fornisce il sismogramma completo predetto dalla sorgente testata in ogni punto della griglia e contiene intrinsecamente gli effetti di sito al suo interno. Il limite principale di questo metodo è il tempo di calcolo, che dipende fortemente dalla grandezza della griglia per la simulazione della parte a bassa frequenza. Il metodo numerico ibrido prevede la simulazione della componente a bassa frequenza del segnale con approccio deterministico tramite simulazione della propagazione delle onde sismiche all'interno di un modello crostale 3D e la parte ad alta frequenza con metodo semi-stocastico in un modello di velocità 1D. Le due componenti del segnale vengono poi combinate per ottenere la forma d'onda broadband.

La modellazione di scenari di scuotimento prevede diversi step che vengono elencati nei paragrafi successivi.

3.1. Definizione delle sorgenti sismiche

Le strutture individuate durante la fase di interpretazione dei dati raccolti nel progetto interpretativo devono essere esportate e finalizzate per una corretta implementazione dei codici per la simulazione dello scuotimento sismico. Inoltre, sarà necessario definire una procedura che permetta di esportare nel formato più consono e di semplificare le superfici di faglia 3D complesse in piani di faglia o in meccanismi focali puntiformi.

Si considerano 5 possibili livelli di semplificazione della struttura individuata.

1. Superficie di faglia georiferita in 3D che deriva direttamente dall'interpretazione (Figura 1-1)
2. Superficie lisciata ed interpolata come nuvola di punti, vertici di nodi (superfici in vari formati come per esempio *stl*, *grid*, e altri) o *contour lines* (Figura 1-2)
3. Patches (*mesh*), per ciascuna delle quali fornire il valore di *strike*, *dip* e *rake* (Figura 1-3)
4. Piano che meglio interpola la superficie 3D. Di questo piano sono necessarie le coordinate dei 4 vertici e del baricentro, le dimensioni (lungo *strike* e *dip*), l'angolo di *strike*, quello di *dip* e di *rake* (Figura 1-4)
5. Meccanismo focale che meglio approssima la superficie di faglia individuata al punto 4 (Figura 1-5)

È importante notare che per le simulazioni con metodi empirici (p.es. ShakeMap) si possono utilizzare sorgenti puntiformi oppure faglie finite planari, mentre con metodi numerici 3D è possibile implementare, oltre a queste, anche faglie in 3D.

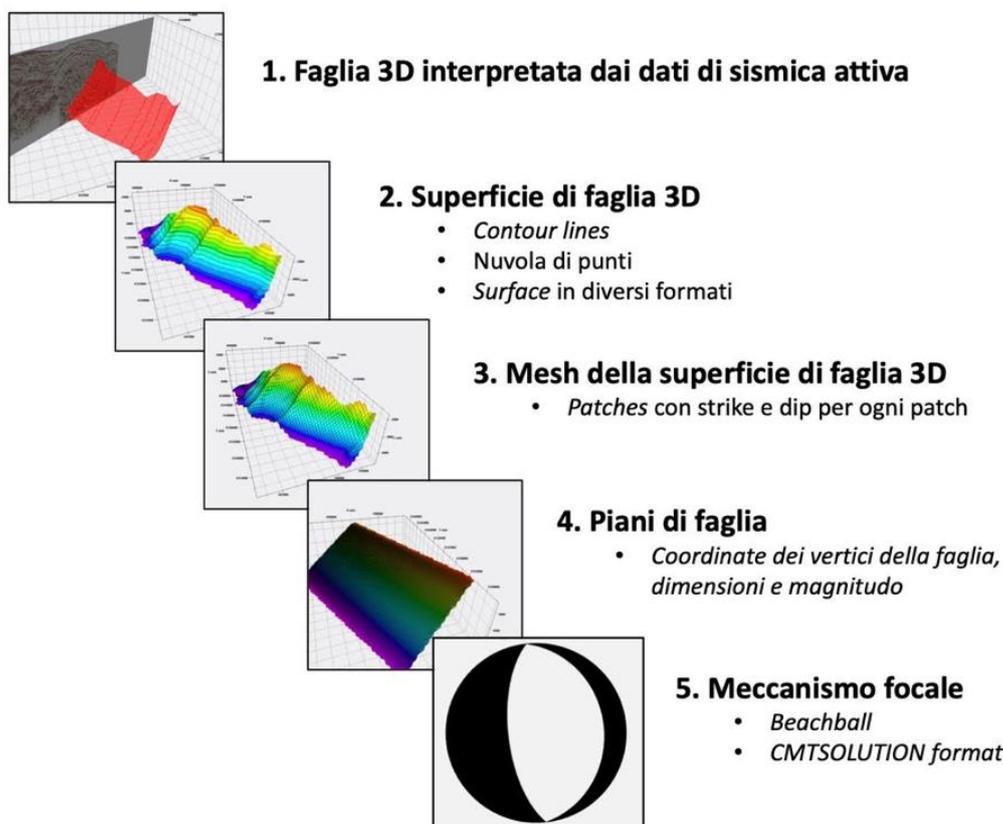


Figura 1 – Schema esemplificativo dei livelli di dettaglio delle faglie individuate: da strutture descritte mediante superfici 3D fino a sorgenti puntiformi (CMT).

In Tabella 2 vengono riportati i parametri dei piani di faglia indispensabili; in particolare, Xcenter, Ycenter, Zcenter sono le coordinate nel sistema di riferimento scelto (geografico o UTM) del centroide della faglia, strike è l'angolo formato dal top della faglia con il Nord, dip è l'angolo di immersione della faglia, length è la lunghezza lungo strike e width è la lunghezza del piano di faglia lungo dip. Inoltre, è bene specificare la distanza minima di ogni piano di faglia dall'area target dello studio. La stima della magnitudo per gli scenari si può effettuare applicando leggi di scala pubblicate in letteratura, come ad esempio la legge di scala per l'area di rottura di Wells e Coppersmith (1994) ($M_w = 0.98 \cdot \log_{10}(A) + 4.07$), assumendo uno slip che coinvolga l'intera superficie di faglia. Un approccio analogo per la stima della magnitudo massima viene utilizzato dalla banca dati DISS (Database of Individual Seismogenic Sources, <https://diss.ingv.it/>).

Tabella 2 – Sintesi dei parametri dei piani di faglia selezionati e semplificati (coordinate nel sistema di riferimento scelto, geografico o UTM).

Fault name	x center	y center	z center	strike (°)	dip (°)	length (km)	width (km)	Minimum distance from gas field (km)	Mw MAX
------------	----------	----------	----------	------------	---------	-------------	------------	--------------------------------------	--------

La definizione della sorgente sismica per ogni scenario di scuotimento è un problema non semplice, che influenza il risultato della simulazione e quindi lo scenario stesso. Non avendo a disposizione dati ulteriori per vincolare il problema, è importante considerare diverse rappresentazioni della sorgente (puntiforme e faglia finita, ad esempio) e varie distribuzioni di slip. Per questo, per una stessa faglia è necessario simulare molteplici scenari; ciò aumenta tuttavia il carico computazionale, soprattutto per quanto riguarda i metodi ibridi. Per i metodi empirici solitamente la sorgente è puntiforme o rappresentata da una faglia finita, mentre nei metodi ibridi la sorgente può anche essere rappresentata da una faglia finita a cui si associa una distribuzione di slip e una storia di rottura. Un esempio semplificato può essere una rottura bilaterale, che si origina al centro e si propaga radialmente verso l'esterno della faglia, con slip egualmente distribuito sul piano di faglia. Il modello di rottura rappresenta una notevole semplificazione della realtà e la complessità della distribuzione di slip influenza fortemente il moto sismico in prossimità della sorgente. Per considerare la variabilità dei possibili modelli cinematici della sorgente, sarebbe importante simulare scenari di rottura diversi, con slip distribuito in maniera casuale sulla faglia e meccanismi di propagazione della rottura diversi. Nella parte ad alta frequenza del metodo ibrido, la variabilità stocastica del meccanismo di rottura può essere tenuta parzialmente in considerazione, assumendo per ogni scenario almeno 5 distribuzioni casuali di slip sul piano di faglia. Il risultato poi sarà la media (o la mediana) delle 5 mappe di scuotimento ottenute.

I dati relativi a geometria e attributi delle faglie potenzialmente sismogeniche individuate (organizzati sulla falsariga del Database of Individual Seismogenic Sources-DISS; DISS Working Group, 2021) e i dati relativi agli scenari di rottura cosismica devono essere prodotti in formati elettronici geo-riferiti, in modo da poter essere utilizzati su piattaforme GIS.

Per il calcolo delle mappe di scuotimento, al fine di considerare anche gli effetti di sito, è necessario avere a disposizione informazioni che descrivono la caratterizzazione sismica dei primi metri di profondità del terreno e che siano distribuite su una griglia di punti o su poligoni che coprano l'intera area di studio. Generalmente gli approcci di calcolo più comuni fanno riferimento al parametro Vs30, ovvero la velocità media dei primi 30 m di profondità, e/o alle categorie di terreno definite

nell'Eurocodice 8. Per definire tali parametri è necessario fare riferimento, ove disponibili, a dati geofisici e geologici a disposizione per l'area di studio. È possibile, inoltre, fare uso di modelli esistenti a scala italiana (es. Forte *et al.*, 2019; Michelini *et al.*, 2020; Mori *et al.*, 2020). Questi non coprono le zone offshore (Forte *et al.*, 2019; Mori *et al.*, 2020) o assumono per queste un valore costante (Michelini *et al.*, 2020). Pertanto, quando l'area di interesse include zone offshore, è necessario stimare tali valori sulla base di informazioni litologiche e geomorfologiche, sulla base di dati di pozzo, indagini geofisiche, batimetria. A tale scopo è possibile fare riferimento ad approcci usati per le aree onshore, per esempio basati su relazioni empiriche che permettono la stima del Vs30 in base a categorie geomorfologiche, del gradiente di pendenza e dell'elevazione di un sito (Iwahashi *et al.*, 2018; Mori *et al.*, 2020), oppure stimando valori di Vs30 sulla base di categorie litologiche secondo l'approccio di Forte *et al.* (2019).

3.2. Mappe di scuotimento con metodi empirici

Lo scuotimento sismico è quantificato tipicamente mediante valori di accelerazione, velocità e spostamento di picco (PGA, PGV e PGD, rispettivamente), e mediante le ordinate dello spettro di risposta elastico (al 5% di smorzamento) in accelerazione (accelerazione spettrale, SA) a diversi periodi. Tali valori possono essere stimati in maniera semplificata mediante l'uso di equazioni predittive del moto del suolo (Ground Motion Model - GMM) che descrivono il decadimento dello scuotimento all'aumentare della distanza dalla sorgente sotto forma di leggi empiriche. Tali leggi sono ottenute da regressioni di dati di scuotimento reali, calcolate in funzione di vari parametri quali meccanismo di faglia ed effetti di sito.

Al fine di stimare le mappe di scuotimento secondo questo metodo, si possono usare software quali ShakeMap (Wald *et al.*, 1999; Michelini *et al.*, 2020) e OpenQuake (GEM, 2022). Tali software sono degli interpolatori sismologici che integrano i dati reali di scuotimento, la localizzazione e la magnitudo con le informazioni sismologiche disponibili nell'area di interesse, attraverso il GMM. In questo lavoro, per il calcolo degli scenari sono necessari i seguenti input:

- parametri di sorgente, parametrizzati come descritto;
- parametri di sito, parametrizzati come descritto;
- GMPE: si può fare riferimento a studi specifici a scala locale oppure fare riferimento alle GMPE più usate a livello nazionale, per esempio quelle considerate nella configurazione del software ShakeMap per la generazione delle mappe di scuotimento di routine per l'Italia (Michelini *et al.*, 2020; <http://shakemap.ingv.it/shake4/index.html>).

I prodotti di output sono valori di scuotimento espressi in termini di PGA, PGV, PGD e SA (a diversi periodi, per esempio a 0.3, 1.0 e 3.0 s) su una griglia di punti all'interno dell'area di studio.

L'approccio di calcolo delle mappe di scuotimento tramite GMM rappresenta una semplificazione del problema della propagazione delle onde sismiche all'interno della crosta tridimensionale. Questo metodo restituisce solo alcune misure di intensità dello scuotimento e non l'intero sismogramma, non considera la complessità del processo di rottura della sorgente, degli effetti della tridimensionalità della crosta, gli effetti di campo vicino e lo scuotimento varia principalmente in funzione della distanza dalla proiezione in superficie della faglia sorgente.

3.3. Modellazione dello scuotimento con metodi ibridi broadband

Per modellare la complessità del processo di rottura della sorgente sismica e della propagazione delle onde sismiche nella crosta è necessario effettuare modellazioni numeriche che permettano di ricostruire il sismogramma broadband su punti di interesse distribuiti sulla superficie. Nel caso fosse necessario stimare lo spostamento in funzione del tempo, si raccomanda di utilizzare metodologie “physics based” per la propagazione delle onde sismiche, come ad esempio codici agli elementi finiti o agli elementi spettrali (SPECFEM3D Peter *et al.*, 2011; SPEED Mazzieri *et al.*, 2013). La modellazione delle alte frequenze con questi metodi deterministici però è molto dispendiosa dal punto di vista computazionale e implica la conoscenza di dettaglio della struttura della crosta superficiale, cosa non sempre disponibile. Per ovviare a questo problema, si possono applicare i metodi ibridi (p.es. Graves e Pitarka, 2010) che prevedono la simulazione della parte del segnale sismico a bassa frequenza (generalmente < 1 Hz) tramite simulazioni deterministiche della propagazione delle onde sismiche in modello crostale 3D e la simulazione della componente ad alta frequenza (generalmente > 1 Hz) con metodi stocastici o semi-stocastici. I sismogrammi a bassa e alta frequenza vengono poi sommati per creare il sismogramma broadband (Figura 2).

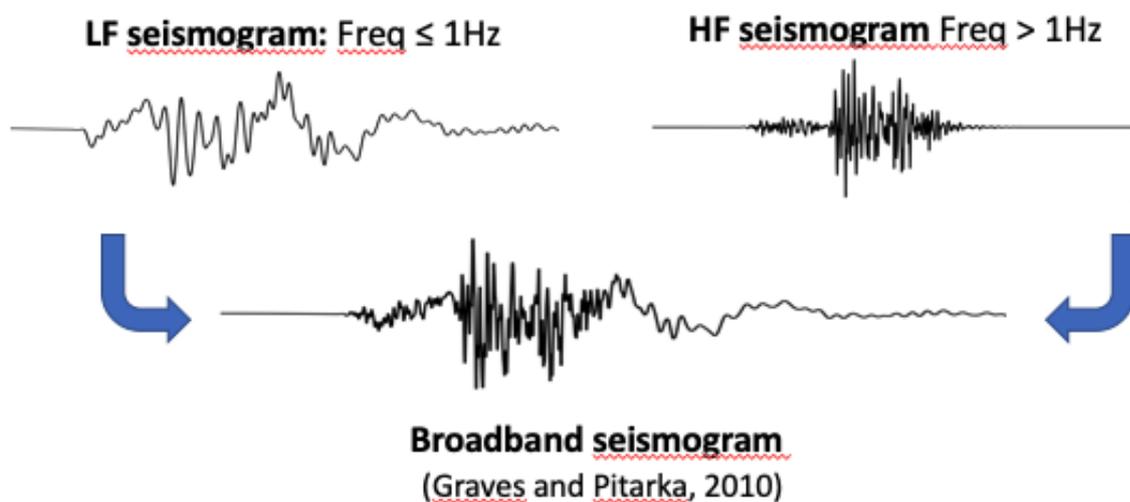


Figura 2 – Schema esemplificativo del metodo per generare i sismogrammi ibridi.

3.3.1. Definizione della griglia di output

Per le simulazioni con metodi deterministici e stocastici è necessario definire una griglia di punti di output disposti all’interno dell’area di studio (sulla superficie o in profondità), in corrispondenza dei quali i codici calcolano i sismogrammi. Il numero di punti scelti non influenza i tempi di calcolo della simulazione deterministica 3D della componente a bassa frequenza del segnale, mentre influenza quelli delle simulazioni stocastiche della componente ad alta frequenza, il cui tempo di calcolo è solitamente proporzionale al numero di punti di output richiesti. La griglia deve essere quindi costruita sulla base delle analisi da svolgere per il caso specifico e può essere strutturata anche in maniera irregolare, quando ci siano aree specifiche da investigare con maggior risoluzione.

3.3.2. Simulazioni 3D (basse frequenze)

Per la simulazione dello scuotimento sismico alla sorgente e della propagazione delle onde sismiche all’interno del modello 3D ottenuto secondo la procedura descritta in precedenza, è

necessario utilizzare codici che permettano di simulare faglie finite e il relativo modello cinematico, un modello crostale di velocità 3D, l'attenuazione, eventuali discontinuità (p.es. la superficie basale di bacini sedimentari), una topografia ad alta risoluzione (p.es. SPECFEM3D, Komatitsch e Tromp, 2002; Peter *et al.*, 2011; SPEED, Mazzieri *et al.*, 2013). Tali simulazioni richiedono un alto costo computazionale e vengono pertanto svolte mediante parallelizzazione basata sulla decomposizione del dominio di calcolo su sistemi HPC. La modellazione viene implementata discretizzando il modello crostale in una griglia di punti a cui sono associati valori di velocità delle onde P (V_p), velocità delle onde S (V_s) e densità, ottenuti dal modello geologico descritto in precedenza. In assenza di un modello di dettaglio, è possibile anche fare riferimento a modelli tomografici per l'area di studio o utilizzare modelli 1D.

- a. Definizione della griglia di calcolo. La griglia di calcolo in cui viene discretizzato il volume crostale 3D deve essere dimensionata in maniera tale da garantire un limite superiore di frequenza risolto dalla simulazione sufficiente all'applicazione del metodo ibrido. Si considera tipicamente che tale frequenza debba essere attorno a 1 Hz. In particolare, questa è influenzata dalla spaziatura degli elementi della griglia nelle aree del modello a velocità più basse, ovvero generalmente vicino alla superficie. Per questa ragione la spaziatura degli elementi della griglia potrebbe essere costruita in modo da aumentare con la profondità. In questo modo è possibile garantire la risoluzione necessaria in termini di frequenza e al tempo stesso limitare il numero totale di elementi che determina i tempi di calcolo. La griglia di calcolo dipende naturalmente dal metodo numerico utilizzato per risolvere l'equazione elastica dell'onda e può essere quindi regolare o irregolare, a tetraedri, parallelepipedi o elementi spettrali.
- b. Validazione del modello 3D con eventi reali. Se si utilizza il metodo ibrido è importante validare i modelli 3D implementati nella *mesh* di calcolo confrontando le forme d'onda simulate con quelle registrate alle stazioni sismiche funzionanti al momento di accadimento di eventi reali. È utile confrontare i tempi di arrivo e la forma delle diverse fasi del sismogramma per la parte di segnale a bassa frequenza (< 1 Hz), la durata dello scuotimento, la velocità massima e altri parametri. Il modello che meglio riproduce i dati registrati è quello da utilizzare per le simulazioni degli scenari di scuotimento.
- c. Simulazione degli scenari. Per quanto riguarda le simulazioni a lungo periodo degli scenari identificati, queste vanno effettuate nel modello 3D che meglio riproduce i sismogrammi reali. Inoltre, è importante definire la rappresentazione della sorgente. Si raccomanda, per scenari di magnitudo > 5.0 , di utilizzare una rappresentazione a faglia finita. La rappresentazione della sorgente dipende dal tipo di codice utilizzato per le simulazioni. Si può ad esempio, come prima semplificazione, discretizzare i piani di faglia in *patch*, e ad ognuna assegnare un meccanismo uguale a quello dell'evento principale, ma con momento pari al momento totale dell'evento diviso il numero di patch. È bene inoltre definire una velocità e un tempo di rottura delle varie patch.

3.3.3. Simulazioni stocastiche (alte frequenze)

Per poter ottenere la forma d'onda broadband, che comprenda le alte frequenze di interesse principalmente ingegneristico e di risentimento, è necessario integrare le simulazioni deterministiche con simulazioni stocastiche ad alta frequenza. Un approccio usato comunemente è quello semi-stocastico di Graves e Pitarka (2010), nel quale la radiazione della sorgente è rappresentata stocasticamente mentre la propagazione delle onde e gli

effetti di scattering sono rappresentati in modo deterministico in un modello di velocità 1D. Per tenere in considerazione la variabilità stocastica del processo di rottura è necessario effettuare n ripetizioni delle simulazioni in maniera da mediare i risultati tra modelli di rottura diversi (dove $n \geq 5$; Boore, 2003; Pischiutta *et al.*, 2021). Il modello di velocità 1D utilizzato per le simulazioni stocastiche può essere costruito come media del modello 3D crostale utilizzato per le simulazioni deterministiche, calcolato su un numero di strati adatto a descrivere l'andamento delle velocità P ed S con la profondità. Altri parametri da considerare per queste simulazioni sono il coefficiente di decadimento spettrale delle alte frequenze (valore κ), l'attenuazione e gli effetti di sito. Tali parametri devono essere calibrati sull'area di studio in funzione dell'eterogeneità (parametri sito-specifici o mediati per l'area di studio) e in base al metodo scelto per la modellazione. Per gli effetti di sito è comunemente utilizzato il parametro Vs30, che deve essere stimato su una griglia di punti che copra l'area di interesse.

3.3.4. Creazione dei segnali broadband e stima dei parametri di scuotimento

Una volta effettuate le simulazioni delle forme d'onda a bassa e alta frequenza, è possibile ottenere i segnali broadband dai quali estrarre i valori di PGA, PGV e le accelerazioni spettrali a 0.3 s, 1.0 s e 3.0 s per il calcolo delle mappe di scuotimento. Per ottenere tali parametri, per ogni scenario e per ogni punto della griglia di output (al quale è stato salvato un segnale a bassa frequenza e almeno uno ad alta frequenza) si consiglia la seguente procedura:

- i. filtraggio passa-alto con corner frequency ~ 1 Hz dei segnali ad alta frequenza (per le diverse simulazioni stocastiche dello slip);
- ii. filtraggio passa-basso con corner frequency ~ 1 Hz del segnale a bassa frequenza ottenuto dalla simulazione deterministica 3D;
- iii. somma degli n segnali ad alta frequenza con il segnale a bassa frequenza ottenendo n segnali risultanti broadband;
- iv. stima dei parametri di scuotimento PGA, PGV, SA0.3, SA1 e SA3 per ognuno dei segnali broadband;
- v. calcolo del valore medio per ognuno dei parametri di scuotimento.

I valori così ottenuti per ogni punto della griglia di output possono essere riportati in mappa (in maniera discreta o interpolati) ottenendo così una mappa di scuotimento. Tali prodotti saranno poi gli input per individuare la possibile instabilità delle frane presenti nell'area di studio e dunque per simulare lo scenario conseguente di tsunami, e per la determinazione degli scenari di danno.

4. Modellazione dei maremoti potenzialmente generati dall'attivazione delle faglie identificate

4.1.1. Fase di generazione

La modellazione di maremoti generati da terremoti si basa sull'ipotesi che gli spostamenti cosismici abbiano un ruolo preponderante rispetto alla propagazione delle onde sismiche. Questa ipotesi è basata sulla considerazione fisica che la velocità delle onde sismiche (ordine dei km/s) è nettamente maggiore rispetto alle velocità di fase tipiche delle onde di maremoto (funzione della profondità locale del bacino, variabile quindi fra decine e centinaia di km/h). Un approccio largamente utilizzato

per descrivere il processo attraverso il quale lo spostamento cosismico del fondale marino provoca la generazione di onde di maremoto è un'approssimazione che potremmo definire "di ordine zero": lo spostamento iniziale del mare è identico alla componente verticale dello spostamento cosismico del fondale marino e questo "trasferimento identico" avviene istantaneamente. Le approssimazioni coinvolte in questo approccio sono fondamentalmente due.

La prima riguarda lo spettro di lunghezze d'onda del campo di spostamento cosismico. I maremoti sono formati da onde "lunghe", intendendo con questo termine il fatto che la loro lunghezza d'onda è generalmente molto maggiore della profondità locale del bacino in cui si propagano. Ciò implica che, per sua natura, il maremoto tende a filtrare le lunghezze d'onda più corte e a mantenere solo quelle che soddisfano la condizione di onda "lunga". Trasferire identicamente il campo cosismico alla colonna d'acqua significa non tenere conto di questo effetto di filtraggio. È possibile mitigare questa approssimazione applicando al campo di spostamento cosismico opportuni filtri, il più utilizzato fra i quali è quello di Kajiura (1963), che pesa i diversi numeri d'onda che compongono lo spettro mediante l'inverso del coseno iperbolico del prodotto del numero d'onda e della profondità locale del bacino. Generalmente, il filtro ha effetto nelle zone a gradiente più elevato del campo cosismico e quindi in corrispondenza della proiezione superficiale del bordo superiore della faglia.

La seconda approssimazione coinvolge la dimensione temporale: supporre che lo spostamento cosismico si realizzi istantaneamente e che istantaneamente venga trasferito alla massa d'acqua soprastante significa supporre che il tempo di rottura della faglia sia trascurabile rispetto alle scale temporali tipiche delle onde di maremoto. È evidente che questa approssimazione può essere valida per tempi di rottura di alcuni secondi o al più di alcune decine di secondi, tipici di magnitudo moderate. Per le magnitudo più "importanti" (per fissare le idee, tipicamente per eventi con $M > 7.5$) il tempo di rottura finito può avere un qualche effetto sul processo di generazione del maremoto, che va quindi modellato come un processo dipendente dal tempo.

La scelta della sola componente verticale del campo cosismico si fonda sul principio fisico attraverso cui un terremoto genera un maremoto, cioè la variazione di energia potenziale del volume d'acqua soprastante la zona sorgente, che è intrinsecamente legata alla dimensione verticale. Ciò non significa che le componenti orizzontali del campo di spostamento cosismico non possano contribuire al campo di spostamento (verticale) del volume d'acqua: questo succede in particolare quando il campo di spostamento cosismico interessa aree con importanti gradienti batimetrici (Tanioka e Satake, 1996). L'opportunità o meno di limitarsi alla componente cosismica verticale dello spostamento deve quindi essere valutata in base a un'accurata analisi dei gradienti batimetrici e topografici in area sorgente.

La geometria della faglia, il meccanismo focale e la distribuzione dello slip sulla superficie di faglia giocano un ruolo chiave nella determinazione del processo di generazione del maremoto. Nell'approccio più semplice, la superficie di faglia viene rappresentata come un piano rettangolare, cui vengono assegnate lunghezza e larghezza. Gli angoli di strike, dip e rake che definiscono il meccanismo focale sono costanti, così come uniforme viene considerato lo slip sul piano di faglia. Nell'ipotesi in cui questo modello di faglia sia immerso in un semispazio elastico, omogeneo e isotropo, delimitato da una superficie libera piana, è possibile calcolare in modo "esatto" le soluzioni per le componenti dello spostamento cosismico. Il modello relativo a queste soluzioni è noto come modello di Okada (1985). La rappresentazione della crosta terrestre in questo modello è evidentemente iper-semplificata, poiché si trascurano sia le eterogeneità della crosta che la topografia irregolare della sua superficie libera. Similmente, le faglie reali in generale sono superfici

curve e irregolari, ed esibiscono variabilità locali sia per gli angoli che definiscono la loro orientazione nello spazio e il meccanismo di rottura, sia per la distribuzione di slip. Fino a che punto sia corretto od opportuno trascurare le caratteristiche realistiche della crosta e della faglia in favore di un modello come quello di Okada dipende da vari fattori, che vanno analizzati caso per caso (si veda, per esempio, Tonini *et al.*, 2020). Il modello di Okada si è rivelato capace di riprodurre in modo soddisfacente le caratteristiche fondamentali dei campi di spostamento cosismico generati da terremoti reali. Nel campo della modellazione dei maremoti, è tuttora un modello largamente utilizzato perché unisce facilità di utilizzo, efficienza di calcolo e la già ricordata capacità di cogliere la struttura generale dei campi di spostamento. Il modello può essere facilmente esteso per prendere in considerazione distribuzioni eterogenee di slip: è sufficiente suddividere il piano di faglia in un certo numero di sotto-faglie, a ciascuna delle quali si assegna un valore diverso di slip (ed eventualmente di rake). Quest'ultima è a sua volta una pratica largamente diffusa negli studi di generazione di maremoto. L'importanza della distribuzione eterogenea dello slip è tanto più marcata quanto più alta è la magnitudo del terremoto e quanto più vicina la faglia si trova alla costa. Se si vuole approcciare il problema della forma irregolare della faglia, allora il modello di Okada può essere adattato solo per geometrie che si riescono a "tassellare" adeguatamente con elementi rettangolari. In caso contrario, è necessario passare a modelli più raffinati, come quelli che adottano dislocazioni elementari triangolari (ad esempio Meade, 2007; Nikkhoo & Walter, 2015), più versatili e più adatte a discretizzare superfici di forma complicata.

Infine, se si desidera tenere conto delle eterogeneità della crosta e/o della topografia irregolare della superficie terrestre, allora è necessario utilizzare metodi puramente numerici (ad esempio PyLith, Aagard *et al.*, 2022), che possiamo definire "impegnativi" in termini sia di costruzione delle griglie sia di tempi di calcolo.

Da quanto precede, risulta evidente che il set minimo di dati necessari per il calcolo della condizione iniziale di un maremoto deve comprendere lunghezza, larghezza, angoli di strike, dip e rake, valore dello slip medio sul piano di faglia e coordinate di un punto rappresentativo del piano (ad esempio il punto medio del bordo superiore). Qualora si ritenesse opportuno elaborare scenari caratterizzati da una distribuzione eterogenea di slip, si può procedere adottando distribuzioni di forma geometrica semplice (ad esempio funzioni gaussiane 2D) oppure distribuzioni stocastiche, eventualmente introducendo anche geometrie di faglia complesse (ad esempio Herrero e Murphy, 2018; Scala *et al.*, 2020). In quest'ultimo caso, i dati a disposizione devono comprendere la geometria 3D dettagliata della superficie di faglia ed eventualmente una sua tassellazione.

4.1.2. Fase di propagazione

La propagazione delle onde di maremoto segue le leggi dell'idrodinamica, che possono essere opportunamente semplificate tenendo conto della natura delle onde stesse e del tipo di sorgente. Nel caso di maremoti generati da terremoti, l'approssimazione di onda lunga è generalmente ben verificata, il che permette di semplificare le equazioni 3D di Navier-Stokes attraverso la cosiddetta approssimazione di "shallow-water" (SW). In questa approssimazione, velocità e accelerazioni verticali sono trascurabili e il campo di pressione segue la semplice legge idrostatica. Le incognite delle equazioni si riducono quindi all'ampiezza e alle componenti orizzontali del campo di velocità delle particelle d'acqua o, in alternativa, ai "flussi" orizzontali (prodotto delle componenti della velocità e della profondità locale del bacino): ognuna di queste quantità è mediata sulla colonna d'acqua. La velocità di fase (velocità con cui si propagano creste e ventri) e la velocità di gruppo

(velocità con cui si propaga l'energia) coincidono e sono fornite dalla radice quadrata del prodotto fra l'accelerazione di gravità e la profondità locale del mare.

Nelle tre equazioni valide nell'approssimazione di SW (due relative alla conservazione della quantità di moto, una per la conservazione della massa) sono inclusi termini non-lineari il cui effetto può essere trascurato quando l'ampiezza delle onde è molto più piccola della profondità locale del bacino, ma deve essere tenuto in considerazione quando la precedente condizione non è verificata: questo succede tipicamente quando l'onda approccia la costa, con conseguente riduzione della velocità di fase e della lunghezza d'onda, il che comporta un aumento dell'ampiezza delle onde (necessario per la conservazione dell'energia).

Un'ulteriore proprietà dell'approssimazione di SW è che le onde sono non dispersive. In altre parole, tutte le lunghezze d'onda viaggiano con la stessa velocità di fase. Nel mondo reale, questo non si verifica mai completamente. La validità dell'approssimazione va presa in senso asintotico, cioè per valori del prodotto kh tendenti a zero (k è il numero d'onda, h la profondità locale del mare). Gli effetti dispersivi possono diventare preponderanti nei casi in cui tale approssimazione non è più valida, ad esempio se il terremoto sorgente ha magnitudo moderata - e quindi la lunghezza d'onda dominante del campo cosismico non soddisfa opportunamente la condizione di SW - oppure nel caso in cui le onde si propagano in zone particolarmente profonde. Ciò significa che le diverse componenti del segnale di tsunami non si muovono tutte insieme (come accade nell'approssimazione SW), ma procedono con velocità che dipende dal numero d'onda: più questo è piccolo (quindi più grande è la lunghezza d'onda), più rapidamente tale componente si propaga. Ciò produce quindi uno "spacchettamento" dello tsunami, con le componenti più lunghe che si propagano più velocemente di quelle a numeri d'onda più alti. Tali effetti sono solitamente simulati tramite codici numerici che risolvono equazioni di maggiore complessità, che tengano conto anche delle variazioni verticali di velocità e accelerazione. Ciò può essere realizzato, ad esempio, tramite approcci di tipo Boussinesq, non-idrostatici (NH), che introducono termini aggiuntivi nelle equazioni della fluidodinamica e che quindi richiedono tempi di calcolo maggiori. Generalmente, comunque, le simulazioni con approccio SW tendono a sovrastimare gli effetti delle onde rispetto a quelle simulate tramite metodi NH: nell'ottica della stima della pericolosità tramite approccio "worst-case", che considera, cioè, il peggior caso possibile, l'utilizzo delle equazioni SW è quindi legittimo.

Il dettaglio delle griglie di calcolo utilizzate per la simulazione di uno tsunami è vincolato dal tipo di studio che si vuole effettuare. Se si vogliono valutare gli effetti di un evento a livello regionale non è necessario utilizzare una risoluzione elevata (tipiche risoluzioni in questo caso sono nell'ordine del km o di qualche centinaio di m). Ciò permette anche di non aumentare eccessivamente le richieste di potenza di calcolo. Lo studio dell'impatto su una zona specifica, e quindi anche degli effetti non-lineari che si manifestano soprattutto nelle acque basse vicino a costa, richiede invece griglie di calcolo più dettagliate. Ad esempio, nel caso di H&RA-Lacinia si è visto che non si possono utilizzare risoluzioni inferiori a 10 m per tenere conto degli effetti locali legati alla morfologia costiera. Nella sezione seguente (4.1.3) verranno illustrate alcune delle problematiche più frequenti che possono emergere quando si studia l'impatto di uno tsunami sulla costa.

4.1.3. Interazione con la costa

La parte finale del processo qui descritto riguarda l'interazione delle onde con la costa, che dal punto di vista dello studio della pericolosità è sicuramente quello più importante. Nelle acque basse vicino a riva prevalgono i fenomeni non lineari, di cui si può tener conto, almeno in parte, includendo nelle

equazioni idrodinamiche gli analoghi termini che generalmente al largo possono essere trascurati, ma che in acque basse diventano preponderanti. Alcune manifestazioni dell'interazione tra tsunami e zone costiere includono, oltre al classico "shoaling" (aumento dell'ampiezza delle onde e diminuzione della velocità), le "edge waves", dovute all'intrappolamento di energia dovuta all'interazione con la costa, o il "wave breaking", cioè la rottura e il ribaltamento del fronte d'onda.

La ricostruzione dettagliata della morfologia in prossimità della costa è di particolare importanza per diversi motivi: nella parte sommersa, strutture come canyon sottomarini possono alterare le caratteristiche dell'impatto dell'onda (si veda lo studio di Iglesias *et al.*, 2014), così come scarpate molto ripide possono portare a un brusco innalzamento dell'ampiezza delle onde. La presenza di bacini semi-chiusi, come i porti o le insenature, può facilitare anche l'insorgenza di fenomeni di risonanza, ossia l'eccitazione dei modi propri di oscillazione a seguito di una perturbazione esterna (come può essere uno tsunami), che può quindi risultare amplificata anche di un ordine di grandezza, con oscillazioni che perdurano molto più a lungo, con prevedibili danni a imbarcazioni e infrastrutture, quando presenti. Infine, anche le foci dei fiumi possono rappresentare una via preferenziale per l'avanzamento dell'acqua verso l'entroterra. Tutti questi elementi evidenziano l'importanza di caratterizzare adeguatamente la batimetria in acque basse e la morfologia della costa. Soprattutto la prima tipologia di dato è di difficile reperibilità, sia perché a livello strumentale tali misure non sono di facile realizzazione, sia perché soggette a continui mutamenti, per l'azione di fattori naturali (correnti sottomarine, sedimentazione) e di fattori di origine antropica (dragaggio del fondo dei porti, scarico di detriti a mare).

L'impatto di uno tsunami con la costa prevede anche lo studio dell'inondazione a terra: ciò può essere simulato con codici numerici, ad esempio con la tecnica del *moving boundary* implementata nel codice UBO-TSUFDF utilizzato per le simulazioni in ambito H&ra Lacinia, che prevede uno spostamento dell'interfaccia acqua-terra, a comprendere le celle che vengono ritenute interessate dall'inondazione (Tinti e Tonini, 2013). In questo modo è possibile stimare le aree interessate dall'avanzamento dell'acqua a terra, e calcolare su ogni cella di griglia interessata alcuni parametri utili a valutare l'impatto sugli edifici a terra: spessore della colonna d'acqua, velocità, momentum flux, ecc.

Un possibile approccio alternativo è rappresentato dall'applicazione dell'*energy method*, utilizzato ad esempio nell'ambito del progetto SPOT (Antoncecchi *et al.*, 2020) per valutare l'impatto delle onde generate da un gran numero di scenari su tutte le coste italiane. Tale metodo, descritto in dettaglio in Kriebel *et al.* (2017) si basa sullo studio del decadimento dell'energia di un flusso costante lungo un transetto topografico, la cui origine è in un punto a costa e a cui viene dato come input iniziale l'ampiezza dell'onda su tale punto. Tramite una procedura ricorsiva, è possibile ottenere lo sviluppo dell'altezza della colonna d'acqua lungo tale profilo, ricavando quindi l'impatto sulle strutture a terra situate lungo il transetto. Il vantaggio di tale tecnica risiede nel basso impiego di potenza computazionale richiesta, mentre il principale limite riguarda il fatto che il calcolo viene effettuato lungo un profilo bidimensionale: non si tiene conto, quindi, dell'espansione laterale a cui può essere soggetta un'onda quando avanza a terra, né del fenomeno opposto, cioè della concentrazione del flusso lungo una direzione preferenziale (ad esempio il letto di un fiume). Alla luce di quanto sopra illustrato, quindi, tale tecnica si può ritenere adeguata a studi su vasta scala, mentre per studi di dettaglio è meglio affidarsi alle simulazioni numeriche.

Le considerazioni precedenti evidenziano l'importanza di definire, come primo passo, il livello di dettaglio delle simulazioni richiesto, che discende dal tipo di indagine che si sta svolgendo: per valutazioni di pericolosità più generali, ad esempio su scala regionale, è sufficiente una griglia

relativamente lasca, e l'utilizzo di equazioni delle onde con termini lineari; se si vuole studiare una zona più nel dettaglio va aumentata la risoluzione della griglia (ciò può essere anche effettuato all'interno della stessa simulazione con griglie telescopiche, tramite la tecnica delle nested grids implementata ad esempio nel codice UBO-TSUF), vanno inclusi i termini non-lineari delle equazioni idrodinamiche e si richiede una più dettagliata caratterizzazione della fascia costiera. Particolare attenzione va risposta nella ricostruzione della linea di costa, che costituisce l'interfaccia acqua-terra e che è quindi una zona particolarmente sensibile anche dal punto di vista del calcolo numerico: eccessivi gradienti di elevazione in tali aree possono produrre instabilità numeriche che possono falsare o alterare profondamente i risultati ottenuti dalle simulazioni. Per tale motivo è sempre assai utile, una volta definita una griglia di calcolo, procedere ad alcuni test di esecuzione della simulazione, per escludere tale eventualità.

5. Caratterizzazione di frane sottomarine o miste prossime all'area di studio

Lo studio delle frane sottomarine si effettua utilizzando tecniche geofisiche marine, come la riflessione sismica multicanale 2D e la batimetria multibeam, che consentono di comprenderne la geometria e l'architettura complessive. Ulteriori dati di esplorazione sismica 3D, resi disponibili principalmente dal settore industriale nelle ultime decadi, hanno fornito immagini ad alta risoluzione della variabilità strutturale interna delle frane. Per quanto riguarda le frane costiere, le tecniche di indagine sono miste e si avvalgono principalmente delle tecniche geofisiche marine, del telerilevamento satellitare e del rilevamento di campo.

L'analisi dei fenomeni di instabilità gravitativa che hanno interessato una data area prossima al campo di produzione di idrocarburi e la valutazione della loro potenziale pericolosità geologica possono essere effettuate a vari livelli di approfondimento. Sono elencati di seguito i dati minimi necessari alle indagini conoscitive e dati che possono essere invece ritenuti supplementari in una prima fase di indagine.

5.1. Raccolta dati minimi necessari

Morfobatimetria di buona risoluzione

Questo dato consente l'analisi delle pendenze del fondale marino nell'area di studio e la mappatura di elementi morfologici utili al fine di caratterizzarne l'instabilità gravitativa, quali: nicchie di distacco, depositi di frana, reticoli di canyon, strutture legate a fuoriuscita di fluidi (p.es. pockmarks, mud volcanoes), strutture dovute a correnti di fondo (erosive e deposizionali), strutture dovute a substrato roccioso affiorante, strutture prodotte da deformazione tettonica attiva (faglie e pieghe che interessano il fondo mare). Il dato morfobatimetrico si può ottenere attraverso diverse tecnologie di indagine che includono: ecoscandagli a fascio singolo per la misura della quota batimetrica puntuale, ecoscandagli a fascio multiplo (multibeam sonar), telerilevamento satellitare e da droni.

L'efficacia dei sistemi sonar, che devono essere operati da un mezzo navale, un drone di superficie o di profondità, è funzione delle frequenze di trasmissione utilizzate. In linea di massima, i multibeam ad alta frequenza, dell'ordine di 200-700 kHz, sono utilizzati in acque da molto poco profonde (< 5 m) fino a mediamente profonde (100-150 m), frequenze attorno a 70-100 kHz sono

usate lungo la piattaforma continentale esterna e la scarpata, frequenze attorno a 30 kHz sono infine utilizzate per le profondità abissali. In genere la risoluzione spaziale ottimale nell'intervallo batimetrico che va dalla fascia costiera fino a non oltre 50-70 m di profondità è di 0,5-2,0 m (multibeam ad alta frequenza > 200 kHz), mentre per la parte di scarpata continentale, dove è ubicata la maggior parte delle frane sottomarine, una risoluzione spaziale molto buona è da considerarsi compresa nell'intervallo 10-25 m e può essere ottenuta con i sistemi a media frequenza.

Anche dai volumi sismici 3D è possibile ricostruire la topografia del fondo mare con una risoluzione spaziale media piuttosto buona, soprattutto se i dati sono di recente acquisizione, ma limitatamente alla porzione indagata dal rilievo sismico.

Per le frane costiere, è maggiormente indicato il telerilevamento che si basa su sistemi ottici come il LiDAR (Light Detection And Ranging), che determinano la distanza di un oggetto e quindi la sua profondità analizzando le riflessioni di un impulso laser. Questi sistemi in genere sono montati su aerei, non solo su satelliti, e usano due range di frequenze della luce: la frequenza più bassa viene riflessa dalla superficie del mare e fornisce indicazioni sulla elevazione costiera, mentre le frequenze più alte penetrano la colonna d'acqua e vengono riflesse dal fondo, raggiungendo elevate risoluzioni spaziali. Questi sistemi sono particolarmente indicati nel caso di coste alte e rocciose.

Anche le immagini satellitari possono essere impiegate per la determinazione della batimetria, sfruttando il principio fisico secondo cui le differenti lunghezze della luce penetrano l'acqua a profondità differenti. I sensori ottici moderni sono multispettrali (13 bande del visibile e dell'infrarosso) e attualmente, data la sua discreta risoluzione spaziale (10 m), l'accessibilità senza restrizioni all'utilizzo delle immagini e il sorvolo della stessa area ogni 5 giorni, il sensore montato su Sentinel-2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) nell'ambito del programma Copernicus è da considerarsi utile nella cartografia e monitoraggio delle variazioni morfo-batimetriche e bentoniche dei fondali costieri.

Pur tuttavia, questi sistemi di telerilevamento satellitare dipendono fortemente dalla trasparenza dell'acqua. Si possono penetrare solo acque basse da un punto di vista ottico, ovvero quando l'effetto del substrato è rilevabile nell'acqua rilasciando un segnale di radianza o riflettività del fondo. Nella maggior parte dei casi ciò significa acque con profondità < 20 m, mentre in acque torbide costiere e interne può significare acque profonde anche solo 1-3 m.

Profili acustici di alta risoluzione

Questo dato, che in genere può essere acquisito da un mezzo navale contemporaneamente ai rilievi batimetrici, serve a verificare le interpretazioni morfologiche, a valutare lo spessore dei sedimenti recenti ed eventualmente a selezionare i siti idonei a campionamenti diretti dei sedimenti (tramite carotaggi, bennate, ecc.). In genere si utilizzano sub-bottom profiler con frequenze modulate comprese tra 3,5 kHz e 12-20 kHz.

Profili sismici a riflessione multicanale di maggior penetrazione (sismica multicanale con sorgenti air gun, water gun o sparker e stendimenti di idrofoni)

Questo tipo di indagine può servire per caratterizzare le strutture tettoniche eventualmente presenti nell'area di interesse, e può permettere di correlare eventuali informazioni stratigrafiche disponibili dai pozzi per esplorazione/produzione di idrocarburi presenti nell'area.

Carotaggi e altri campionamenti diretti dei sedimenti del fondale

Questo dato può servire sia per la caratterizzazione geotecnica sia per l'attribuzione stratigrafica dei sedimenti superficiali; quest'ultima informazione può fornire indicazioni sui tassi di sedimentazione, che rappresentano una componente importante nella valutazione della stabilità gravitativa.

In sintesi, le acquisizioni di dati dei primi due punti di questa descrizione sono una premessa indispensabile per la valutazione della pericolosità legata a instabilità gravitativa nelle vicinanze di un campo produttivo. Le acquisizioni descritte nei due punti successivi possono essere invece necessarie qualora l'area di interesse sia caratterizzata da complessità strutturali e da una tettonica attiva con presenza di sismicità.

Per l'elaborazione dei dati batimetrici grezzi e la validazione/interpolazione dei modelli digitali (DTM) che vengono realizzati possono essere utilizzati diversi software di tipo commerciale, tra cui i più diffusi sono: QPS Qimera, CARIS HIP&SIPS, Ifremer Globe. Un software aperto è MB-system Seafloor Mapping Software, ma l'evoluzione dei moderni sonar, soprattutto ad alta frequenza, ne rende complessa la gestione. L'elaborazione dei dati batimetrici segue un flusso molto specifico, che deve essere portato a termine da un operatore esperto soprattutto nelle fasi di pulizia e filtraggio del dato, perché serve notevole esperienza per distinguere tra artefatti e morfologie reali. Al termine dell'elaborazione vengono generati dei modelli digitali della batimetria che consentono una visualizzazione quasi 3D del fondo; questi possono avere differenti risoluzioni spaziali (multi-resolution) a seconda della profondità indagata e della risoluzione nominale del sistema di acquisizione.

Per quanto riguarda i volumi di dati sismici 3D, è possibile interpretare e ricostruire la topografia del fondo mare con tecniche di 3D seed autotrack (supervisionato) sui dati 3D disponibili in tempi doppi (TWT); la risoluzione del risultato dipende dal bin size del dato sismico. Una volta creata la superficie costituita da punti in tempi doppi, prima di convertirli in profondità è necessario definire quale velocità media dell'acqua utilizzare (un intorno di 1500 m/s). Per farlo, è preferibile confrontare i punti con dati multibeam presenti nell'area, e ricavarne quindi una velocità plausibile. Le superfici del fondo mare ricostruite a partire dal dato sismico 3D possono avere alcuni difetti importanti, intrinsecamente collegati alle caratteristiche della wavelet, e vanno pertanto usati con cautela e solo quando dati sonar multibeam non sono disponibili nell'area di studio.

5.2. Caratterizzazione delle frane sottomarine

Non esiste un metodo univoco per descrivere la morfologia delle frane sottomarine e ciò in genere ostacola l'effettiva parametrizzazione delle stesse e una efficace integrazione dei risultati di osservazioni diverse, che partono da diversi tipi di dati raccolti, a disparate risoluzioni spaziali, in ambienti deposizionali e contesti tettonico-strutturali diversi. In particolare, l'accuratezza e il numero di parametri che possono essere mappati per una frana sottomarina è funzione delle dimensioni della frana rispetto alla risoluzione dei dati e alla loro estensione spaziale. Piccole frane sono difficili da mappare accuratamente (se non del tutto) da dati a bassa risoluzione, mentre le grandi frane possono sfuggire, in parte, utilizzando un dataset ad alta risoluzione con estensione spaziale limitata. Inoltre, la soggettività dell'interpretazione dell'operatore è un altro fattore che riduce la possibilità di applicare un metodo standard e completamente ripetibile su qualunque caso studio.

Alcuni parametri (Tabella 3, Figura 3) sono però fondamentali e devono essere misurati per poter classificare dal punto di vista geomorfologico una frana e tentare il calcolo del volume della massa

di sedimento coinvolta, che è fondamentale per le simulazioni della generazione di onde di tsunami da collasso sottomarino.

Tabella 3: Principali parametri morfometrici di una frana sottomarina.

Parametri metrici (in inglese)	Descrizione
Name	Può essere già pubblicato o si può rendere necessario doverlo attribuire, come in questo progetto
Depth below seafloor	Espressa in m lineari o TWT in ms se disponibili solo dati del sottofondo
Latitude/longitude	Si intende in genere una stima misurata nel centro dell'oggetto mappato
Water depth minimum (m)	Minima profondità della nicchia di frana
Water depth maximum (m)	Massima profondità raggiunta dal deposito
Total length, Lt (m)	Dal limite superiore della nicchia fino al termine del deposito connesso (esclusi eventuali blocchi sparsi)
Deposit length, Ld (m)	Lunghezza del deposito esclusi eventuali blocchi sparsi
Evacuated Length, Le (m)	Lunghezza della nicchia, corrisponde a Lt - Ld
Scar perimeter length, Ls (m)	Lunghezza della nicchia, a volte è preferibile semplificare la polilinea
Headscarp height, Hs (m)	Altezza della scarpata dal punto convesso massimo al punto concavo minimo
Evacuation height, He (m)	Altezza calcolata dal limite superiore del deposito al limite superiore della scarpata
Scar width, Ws (m)	Larghezza della nicchia
Scar surface nature	Descrizione della nicchia (e.g. concava, a gradini, ecc.)
Maximum deposit width, Wd (m)	Larghezza massima del deposito

Maximum deposit thickness, Td max	Misurata in m lineari o TWT in ms se disponibili solo dati del sottofondo
Total height drop, Ht (m)	Altezza calcolata dal limite inferiore del deposito al limite superiore della nicchia
Slope gradient, S (°)	Gradiente della scarpata integra
Slope gradient of the headscarp, Ss (°)	Gradiente della nicchia
Slope gradient at the toe, St (°)	Gradiente misurato di fronte al piede di scarpata
Basal surface type	Descrizione della superficie basale (rugosa, planare, ecc.)
Upper surface type	Descrizione della superficie superiore (rugosa, planare, ecc.)
Volume (km ³)	Volume del deposito calcolato

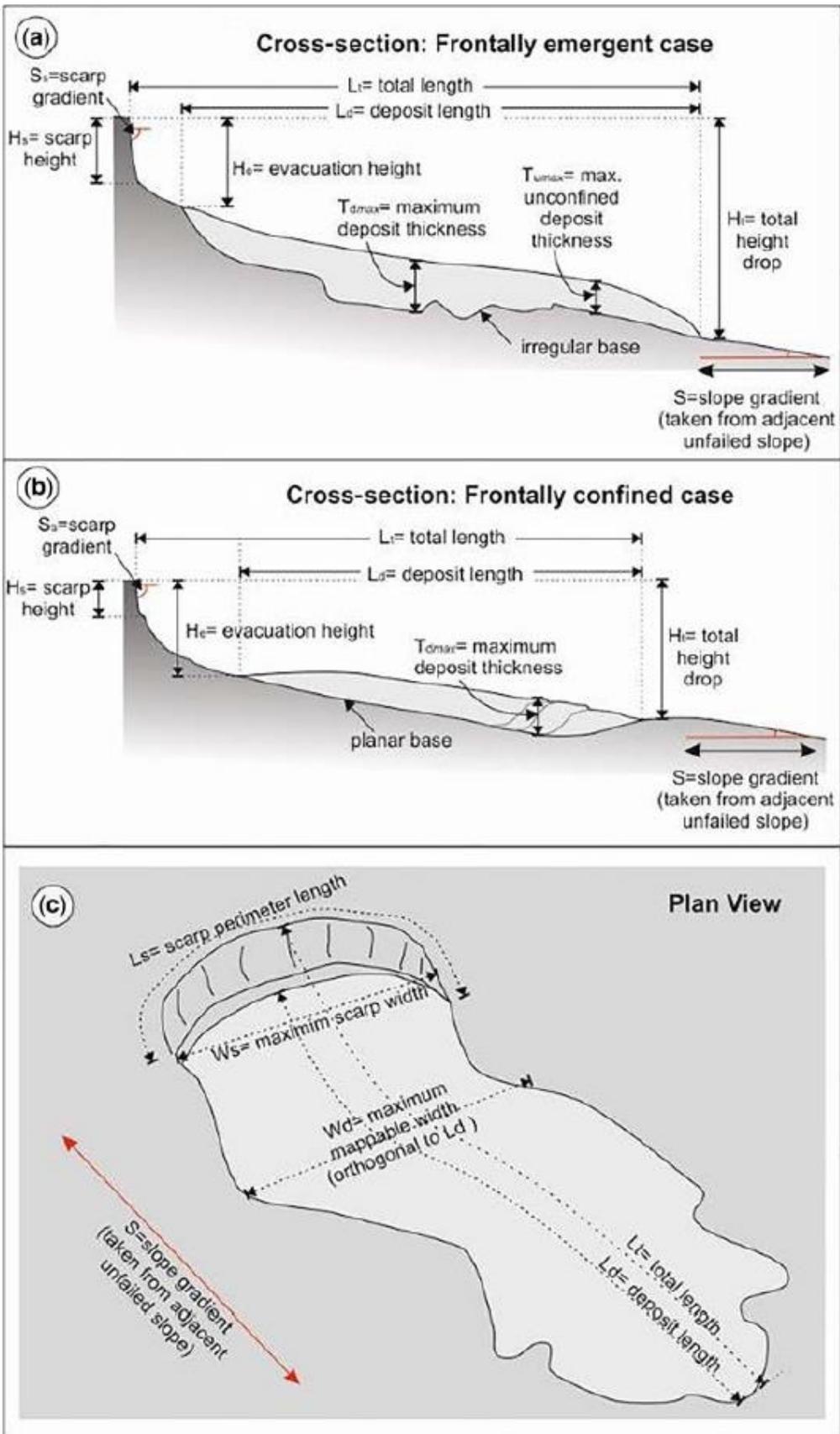


Figura 3 – Principali elementi costitutivi di una frana utili alla misurazione e classificazione geomorfometrica. Da Clare et al. (2019).

Numerosi metodi sono stati applicati per il calcolo del volume di una frana sottomarina, a partire soprattutto da dati batimetrici. Il primo si basa su una stima del volume mancante: una volta individuata una nicchia, il volume viene calcolato dalla differenza tra la batimetria della nicchia e una superficie interpolata che collega i bordi superiori della nicchia. Questo approccio mira a ricostruire la topografia pre-crollo (ten Brink *et al.*, 2006) ed è maggiormente utile ed efficace quando sono disponibili solo dati multibeam. Questo metodo è stato utilizzato per modellare il debris flow di Capo Colonna del progetto H&RA Lacinia. Il secondo metodo si basa sulla misura delle dimensioni della nicchia di distacco (McAdoo *et al.* 2000): il volume della frana in questo caso è modellato come la geometria di un cuneo (volume = $1/2 \times \text{area} \times \text{altezza}$). La formula usata è la seguente (Figura 4):

$$V_{slide} = \frac{1}{2} (A_s) \times h \cos \alpha$$

dove:

A_s è l'area della nicchia di frana

h è l'altezza della nicchia di frana

α è l'angolo della scarpata di frana

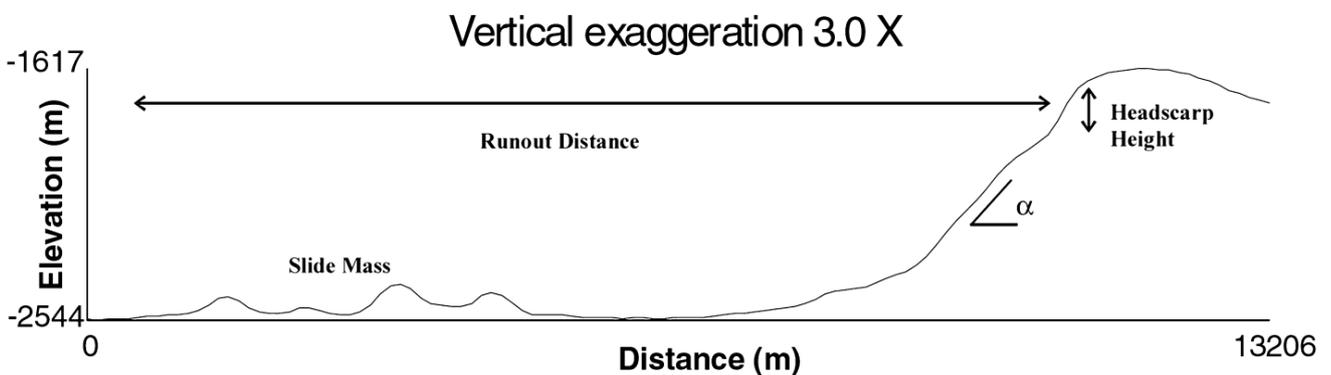


Figura 4 - Calcolo del volume di un corpo di frana a partire dalla geometria della nicchia di distacco. Da McAdoo *et al.* (2000).

Il piano inferiore del cuneo è derivato dagli angoli di gradiente di scarpata della lunghezza totale del deposito (runout) e/o della nicchia, mentre il piano superiore del cuneo è rappresentato dal pendio immediatamente adiacente (supposto essere rappresentativo della pendenza pre-crollo). Questo metodo è stato utilizzato per stimare grossolanamente il volume delle frane distaccatesi da tutte le nicchie significative catalogate nell'area del progetto H&RA Lacinia. Il terzo metodo si basa sulle misurazioni del deposito di frana stesso, quando i dati lo consentono o quando la nicchia non è preservata a causa di erosioni successive o mancanza di dato. In tale scenario, il volume è determinato come la funzione dello spessore e dell'area della frana. L'applicabilità di questo metodo è in relazione alla conservazione del corpo di frana.

A volte il solo dato batimetrico non è sufficiente per una corretta stima del volume del corpo di frana, e in questo caso i profili sismici ad alta risoluzione o a maggiore penetrazione, a seconda delle dimensioni del corpo, sono fondamentali per una più accurata misurazione dello spessore. La questione diventa fondamentale quando si tratta di frane confinate frontalmente, in quanto il sedimento non scorre sul fondale e la sua espressione batimetrica è limitata rispetto allo spessore totale di sedimenti che si spostano. Ciò sottolinea l'importanza di integrare i dati sismici e batimetrici assieme, ogni qual volta sia possibile. Infine, i dati sismici 3D possono fornire calcoli più accurati del volume della frana se il deposito è interamente coperto dal rilievo e vengono effettuate adeguate conversioni tempo-profondità.

6. Modellazione dei maremoti potenzialmente generati dall'attivazione delle frane sottomarine identificate

6.1. Considerazioni generali sulle differenze tra maremoti generati da frana e da terremoto

Gli tsunami generati da moti franosi presentano alcune peculiarità, di cui bisogna tener conto quando se ne vogliono simulare gli effetti, che influenzano sia la ricerca dei dati necessari a realizzare lo scenario numerico, sia la scelta dei codici computazionali da applicare. Le specifiche caratteristiche che distinguono tali tsunami da quelli sismoindotti (descritti nella sezione 4) possono essere così schematizzate:

a) *Generazione*. Se per le onde generate da terremoto la condizione di perturbazione iniziale della superficie marina può essere considerata istantanea, vista la diversa scala temporale che caratterizza i due fenomeni (sorgente e onda generata), per gli tsunami da frana ciò non è più valido. L'evoluzione di un evento franoso (innesco – accelerazione – decelerazione – deposito finale) avviene in tempi comparabili a quelli dell'onda da esso generato, e quindi il moto di frana sul fondo del bacino “interagisce” con l'effetto che esso provoca (lo tsunami), almeno per le basse profondità. È infatti conosciuto l'effetto retroattivo che può provocare la propagazione di uno tsunami sullo stesso moto di frana che lo ha provocato, modificandone la dinamica per valori che possono raggiungere il 10% (Harbitz *et al.*, 2014; Løvholt *et al.*, 2015). Il moto franoso, quindi, altera la profondità del bacino al suo passaggio, dislocando l'intera colonna d'acqua. Conoscere lo spessore del corpo in movimento sul fondo e la velocità con cui questo varia permette quindi di stimare l'impulso tsunamigenico dinamico. In alcuni approcci di modellazione di tsunami generati da frana, si assume che la massa franosa sia rappresentata da un corpo rigido: ciò provoca generalmente una sovrastima dell'ampiezza delle onde generate, nonché un cambiamento dei contenuti in frequenza delle perturbazioni generate (Harbitz *et al.*, 2006; Yavari-Ramshe S. and Ataie-Ashtiani B., 2016). Per tali motivi è preferibile quindi applicare un codice di calcolo che tenga conto delle variazioni della forma del corpo di frana durante lo scivolamento.

b) *Propagazione*. Un'altra caratteristica tipica degli tsunami da frana, anche questa riconducibile alla loro genesi, riguarda la propagazione. Ogni tsunami è infatti soggetto al fenomeno idrodinamico della dispersione, che mette in relazione la velocità di propagazione con la lunghezza d'onda. Le componenti a minor lunghezza si muoveranno a minore velocità rispetto a quelle più lunghe: il risultato è che, all'aumentare della distanza, lo tsunami si “spacchetta”, provocando oscillazioni ad ampiezza più bassa rispetto a quanto avverrebbe se tale fenomeno non avesse luogo. Gli tsunami

generati da terremoto sono generalmente considerati non dispersivi: ciò deriva anche dall'approssimazione di "onda lunga", in cui il rapporto tra la lunghezza d'onda λ e la profondità h del bacino in cui essa si muove è maggiore di 20; le onde generate da una frana sono in generale caratterizzati da oscillazioni più corte, per via delle dimensioni della sorgente, e per essi quindi tale effetto può essere più evidente. In Glimsdal *et al.* (2013) l'effetto di dispersione viene quantificato secondo la formula:

$$d_\lambda = 0.025 \left(\frac{\lambda}{h} \right)^2$$

Dove d_λ è la distanza, in termini di lunghezze d'onda della perturbazione iniziale, a cui tale effetto diventa preponderante e non è più trascurabile. Ad esempio, quindi, se per uno tsunami sismoindotto è ragionevole considerare una lunghezza d'onda iniziale di 100 km, su una profondità media di propagazione di 4 km (quindi $\lambda/h = 25$, per cui vale l'approssimazione di onda lunga) si avrà che gli effetti dispersivi si manifestano per $d_\lambda = 15.6$, cioè a più di 1500 km di distanza dalla sorgente. D'altra parte, se per una perturbazione generata da una frana sottomarina si assume $\lambda = 5 \text{ km}$, ipotizzando una profondità media $h = 0.5 \text{ km}$ ($\lambda/h = 10$, per cui non è più valida l'approssimazione di onda lunga) si ottiene una distanza di circa 12.5 km: gli effetti dispersivi in questo caso, quindi, si manifesteranno su distanze molto più brevi. Generalmente, infine, si considerano più dispersive le onde generate da frane sabaeree rispetto a quelle sottomarine.

c) *Interazione con la costa.* Gli tsunami da frana mostrano alcune differenze rispetto a quelli generati da altre sorgenti anche nell'impatto a costa. Generalmente, infatti, essi mostrano effetti molto più consistenti a livello locale, nelle coste vicine alla sorgente, che poi si riducono molto velocemente all'aumentare della distanza. Questa peculiarità è stata più volte osservata, e nel lavoro di Okal & Synolakis (2004) è stata proposta una metodologia per distinguere il tipo di sorgente di tsunami basandosi sulla distribuzione dei run-up lungo la costa. Un altro fenomeno, tipico di tutti gli tsunami ma particolarmente accentuato nel caso di onde generate da frana, è quello della risonanza dei bacini costieri, la quale può provocare notevoli amplificazioni di un segnale oscillatorio in ingresso. Questo fenomeno dipende dalla geometria del bacino stesso, che ne determina alcune frequenze tipiche di oscillazione: se lo tsunami presenta periodi di oscillazione con valori che coincidono con uno di questi modi tipici, l'intero bacino può entrare in risonanza. Questi fenomeni sono molto evidenti nei porti o nei fiordi, ad esempio. Soprattutto per i primi, i modi fondamentali di oscillazione hanno spesso valori di periodo di qualche minuto, e sono quindi più facilmente soggetti ad essere eccitati da tsunami generati da frana, che, come già visto, hanno periodi tipici di oscillazione di tale ordine di grandezza.

6.2. Dati minimi necessari, dettaglio necessario nella ricostruzione, tipi di software

La premessa fondamentale alle considerazioni che seguiranno riguarda i codici numerici utilizzati nell'ambito del progetto H&RA-Lacinia: la simulazione della dinamica degli scenari di frana e della propagazione delle onde da questi generate è stata effettuata tramite i codici numerici UBO-BLOCK (Tinti *et al.*, 1997) e UBO-TSUFDF (Tinti e Tonini, 2013). Quindi, la descrizione delle procedure effettuate e dei dati necessari riguarda specificamente gli input e il formato richiesto per l'applicazione di tali algoritmi di calcolo. Alcune considerazioni, comunque, possono essere ritenute valide in linea generale.

La prima considerazione riguarda proprio i codici numerici utilizzati: il codice UBO-BLOCK permette di ricostruire l'intera serie temporale della forma e della dinamica della frana, fornendo in questo modo l'input dinamico di generazione del maremoto (punto *a* della sezione precedente). Per quanto riguarda i fenomeni dispersivi (descritti al punto *b* della sezione precedente), il codice UBO-TSUFDF non è in grado di gestirli: le simulazioni avvengono quindi sempre considerando tsunami in approssimazione di onda lunga (le limitazioni che emergono da tale approccio verranno brevemente descritte nella sezione successiva). Per descrivere più nel dettaglio le ampiezze a costa e verificare eventuali fenomeni di risonanza a costa, infine (punto *c* della sezione precedente), UBO-TSUFDF permette di aumentare la risoluzione della griglia di calcolo in alcune aree tramite la tecnica del *grid nesting*, che consente di simulare la propagazione dello tsunami con griglie di calcolo telescopiche, a passo spaziale minore.

Per simulare un moto franoso tramite UBO-BLOCK, quindi, è necessario ricostruire adeguatamente la morfologia iniziale dello scenario, cioè la conformazione iniziale della massa franata e della superficie sulla quale essa si muoverà. Il dettaglio del dato dipende in gran parte dal dominio su cui si vuole valutare l'effetto delle onde generate dalla frana. Se si prende un dominio esteso, di decine di km, la griglia computazionale per la simulazione dello tsunami non potrà essere troppo fitta, per evitare tempi di calcolo eccessivi. Se ad esempio si opta per un passo spaziale di 100 m, bisogna valutare se tale spaziatura è in grado di descrivere adeguatamente il corpo di frana. Operativamente, si può considerare come soglia minima di adeguata caratterizzazione della massa un centinaio di punti nello spazio. Nei casi in cui l'area interessata dal franamento sia coperta da un numero minore di punti, è preferibile infittire la griglia e procedere in seguito a interpolare i dati ottenuti sulla griglia di maremoto a passo maggiore.

Per le simulazioni degli tsunami solitamente si procede a studiare gli effetti su scala regionale, quindi su un dominio più ampio a bassa risoluzione (cioè, passo spaziale maggiore), per poi concentrare l'attenzione su aree costiere specifiche che si ritiene di specifico interesse: zone particolarmente colpite da onde di ampiezza considerevole, oppure strutture costiere come i porti in cui gli effetti di risonanza possono essere accentuati. Per le griglie a passo maggiore ci si può affidare a database pubblici che ormai consentono di descrivere batimetrie su scala regionale con passo di un centinaio di metri, più che sufficienti per lo scopo delle simulazioni; se si vuole dettagliare meglio la batimetria e la zona costiera bisogna invece affidarsi a dati a risoluzione maggiore, che permettano di costruire griglie locali con passo spaziale dell'ordine di 10 m o anche meno (la spaziatura delle griglie più fini dipende anche dallo scopo dello studio).

6.2.1. Errori da non fare, limiti del metodo, risultati attesi

La realizzazione di uno scenario di frana e la modellazione della relativa dinamica necessitano sempre di una serie di approssimazioni e semplificazioni, che permettano di modellare il fenomeno e trarre indicazioni sulle sue conseguenze in termini di pericolosità. La massa iniziale va quindi sempre ricostruita in modo che sia rappresentata da un numero sufficiente di punti di griglia (si vedano le considerazioni nella sezione precedente); d'altra parte, raffinare eccessivamente la risoluzione provoca un rapido aumento dei tempi di calcolo, a fronte del quale non si apprezzano eccessive differenze in termini di risultato. In breve, non è necessario, soprattutto per frane sottomarine, eccedere nel dettagliare la massa.

La realizzazione delle griglie di calcolo per lo tsunami è un'operazione delicata: soprattutto il passaggio tra le celle di acqua e quelle di terra richiede particolare attenzione, in quanto è la maggior fonte di instabilità numeriche, che producono risultati errati. Una volta interpolati i dati grezzi a disposizione sulla griglia regolare, necessaria per la simulazione numerica con il codice UBO-TSUFDF, è buona norma controllare il boundary terra-mare per verificare che non ci siano eccessive irregolarità: celle isolate di terra in mezzo al mare e viceversa, eccessivi cambiamenti di quota, e in generale valori di elevazione non compatibili con quelli circostanti. Tale procedura è di difficile automatizzazione, e richiede quindi un lungo lavoro e una buona dose di esperienza dell'operatore nell'individuare le possibili criticità che potrebbero sorgere nella simulazione, causando instabilità numeriche che possano renderne gli output inutilizzabili.

Il principale limite del codice UBO-TSUFDF, nella sua applicazione a tsunami generati da frana, riguarda il fatto che esso è non-dispersivo. È quindi adatto a casi in cui è valida l'approssimazione di onda lunga: ciò vale sicuramente per gli tsunami sismoindotti, mentre per quelli generati da frana va valutata la distanza alla quale la dispersione produce effetti non più trascurabili. Nella sezione 6.1, punto *b*, è stata presentata una metodologia per quantificare tale distanza: nei casi studiati per il progetto H&RA Lacinia, comunque, si ottiene che gli effetti dispersivi diventano prevalenti per distanze che sono al di fuori del dominio computazionale utilizzato, e quindi dell'area studiata.

In generale, comunque, trascurare gli effetti dispersivi produce una sovrastima degli effetti delle onde che impattano a costa: in termini di valutazione della pericolosità e gestione dell'emergenza e del rischio ciò può comunque ricadere nei margini di incertezza e di sicurezza che è sempre buona norma attuare quando si simulano fenomeni naturali, specialmente quelli complessi e non-lineari come i maremoti generati da frana.

7. Caratterizzazione della vulnerabilità ed esposizione rispetto ai terremoti dei territori prospicienti un campo di produzione offshore

Secondo la definizione fornita dallo United Nations Office for Disaster Risk Reduction (Ufficio delle Nazioni Unite per la Riduzione del Rischio di Disastri) - UNDRR (<https://www.preventionweb.net/>), la vulnerabilità descrive le condizioni che rendono individui, comunità, beni e sistemi maggiormente suscettibili rispetto all'impatto dei diversi pericoli, compresi i terremoti. Il livello di vulnerabilità di una comunità è determinato da una combinazione di diversi fattori, tra cui la condizione dell'edificato e delle infrastrutture, la consapevolezza dei pericoli, l'organizzazione della pubblica amministrazione, la gestione dell'ordine pubblico, l'organizzazione delle competenze in tutti i campi della gestione delle catastrofi. È evidente che la vulnerabilità riferita a comunità o sistemi socio-economici è un concetto molto complesso e articolato, difficilmente quantificabile. Per questo motivo spesso si ricorre a una distinzione tra vulnerabilità fisica e vulnerabilità sociale, riferendo la prima soprattutto agli edifici e alle infrastrutture, la seconda alle comunità.

L'esposizione (<https://www.preventionweb.net/>) rappresenta la presenza di persone, infrastrutture, abitazioni, capacità produttive e altri beni materiali situati in zone soggette a pericoli, quali i terremoti. Le misure di esposizione possono includere il numero di persone o il tipo di beni in un'area.

7.1. Costruzione database delle strutture e infrastrutture esposte al rischio sismico

La gestione dei dati raccolti relativi alle strutture ed infrastrutture potenzialmente esposte al rischio per caratterizzarne la vulnerabilità sismica e l'esposizione può essere efficacemente condotta costruendo una banca dati su base cartografica georeferenziata (Geographic Information System, GIS).

Per il reperimento dei dati, è utile consultare le banche dati nazionali disponibili e, qualora lo studio sia riferito ad uno specifico territorio, si raccomanda il coinvolgimento delle autorità locali (p.es. Regioni, Province, Comuni) al fine di raccogliere informazioni sufficientemente dettagliate per la caratterizzazione della vulnerabilità e dell'esposizione. Inoltre, è importante raccogliere dati dai gestori delle infrastrutture (p.es. gestori della rete di strade statali e autostrade, autorità portuali, ecc.). A titolo di esempio, si riporta nelle tabelle seguenti la tipologia di dati utili per caratterizzare, a scala nazionale, una serie di strutture ed infrastrutture, tra cui l'edilizia residenziale (Tabella 4), le scuole (

Tabella 5) ed alcune componenti della rete di trasporto (Tabella 6).

Tabella 4: Dati per la caratterizzazione, a scala nazionale, della vulnerabilità sismica e dell'esposizione nel caso dell'edilizia residenziale.

Elemento esposto	Descrizione del dato	Origine del dato
Edilizia residenziale	Numero di edifici, numero di abitazioni, popolazione residente e superficie abitativa. Gli edifici sono caratterizzati dal materiale di costruzione, anno di costruzione (fascia d'età) e numero di piani.	15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011

Tabella 5: Dati per la caratterizzazione, a scala nazionale, della vulnerabilità sismica e dell'esposizione nel caso delle scuole.

Elemento esposto	Descrizione del dato	Origine del dato
Scuole	Posizione dell'edificio scolastico (indirizzo e numero civico), tipologia delle strutture verticali e orizzontali, numero dei piani, anno di costruzione e numero degli studenti ospitati.	Censimento Anagrafe dell'Edilizia Scolastica (2005) del Ministero dell'Istruzione

Tabella 6: Dati per la caratterizzazione, a scala nazionale, della vulnerabilità sismica e dell'esposizione nel caso delle infrastrutture di trasporto della rete viabilistica.

Elemento esposto	Descrizione del dato	Origine del dato
Ponti stradali	Posizione dell'opera (coordinate geografiche), identificativo gestore, nome opera, tipo strada, tratta, progressiva chilometrica iniziale e finale, tipo tracciato, anno di progettazione, categoria ponte, interventi eseguiti, comune di appartenenza, stima della larghezza dell'impalcato, tipologia strutturale (i.e. ponte a travata, ponte ad arco ecc.), luce media delle campate, altezza media degli elementi verticali, materiale degli elementi verticali, rapporto freccia luce (solo per ponti ad arco), presenza dispositivi di ritegno sismico (solo per ponti a travata).	Gestori infrastrutture, open street map, google street view.
Gallerie	Posizione dell'opera (coordinate geografiche relative a inizio e fine opera), nome opera, ubicazione, progressiva di inizio e fine, codice strada appartenenza, profondità, tipologia.	
Opere di sostegno	Posizione dell'opera (coordinate geografiche relative a inizio e fine opera), ubicazione, progressiva inizio e fine, comune di appartenenza, tipologia.	
Viabilità stradale	Posizione del tratto stradale (coordinate geografiche relative a inizio e fine opera), tracciato, nome, nome secondario, classifica tecnico funzionale, classifica amministrativa.	

Per una valutazione a scala locale, le informazioni menzionate in precedenza dovrebbero essere integrate con dati di dettaglio. Per l'edilizia residenziale, ad esempio, il dato dovrebbe poter essere raffinato considerando la distribuzione degli edifici, ad esempio, nelle sezioni censuarie presenti all'interno del Comune; per le scuole e le infrastrutture di trasporto, dati di dettaglio potrebbero essere ottenuti mediante sopralluoghi effettuati al sito di ubicazione dell'opera in esame.

Con riferimento ad un porto marittimo, ad esempio, oltre ai dati generali, quali coordinate geografiche, mare su cui si affaccia il porto, Regione, Provincia e Comune di appartenenza, ente che gestisce il porto, categoria e classe del porto, quadrante dei venti dominanti, tipologia fondali, profondità minima e massima dei fondali, funzione prevalente del porto, ecc., sarebbe auspicabile acquisire dalle autorità che sovrintendono il porto:

- planimetria del porto in esame;
- batimetria della porzione di mare prospiciente il porto;

- ubicazione e dati tecnici relativi alle banchine, e.g. destinazione d'uso, tipologia strutturale (inclusa sezione trasversale rappresentativa di ciascuna tipologia di banchina), stato di conservazione attuale, estensione dell'area retroportuale, ecc.;
- ubicazione e caratteristiche tecniche delle infrastrutture portuali, e.g. attrezzature per carico/scarico di merci, componenti del sistema elettrico, serbatoi per lo stoccaggio di merci, ecc.
- risultati di prove per la caratterizzazione geotecnico-sismica dei terreni nell'area portuale;

Con particolare riferimento ad un ponte specifico, i dati da reperire dovrebbero essere:

- numero di campate;
- tipologia dell'opera (p.es. ponte ad arco, ponte a travata, ecc.) e schema statico;
- destinazione d'uso (cioè, tipologia di opera servita);
- tipologia di tracciato;
- anno di progettazione, anno di costruzione ed eventuali interventi eseguiti;
- caratteristiche geometriche: luce delle campate, rapporto freccia/luce (per ponti ad arco); altezza degli elementi verticali; sezione dei principali elementi costituenti (impalcato, pile, spalle ecc.);
- materiale costituente i principali elementi (i.e. impalcato, elementi verticali);
- fenomeni di degrado presenti, entità e dimensioni;
- informazioni aggiuntive specifiche per ponti a travata:
 - o tipologia di apparecchi di appoggio e principali grandezze che li caratterizzano (resistenza, coefficiente d'attrito, ecc.);
 - o presenza di dispositivi di ritegno sismico;
- informazioni aggiuntive specifiche per ponti ad arco:
 - o timpani (spessore, altezza, materiale);
 - o rinfiacco (altezza, materiale, peso di volume e angolo d'attrito del materiale);
 - o riempimento (materiale, peso di volume e angolo d'attrito del materiale);
 - o parapetto (altezza, spessore, tipologia e peso di volume del materiale).

In linea generale, occorre procedere ad un incremento del livello di conoscenza dell'asset esposto al rischio, coerentemente con la scala geografica dell'area considerata.

Congiuntamente ai dati relativi alle strutture ed infrastrutture esposte al rischio, qualora lo scenario di scuotimento utilizzato come input sia riferito a bedrock in roccia e morfologia piana, si suggerisce anche il reperimento di dati per la caratterizzazione geomorfologica del territorio in esame e della tipologia di suolo su cui le opere in esame sono ubicate. Tra i dati disponibili nella letteratura tecnica a scala nazionale, si menziona il modello digitale italiano del terreno (Digital Elevation Model, DEM) TINITALY, caratterizzato da una risoluzione spaziale di 10 m (Tarquini *et al.* 2007, 2017). Inoltre, è fruibile per il territorio nazionale la mappa della velocità equivalente delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità (V_{s30}) proposta da Mori *et al.* (2020), a partire da una classificazione del suolo condotta a scala nazionale e basata sull'analisi congiunta delle caratteristiche geomorfologiche del territorio italiano e di una serie di dati da indagini geognostiche provenienti da studi di microzonazione sismica condotti a scala comunale (circa 35000 sondaggi e 11300 profili Vs).

È importante precisare che, qualora ci si riferisca ad una scala di analisi più dettagliata (p.es. alla scala di una specifica opera), è opportuno acquisire risultati di analisi più raffinate, quali studi della risposta sismica locale condotti a partire da una accurata caratterizzazione geotecnica dei depositi di terreno dei siti di ubicazione delle strutture/infrastrutture in esame.

7.2. Definizione delle curve di fragilità

Per la definizione della propensione al danno di un sistema a seguito di un evento sismico di prefissata severità, possono essere efficacemente impiegate le curve di fragilità; tali curve rappresentano matematicamente la vulnerabilità sismica del sistema considerato. Le curve di fragilità relative a una classe di edifici o a una tipologia infrastrutturale sono funzioni matematiche che esprimono la probabilità di raggiungere o superare diversi livelli di danno in funzione di uno o più parametri rappresentativi dello scuotimento sismico (p.es. il picco di accelerazione al suolo, PGA); tipicamente, sono descritte da una distribuzione cumulativa lognormale.

Utilizzando metodi meccanici, ossia metodi basati su un modello matematico del comportamento sismico della struttura/infrastruttura in esame, il modello che riproduce il comportamento della struttura può essere messo in relazione con il livello di conoscenza acquisito.

Nella Tabella 7 si riporta una selezione di curve di fragilità disponibili nella letteratura tecnica per classi di edifici e per infrastrutture di trasporto, cioè ponti, gallerie, opere di sostegno e banchine portuali, sviluppate per il contesto italiano. Per ciascun modello, sono riportati i parametri rappresentativi dello scuotimento sismico richiesti in ingresso.

Tabella 7: Selezione di curve di fragilità nella letteratura tecnica per la definizione della vulnerabilità sismica di edifici ed infrastrutture.

Strutture/infrastrutture		Selezione curve di fragilità	Parametro scuotimento sismico in ingresso richiesto
Edifici (e.g. edilizia residenziale, scolastica, ecc.)		Borzi <i>et al.</i> (2008a, b), Faravelli <i>et al.</i> (2019)	Picco di accelerazione al suolo
Infrastrutture di trasporto	Ponti a travata	Bellotti <i>et al.</i> (2019a, b)	Picco di accelerazione al suolo
	Ponti ad arco	Morandi <i>et al.</i> (2019)	
	Opere di sostegno	Cosentini e Bozzoni (2022)	Picco di velocità oppure picco di accelerazione su roccia
	Gallerie	Andreotti e Lai (2019)	Picco di accelerazione su roccia
	Banchine portuali a blocchi	Calabrese e Lai (2013, 2016)	Picco di accelerazione su roccia
	Banchine portuali su pali	Özcebe <i>et al.</i> (2022)	Picco di velocità su roccia

7.3. Sviluppo dei motori per il calcolo degli scenari di danno e delle relative perdite

Per la stima di scenari di danno e delle relative perdite, con riferimento alle strutture ed infrastrutture ubicate nell'area di impatto degli eventi potenzialmente innescati, occorre sviluppare dei motori di calcolo che consentano di combinare la vulnerabilità e l'esposizione con lo scuotimento atteso al sito.

Gli scenari di danno forniscono la probabilità di raggiungere un determinato livello di danno dato un certo scenario di scuotimento. La probabilità di danno può essere calcolata direttamente mediante ciascuna curva di fragilità utilizzando in ingresso uno o più parametri rappresentativi dello scuotimento sismico al sito.

Il calcolo delle perdite viene condotto utilizzando delle funzioni di conseguenza, che mettono in relazione il danno con la perdita oggetto di interesse: ci si può, infatti, riferire alle perdite umane oppure a quelle economiche o all'inagibilità dell'elemento esposto al rischio.

8. Modellazione dell'impatto e delle perdite connesse ai terremoti modellati sui territori prospicienti un campo di produzione offshore

Al fine di valutare una stima dell'impatto dovuto a terremoti potenzialmente innescati offshore su strutture ed infrastrutture ubicate a terra nei territori di interesse, è necessario:

- costruire una banca dati su base cartografica georeferenziata GIS delle strutture ed infrastrutture potenzialmente esposte al rischio. Come già illustrato nella Sezione 7 del presente rapporto, tale banca dati ha lo scopo sia di gestire i dati tecnici relativi alle strutture e infrastrutture che consentano la definizione delle curve di fragilità per la valutazione della vulnerabilità sismica, sia i dati di esposizione necessari per il calcolo delle perdite indotte in caso di evento sismico;
- quantificare la vulnerabilità sismica delle strutture e delle infrastrutture potenzialmente colpite, cioè la loro propensione a danneggiarsi se soggette a scuotimento sismico;
- definire gli scenari di scuotimento associati agli eventi potenzialmente innescati (o disporre come dato di input ove già disponibile);
- sviluppare gli strumenti informatici per effettuare il calcolo dello scenario di danno e delle perdite;
- effettuare il calcolo degli scenari di danno e delle perdite, e renderli efficacemente fruibili in un WebGIS.

Le suddette fasi sono illustrate graficamente nello schema in Figura 5, che rappresenta l'approccio metodologico per la modellazione dell'impatto e delle perdite connesse ai terremoti innescati.

È importante ricordare che il dettaglio di conoscenza dei dati di esposizione e, di conseguenza, il livello di accuratezza delle valutazioni di vulnerabilità devono essere adeguati alla scala geografica della/e area/e oggetto di studio.

Il calcolo delle perdite viene condotto utilizzando dei coefficienti che mettono in relazione il danno con la perdita oggetto di interesse: le perdite possono essere espresse in termini di vite umane, oppure come perdite di tipo economico, o determinate dall'inagibilità dell'elemento costruito esposto al rischio. Per gli edifici, si può fare riferimento alle relazioni tra livelli di danno e perdite utilizzate nel National Risk Assessment (NRA2018 - documento di valutazione del rischio nazionale) per ottenere le mappe di rischio sismico del patrimonio residenziale italiano (Dolce *et al.*, 2021). Per quanto riguarda le perdite umane, ad esempio, la probabilità che gli occupanti di un edificio subiscano ferite o perdano la vita viene valutata in relazione ai soli livelli di danno D4-Danno Severo e D5-Collasso (Tabella 8). Sebbene il numero atteso di vittime e feriti possa variare a seconda del tipo di struttura dell'edificio (cioè, distinguendo tra edifici in muratura o edifici in cemento armato-c.a.), nel NRA2018 le valutazioni sono state eseguite assegnando una percentuale di vittime e feriti attesi rispetto alla popolazione residente in edifici con danno di livello D4 e D5, indipendentemente dal materiale da costruzione.

Tabella 8: Percentuali per il calcolo delle perdite umane nel caso di edifici residenziali danneggiati.

		Livello di danno	
		D4	D5
Perdite umane	Vittime	1 %	10 %
	Feriti	5 %	30 %

È importante evidenziare che, come visto in precedenza, gli scenari di scuotimento possono essere calcolati sia con riferimento a condizioni ideali di substrato roccioso affiorante e superficie topografica orizzontale, che tenendo conto di eventuali effetti di amplificazione sismica (i.e. litostratigrafica e/o topografica). Per il calcolo degli scenari di danno occorre utilizzare in input il/i parametro/i di scuotimento sismico richiesto dalle curve di fragilità adottate. Ad esempio, con riferimento ai modelli di fragilità in Tabella 7, per il calcolo degli scenari relativi a edilizia residenziale, scuole e ponti sono da considerare le mappe di scuotimento che includono gli effetti di sito; per quanto concerne gallerie, opere di sostegno e infrastrutture portuali sono da utilizzare in input le mappe di scuotimento su roccia.

In Figura 6 è mostrato, a titolo di esempio, lo scenario di danno calcolato nell'ambito del progetto H&RA Lacinia per gli edifici residenziali del Comune di Crotona: la prima tabella mostra il numero stimato di edifici che raggiungono o superano i livelli di danno da D1 (danno lieve) a D5 (collasso); la seconda tabella riporta l'impatto in termini di numero stimato di edifici agibili, inagibili a breve termine, inagibili a lungo termine e crollati; la terza tabella riporta il numero di vittime e feriti stimato a partire dalle percentuali sopra descritte; infine, l'ultima tabella mostra la stima delle perdite economiche espresse in Euro.

Ancora a titolo d’esempio, la Figura 7 mostra lo scenario di danno e le perdite calcolate per una scuola, sempre del Comune di Crotona. Le tabelle di Figura 7 riportano la probabilità di raggiungere i 5 livelli di danno da D1 a D5, le probabilità di inagibilità e le perdite economiche in euro.

percentile	D1	D2	D3	D4	D5
50	2400	1425	390	36	18

percentile	Agibili	Inagibili a breve termine	Inagibili a lungo termine	Crolli
50	5118	555	230	18

percentile	Vittime	Feriti
50	13	42

percentile	Perdite economiche
50	149959817.26 €

Figura 6 – Esempio di uno scenario di danno e relative perdite calcolato per l’edilizia residenziale nel Comune di Crotona.

Danno	Percentile	Probabilità di superamento
Danno 1	50	100 %
Danno 2	50	100 %
Danno 3	50	0 %
Danno 4	50	0 %
Danno 5	50	0 %

percentile	Prob. Agibile	Prob. Inagibile a breve termine	Prob. Inagibile a lungo termine	Prob. Crolli
50	60.00 %	40.00 %	0.00 %	0 %

percentile	Perdite economiche
50	810000.00 €

Figura 7 – Esempio di uno scenario di danno e relative perdite calcolato per un edificio scolastico del Comune di Crotona.

8.2. Rappresentazione dei risultati su piattaforma webGIS

Per presentare in modo organico i risultati ottenuti e consentire una immediata consultazione dei dati e delle mappe, può essere sviluppato un WebGIS, cioè un sistema informativo geografico (GIS) fruibile tramite web (si veda, a titolo d'esempio, Bozzoni *et al.*, 2018; Borzi *et al.*, 2021). Un WebGIS rappresenta l'estensione al web degli applicativi nati e sviluppati per gestire la cartografia numerica.

Le principali funzionalità tipiche dell'interfaccia client di un WebGIS sono le seguenti: rappresentazione on-line di mappe cartografiche, quali perimetri comunali, aree abitate, ubicazione di strutture e tracciati di infrastrutture strategiche; uso di funzioni di zoom in, zoom out, pan, consultazione coordinate; visualizzazione di schede informative, contenenti le informazioni disponibili per l'elemento di interesse; personalizzazione dei contenuti, come la tematizzazione degli strati informativi.

La piattaforma WebGIS dovrebbe consentire:

- la visualizzazione delle mappe tramite web, sfruttando i tool di navigazione;
- la consultazione della banca dati costruita e l'esame dei dati tecnici relativi alle strutture ed infrastrutture esposte al rischio;
- la consultazione delle mappe di scuotimento utilizzate come dati in input;
- la consultazione dei risultati calcolati in termini di scenari di danno e di perdite;
- la tematizzazione dei layer relativi agli scenari di danno;

l'esportazione dei risultati calcolati in formato standard, ad esempio shapefile

9. Caratterizzazione della vulnerabilità ed esposizione rispetto ai maremoti dei territori prospicienti un campo di produzione offshore

9.1. Costruzione del database delle strutture e infrastrutture esposte al rischio di maremoto

La caratterizzazione della vulnerabilità ed esposizione del patrimonio costruito rispetto ai maremoti è in primo luogo basata sulla conoscenza delle strutture ed infrastrutture potenzialmente esposte a rischio inondazione. A tal fine, occorre far riferimento a banche dati a livello nazionale (ISTAT) o territoriale, effettuare sopralluoghi o fare uso di strumenti quali Google Street View o Open Street Map. Gli strumenti per il reperimento dati per la caratterizzazione dell'esposizione sono gli stessi già illustrati nel caso di terremoto.

La definizione degli attributi significativi per lo studio di fragilità e vulnerabilità deve seguire analisi specifiche di simulazione del comportamento strutturale per azioni indotte da maremoto. In particolare, il materiale da costruzione, l'epoca costruttiva e il numero di piani, la distribuzione delle aperture, sono attributi significativi per la caratterizzazione di esposizione e vulnerabilità di edifici. Per i ponti invece, gli attributi significativi sono la tipologia strutturale, luce delle campate e altezza delle pile. La preliminare stima della vulnerabilità delle tipologie esistenti sul territorio può facilitare la definizione di classi di vulnerabilità/fragilità e ridurre il numero di set di curve di fragilità necessarie per la stima delle perdite.

9.2. Caratterizzazione della vulnerabilità

Di seguito si riporta la classificazione della vulnerabilità per maremoto dell'edilizia esistente sul territorio (Del Zoppo *et al.*, 2022a) (Tabella 9).

Tabella 9: Classi di vulnerabilità per edilizia residenziale per maremoti (dettagli in Del Zoppo *et al.*, 2022a)

CLASSE DI VULNERABILITA'	MURATURA	CALCESTRUZZO ARMATO
A	<i>Edifici Ante 1919 e post 1981</i> Progettazione gravitazionale 1-2 piani	
B	<i>Edifici tra 1919 e 1981</i> Progettazione gravitazionale 1-2 piani <i>Edifici post 1919</i> Progettazione sismica 1-2 piani	
C1	<i>Edifici tra 1919 e 1981</i> Progettazione gravitazionale 3-5 piani <i>Edifici post 1981</i> Progettazione sismica 3-5 piani	<i>Edifici Ante 1981</i> Progettazione gravitazionale 1-3 piani
C2	<i>Edifici Ante 1919 e post 1981</i> Progettazione gravitazionale 3-5 piani	<i>Edifici Ante 1981</i> Progettazione gravitazionale 4-6 piani <i>Edifici Ante 1981</i> Progettazione sismica 1-3 piani

D	<i>Edifici tra 1919 e 1981</i> Progettazione sismica 3-5 piani	<i>Edifici Ante 1981</i> Progettazione sismica 4-6 piani <i>Edifici post 1981</i> Progettazione sismica 1-6 piani
---	--	--

Per la caratterizzazione della vulnerabilità, è importante notare che il comportamento di strutture e infrastrutture durante un maremoto è sostanzialmente diverso dal comportamento in caso di terremoto. Pertanto, per la valutazione della propensione al danneggiamento di strutture e infrastrutture soggette a maremoto è necessario utilizzare curve di fragilità opportunamente sviluppate per le tipologie strutturali e infrastrutturali presenti sul territorio in esame. Pochi set di curve di fragilità empiriche (ovvero derivanti da precedenti maremoti) sono disponibili nella letteratura tecnica e nessuna di esse è riconducibile alle specificità del patrimonio costruito a livello nazionale. Pertanto, è necessario utilizzare curve di fragilità o vulnerabilità analitiche specificatamente sviluppate per le tipologie edilizie dell'area di studio. La procedura per sviluppare curve di fragilità analitiche per maremoto consiste nel:

- definire una classe di strutture/infrastrutture sulla base dei dati di esposizione;
- generare un portfolio di strutture/infrastrutture statisticamente rappresentativo del patrimonio esistente, ovvero con caratteristiche geometriche e meccaniche derivanti dai dati di esposizione raccolti;
- calcolare la propensione al danneggiamento di strutture/infrastrutture soggette ad azioni indotte da maremoti, ovvero a distribuzioni di pressioni idrostatiche e idrodinamiche.

Per valutare la propensione al danneggiamento occorre utilizzare strumenti di analisi specifici, come la metodologia di analisi *pushover* ad altezza variabile per edifici in cemento armato (Del Zoppo *et al.*, 2021, 2022b) e metodologie di analisi locali per edifici in muratura (Belliazzi *et al.*, 2020, 2021).

Date le elevate incertezze sulla stima della velocità del flusso durante le simulazioni degli scenari di inondazione, la misura di intensità più affidabile per la definizione di curve di fragilità/vulnerabilità è l'altezza dell'onda, H_w , propagata sul territorio attraverso opportune mappe di ingressione che tengano conto della effettiva rugosità e altimetria dell'area. La velocità del flusso viene considerata come incertezza durante il calcolo delle azioni indotte sulle strutture/infrastrutture per lo sviluppo delle curve di fragilità/vulnerabilità.

È inoltre necessario definire delle scale di danno (Tabella 10) per classificare in modo congruente la propensione al danneggiamento di strutture e infrastrutture, in modo da sviluppare curve di fragilità associate a ciascun livello di danno. Si riportano di seguito i livelli di danno meccanici definiti per edifici in cemento armato e muratura per la produzione delle curve di fragilità.

Tabella 10: Scala di danno per edifici per la stima della vulnerabilità da maremoti.

		SLIGHT	MODERATE	EXTENSIVE	COMPLETE
CALCESTRUZZO ARMATO	Strutturale	Prima fessurazione del calcestruzzo dei pilastri	Primo raggiungimento della metà della deformazione di snervamento nei pilastri	Primo raggiungimento della deformazione di snervamento nei pilastri O Crisi a taglio di un pilastro del piano terra	Raggiungimento del massimo taglio alla base
	Non-strutturale	N.A.	Prima fessurazione della tamponatura fuori dal piano	Collasso della tamponatura fuori dal piano	N.A.
MURATURA	Strutturale	N.A.	Raggiungimento del limite elastico in una parete perimetrale con riferimento ai meccanismi nel piano o fuori piano	Attivazione di un meccanismo nel piano o fuori piano di una parete perimetrale sulla quale non gravano i solai	Attivazione di un meccanismo nel piano o fuori piano di una parete perimetrale sulla quale gravano i solai
	Non-strutturale	Attivazione del meccanismo di ribaltamento rigido del sottofinestra	N.A.	N.A.	N.A.

In Figura 8 sono riportate, a titolo di esempio, le curve di fragilità derivate per gli edifici scolastici presenti sul territorio oggetto di studio del progetto H&RA Lacinia per scuole in cemento

armato e per scuole in muratura. Esse rappresentano, per ciascun livello di danno, la probabilità di danneggiamento P_d in funzione del valore dell'altezza dell'onda al sito dell'edificio scolastico.

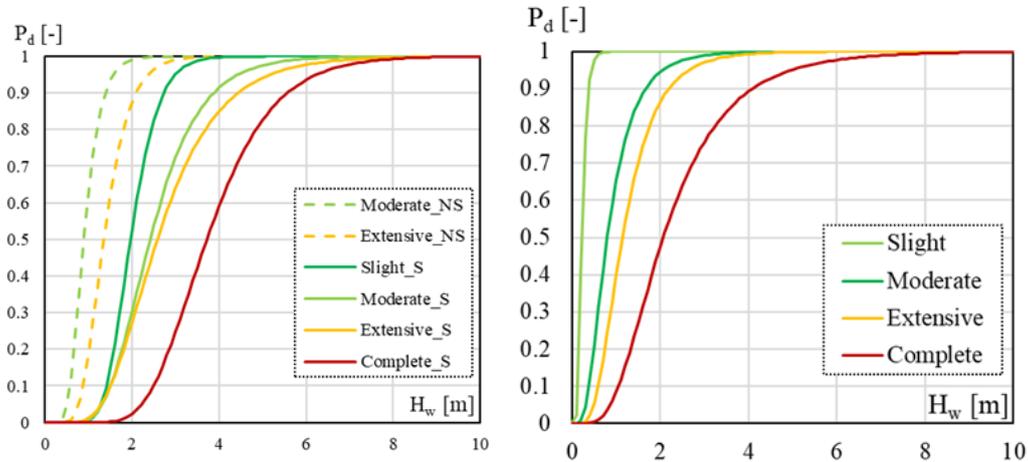


Figura 8 – Curve di fragilità derivate per gli edifici scolastici in cemento armato e muratura presenti sul territorio oggetto di studio.

10. Modellazione dell’impatto e delle perdite connesse ai maremoti modellati sui territori prospicienti un campo di produzione offshore

Al fine di valutare il potenziale impatto associato a maremoti su strutture ed infrastrutture esistenti ubicate nei territori di interesse, la metodologia è in linea generale analoga a quanto già illustrato per l’impatto da terremoti; pertanto, si mettono in evidenza le sole peculiarità che differenziano i due impatti. Nel caso di maremoti è necessario:

- costruire una banca dati su base cartografica georeferenziata GIS del patrimonio edilizio esistente sul territorio di interesse, con attenzione alla classificazione degli attributi significativi per quantificare la vulnerabilità delle strutture durante una inondazione attraverso dati ISTAT o studi territoriali;
- quantificare la vulnerabilità delle strutture e delle infrastrutture potenzialmente colpite, cioè la loro propensione a danneggiarsi durante un maremoto, attraverso l’utilizzo di curve di fragilità opportunamente costruite per le tipologie edilizie presenti sul territorio;
- definire gli scenari di inondazione associati agli eventi potenzialmente innescati (o disporre come dato di input ove già disponibile);
- sviluppare gli strumenti informatici per effettuare il calcolo dello scenario di danno e delle perdite su scala territoriale;
- effettuare il calcolo degli scenari di danno e delle perdite per gli scenari di inondazione.

La metodologia per la stima delle perdite per rischio maremoto è schematicamente illustrata in Figura 9.



Figura 9 – Schema generale della modellazione dell’impatto e delle perdite connesse ai maremoti.

La sovrapposizione della banca dati del patrimonio edilizio esistente sul territorio in ambiente GIS e dello scenario di inondazione consente il calcolo della stima su scala territoriale delle perdite connesse all’evento. In dettaglio, a ciascun edificio/infrastruttura o area censuaria, in funzione del livello di dettaglio dello studio effettuato, è associato un set di curve di fragilità e un valore di altezza d’onda al sito dell’edificio. L’intersezione tra valore di altezza d’onda e curve di fragilità fornisce la probabilità di attingimento di ciascun livello di danno relativamente allo scenario di inondazione considerato. La piattaforma GIS consente sia una valutazione quantitativa del livello di danno raggiunto, sia una rapida visualizzazione grafica della sua distribuzione su scala territoriale, come riportato in via esemplificativa in Figura 10.

Agli specifici livelli di danno definiti per gli scenari di maremoto sono correlati dei coefficienti di perdita in accordo con quanto fatto per gli scenari sismici al fine di produrre stime di perdita congruenti, in termini di vite umane e di perdite economiche.

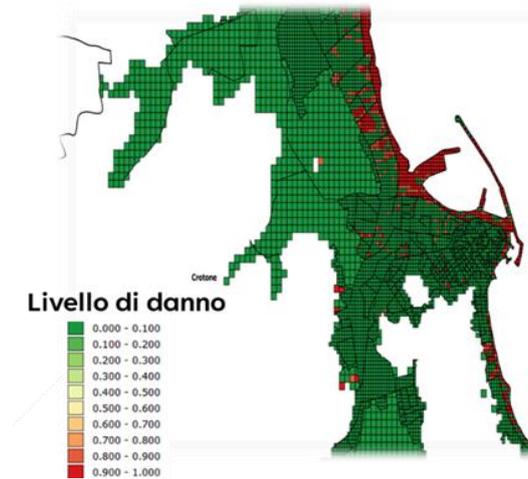


Figura 10 – Figura esemplificativa del livello di danno individuato per uno scenario di inondazione.

11. Caratterizzazione degli effetti geomeccanici e dinamici delle attività svolte in un campo di produzione offshore sul volume crostale circostante

La produzione e/o iniezione di fluidi nel sottosuolo può indurre deformazioni nel volume crostale circoscritto all'interno del campo ma anche nel volume crostale circostante (Figura 11; Ellsworth, 2013). La deformazione indotta da questo tipo di attività può manifestarsi per esempio come subsidenza o sollevamento, riattivazione e scorrimento lungo piani di faglia, ecc. Focalizzandosi sulla riattivazione di faglie, lo scorrimento lungo il piano può avvenire in maniera repentina, generando terremoti (Keranen *et al.*, 2013; Rubinstein *et al.*, 2014; Stabile *et al.*, 2014; Improta *et al.*, 2015, 2017; Candela *et al.*, 2019), oppure in maniera stabile, asismica (Guglielmi *et al.*, 2015; Scuderi & Collettini, 2016). La riattivazione di una faglia esistente potrebbe essere, in linea di principio, favorita da una variazione della pressione di poro legata alla vicinanza dei pozzi di iniezione alla zona di faglia (effetto diretto), o legata alla deformazione indotta dalla risposta poroelastica del volume crostale, sempre come conseguenza della produzione o iniezione di fluidi nel sottosuolo (effetto indiretto; Figura 11). In quest'ultimo caso la riattivazione di una faglia può coinvolgere strutture distanti anche qualche chilometro dai pozzi (Chang & Yoon, 2022). Un altro particolare caso di riattivazione, causata indirettamente dalla variazione della pressione di poro, è quella dovuta al trasferimento di sforzo indotto dalla riattivazione (in modo sismico o asismico) di una faglia vicina ai pozzi su un'altra faglia più distante che, qualora si trovi già in uno stato di sforzo critico, può riattivarsi anch'essa (Guglielmi *et al.*, 2015; Scuderi & Collettini, 2016; Vadacca *et al.*, 2021).

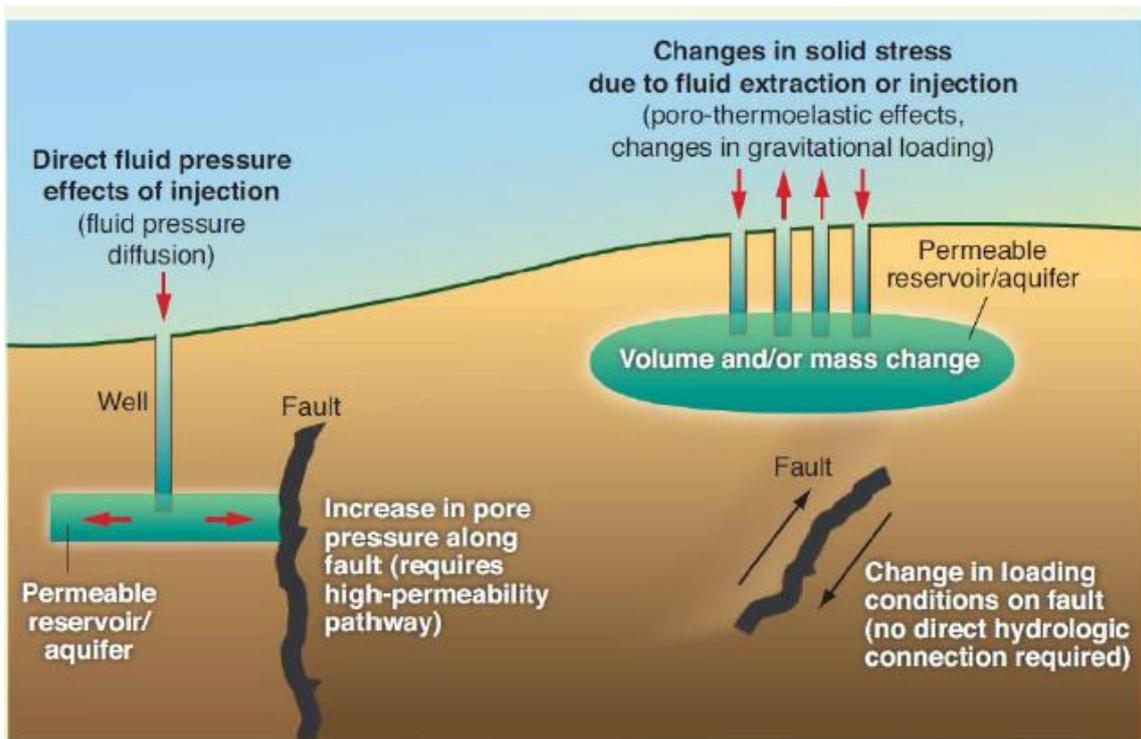


Figura 11 – Effetti diretti e indiretti della variazione della pressione dei fluidi sulla stabilità di una faglia (da Ellsworth, 2013).

Per comprendere come la variazione della pressione di poro indotta dall'iniezione e/o dalla produzione di fluidi nel/dal sottosuolo possa influenzare o meno la stabilità delle faglie, è necessario seguire vari step di analisi, che vanno dalla modellazione geologico-strutturale del sottosuolo fino alle simulazioni numeriche geomeccaniche e all'analisi di stabilità di faglia. La Figura 12 mostra il workflow generale da seguire:

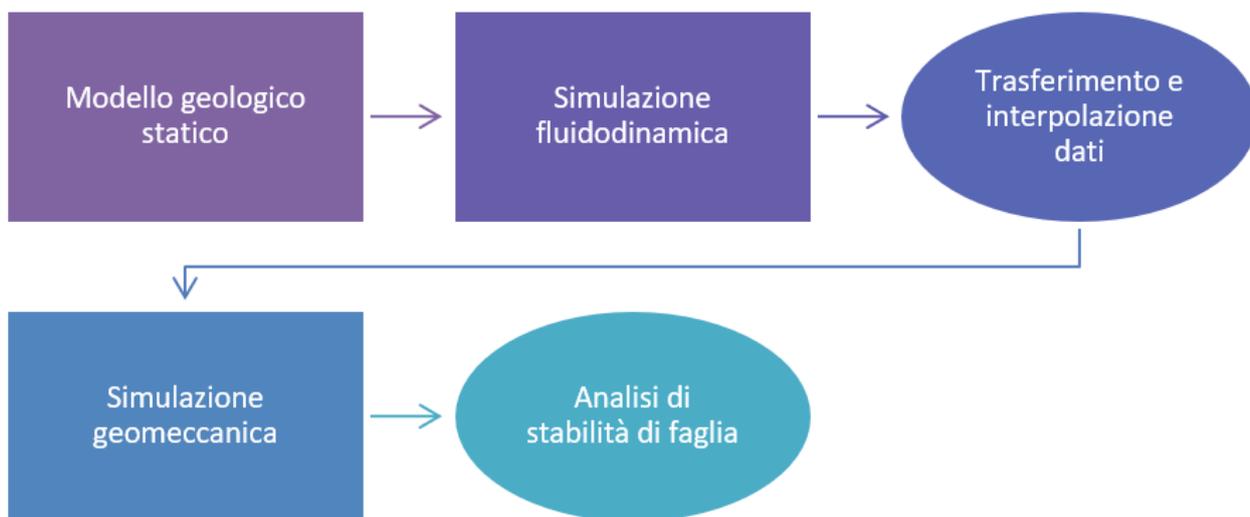


Figura 12 – Workflow geomeccanico per analisi di stabilità di faglia.

11.1. Costruzione del modello geologico statico

La prima parte del workflow prevede la costruzione di un modello geologico statico, che includa tutte le informazioni stratigrafiche e strutturali che caratterizzano il sito di interesse. Per una adeguata ricostruzione del modello geologico è necessario interagire con gli operatori del settore che gestiscono il giacimento oggetto di studio, che dispongono di quantità e qualità significative di dati e informazioni. Le informazioni minime necessarie che l'operatore dovrebbe fornire sono:

- report geologici/geofisici relativi all'area di studio e report di sintesi del giacimento;
- dati di pozzo (ovvero posizione, quota tavola rotary, profondità raggiunta, profilo di deviazione, dati di velocità, well top o comunque informazioni relative alle profondità dei diversi livelli stratigrafici incontrati) e relativi log di pozzo;
- dati sismici (2D e 3D e dati di velocità), sezioni geologiche e mappe di isocrone/isobate/isopache dei principali livelli riconosciuti. Tali dati sono fondamentali per l'interpretazione geologico-strutturale;
- parametri petrofisici di tutti i livelli riconosciuti. I principali parametri petrofisici sono porosità, permeabilità, comprimibilità, net to gross nonché le loro variabilità/eterogeneità.

52

Spesso questi dati sono strettamente associati al volume crostale circoscritto al giacimento, dove si ha un elevato grado di risoluzione delle informazioni che descrivono la geologia del sottosuolo. Per questo motivo sarà necessario raccogliere e interpretare dati di sismica a riflessione e dati sismologici (singoli eventi e sequenze sismiche) anche su scala regionale, così come descritto in precedenza. In questo modo sarà possibile avere informazioni anche sul volume crostale circostante il campo, in modo da identificare le faglie più significative e potenzialmente in grado, qualora attivate, di generare terremoti di magnitudo rilevante ai fini delle stime di danno e perdite sopra illustrate.

Uno dei software maggiormente usati nel campo della modellazione statica di strutture geologiche complesse è Petrel (Schlumberger Ltd, 2022a) di proprietà della Slb. Tale software permette di integrare tutti i dati disponibili come log di pozzo, profili sismici, DEM, mappe batimetriche, ecc., permettendo la ricostruzione dei livelli stratigrafici del sottosuolo e delle geometrie di faglia. Dopo aver definito il modello geologico del sottosuolo è inoltre possibile, direttamente all'interno di Petrel (se successivamente si decide di utilizzare un codice di fluidodinamica in grado di leggere il formato Petrel, come ad esempio Eclipse; Schlumberger Ltd, 2022b), discretizzare il dominio con elementi esaedrici in modo da predisporlo per la simulazione fluidodinamica.

11.2. Costruzione del modello fluidodinamico

In generale, indipendentemente dal codice utilizzato, dopo aver eseguito il modello geologico, si passa alle simulazioni fluidodinamiche. Nella tecnica dei modelli numerici, il flusso di ciascun fluido in giacimento è descritto con l'equazione di Darcy generalizzata, e la conservazione della massa di ciascun fluido è descritta mediante l'equazione di continuità, nella quale si tiene conto anche delle portate di massa dei fluidi erogati e/o iniettati attraverso i singoli pozzi. Il comportamento volumetrico e di fase dei fluidi in giacimento è invece descritto mediante apposite equazioni di stato.

L'equazione risultante dall'inserimento dell'equazione di Darcy generalizzata in quella di continuità, tenendo conto dell'equazione di stato dei fluidi, descrive il comportamento del giacimento. Tale equazione è di tipo differenziale del secondo ordine alle derivate parziali, con coefficienti che sono funzione delle variabili. Per la soluzione di tale equazione con tecniche numeriche è necessario che

essa venga “discretizzata”; pertanto, è fondamentale eseguire la “discretizzazione” del volume di giacimento in “celle” mediante un reticolo opportunamente studiato e, in aggiunta, “discretizzare” il tempo tramite passi temporali.

Diversi codici sia commerciali che open-source sono disponibili per simulare il flusso dei fluidi nel sottosuolo. Alcuni esempi sono Tough3 (<https://tough.lbl.gov/software/tough3/>), OPM (https://opm-project.org/?page_id=19), GeoSIAM (Agate & Guandalini, 2020), FeFlow (<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>) ed Eclipse (Schlumberger Ltd, 2022b). Il software individuato per le simulazioni fluidodinamiche deve permettere di simulare il processo produttivo del giacimento considerando i pozzi presenti e tutte le formazioni che costituiscono il giacimento.

Tutte le proprietà definite nel modello geologico statico vengono acquisite all’interno del modello fluidodinamico, che è costituito da una griglia di calcolo, non necessariamente uguale a quella del modello geologico statico, alla quale vengono associate le proprietà della roccia. La discretizzazione del modello fluidodinamico deve essere realizzata coerentemente con il metodo numerico utilizzato nel codice adottato e deve tenere conto degli aspetti fluidodinamici che caratterizzano il giacimento; pertanto, la griglia di calcolo deve essere opportunamente raffinata laddove ci si aspettano gradienti di velocità maggiori, come ad esempio in prossimità dei pozzi e delle faglie, o in prossimità di passaggi fra formazioni con permeabilità molto differenti, o in prossimità del contatto fra due fluidi diversi. In ogni caso va tenuto presente che un aumento eccessivo del numero di elementi del reticolo richiederebbe tempi di calcolo molto lunghi, che potrebbero rendere difficoltosa la realizzazione della simulazione. Il modello fluidodinamico deve essere poi completato inserendo i parametri termodinamici dei fluidi presenti nel giacimento e le loro eventuali variazioni areali e verticali e, in aggiunta, la loro composizione chimica. Vengono inoltre definite le saturazioni iniziali, le curve di permeabilità relativa e la pressione capillare. Definito il modello fluidodinamico, vengono eseguite le seguenti fasi di simulazione numerica: inizializzazione del modello, simulazione della storia produttiva del giacimento e simulazioni predittive finalizzate a indagare il comportamento del giacimento in risposta a programmi futuri di coltivazione.

11.2.1. Inizializzazione del modello

Questa fase è realizzata al fine di simulare lo “stato naturale” indisturbato del sistema fluidodinamico al termine del quale viene verificato il raggiungimento delle condizioni iniziali di equilibrio. In questa fase viene effettuato un controllo sul volume di Gas/Olio Originariamente In Posto (GOIP/OOIP), riprodotto tramite la simulazione a partire dai dati disponibili, oltre alla verifica delle quote di contatto fra i vari fluidi (p.es. Gas-Water Contact o Gas-Oil contact, oppure Oil-Water contact).

11.2.2. Simulazione della storia produttiva del giacimento

In questa fase viene simulata l’attivazione dei pozzi inserendo la portata del fluido, la durata del processo di iniezione/produzione ed eventualmente come le portate variano nel tempo per ognuno dei pozzi attivi nel giacimento. La simulazione viene ritenuta accurata quando si raggiunge una buona corrispondenza tra i dati simulati e quelli misurati, sia in termini di volumi, sia in termini di distribuzione spaziale di pressione e di saturazione dei fluidi (p.es. distribuzione della saturazione della fase acqua o della fase gas). Questa fase viene chiamata “history matching”.

Nelle prime due fasi della simulazione fluidodinamica viene effettuata una calibrazione dei parametri fluidodinamici (p.es. permeabilità relativa); questo processo è molto importante e la sua

realizzazione può richiedere molto tempo. Alla luce di quanto discusso, è evidente che per eseguire le simulazioni fluidodinamiche sono necessarie le seguenti informazioni minime:

- dati di scoperta del giacimento quali la pressione (statica) e la temperatura del giacimento, i volumi dei fluidi in posto (es. GOIP) e il livello della tavola d'acqua;
- dati sulle permeabilità relative e sulle saturazioni relative;
- dati relativi alla storia produttiva del campo, ovvero volumi di fluidi iniettati o prodotti dai vari pozzi e come questi variano nel tempo;
- quote e lunghezze dei tratti produttivi dei pozzi;
- valori di pressione registrati durante la coltivazione, che risultano fondamentali nella fase di history matching.

I risultati delle simulazioni dipendono fortemente dai dati di input; infatti, più informazioni si hanno sulle proprietà dei fluidi e sulle proprietà dei diversi strati geologici, più i risultati numerici saranno attendibili e si avrà un buon matching con i valori misurati.

Il principale risultato della simulazione fluidodinamica è la variazione nel tempo della pressione dei fluidi all'interno del volume di giacimento. Da qui è possibile selezionare ed estrarre le pressioni dei fluidi per alcuni passi di tempo significativi, in modo da ridurre i costi computazionali della successiva simulazione geomeccanica.

11.3. Costruzione del modello geomeccanico

Uno step importante del workflow è quello che vede il trasferimento e l'interpolazione dei valori della pressione dei fluidi dalla griglia di calcolo usata per la simulazione fluidodinamica alla griglia usata invece per la simulazione geomeccanica. Di solito, infatti, vengono usate griglie di calcolo diverse per i due tipi di simulazione, spesso proprio a causa dei diversi metodi numerici che stanno alla base dei due diversi tipi di modellazione. Per esempio, il software Eclipse (usato per le simulazioni fluidodinamiche) si basa sul metodo dei volumi finiti e usa una griglia strutturata, caratterizzata da elementi esaedrici dove la pressione dei fluidi è calcolata al centro di ogni elemento. Al contrario, la maggior parte dei software usati per le simulazioni geomeccaniche si basa sul metodo degli elementi finiti, e la pressione di poro è applicata solitamente ai nodi dell'elemento. In aggiunta, spesso è necessario utilizzare elementi tetraedrici nella costruzione della griglia di calcolo per le simulazioni geomeccaniche, specialmente se le superfici di faglia sono rappresentate in modo esplicito. Infatti, gli elementi tetraedrici meglio si adattano a modelli geologico-strutturali complessi dove sono presenti diverse superfici di faglia spesso intersecate tra loro. Queste considerazioni dimostrano come sia necessaria, dunque, l'implementazione di un codice per il trasferimento e l'interpolazione dei dati scritto ad-hoc a seconda dei casi studio da analizzare e dei software utilizzati (Colucci *et al.*, 2022). Un altro aspetto importante da considerare è che l'estensione del modello geomeccanico è di solito più grande di quella del modello fluidodinamico, sia per evitare effetti di bordo e sia per valutare, ad esempio, le deformazioni indotte dalla variazione dei fluidi all'interno del volume crostale circoscritto al giacimento su quello più distante. Per questo motivo, nel codice di interpolazione deve essere realizzato un sistema per verificare se un determinato punto della griglia geomeccanica, sul quale si vuole calcolare il valore della pressione dei fluidi, ricade all'interno del dominio fluidodinamico. Se il punto considerato risulta interno, allora viene effettuata l'interpolazione con una ben definita tecnica (per esempio: *neighborhood*, *inverse power*, *Kriging*, ecc.), altrimenti si impone un valore di pressione di poro pari

alla pressione idrostatica calcolata in funzione della quota del punto considerato (questo in assenza di ulteriori dati dell'andamento della pressione dei fluidi in profondità al di fuori del giacimento). Il codice di interpolazione, inoltre, deve permettere di assegnare agli elementi della griglia geomeccanica tutte quelle informazioni utili per definire le proprietà dei materiali, qualora questo non possa essere facilmente realizzabile direttamente all'interno del software utilizzato per le simulazioni (Colucci *et al.*, 2022).

Anche per le simulazioni geomeccaniche sono disponibili sia software commerciali (p.es. Abaqus; Abaqus User Manual, 2017), sia open-source (p.es. PyLith; Aagaard *et al.*, 2013). I dati di input necessari per la definizione del modello geomeccanico includono le proprietà dei materiali, le proprietà frizionali delle superfici di faglia, il campo di sforzo iniziale e le condizioni al contorno.

Per quanto riguarda le proprietà dei materiali, bisogna valutare in maniera opportuna il tipo di reologia (ad esempio reologia elastica o elastoplastica), in modo da simulare correttamente la deformazione delle varie litologie presenti nel dominio crostale oggetto dello studio.

La legge di Amonton definisce quando le superfici di faglia sono bloccate o meno. Essa afferma che il rapporto dello *shear stress* sullo *stress* normale effettivo sul piano di faglia non può superare il coefficiente di attrito:

$$\frac{\tau}{\sigma'_n} \leq \mu_s$$

Dove:

σ'_n è lo sforzo normale effettivo

τ è lo shear stress

μ_s è il coefficiente di attrito di scivolamento.

La faglia è dunque bloccata quando $\tau/\sigma'_n < \mu_s$ e scorre quando invece $\tau/\sigma'_n = \mu_s$. Diversi modelli di attrito sono descritti in letteratura. Si va dal modello più semplice di attrito statico, dove il valore μ è costante, a modelli più complessi, quali la legge di attrito di tipo *slip-weakening*, fino ad arrivare a leggi di attrito di tipo *rate-and-state* in cui μ_s varia in funzione, ad esempio, della velocità di scorrimento o dello stato in cui si trovano i contatti della superficie di faglia (Dieterich, 1979; Ruina, 1983; Marone, 1998). La scelta del modello di attrito più adatto dipende dall'obiettivo dell'analisi geomeccanica. Infatti, se l'obiettivo non è quello di simulare la riattivazione delle faglie, ma di comprendere la variazione del campo di sforzo lungo le faglie prima che lo scorrimento avvenga, allora in prima approssimazione può essere sufficiente utilizzare un modello di attrito statico. Se invece l'obiettivo è simulare gli effetti dinamici della riattivazione o per esempio l'intero ciclo sismico; dalla fase intersismica a quella cosismica fino alla fase postsismica, allora è necessario utilizzare modelli di attrito più complessi, come quelli citati sopra.

Un altro dato di input fondamentale per inizializzare il modello geomeccanico è il campo di sforzo iniziale. Infatti, nel primo step di una simulazione geomeccanica è importante avere un modello in equilibrio con il campo di sforzo agente nel volume crostale di interesse. Per questo motivo è importante riprodurre il regime di stress vigente sia per quanto riguarda l'orientazione che la magnitudo degli assi di sforzo principali, a seconda della disponibilità dei dati. Le condizioni al contorno applicate al modello sono le seguenti: la superficie superiore del dominio è libera di

muoversi in tutte le direzioni, mentre i bordi laterali e la superficie inferiore sono mantenuti fissi nella direzione perpendicolare.

Dopo questo primo step, la soluzione è usata quindi come condizione iniziale per i successivi step, che vanno ad analizzare gli effetti della variazione della pressione di poro sulla deformazione del dominio crostale e delle faglie presenti al suo interno. Ognuno di questi step è caratterizzato da un caratteristico campo di pressione di poro riferito ad un determinato periodo, scelto tra i risultati di output della simulazione fluidodinamica.

Una volta terminata la simulazione geomeccanica, dai risultati ottenuti si effettua l'analisi di stabilità su tutte le faglie del dominio. Per tale scopo è utile calcolare il valore di *slip tendency* (ST) dato dal rapporto dello *shear stress* sullo sforzo normale effettivo agenti sulla superficie di discontinuità:

$$ST = \frac{\tau}{\sigma'_n}$$

Se il valore di ST è minore del coefficiente di attrito di scivolamento μ_s allora vorrà dire che la faglia si trova in uno stato di *stress* stabile e non si avrà movimento. Al contrario, se il valore di ST supera il coefficiente di attrito, la resistenza della faglia è superata e lo scorrimento inizia a propagarsi lungo il piano di faglia (Morris *et al.*, 1996; Lisle & Srivastava, 2004; Collettini & Trippetta, 2007; Moeck *et al.*, 2009; Vadacca *et al.*, 2018 e 2021).

Nel workflow geomeccanico appena descritto, le superfici di faglia sono definite in maniera esplicita nella griglia di calcolo. Questo necessita particolare attenzione nella costruzione della griglia, in modo che gli elementi siano conformi alle superfici di discontinuità. I nodi lungo le superfici di faglia sono splittati in due tranne quelli lungo i bordi, nel caso in cui le faglie siano completamente immerse nel dominio (si veda per esempio la tecnica dello *split-node* descritta in Vadacca *et al.*, 2018, Figura 13). Questa condizione è necessaria per modellare la deformazione lungo le faglie attraverso contatti frizionali.

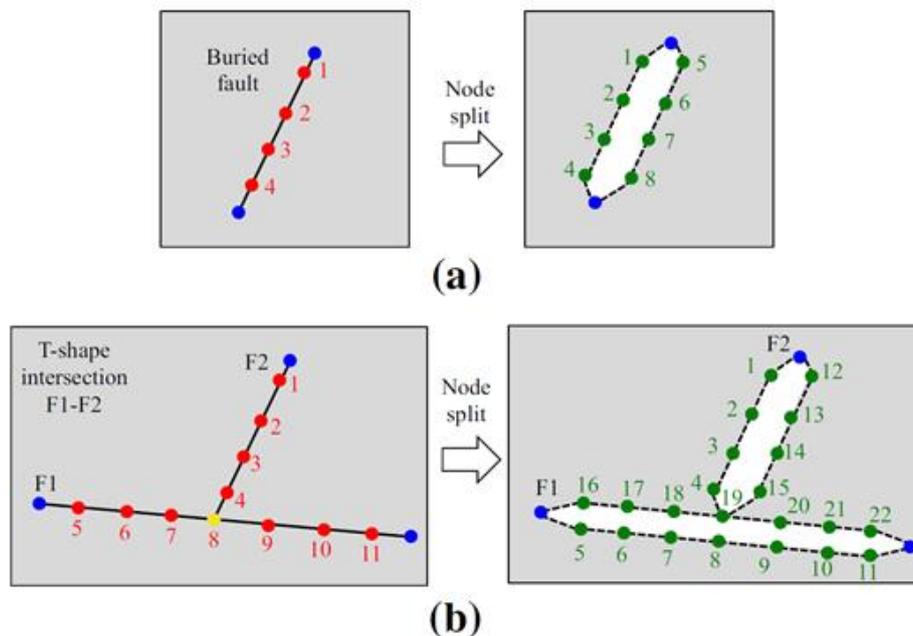


Figura 13 – Rappresentazione bidimensionale della tecnica dello *split-node* per una singola faglia (a) e per un'intersezione a T (b); da Vadacca *et al.* (2018).

Se da un lato la presenza esplicita delle superfici di faglia nel modello geomeccanico permette di calcolare in maniera più accurata il valore di *slip tendency*, dall'altro lato la loro presenza può aumentare notevolmente i costi computazionali. Per questo motivo, soprattutto nel caso in cui il caso studio fosse caratterizzato da numerose faglie, si può procedere ad una semplificazione del workflow. Ad esempio, si potrebbe procedere nel costruire un modello geomeccanico continuo dove le faglie non sono definite in modo esplicito nella griglia di calcolo. In questo modo l'analisi di stabilità di faglia può essere effettuata attraverso un codice scritto *ad hoc* che permette di leggere il campo di sforzo dall'output della simulazione geomeccanica continua, e da questo calcolare il valore dello *slip tendency* sulle varie superfici di faglia. La Figura 14 mostra il workflow appena descritto.

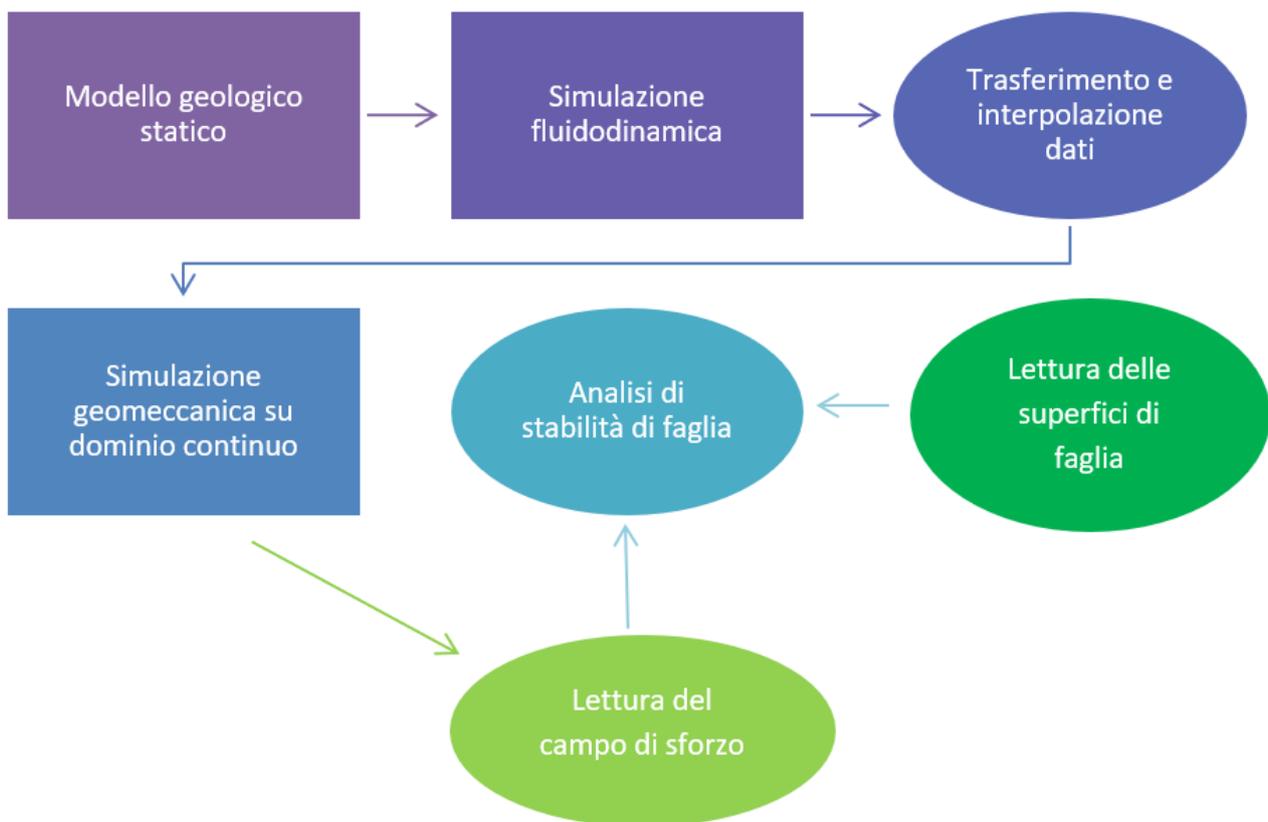


Figura 14 – Variante del workflow geomeccanico in cui le faglie non sono definite in modo esplicito nella griglia di calcolo.

Questo workflow ha il grande vantaggio di effettuare un'analisi di stabilità di faglia molto rapida. Ovviamente il grado di accuratezza del valore di *slip tendency* dipenderà dal grado di risoluzione della griglia nelle zone dove sono presenti le faglie (anche se queste non sono definite esplicitamente).

Nel caso in cui dall'analisi di stabilità risultassero che alcune faglie sono critiche (per esempio con valore di ST prossimo a μ_s) allora poi si potrebbero effettuare delle nuove simulazioni geomeccaniche includendo solo quelle faglie, in modo da avere una maggiore risoluzione dei risultati e risparmiare così sui costi computazionali.

12. Considerazioni conclusive

Le buone pratiche fin qui descritte sono frutto della competenza degli enti di ricerca e università che le hanno identificate ed elaborate, e dell'esperienza che essi hanno maturato nell'ambito del progetto H&RA Lacinia, sulla base dell'indirizzo fornito dal MASE con il supporto tecnico del Dipartimento della Protezione Civile.

Come si comprende dalla lettura del documento, non è facile stabilire le condizioni di potenziale innesco di scenari di pericolo e rischio di terremoto e maremoto legati alla produzione di idrocarburi in aree offshore. La disponibilità e il contributo informativo forniti dall'operatore sono ingredienti essenziali per lo svolgimento delle indagini. Malgrado ciò, è possibile che tutte le conoscenze scientifiche disponibili per una data area offshore di interesse esplorativo non siano sufficienti per arrivare a una caratterizzazione esaustiva delle condizioni di potenziale interazione tra attività produttive in una piattaforma offshore e sorgenti sismogeniche e tsunamigeniche, siano esse faglie o frane, presenti nelle vicinanze, nonché degli impatti e delle perdite causate da una loro eventuale attività. Potrebbero essere infatti necessari dati e informazioni aggiuntive, eventualmente da raccogliere *ex novo*.

Tuttavia, l'elemento che appare più rilevante nella predisposizione di queste buone pratiche è la necessità di una forte interazione tra le diverse comunità scientifiche e il beneficio che ne deriva rispetto alla qualità dei prodotti attesi. Il ruolo di coordinamento da parte delle pubbliche amministrazioni coinvolte è quello di promuovere e supportare questa interazione e svolgere inoltre un ruolo di garanzia anche rispetto all'interlocuzione con l'operatore.

In questa chiave, si ritiene che la modalità complessiva di lavoro descritta in questo documento e sperimentata nel progetto H&RA Lacinia rappresenti di per sé una buona pratica da adottare in studi di questo genere.

13. Riferimenti bibliografici

- Aagaard, B. T., Knepley, M. G. & Williams, C. A. (2013). A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 118, 3059–3079.
- Aagard, B., Knepley, M., Williams, C. A. (2022). New features in Pylith version 3 including Multiphysics capabilities and higher order discretizations. AGU Fall Meeting 2022, held in Chicago, IL, 12-16 December 2022, id. S25A-03.
- Abaqus User Manual v.2019 (Dassault Systèmes, 2017).
- Agate, G., & Guandalini, R. (2020). Manuale d'uso del software GeoSIAM - versione 2.1. Milano: Ricerca di Sistema RSE S.p.A. n.20010730.
- Antonecchi I., Ciccone F., Dialuce G., Grandi S., Terlizze F., Di Bucci D., Dolce M., Argnani A., Mercorella A., Pellegrini C., Rovere M., Armigliato A., Pagnoni, G., Paparo M.A., Tinti, S., Zaniboni F., Basili R., Cavallaro D., Coltelli M., Firetto Carlino M., Lipparini L., Lorito S., Maesano F.E., Romano F., Scarfì L., Tiberti M.M., Volpe M., Fedorik J., Toscani G., Borzi B., Faravelli M., Bozzoni F., Pascale V., Quaroni D., Germagnoli F., Belliazi S., Del Zoppo M., Di Ludovico M., Lignola G.P., Prota A. (2020) - Progetto SPOT - Sismicità Potenzialmente innescabile Offshore e Tsunami. Report integrato di fine progetto. 44 p. DOI: 10.5281/zenodo.3732887 - ISBN: 9788894366945
- Andreotti G., Lai C.G. (2019). Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 91, 2019, 103008, ISSN 0886-7798. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103008>.
- Belliazi, S., Lignola, G. P., & Prota, A. (2020). Simplified approach to assess the vulnerability of masonry buildings under tsunami loads. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1-13. <https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00147>
- Belliazi, S., Lignola, G. P., Di Ludovico, M., & Prota, A. (2021, June). Preliminary tsunami analytical fragility functions proposal for Italian coastal residential masonry buildings. In *Structures* (Vol. 31, pp. 68-79). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.059>
- Bellotti D., Famà A., Di Meo A., Borzi B. (2019a). Large-scale vulnerability analysis of girder railway bridges. *Proceedings of the 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 24–26 June, Crete, Greece.
- Bellotti D., Famà A., Di Meo A., Borzi B. (2019b). Large-scale vulnerability analysis of girder railway bridges. *Risk-Based Bridge Engineering: Proceedings of the 10th New York City Bridge Conference*, 26-27 August, New York City, USA.
- Boore, D.M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure appl. Geophys.*, 160, 635–676.
- Borzi B., Crowley H., Pinho R. (2008a). Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings, *Int J Archit Herit*, 2:353–376, doi: 10.1080/15583050701828178
- Borzi B., Pinho R., Crowley H. (2008b). Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings, *Eng Struct*, 30:804–820, doi: 10.1016/j.engstruct.2007.05.021
- Borzi, B., Onida, M., Faravelli, M., Polli, D., Pagano, M., Quaroni, D., Cantoni, A., Speranza, E., Moroni, C. (2021). IRMA platform for the calculation of damages and risks of Italian residential buildings. *Bull Earthquake Eng.* 19, 3033–3055. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00924-x>
- Bozzoni F., Lai C.G., Marsan P., Conca D., Famà A. (2018). WebGIS platform for seismic risk assessment of maritime port systems in Italy. In *Proc., 4th PIANC Mediterranean Days Congress 2018*. Madrid, Spain: Asociación Técnica de Puertos y Costas.

- Calabrese A., Lai C.G. (2016). Sensitivity analysis of the seismic response of gravity quay walls to perturbations of input parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 82 (2016), pag. 55-62. doi:10.1016/j.soildyn.2015.11.010.
- Calabrese, A., Lai, C.G. (2013). Fragility functions of blockwork wharves using artificial neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52(1): 88-102.
- Candela, T., Osinga, S., Ampuero, J.-P., Wassing, B., Pluymaekers, M., Fokker, P. A., & Muntendam-Bos, A. G. (2019). Depletion-induced seismicity at the Groningen gas field: Coulomb rate-and-state models including differential compaction effect. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7), 7081–7104. <https://doi.org/10.1029/2018JB016670>
- Cesca S. (2020). Seiscloud, a tool for density-based seismicity clustering and visualization. *J. Seismol.* 24:443–457 <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09921-8>
- Chang, K.W., Yoon, H. (2022). Permeability-controlled migration of induced seismicity to deeper depths near Venus in North Texas. *Sci Rep* 12, 1382. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05242-7>
- Clare, M. et al. (2019). A consistent global approach for the morphometric characterisation of subaqueous landslides. In *Subaqueous Mass Movements and Their Consequences: Assessing Geohazards, Environmental Implications and Economic Significance of Subaqueous Landslides* (eds. Lintern, D. G. et al.) 455-477 (Geological Society, London, Special Publications 477, 2019).
- Collettini, C., & Trippetta, F. (2007). A slip tendency analysis to test mechanical and structural control on aftershock rupture planes. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3), 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.001>
- Colucci F., Agate G., Vadacca L. (2022). Studio e simulazione di giacimento per indagare le possibili interazioni fra attività di estrazione e rischio sismico/tsunami. Giacimento H&RA Lacinia e Luna. Rapporto tecnico finale, Novembre 2022. (Protocollo RSE n. 22012286)
- Cosentini R., Bozzoni F. (2022). Fragility curves for rapid assessment of earthquake-induced damage to earth-retaining walls starting from optimal seismic intensity measures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.152, 2022, 107017, ISSN 0267-7261, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107017>
- Del Zoppo, M., Di Ludovico, M., Prota, A. (2021). Methodology for assessing the performance of RC structures with breakaway infill walls under tsunami inundation. *Journal of Structural Engineering*, 147(2), 04020330.
- Del Zoppo, M., Belliazzi, S., Lignola, G. P., Di Ludovico, M., Prota, A. (2022a). Analytical structural vulnerability and classification of Italian residential building stock to tsunami hazard. *Bulletin of Geophysics and Oceanography* Vol, 63(4), 555-574.
- Del Zoppo, M., Di Ludovico, M., Prota, A. (2022b). A mechanics-based method towards risk assessment of RC buildings under tsunami and flow-type hazards. *Engineering Structures*, 264, 114452.
- Dieterich, J. H. (1979). Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2161–2168. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02161>
- DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>
- Dolce, M., Prota, A., Borzi, B., da Porto, F., Lagomarsino, S., Magenes, G., Moroni, C., Penna, A., Polese, M., Speranza, E., Verderame, G. M., Zuccaro, G. (2021). Seismic risk assessment of residential buildings in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2999–3032, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01009-5>.
- Ellsworth, W. L. (2013). Injection-induced earthquakes. *Science*, 341(6142), 1–7. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
- Faravelli M., Borzi B., Polli D., Pagano M. (2019). Calibration of a mechanics-based method for large-scale vulnerability assessment, *Bull Earthquake Eng*, 17(5):2485-2508, doi: 10.1007/s10518-019-00560-0
- Forte G., Chioccarelli E., De Falco M., Cito P., Santo A., Iervolino I. (2019). Seismic soil classification of Italy based on surface geology and shear-wave velocity measurements. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 122, 79-93.

- GEM (2022). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.15.0. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE. 3.15.0
- Glimsdal S., Pedersen G., Harbitz C.B., Løvholt F. (2013). Dispersion of tsunamis: does it really matter? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1507–1526. DOI: 10.5194/nhess-13-1507-2013.
- Graves RW, Pitarka A (2010) Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100(5A): 2095–2123.
- Guglielmi, Y., Cappa, F., Avouac, J.-P., Henry, P., & Elsworth, D. (2015). Seismicity triggered by fluid injection–induced aseismic slip. *Science*, 348(6240), 1224–1226. <https://doi.org/10.1126/science.aab0476>
- Harbitz C.B., Løvholt F., Pedersen G., Masson D.G. (2006). Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides: a short review. *Nor J Geol* 86:255–264 <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/42982>.
- Harbitz C.B., Løvholt F., Bungum H. (2014). Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely? *Nat Hazards* 72:1341–1374. doi:10.1007/s11069-013-0681-3.
- HAZUS (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology – Earthquake Model, Technical Manual, National Institute of Building Science (NIBS) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C., USA.
- Herrero, A., Murphy, S. (2018). Self-similar slip distributions on irregular shaped faults, *Geophys. J. Int.*, 213(3), 2060–2070, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy104>.
- Iglesias O., Lastras G., Souto C., Costa S., Canals M. (2014). Effects of coastal submarine canyons on tsunami propagation and impact. *Marine Geology*, 350, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.013>.
- Improta, L., Bagh, S., De Gori, P., Valoroso, L., Pastori, M., Piccinini, D., et al. (2017). Reservoir structure and wastewater-induced seismicity at the Val d'Agri Oilfield (Italy) shown by three-dimensional Vp and Vp/Vs local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 9050–9082. <https://doi.org/10.1002/2017JB014725>
- Improta, L., Valoroso, L., Piccinini, D., & Chiarabba, C. (2015). A detailed analysis of wastewater-induced seismicity in the Val d'agri oilfield (Italy). *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2682–2690. <https://doi.org/10.1002/2015GL063369>
- Iwahashi J., Kamiya I., Matsuoka M., Yamazaki, D. (2018). Global terrain classification using 280 m DEMs: segmentation, clustering, and reclassification. *Prog. Earth Planet. Sci.* <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0157-2>.
- Kajiura, K. (1963). The leading wave of a tsunami, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 41, 535–571.
- Keranen, K. M., Savage, H. M., Abers, G. A., & Cochran, E. S. (2013). Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology*, 41(6), 699–702. <https://doi.org/10.1130/G34045.1.06>
- Komatitsch, D., & Tromp, J. (2002). Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—I. Validation. *Geophysical Journal International*, 149(2), 390–412.
- Kriebel D. L., Lynett P. J., Cox D. T., Petroff C. M., Robertson I. N., Chock G. Y. (2017). Energy method for approximating overland tsunami flows. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5), 04017014. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000393.
- Lisle, R. J., & Srivastava, D. C. (2004). Test of the frictional reactivation theory for faults and validity of fault-slip analysis. *Geology*, 32(7), 569–572. <https://doi.org/10.1130/G20408.1>
- Lolli B., Randazzo D., Vannucci G., Gasperini P. (2020). The Homogenized Instrumental Seismic Catalog (HORUS) of Italy from 1960 to Present, *Seismol. Res. Lett.*, doi: 10.1785/0220200148.
- Løvholt F., Pedersen G., Harbitz C.B., Glimsdal S., Kim J. (2015). On the characteristics of landslide tsunamis. *Phil Trans R Soc A* 373:20140376. doi: 10.1098/rsta.2014.0376.
- Marone, C. (1998). Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 643–696. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.643>
- Mazzieri, I., Stupazzini, M., Guidotti, R., & Smerzini, C. (2013). SPEED: SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin: A non-conforming approach for 3D multi-scale problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 95(12), 991–1010.

- McAdoo, B. G., Pratson, L. F., & Orange, D. L. (2000). Submarine landslide geomorphology, US continental slope. *Marine geology*, 169(1-2), 103-136.
- Meade, B. J. (2007). Algorithms for the calculation of exact displacements, strains and stresses for triangular dislocation elements in a uniform elastic half-space. *Computers & Geosciences*, 33(8), 1064-1075, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.12.003>.
- Michelini A., Faenza L., Lanzano G., Lauciani V., Jozinović D., Puglia R., Luzi L. (2020). The New ShakeMap in Italy: Progress and Advances in the Last 10 Yr. *Seismological Research Letters* 91 (1): 317–333. doi: <https://doi.org/10.1785/0220190130>
- Moeck, I., Kwiatek, G., & Zimmermann, G. (2009). Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *Journal of Structural Geology*, 31(10), 1174–1182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.06.012>
- Morandi P, Manzini CF, Borzi B, Mauro A, Vecchi A, Tisalvi M, Iacobini F. (2019). Simplified seismic vulnerability assessment of railway masonry arch bridges. E-Proceedings of the 10th New York City Bridge Conference, 26-27 August, New York, USA.
- Mori F., Mendicelli A., Moscatelli M., Romagnoli G., Peronace E., Naso G (2020). A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset. *Engineering Geology* Vol. 275. 105745. 20 September 2020.
- Morris, A., Ferrill, D. A. & Henderson, D. (1996). Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 24(3), 275–278. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2)
- Nikkhoo, M., Walter, T. R. (2015). Triangular dislocation: an analytical, artefact-free solution. *Geophys. J. Int.*, 201(2), 1119-1141, <https://doi.org/10.1093/gji/ggv035>.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- Okal E. A., Synolakis C.E. (2004). Source discriminants for near-field tsunamis. *Geophys. J. Int.* 158, 899–912. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02347.x.
- Özcebe, A.G., Bozzoni, F., Borzi, B. (2022). Seismic Vulnerability Assessment of Critical Port Infrastructure Components by Modelling the Soil-Wharf-Crane Interaction. *Infrastructures* 2022, 7, 102. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7080102>
- Peter, D., Komatitsch, D., Luo, Y., Martin, R., Le Goff, N., Casarotti, E., et al. (2011). Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes. *Geophysical Journal International*, 186(2), 721–739.
- Pischiutta M., Akinci A., Tinti E, Herrero A. (2021) Broad-band ground-motion simulation of 2016 Amatrice earthquake, Central Italy, *Geophysical Journal International* 224 (3): 1753–1779. doi: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa412>
- Rubinstein, J. L., Ellsworth, W. L., McGarr, A., & Benz, H. M. (2014). The 2001–present induced earthquake Sequence in the Raton basin of northern New Mexico and Southern Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2162–2181. <https://doi.org/10.1785/0120140009>.
- Ruina, A. (1983). Slip instability and state variable friction laws. *Journal of Geophysical Research*, 88(B12), 10359–10370. <https://doi.org/10.1029/JB088iB12p10359>
- Scala, A., Lorito, A., Romano, F., Murphy, S., Selva, J., Basili, R., Babeyko, A., Herrero, A., Hoechner, A., Lovholt, F., Maesano, F. E., Perfetti, P., Tiberti, M. M., Tonini, R., Volpe, E., Davies, G., Festa, G., Power, W., Piatanesi, A., Cirella, A. (2020), Effect of Shallow Slip Amplification Uncertainty on Probabilistic Tsunami Hazard Analysis in Subduction Zones: Use of Long-Term Balanced Stochastic Slip Models. *Pure Appl. Geophys.*, 177, 1497-1520, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02260-x>
- Schlumberger Ltd, «Petrel: The Platform for E&P Decision Making,» 2022a. (Online). Available: <https://www.software.slb.com/products/petrel>.
- Schlumberger Ltd, «Eclipse Industry-Reference Reservoir Simulator» 2022b. (Online). Available: <https://www.software.slb.com/products/eclipse>.

- Scuderi, M. M., & Collettini, C. (2016). The role of fluid pressure in induced vs. triggered seismicity: Insights from rock deformation experiments on carbonates. *Scientific Reports*, 6(24852), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep24852>
- Stabile, T. A., Giocoli, A., Perrone, A., Piscitelli, S., & Lapenna, V. (2014). Fluid injection induced seismicity reveals a NE dipping fault in the southeastern sector of the High Agri Valley (southern Italy). *Geophysical Research Letters*, 41(16), 5847–5854. <https://doi.org/10.1002/2014GL060948>.
- Tanioka, Y., Satake, K. (1996). Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 8, 861-864, <https://doi.org/10.1029/96GL00736>
- Tarquini S., Nannipieri L. (2017). The 10m-resolution TINITALY DEM as a trans-disciplinary basis for the analysis of the Italian territory: Current trends and new perspectives. *Geomorphology*, 281, 108 - 115.
- Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A. (2007). TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.0). (Data set). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/TINITALY/1.0>.
- ten Brink, U.S., Andrews, B.D., Miller, N.C. (2016). Seismicity and sedimentation rate effects on submarine and subaerial landslides: *Earth and Planetary Science Letters*, v,287, p. 31-42, doi: 10.1016/j.epsl.2009.07.031.
- Tinti S. and Tonini R. (2013). The UBO-TSUFDTsunami inundation model: validation and application to a tsunami case study focused on the city of Catania, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(7), 1795-1816. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1795-2013>.
- Tinti S., Bortolucci E., Vannini C. (1997). A block-based theoretical model suited to gravitational sliding. *Natural Hazards*, 16, 1–28.
- Tonini R., Basili R., Maesano F. E., Tiberti M. M., Lorito S., Romano F., Scala A., Volpe E. (2020). Importance of earthquake rupture geometry on tsunami modelling: The Calabrian Arc subduction interface (Italy) case study, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1805-1819, DOI:10.1093/gji/ggaa409
- Vadacca, L., Colciago, C. M., Micheletti, S., & Scotti, A. (2018). Effects of the anisotropy of the fault zone permeability on the timing of triggered earthquakes: Insights from 3D-coupled fluid flow and geomechanical deformation modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 175(12), 4131–4144. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1936-4>
- Vadacca, L., Rossi, D., Scotti, A., & Buttinelli, M. (2021). Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in the Val d'Agri oilfield (Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2019JB019185. <https://doi.org/10.1029/2019JB019185>
- Van Ede M.C., Molinari I., Imperatori W., E. Kissling, J. Baron, A. Morelli (2020). Hybrid Broadband Seismograms for Seismic Shaking Scenarios: An Application to the Po Plain Sedimentary Basin (Northern Italy). *Pure Appl. Geophys.* 177, 2181–2198.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W., & Worden, C. B. (1999). TriNet “ShakeMaps”: Rapid Generation of Peak Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California. *Earthquake Spectra*, 15(3), 537–555
- Yavari-Ramshe S., Ataie-Ashtiani B. (2016). Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves—recent advances and future challenges. *Landslides* (2016) 13:1325–1368. DOI: 10.1007/s10346-016-0734-2.

