



LNG Logistic Monfalcone, Italia

Distribuzione GNL in Regione Friuli-Venezia Giulia

Inquadramento geologico-geomorfologico-geotecnico

Doc. No. P0030812-9-H5 Rev. 0 – Agosto 2022

Rev.	Descrizione	Preparato da	Controllato da	Approvato da	Data
0	Prima Emissione	G. Mazzoni	A. Murianni	A. Lo Nigro	04/08/2022

Tutti i diritti, traduzione inclusa, sono riservati. Nessuna parte di questo documento può essere divulgata a terzi, per scopi diversi da quelli originali, senza il permesso scritto di RINA Consulting S.p.A.

INDICE

	Pag.
LISTA DELLE TABELLE	2
LISTA DELLE FIGURE	2
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	3
SINTESI	5
1 INTRODUZIONE	6
2 SCOPO DEL DOCUMENTO	7
3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE	8
4 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	11
5 ASSETTO MORFOLOGICO-BATIMETRICO	12
5.1 BATIMETRIA E MORFOLOGIA	12
5.2 ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO	14
6 TETTONICITÀ E SISMICITÀ	18
6.1 ASSETTO TETTONICO	18
6.2 SISMICITÀ STORICA	18
6.3 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE	19
7 STRATIGRAFIA GEOTECNICA	22
8 GEORISCHI	25
8.1 SISMA	25
8.2 LIQUEFAZIONE INDOTTA DAL SISMA	27
8.3 LIQUEFAZIONE INDOTTA DAL MOTO ONDOSI	30
8.4 FRANE SOTTOMARINE	31
8.5 MAREMOTO	31
9 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	34
REFERENZE	35

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 6.1:	Terremoti storici per l'area oggetto di studio	19
Tabella 6.2:	Magnitudo massima attesa per le sorgenti sismogenetiche prossimali	21
Tabella 7.1:	Stima preliminare dei parametri di resistenza entro i primi 20 m ([15])	23
Tabella 8.1:	Accelerazione al suolo al variare della probabilità di superamento (accelerazione in g)	27
Tabella 8.2:	Probabilità di innesco della liquefazione al variare della probabilità di superamento	29

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1.1:	Porto di Monfalcone ed indicazione della banchina Molino Casillo	6
Figura 3.1:	Schema paleogeografico della regione di interesse	8
Figura 3.2:	Schema Stratigrafico dell'arco alpino meridionale dal carbonifero al terziario. Si vedano la piattaforma friulana e il bacino di Belluno-Carnia	9
Figura 3.3:	Sezione interpretata di sismica a riflessione [12]	10
Figura 5.1:	Batimetria sintetica con sovrapposizione delle isolinee delle morfologie sepolte	12
Figura 5.2:	Batimetria di dettaglio	13
Figura 5.3:	Spessore dei sedimenti marini	13
Figura 5.4:	Litologie pre-quadernarie	14
Figura 5.5:	Classificazione dei sedimenti superficiali	15
Figura 5.6:	Ubicazione dei punti esplorativi disponibili nelle banche dati nazionali	16
Figura 5.7:	Stratigrafie dei pozzi utilizzati come riferimento [11]	17
Figura 6.1:	Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche prossimali	18
Figura 6.2:	Mappa di pericolosità sismica di riferimento per [5] concernente un periodo di ritorno di 475 anni	20
Figura 6.3:	Mappa di pericolosità sismica secondo [18] concernente un periodo di ritorno di 475 anni	20
Figura 7.1:	Ricostruzione del profilo di VS per un'area affine dell'Alto Adriatico (fonte: [14])	22
Figura 7.2:	Angolo di stato critico in funzione dell'indice granulometrico I_{GS}	23
Figura 7.3:	Percorsi tensionali in condizioni triassiali non drenate dei terreni testati e riportati in [15]	24
Figura 7.4:	Resistenza al taglio non drenata elaborata a partire da prove triassiali in funzione della resistenza di punta netta (CPT) e dell'indice di stress orizzontale (DMT) [15]	24
Figura 8.1:	Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per $P_{VR=50 \text{ anni}} = 0.01$ (TR = 4975 anni)	25
Figura 8.2:	Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per $P_{VR=50 \text{ anni}} = 0.02$ (TR = 2475 anni)	26
Figura 8.3:	Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per $P_{VR=50 \text{ anni}} = 0.10$ (TR = 475 anni)	26
Figura 8.4:	Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per $P_{VR=50 \text{ anni}} = 0.39$ (TR = 102 anni)	27
Figura 8.5:	Curve di resistenza alla liquefazione secondo il metodo proposto in [16]	28
Figura 8.6:	Mappa di suscettibilità a frana sottomarina	31
Figura 8.7:	Estratto dal catalogo Euro-Mediterraneo degli tsunami [26]	32
Figura 8.8:	Mappa a scala sovra-continentale del rischio tsunami [23]	33

ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

a_g	Accelerazione (orizzontale) di picco al suolo in assenza di effetti amplificativi
ALE	Abnormal Level Earthquake
a_{max}	Accelerazione (orizzontale) di picco al suolo in presenza di effetti amplificativi
c	Celerità dell'onda
c_u	Resistenza al taglio non drenata
CRR	Rapporto ciclico di resistenza
CSR	Rapporto ciclico di sollecitazione
D₀	Diametro di riferimento
D₅₀	Diametro relativo al 50% di passante
ELE	Extreme Level Earthquake
FS	Fattore di sicurezza
H_s	Altezza dell'onda
h_w	Profondità di riferimento del seabed
L	Lunghezza d'onda
LNG	Gas naturale liquefatto
MIH	Massimo livello di inondazione per tsunami
MSF	Fattore correttivo per magnitudo
M_w	Magnitudo momento
P_L	Probabilità di innesco del fenomeno di liquefazione
P_{VR}	Probabilità di superamento (riferita ad un periodo pari a V _R)
Q(H_s)	Probabilità di superamento (rif. H _s)
SPM	Sistema di ormeggio a punto singolo
t	Tempo
T_p	Periodo di picco dell'onda
T_R	Tempo di ritorno
u	eccesso di pressione neutrale
U	Coefficiente di uniformità
u₀	pressione neutrale a riposo
u_w	Velocità del vento
V_s	Velocità delle onde di taglio
V_{s1}	Velocità delle onde di taglio normalizzata
V_{s1}*	Velocità delle onde di taglio normalizzata di riferimento
z	Profondità
z_{eq}	Profondità di equilibrio
γ	Peso di volume totale
λ	numero d'onda
σ'_v	Tensione verticale efficace

σ'_v	Tensione verticale totale
τ_{av}	Tensione tangenziale di riferimento in presenza di azione sismica
ϕ'	Angolo di attrito efficace
ω	Velocità angolare
a_1, a_2, a_3, a_4	Parametri correlativi
c_1, c_2, c_3, c_4	Parametri correlativi
K_{a1}, K_{a1}	Fattori correttivi per ageing
k, U_c	Parametri della funzione di Weibull
μ, σ	Parametri della funzione Log-Normale

SINTESI

Morfologia e Batimetria	L'area è caratterizzata da bassi fondali praticamente pianeggianti, con massime profondità non superiori a 30 m e pendenze medie dell'ordine di 0.01%.
Assetto Geologico e Geotecnico	La litologia dell'area in esame è caratterizzata dalla presenza di marne e argilliti carbonatiche (principalmente calcari) corrispondenti alla Piattaforma Carbonatica Friulana, coperte da sedimenti di origine marina e continentale diffusi in funzione dalla batimetria (fino a pochi chilometri dalla costa), con uno spessore che può raggiungere 800 metri. Superficialmente, è plausibile la presenza di sedimenti sciolti a litologia prevalentemente sabbioso/limosa con intercalazioni limoso/argillose nell'ambito delle profondità di interesse per la fondazione del sistema SPM. È tuttavia possibile il rinvenimento superficiale di forme litificate isolate in una fascia compresa tra 10 e 40 m dal fondale.
Rischio Sismico	L'area presenta una bassa pericolosità sismica di base, connotata da valori magnitudo massima attesa (M_w) compresi fra 6.5 e 7.1 e valori di a_g al bedrock sismico (convenzionale) dell'ordine di 0.090 g per un periodo di ritorno di 500 anni. In termini di rischio, la normativa specifica inquadra l'installazione prevista all'interno della categoria SRC4.
Altri Georischi	<p>Non è possibile escludere a priori l'insorgenza di fenomeni rilevanti associati alla liquefazione degli orizzonti sabbiosi presenti nella stratigrafia più superficiale in occasione di eventi sismici intensi. Per questo fenomeno si stima una probabilità di innesco bassa per tempi di ritorno dell'evento sismico pari o inferiori a 500 anni, mentre si stima una probabilità di innesco moderatamente elevata per tempi di ritorno eccedenti i 2500 anni.</p> <p>La stima concernente il fenomeno della liquefazione indotta dal moto ondoso indica una profondità di equilibrio attorno a 6-7 m per un'onda estrema con tempo di ritorno pari a 50 anni. È pertanto ragionevole supporre che oltre tali profondità l'effetto di liquefazione istantaneo dovuto all'onda estrema sia marginale.</p> <p>Ulteriori georischi indagati (effetti rilevanti di frane sottomarine e maremoti) presentano una probabilità di occorrenza marginale.</p>

1 INTRODUZIONE

La società costituenda LNG LOGISTIC, cui soci fondatori sono SBE-VARVIT, DANIELI, ACCIAIERIE VENETE e MOLINO CASILLO, si farà carico di gestire l'importazione e la distribuzione di gas naturale liquefatto a imprese manifatturiere del Nord-Est Italia, grandi consumatrici di gas naturale. Tale iniziativa ha lo scopo di contribuire in maniera significativa al raggiungimento dell'indipendenza dalle forniture di gas dalla Russia, con un target di distribuzione di gas ai consumatori finali pari a 1 bcm/anno.

RINA è stata selezionata per condurre le verifiche tecniche necessarie per verificare la fattibilità del progetto, coprendo diverse tematiche all'interno dell'intero ciclo logistico considerato.

Il progetto consiste dei seguenti elementi chiave:

- ✓ Una nave madre (di taglia pari a 145,000 m³ di GNL stoccato) ormeggiata al largo della rada di Monfalcone e della costa veneto-friulana. Il rifornimento di GNL a tale nave verrà garantito da una nave gasiera, non trattata in questo progetto;
- ✓ Una "shuttle carrier" (di taglia pari a 12,000 m³ di GNL stoccato) adibita al trasporto di GNL dalla nave madre a terra;
- ✓ Una banchina per il trasferimento di GNL dalla shuttle carrier a terra. La banchina "Molino-Casillo", sita all'interno del porto di Monfalcone, è stata selezionata per questo scopo, avendo la possibilità di allaccio ad un collegamento ferroviario esistente. Un'immagine satellitare dell'area e della banchina è fornita nella seguente Figura 1.1:

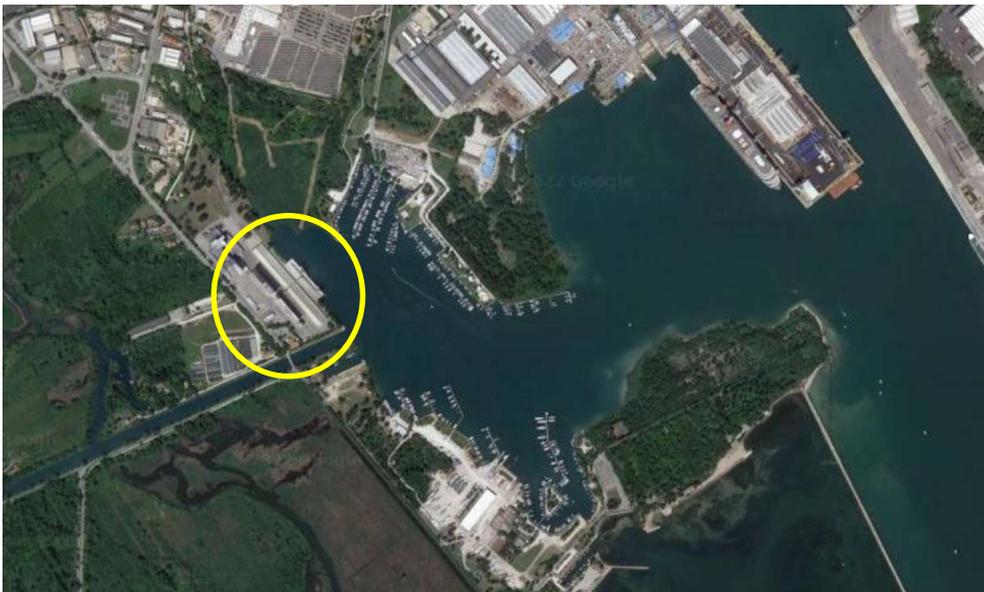


Figura 1.1: Porto di Monfalcone ed indicazione della banchina Molino Casillo

- ✓ Un sistema di trasferimento del GNL installato sulla banchina, per permettere il riempimento di ISO-container dalla shuttle carrier ormeggiata. Gli ISO-container saranno poi caricati su treni per la distribuzione nell'area del Nord-Est Italia. Una parte del GNL sarà invece trasportata su gomma, con lo scopo di rifornire i clienti che si trovano in prossimità di Monfalcone;
- ✓ Cinque Hub (aree individuate: Udine, Verona, Padova, Brescia, Marzaglia) destinati ad accogliere gli ISO-container trasportati su rotaia e smistare il GNL capillarmente verso gli utenti finali. La tratta tra ciascun hub e l'utente finale sarà coperta da trasporto su gomma;
- ✓ Gli utenti finali, dove il GNL consegnato sarà rigassificato in loco e reso disponibile al loro stesso utilizzo.

La soluzione tecnica proposta è altamente flessibile, avente pertanto la potenzialità di essere adattata ad aree differenti con caratteristiche analoghe a quelle individuate per il terminale di Monfalcone.

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Il lavoro, con specifico riferimento all'area di interesse, è volto alla definizione degli aspetti geologici e geomorfologici più rilevanti, alla definizione dei profili batimetrici e stratigrafici, alla valutazione della pericolosità sismica, alla valutazione preliminare degli aspetti geotecnici salienti e all'inquadramento in termini di georischi.

Questo lavoro è propedeutico alle fasi di indagine più avanzate e finalizzate ad un approfondimento della conoscenza geologico-geotecnica dell'area, nonché degli aspetti di dettaglio concernenti i georischi.

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE

Da un punto di vista geologico strutturale, il golfo di Trieste e le zone costiere che lo circondano rappresentano la parte più settentrionale dell'avanpaese adriatico, costituito dalla piattaforma Carbonatica, Adriatica Mesozoica, dai carbonati del Paleocene, Eocene e dal Flysch eocenico, affioranti in Istria e nel Carso e sepolti sotto i sedimenti neogenici della Pianura Friulana.

A partire dal Giurassico, l'ampia piattaforma carbonatica che costituiva la Dolomia principale ha cominciato a differenziarsi in una fase prevalentemente estensiva, si è suddivisa in diverse unità paleogeografiche che, per l'area di interesse, sono rappresentate dalla Piattaforma Carbonatica Friulana ad est e dal Bacino di Belluno ad ovest [9]. Mentre la piattaforma carbonatica friulana si è sviluppata con 1200-1500 m di aggradazione rispetto al bacino principale, il bacino di Belluno è stato invece riempito mediante la deposizione di Calcari di Acque profonde, Calcari Marnosi e Scaglia Alpina. Uno schema paleogeografico dell'area è riportato in Figura 3.1.

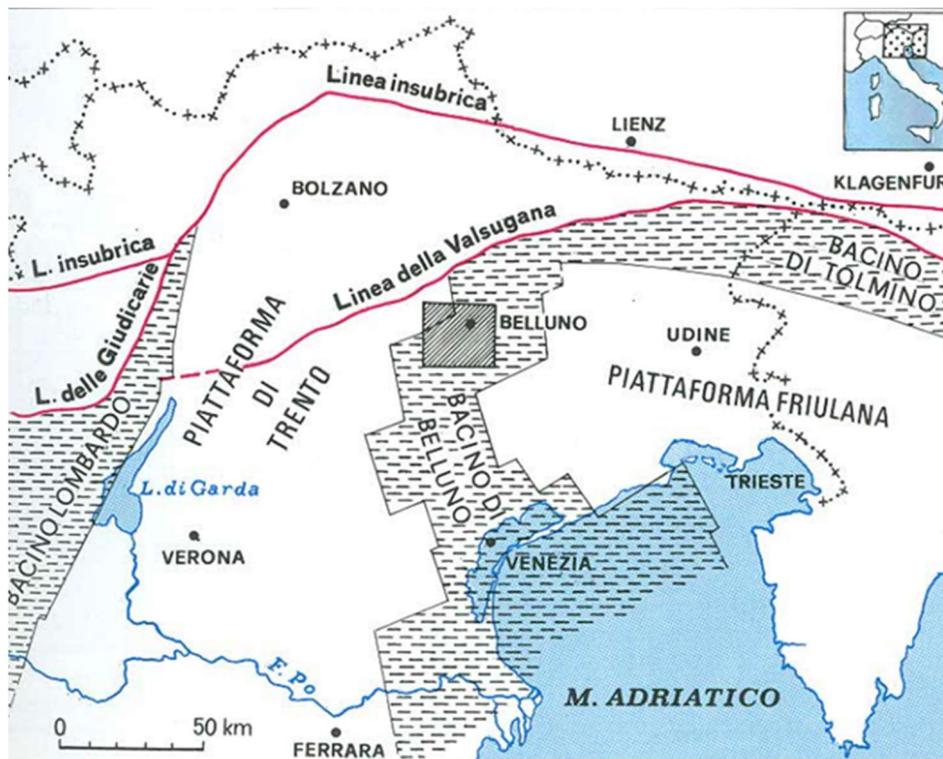


Figura 3.1: Schema paleogeografico della regione di interesse

Una volta iniziata la fase compressiva dinarica e alpina nel Terziario, la piattaforma carbonatica friulana ha subito delle fessurazioni che sono successivamente state riempite dai flysch torbiditici di origine terrigena, mentre la parte occidentale, è stata inglobata e fessurata nell'Avanfossa alpina e riempita successivamente con la Molassa di età Miocenica superiore [9].

A seguito della regressione marina del Messiniano, queste aree sono state successivamente sottoposte a deposizione subaerea, che ne ha condizionato la morfologia con la formazione di valli e terrazzi. La condizione di deposizione subaerea è perdurata sino al Pleistocene, quando l'ambiente deposizionale ritorna ad essere marino [11]. Lo schema stratigrafico è riportato in Figura 3.2.

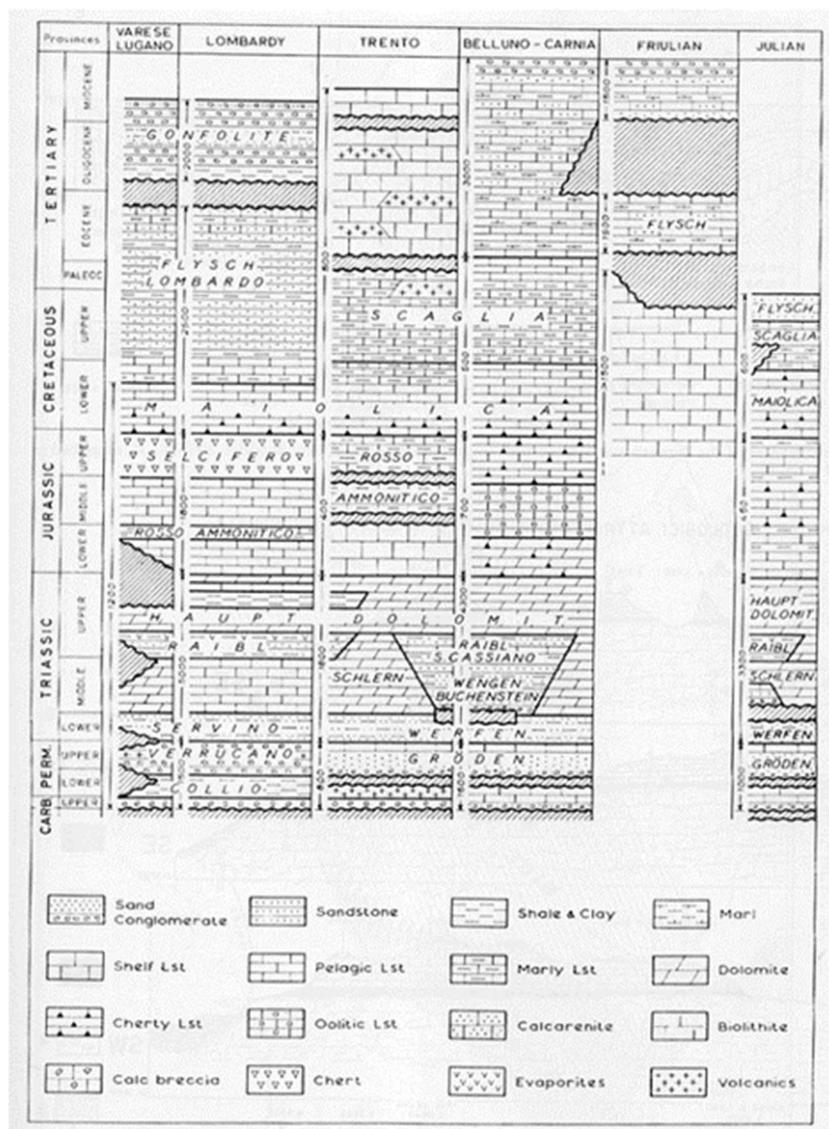


Figura 3.2: Schema Stratigrafico dell’arco alpino meridionale dal carbonifero al terziario. Si vedano la piattaforma friulana e il bacino di Belluno-Carnia

La sedimentazione Plio-Quaternaria, condizionata dalle ciclicità climatiche (periodi glaciali e interglaciali), a causa dell’ubicazione periferica del golfo rispetto il bacino del Mediterraneo, presenta sequenze di qualche centinaio di metri di spessore, più limitato rispetto le sequenze dell’Adriatico centrale. La sedimentazione Olocenica è ristretta alle zone costiere, in particolare quelle settentrionali del golfo dove c’è il maggior apporto sedimentario fluviale, e nella parte orientale del golfo, in una area depressa dal punto di vista batimetrico [12].

Sintetizzando gli aspetti legati alla geologia strutturale e tettonica, il Golfo di Trieste (Adriatico nord-orientale), ha subito una deformazione polifasica passando da un regime estensionale mesozoico con la formazione della piattaforma carbonatica, alla fase orogenetica cenozoica con la formazione delle dinaridi, e di cui il golfo costituisce l’avanfossa più recente riempita da sedimenti flyschiodi eocenici, e successivamente coinvolta dall’avanzata dei thrusts frontali della catena. I profili di sismica a riflessione realizzati nei primi anni 2000, hanno evidenziato che la formazione della catena alpina dal Neogene ha generato una riattivazione delle strutture in modalità trascorrente/transpressiva. Le diverse fasi tettoniche hanno generato un sistema di strutture con andamento principale NW-SE, per le quali si osservano fenomeni di riattivazione di tipo neotettonico [12].

In Figura 3.3 è riportata una sezione di sismica a riflessione interpretata in cui è possibile osservare i rapporti stratigrafici e tettonici.

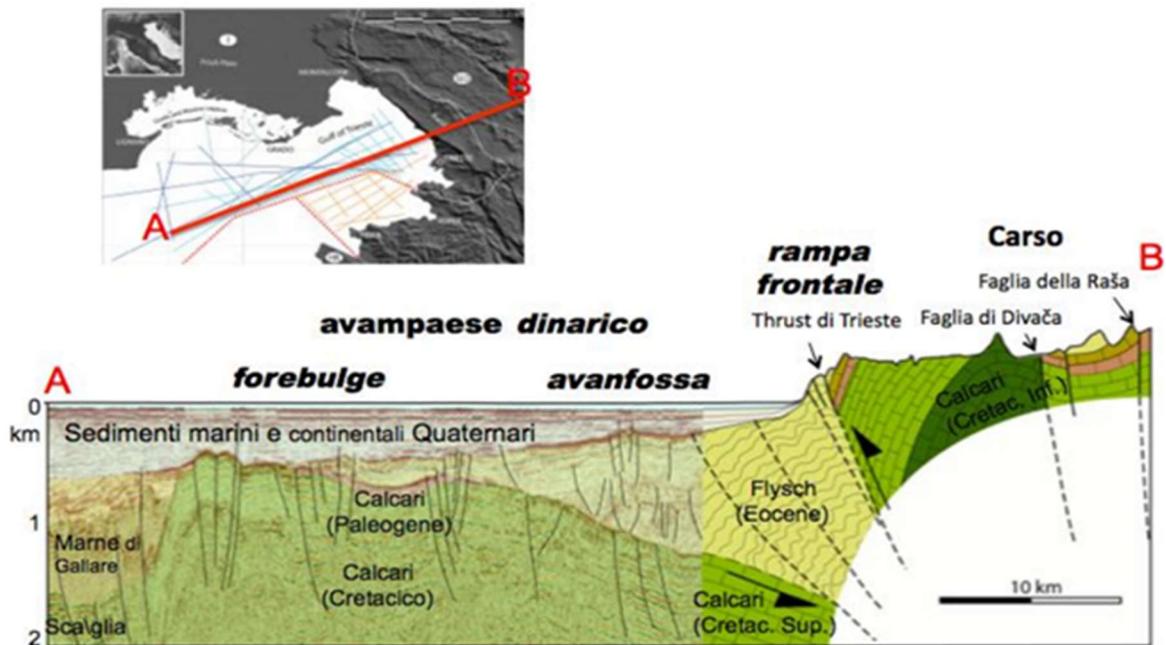


Figura 3.3: Sezione interpretata di sismica a riflessione [12]

4 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il Golfo di Trieste è situato nella parte nord-orientale del Mare Adriatico settentrionale. È delimitato a Nord dai litorali della Laguna di Marano e Grado e dal delta dell'Isonzo, a Nord-Est dalle pendici dell'altipiano carsico, a Sud dalla costa settentrionale dell'Istria slovena e croata. Verso Ovest invece si considera come limite la linea immaginaria dalla Foce del Fiume Tagliamento alla Punta Salvore. Il Golfo ha un'estensione di circa 550 km², con una profondità media di 16 m e massima di circa 37 m, che raggiunge nei pressi di Pirano. La distanza dalla Foce del Fiume Tagliamento alla Punta Salvore è di 21 km. La costa ha fondali bassi e sabbiosi nel tratto settentrionale, mentre il resto del litorale, a sud delle foci del Timavo, è in prevalenza alto e roccioso in quanto si trova a ridosso dell'altipiano del Carso e dell'Istria [8].

Per quanto riguarda la morfologia dei fondali, la zona settentrionale, dalla foce del Tagliamento a quella del Timavo, presenta bassi fondali, che si approfondiscono fino a una decina di metri a bassissima pendenza [6] [7]. Sono inoltre da sottolineare le differenze di valori di profondità tra le parti meridionale e centro-orientale del Golfo e quella settentrionale. Le prime, che si trovano davanti all'Istria e a Trieste presentano fondali superiori ai 15 metri, che raggiungono a volte profondità sino ai 20 metri, anche in vicinanza della costa. Le seconde, che sono adiacenti al delta dell'Isonzo, presentano invece fondali bassi che si approfondiscono gradualmente con una debole pendenza.

5 ASSETTO MORFOLOGICO-BATIMETRICO

5.1 BATIMETRIA E MORFOLOGIA

Il Mare Adriatico è un bacino epicontinentale semi-chiuso che presenta una piattaforma a bassa pendenza e profondità media di 35 metri nei settori settentrionale e centrale, mentre nel settore meridionale si osserva un maggiore gradiente. Le aree proposte come alternative per la realizzazione dell'intervento sono comprese nella piattaforma continentale del bacino settentrionale dell'Alto Adriatico, con profondità comprese tra 0 e 30.0 metri e una pendenza media di 0.01%. L'area in esame è caratterizzata da un fondale a morfologia praticamente pianeggiante (fatto salvo per la forma leggermente rilevata denominata Trezza Grande - v. Figura 5.2 - che interessa una porzione orientale dell'area indagata) e dalla presenza di paesaggi sepolti con morfologia più irregolare (Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3, sulla base delle informazioni contenute in [13])

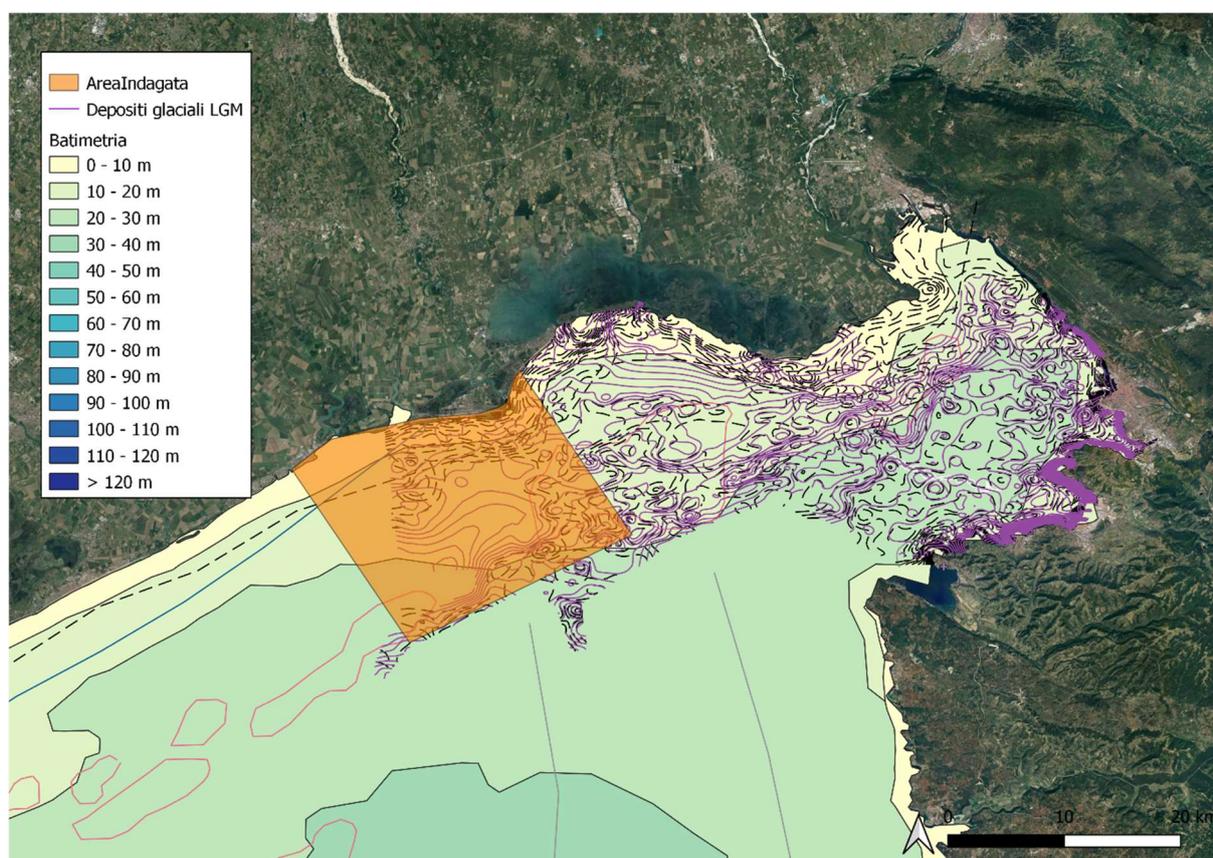


Figura 5.1: Batimetria sintetica con sovrapposizione delle isolinee delle morfologie sepolte

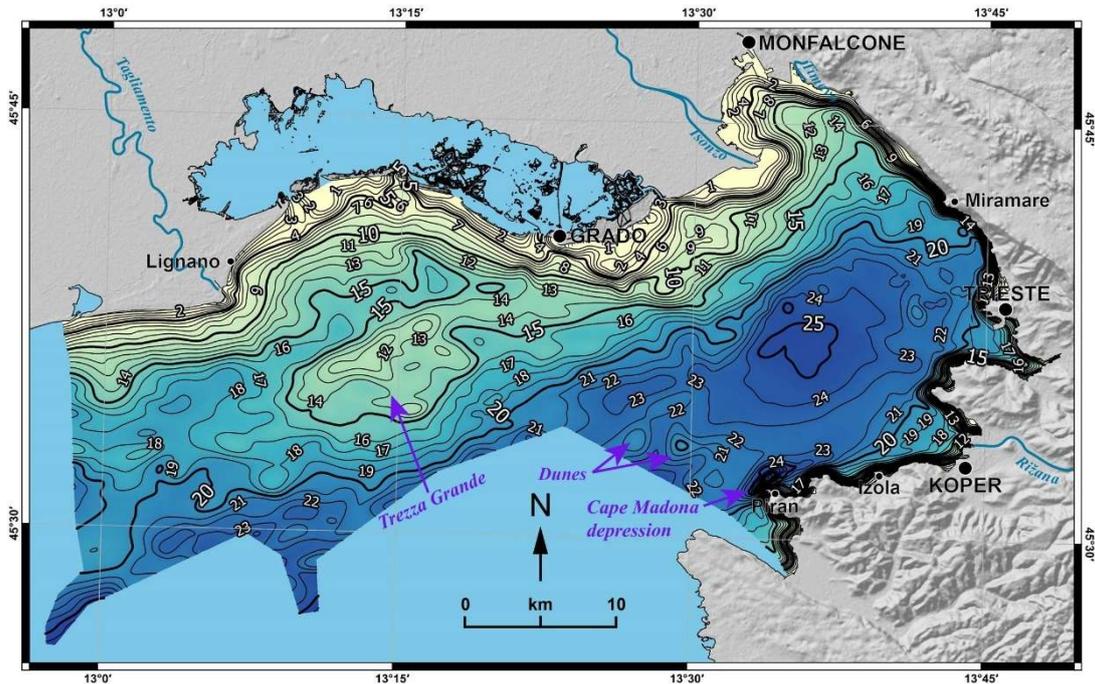


Figura 5.2: Batimetria di dettaglio

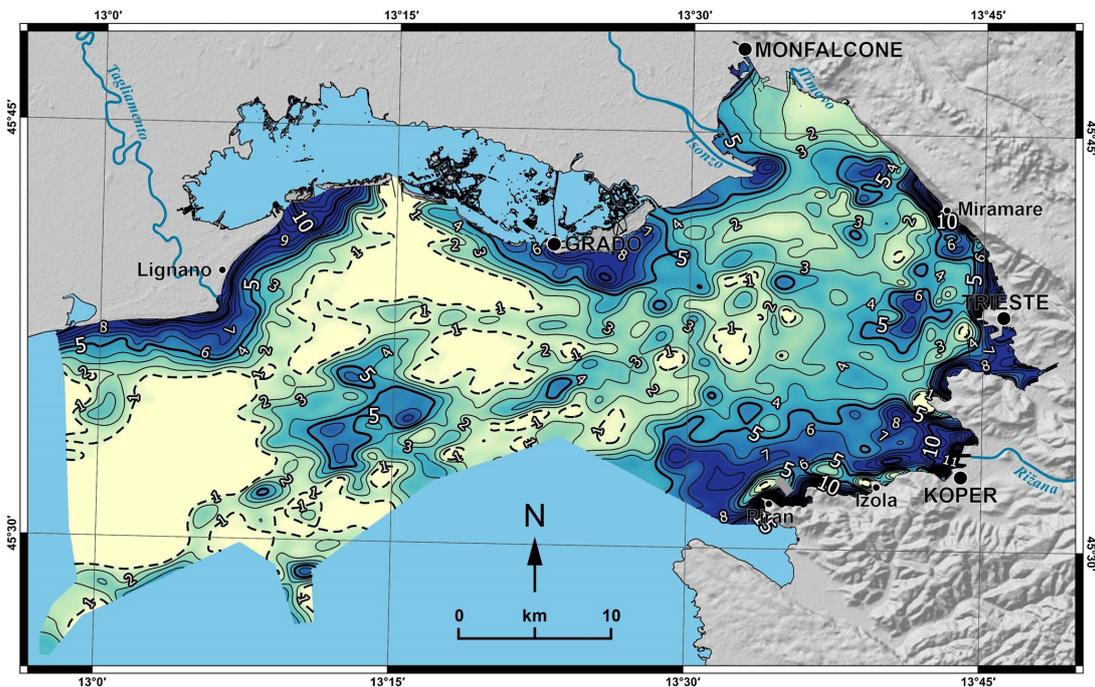


Figura 5.3: Spessore dei sedimenti marini

5.2 ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO

Le fasce marine dell'Alto Adriatico sono composte da sedimenti clastici la cui origine è legata agli apporti fluviali, in maggioranza ascrivibili al Fiume Po. La dinamica di deposizione nel Golfo di Trieste e delle aree di mare limitrofe è condizionata dalle correnti litoranee che provocano la dispersione di materiali sabbiosi dagli sbocchi dei corsi d'acqua in mare verso N e NE, mentre i materiali fini sono portati al mare dai corsi d'acqua e dal processo erosivo subito dal fondale marino in direzione SE.

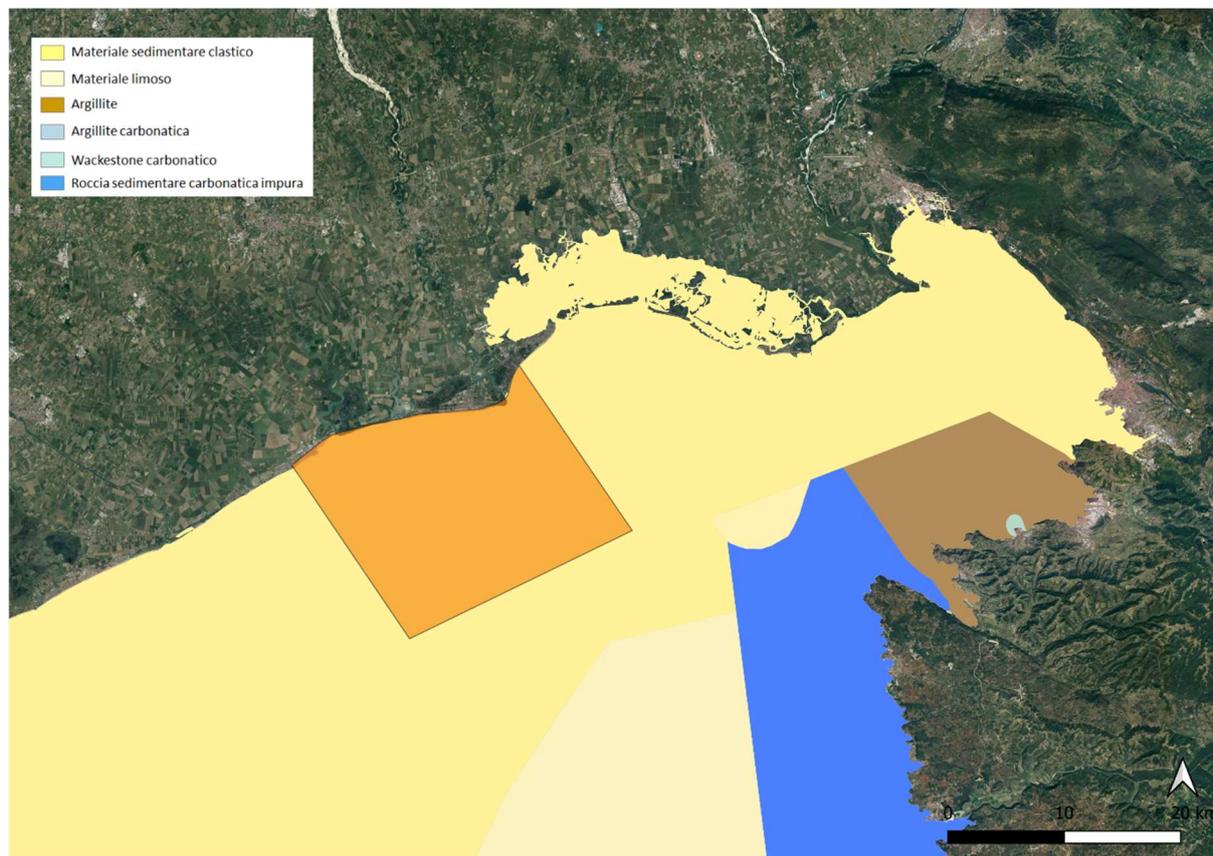


Figura 5.4: Litologie pre-quoternarie

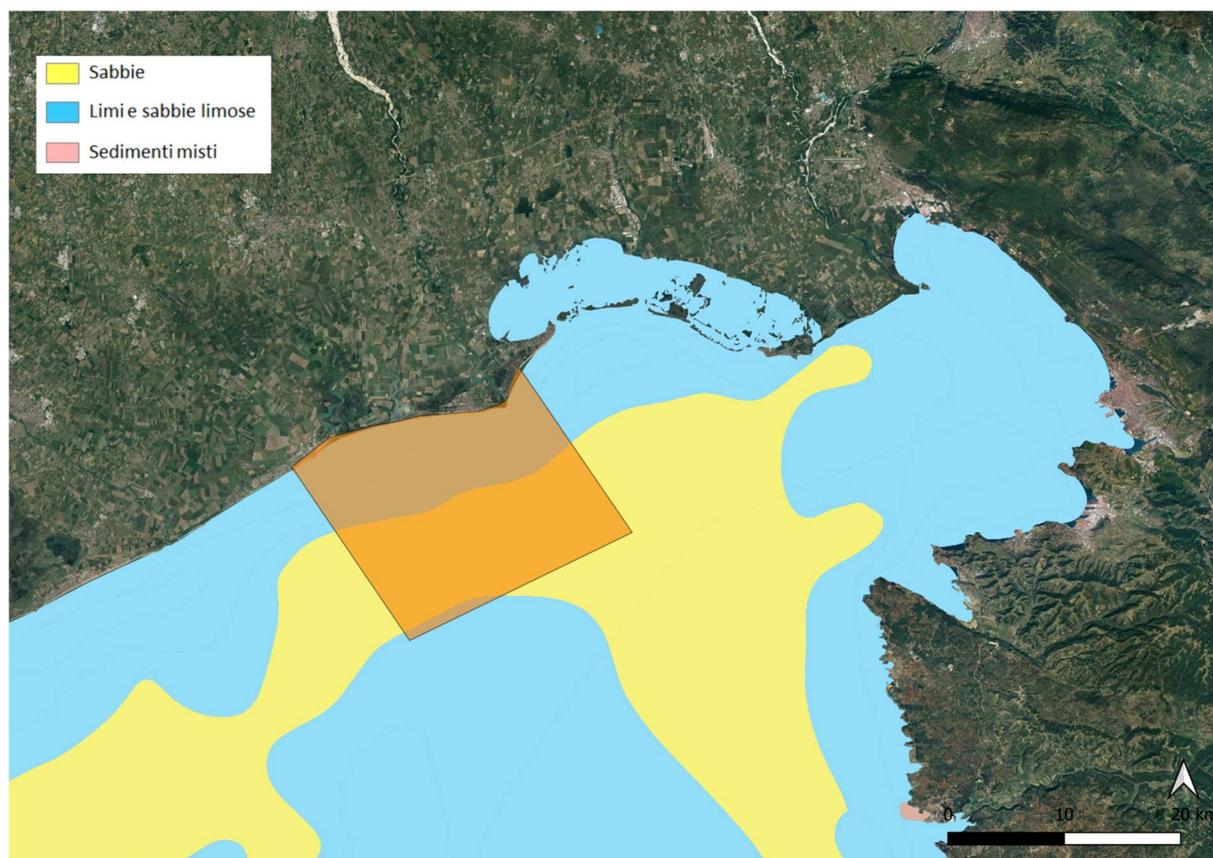


Figura 5.5: Classificazione dei sedimenti superficiali

La distribuzione dei sedimenti clastici nell'Alto Adriatico è dunque definita per fasce batimetriche. La fascia marina costiera è interessata da sabbie di origine fluviale (sabbie costiere), con un'estensione dalla costa fino a una profondità massima di 5.0 a 7.0 metri e spessore di 2.0 a 3.0 metri sulla battigia. A profondità da 8.0 a 10.0 metri, il fondale marino presenta una estesa fascia a granulometria più fine costituita di limi e limi argillosi. La granulometria nelle fasce seguenti mostra un aumento del diametro dei sedimenti, che passano da materiali limosi a limi sabbiosi e successivamente a sabbie limose.

Inoltre, la zona a Nord della foce del Fiume Po è caratterizzata dalla presenza di numerosi affioramenti rocciosi distribuiti irregolarmente lungo il bacino settentrionale, in un intervallo batimetrico compreso tra 10 e 40 metri. Tali affioramenti presentano una vasta eterogeneità di forme, dimensioni e materiale. Nell'area in esame i litotipi sono generalmente argilliti carbonatiche.

Le principali unità litologiche sono state identificate tramite l'interpretazione dei pozzi realizzati a terra (Cavanella 001 e Cesarolo 001) e a mare (Amanda 001) più prossimi, oltre a indagini sismiche realizzate sia per scopi scientifici che di prospezione e ricerca di idrocarburi [9] [25].



Figura 5.6: Ubicazione dei punti esplorativi disponibili nelle banche dati nazionali

La litologia dell'area in esame è caratterizzata dalla presenza di marne e argilliti carbonatiche (principalmente calcari) corrispondenti alla Piattaforma Carbonatica Friulana, coperte da sedimenti di origine marina e continentale diffusi in funzione della batimetria (fino a pochi chilometri dalla costa), con uno spessore che può raggiungere 800 metri. Le indagini disponibili non evidenziano la presenza di affioramenti di Flysch, ovvero di alternanza tra livelli arenacei e marnosi, nella zona di interesse.

6 TETTONICITÀ E SISMICITÀ

6.1 ASSETTO TETTONICO

Dal punto di vista tettonico, l'area del Golfo di Trieste è descritta come la zona di interazione tra la placca Adriatica ed Europea (Alpi e Subalpino) e la placca Adriatica e il Sistema Dinarico, con meccanismi di rottura attesi di tipo *thrust* e *backthrust* che presentano andamento con vergenza Nord Ovest e Sud Est, rispettivamente. La principale struttura osservata è la Faglia di Trieste, ubicata nel fronte costiero del Carso, a una distanza pari a circa 45.0 km dall'area indagata e dove è presente il tetto della faglia.

Si presume che dopo la fase principale di formazione della Catena Dinarica nell'area del Carso, sia avvenuta una prosecuzione dell'attività fino a tempi recenti. È necessario considerare tali evidenze strutturali nella determinazione della pericolosità sismica lungo il bacino settentrionale del Golfo di Trieste, che presenta dunque strutture di attività tettonica recente e conseguenti deformazioni modeste nei sedimenti marini non consolidati e continentali rispetto ad aree circostanti a maggiore attività sismogenetica.

L'area indagata non ricade all'interno di nessuna delle zone sismogenetiche individuate e cartografate all'interno del Progetto DISS dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia [20]. Tuttavia, la sua posizione risulta prossimale rispetto alle zone ITCS060, ITCS065, ITCS100 e ITCS101 (Montebelluna-Montereale, Medea, Golfo di Trieste Nord e Golfo di Trieste Sud, rispettivamente). La magnitudo massima attesa per le zone in oggetto è compresa tra 6,5 e 7.1 per ulteriori approfondimenti si rimanda al par. 6.3



Figura 6.1: Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche prossimali

6.2 SISMICITÀ STORICA

In Tabella 7.1 si riportano i principali eventi sismici risentiti storicamente nell'area indagata, così come indicati dal Catalogo Parametrico – Database Macrosismico dei terremoti italiani (CPTI-DMTI 15 – realizzato nell'ambito della linea di attività INGV T3 "Pericolosità sismica e contributi alla definizione del rischio" e quale contributo alle attività dell'Allegato A dell'Accordo quadro INGV-DPC 2012-2021).

Tabella 6.1: Terremoti storici per l'area oggetto di studio

Anno	Area epicentrale	M _w
1893	Bellunese	4.42
1897	Asolano	4.44
1897	Ljubljana	4.99
1898	Valli del Natisone	5.12
1976	Friuli	6.45
1977	Friuli	5.26
1978	Dolomiti Friulane	4.35
1987	Reggiano	4.71
1991	Prealpi Giulie	4.51
1998	Carniola interna	4.25
2004	Slovenia nord-occidentale	5.12

6.3 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La pericolosità sismica di base per l'area oggetto di studio è connotata, sia nelle NTC18 [5] che nell'European Seismic Hazard Model (ESHM20) [18], da valori di accelerazione al suolo, in assenza di fenomeni di amplificazione locale per un tempo di ritorno convenzionale di 475 anni, inferiori a 0.1 g. Questo livello di accelerazione denota, in generale, una bassa pericolosità sismica di base.

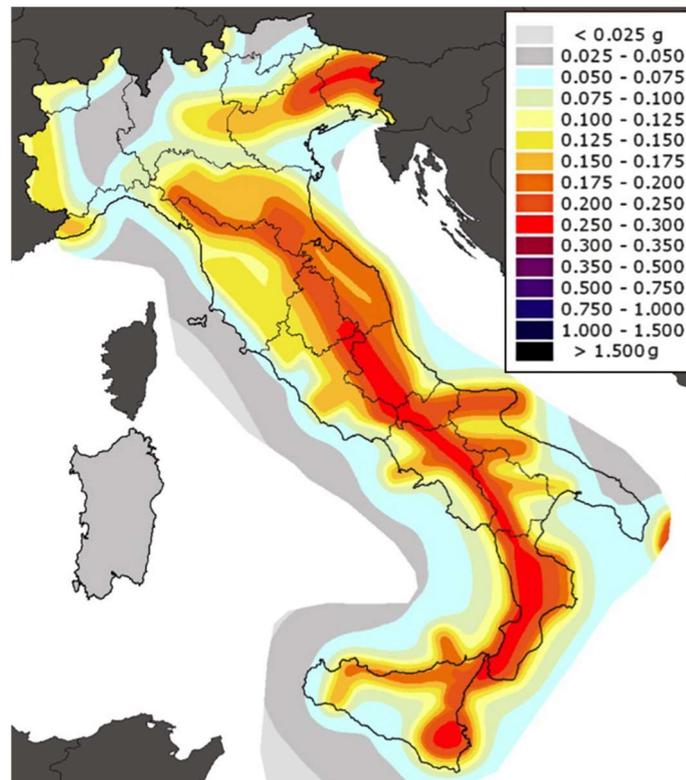


Figura 6.2: Mappa di pericolosità sismica di riferimento per [5] concernente un periodo di ritorno di 475 anni

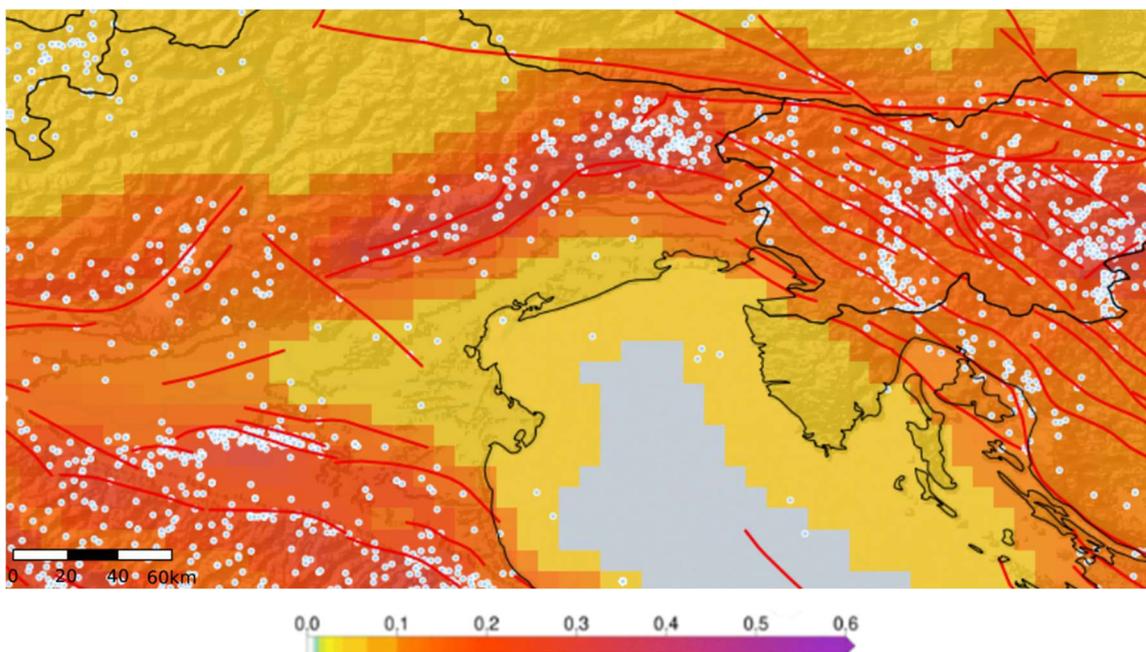


Figura 6.3: Mappa di pericolosità sismica secondo [18] concernente un periodo di ritorno di 475 anni

In termini di magnitudo massima attesa, nell'ambito del lavoro relativo al DISS Working Group pubblicato in ultima revisione in [20], si identificano quattro sorgenti sismogenetiche prossimali all'area oggetto di studio, per le quali si riportano sinteticamente i dati salienti.

Tabella 6.2: Magnitudo massima attesa per le sorgenti sismogenetiche prossimali

Denominazione sorgente	M_w
ITCS060	6.8
ITCS065	7.1
ITCS100	6.9
ITCS101	6.5

7 STRATIGRAFIA GEOTECNICA

La stratigrafia geotecnica viene dedotta, in via assolutamente preliminare e in assenza di indagini dirette, a partire dai dati bibliografici disponibili in letteratura tecnica e da fonti GIS italiane ed europee.

Sulla base di quanto già riportato in precedenza all'interno del par. 5.2, gli strati più superficiali rispetto al fondale sono caratterizzati dalla successione sedimentaria di spessore rilevante (> 500 m) denominata "Sabbie di Asti", caratterizzata al tetto da sedimenti a litologia sabbiosa e sabbioso/limosa intercalati a livelli limoso/argillosi. Procedendo da Sud verso Nord lo spessore dei sedimenti marini (olocenici) che sovrastano la formazione delle Sabbie di Asti passa da valori praticamente nulli a valori che in prossimità della linea di costa raggiungono i 7-8 m. In questi sedimenti prevalgono in superficie le frazioni più fini (limi e argille).

In assenza di informazioni geognostiche ragionevolmente dettagliate e prossime all'area di studio, ci si limita in questa sede a fornire le seguenti indicazioni preliminari:

- ✓ È plausibile la presenza di sedimenti sciolti a litologia prevalentemente sabbioso/limosa con intercalazioni limoso/argillose nell'ambito delle profondità di interesse per la fondazione del sistema SPM.
- ✓ Una stima della velocità delle onde di taglio basata su una campagna di indagine eseguita in un'area geograficamente attigua e geomorfologicamente affine (v. Figura 7.1 con riferimento a [14]), fornisce una prima indicazione circa l'andamento litostratigrafico a media profondità e le V_s attese.

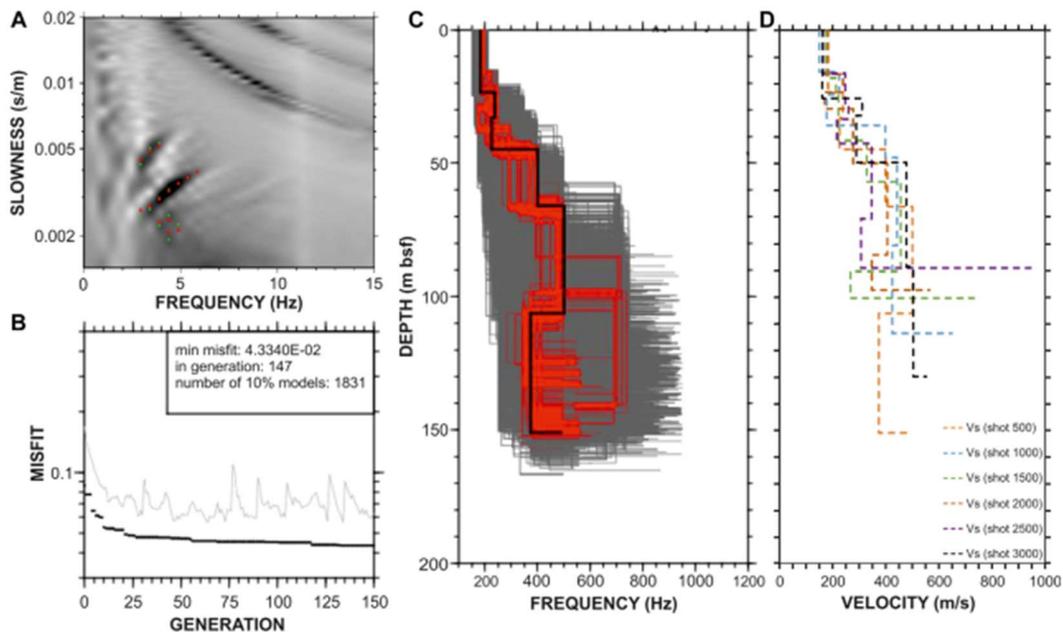


FIGURE 4 | (A) Velocity spectrum and dispersion curves. The green points represent the observed phase velocities, while the red triangles represent the calculated ones. (B) Minimum misfit (black dots), and average misfit (gray line) vs. the number of generations for the seed number leading to the best model. (C) Scholte wave dispersion curves inversion for shot 500: all tested models (gray), models lying within 10% of the minimum misfit (red) and the minimum misfit model (black). (D) V_s profiles from selected shots obtained by the Scholte waves inversion.

Figura 7.1: Ricostruzione del profilo di V_s per un'area affine dell'Alto Adriatico (fonte: [14])

- ✓ Una stima preliminare dei parametri di resistenza attesi per i materiali ricompresi nei primi 20 m dal fondale può essere tentata per analogia con l'area della Laguna di Venezia, fortemente indagata dal punto di vista geotecnico nel passato recente (rif. [15]). In Tabella 7.1 si riporta tale stima per i materiali a comportamento incoerente (sabbie e sabbie limose) e per i materiali a comportamento coesivo (limi e argille).

Tabella 7.1: Stima preliminare dei parametri di resistenza entro i primi 20 m ([15])

Comportamento	φ' (°)	c_u (kPa)
Incoerente	36	-
Coesivo	31	30 - 60

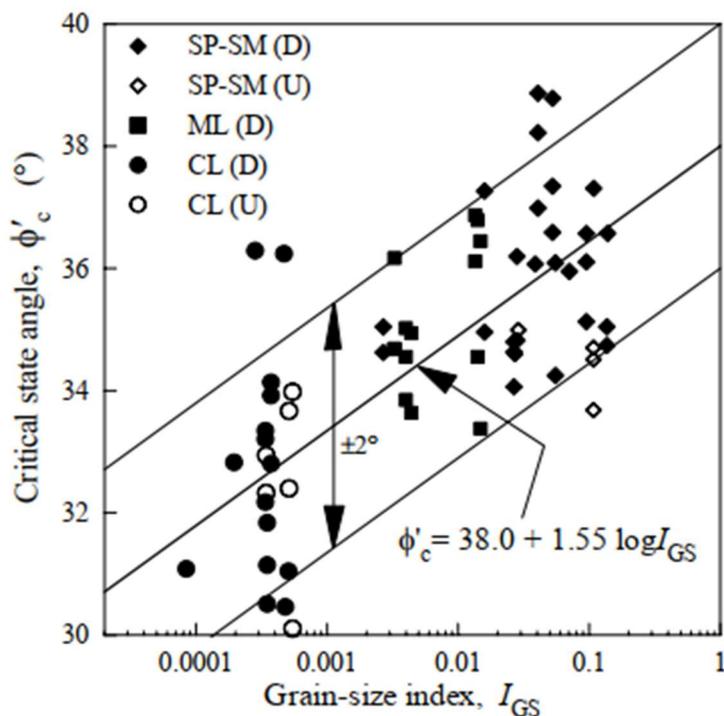


Figura 7.2: Angolo di stato critico in funzione dell'indice granulometrico I_{GS} ¹

¹ L'indice granulometrico I_{GS} proposto in **Error! Reference source not found.** è calcolato come $(D_{50}/D_0)/U$ in cui $D_0 = 1$ mm

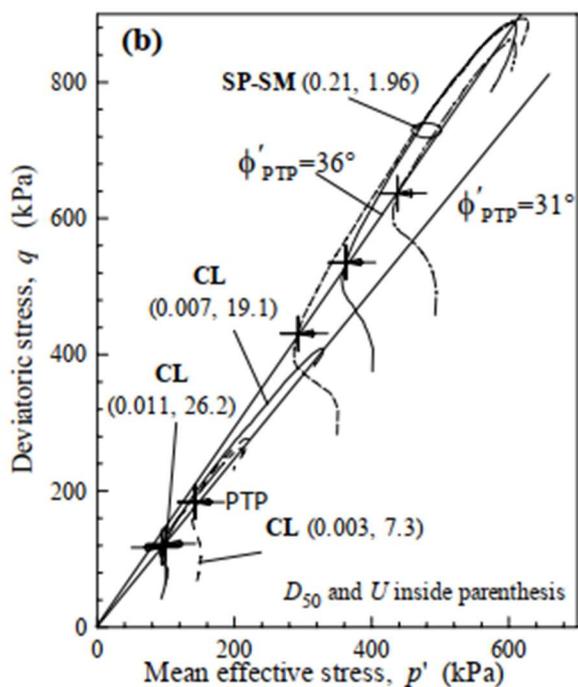


Figura 7.3: Percorsi tensionali in condizioni triassiali non drenate dei terreni testati e riportati in [15]

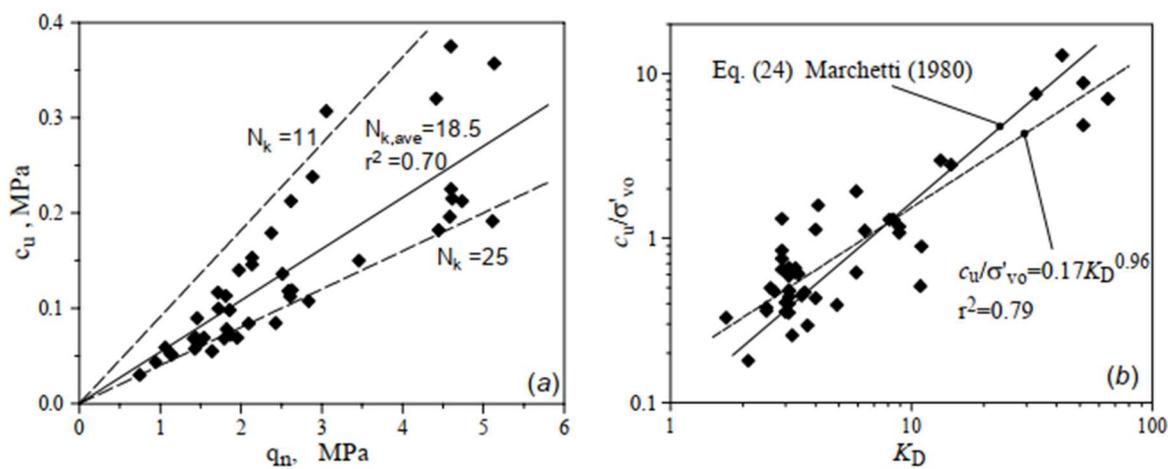


Figura 7.4: Resistenza al taglio non drenata elaborata a partire da prove triassiali in funzione della resistenza di punta netta (CPT) e dell'indice di stress orizzontale (DMT) [15]

8 GEORISCHI

8.1 SISMA

Con riferimento a quanto indicato all'interno del Cap. 6, l'area in esame presenta una bassa pericolosità sismica di base, connotata da valori magnitudo massima attesa (M_w) compresi fra 6.5 e 7.1 e valori di a_g al bedrock sismico (convenzionale) dell'ordine di 0.090 g per un periodo di ritorno di 500 anni. In termini di rischio, la normativa specifica [2] inquadra l'installazione prevista all'interno della categoria SRC4.

La quantificazione della pericolosità sismica riportata nel seguito è derivata dall'European Seismic Hazard Model (ESHM20) [18] e l'estrazione degli spettri elastici di accelerazione orizzontale è stata operata mediante il software REXELweb [19]. Gli effetti di sito che possono essere stimati in questa fase preliminare, sulla scorta dei dati bibliografici disponibili, sono di seguito quantificati impiegando, a titolo esemplificativo, le procedure definite dagli Eurocodici [4] e dal relativo annesso nazionale [5].

Gli spettri riportati in Figura 8.1, Figura 8.2, Figura 8.3, Figura 8.4 sono associati a probabilità di superamento, riferite ad un periodo di 50 anni, rispettivamente pari a 0.01, 0.02, 0.10 e 0.39 (ovvero a tempi di ritorno rispettivamente pari a c.a. 5000, 2500, 500 e 100 anni). Gli spettri target, indicati con linea solida di colore ciano, sono da intendersi come elastici al 5% di smorzamento convenzionale. A titolo esemplificativo sono riportati altresì, con linea solida di colore nero, gli spettri medi derivati dall'estrazione di accelerogrammi naturali spettro-compatibili.

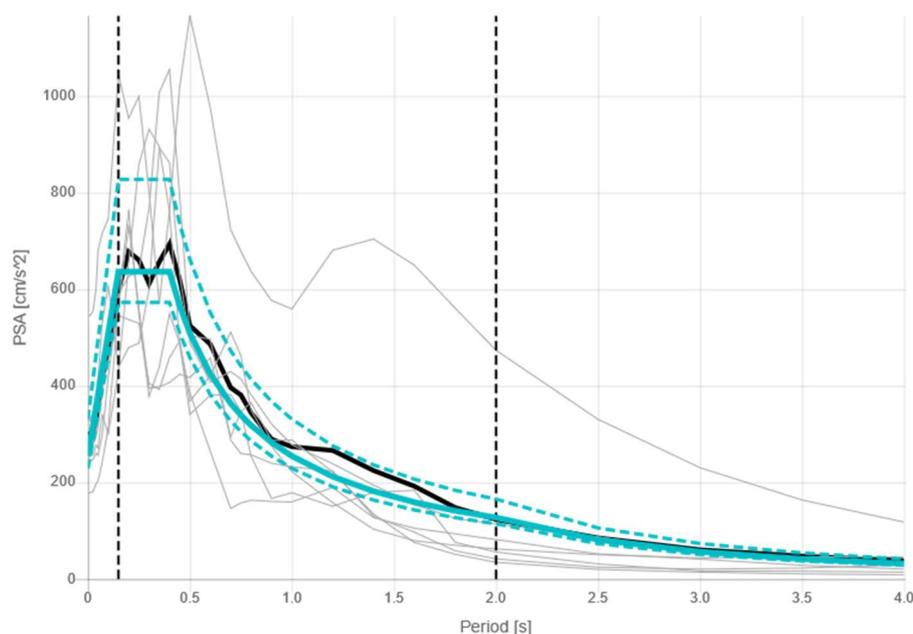


Figura 8.1: Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per $P_{VR=50 \text{ anni}} = 0.01$ (TR = 4975 anni)

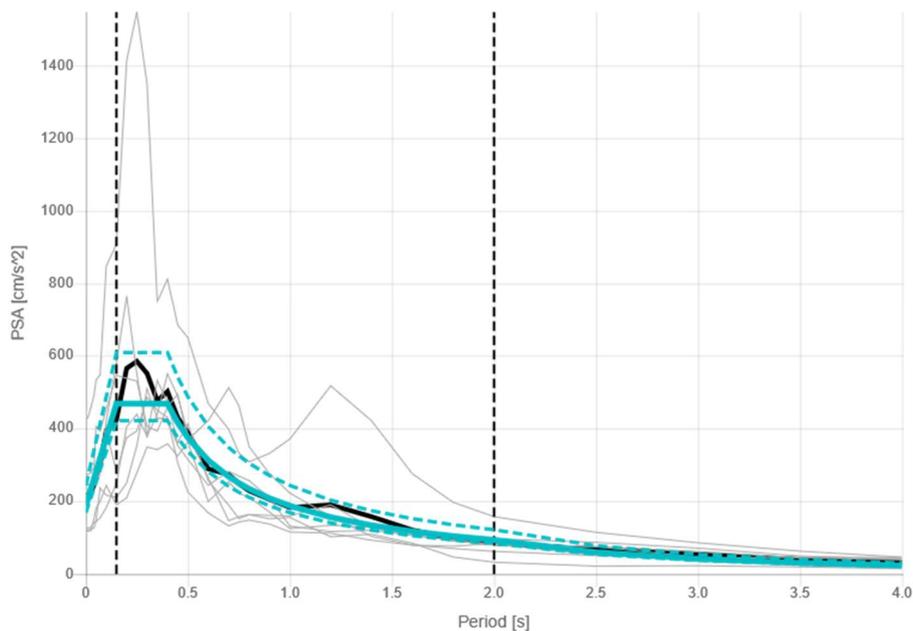


Figura 8.2: Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per PVR=50 anni = 0.02 (TR = 2475 anni)

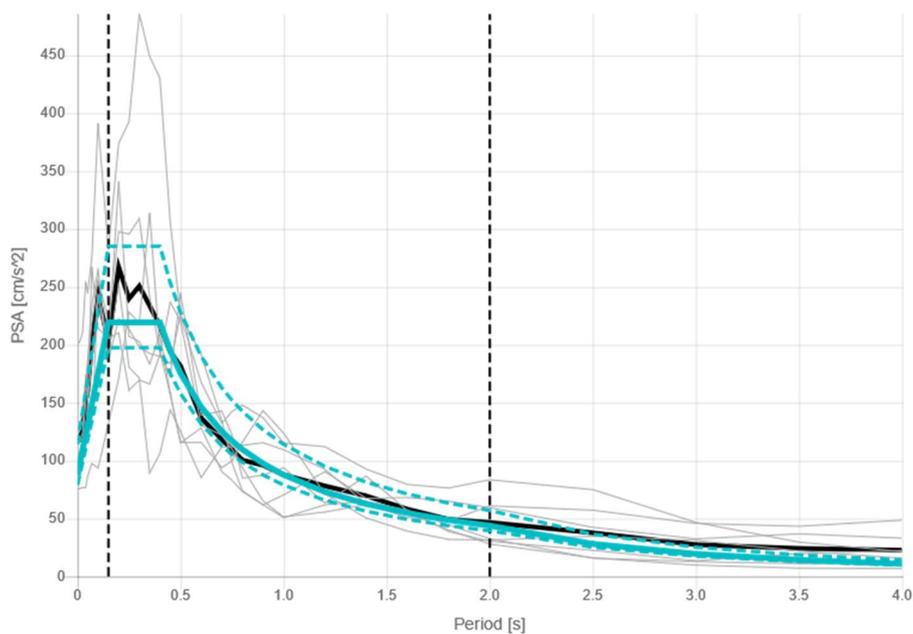


Figura 8.3: Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per PVR=50 anni = 0.10 (TR = 475 anni)

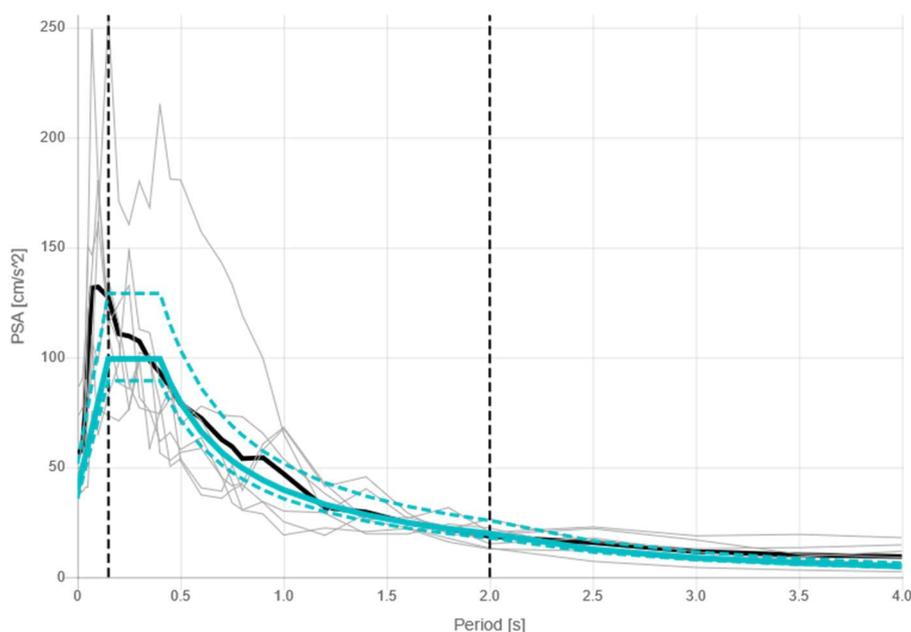


Figura 8.4: Spettro elastico in accelerazione riferito alla pericolosità sismica di base (in assenza di effetti di amplificazione di sito) per $P_{VR=50}$ anni = 0.39 ($T_R = 102$ anni)

I parametri indicati in Figura 8.4 si riferiscono infine ad una stima, circoscritta al solo valore di accelerazione massima al suolo (a_{max}), dei plausibili effetti amplificativi di sito.

Tabella 8.1: Accelerazione al suolo al variare della probabilità di superamento (accelerazione in g)

Effetti amplificativi di sito	$P_{VR=50} = 0.01$ ($T_R = 4975$ anni)	$P_{VR=50} = 0.02$ ($T_R = 2475$ anni)	$P_{VR=50} = 0.10$ ($T_R = 475$ anni)	$P_{VR=50} = 0.39$ ($T_R = 102$ anni)
Nessuno (pericolosità di base)	0.260	0.191	0.089	0.041
Minima amplificazione attesa ²	0.341	0.270	0.134	0.062
Massima amplificazione attesa ³	0.371	0.322	0.160	0.074

In accordo con la normativa di settore [2], si dovrà procedere ad un successivo approfondimento sito-specifico per la definizione degli spettri di progetto per gli stati limite previsti (ALE e ELE). Tale approfondimento non costituisce parte del presente studio preliminare.

8.2 LIQUEFAZIONE INDOTTA DAL SISMA

Sulla base delle considerazioni di carattere geologico e geotecnico riportate in precedenza nel presente elaborato, non è possibile escludere a priori l'insorgenza di fenomeni rilevanti associati alla liquefazione degli orizzonti sabbiosi presenti nella stratigrafia più superficiale in occasione di eventi sismici intensi.

² La minima amplificazione attesa è definita sulla base della metodologia proposta in **Error! Reference source not found.** per il calcolo del fattore di amplificazione per effetti stratigrafici, ipotizzando una categoria di sottosuolo C.

³ La massima amplificazione attesa è definita sulla base della metodologia proposta in **Error! Reference source not found.** per il calcolo del fattore di amplificazione per effetti stratigrafici, ipotizzando una categoria di sottosuolo D.

Al fine di operare una prima stima grossolana della probabilità di innesco della liquefazione, si impiegano, nello specifico, i dati bibliografici contenuti in [14] e il metodo correlativo basato sulla velocità di propagazione delle onde di taglio proposto in [16] per dedurre il parametro P_L espresso, come suggerito dagli autori, attraverso la seguente relazione:

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{0.73}\right)^{3.4}}$$

In cui FS è pari al rapporto CRR/CSR valutato fino ad una profondità limite che, sempre secondo gli autori, è pari a c.a. 20 m e oltre la quale si ritiene il rischio di innesco come marginale.

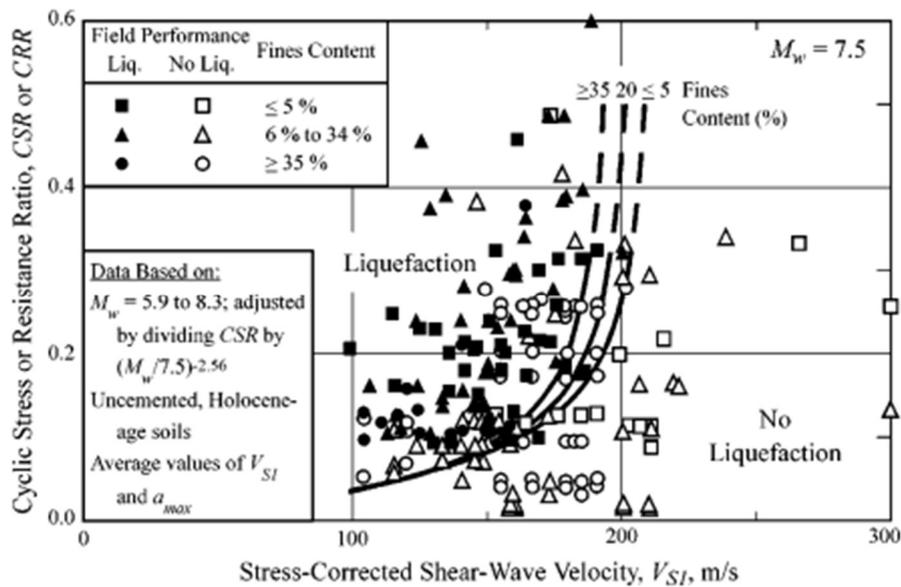


Figura 8.5: Curve di resistenza alla liquefazione secondo il metodo proposto in [16]

In questa fase preliminare non è ovviamente possibile né lecito spingersi nel dettaglio della parametrizzazione proposta in [16]. Ci si pone pertanto in una condizione ritenuta realistica e sufficientemente conservativa che:

- ✓ Presuppone l'impiego della curva caratteristica per contenuti di fine medi ($5\% < FC < 35\%$)
- ✓ Definisce una magnitudo di riferimento pari a 7.1 (massima tra quella delle sorgenti prossimali)
- ✓ Omette l'applicazione dei fattori correttivi che tengono conto dei fenomeni di *ageing*

Sulla base di queste premesse, nel seguito si riportano i risultati dell'analisi preliminare del rischio di liquefazione in termini di fattore di sicurezza (FS) valutato ad una profondità rappresentativa (tale per cui $\sigma'_v = 100$ kPa) e dell'associata probabilità di innesco (P_L) per ciascun valore della probabilità di superamento in termini di accelerazione orizzontale al suolo (ovvero per ciascun valore del tempo di ritorno associato all'evento sismico).

Dati generali

h_w	20,0 m
γ	18,0 kNm ⁻³
M_w	7,1 -
MSF	1,15 -
V_s	200,0 ms ⁻¹
V_{s1}^*	207,5 ms ⁻¹

Minima condizione amplificativa

P_{VR50}	a_{max} (g)	z (m)	FS	PL
0,01	0,341	12,3	0,65	0,60
0,02	0,270	12,3	0,82	0,40
0,10	0,134	12,3	1,65	0,06
0,39	0,062	12,3	3,57	0,00

Massima condizione amplificativa

P_{VR50}	a_{max} (g)	z (m)	FS	PL
0,01	0,371	12,3	0,60	0,67
0,02	0,322	12,3	0,69	0,55
0,10	0,160	12,3	1,38	0,10
0,39	0,074	12,3	2,99	0,01

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d$$

$$CRR = MSF \left\{ 0.022 \left(\frac{K_{a1} V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 \left(\frac{1}{V_{S1}^* - (K_{a1} V_{S1})} - \frac{1}{V_{S1}^*} \right) \right\} K_{a2}$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56}$$

Tabella 8.2: Probabilità di innesco della liquefazione al variare della probabilità di superamento

Condizione amplificativa	$P_{VR=50} = 0.01$ ($T_R = 4975$ anni)	$P_{VR=50} = 0.02$ ($T_R = 2475$ anni)	$P_{VR=50} = 0.10$ ($T_R = 475$ anni)	$P_{VR=50} = 0.39$ ($T_R = 102$ anni)
Minima amplificazione attesa	60%	40%	6%	<1%
Massima amplificazione attesa	67%	55%	10%	1%

Se ne deduce che la probabilità di innesco di fenomeni di liquefazione (sismica) per i sedimenti più superficiali in occasione del terremoto di progetto è moderatamente elevata per tempi di ritorno eccedenti i 2500 anni, mentre risulta bassa per tempi di ritorno dell'ordine di 500 anni e inferiori.

Questa prima valutazione dovrà necessariamente essere rivista a valle della campagna di indagine e delle successive analisi di dettaglio, non oggetto del presente elaborato preliminare, anche considerando l'interazione con il moto ondoso (liquefazione residua).

8.3 LIQUEFAZIONE INDOTTA DAL MOTO ONDOSI

In assenza di informazioni geotecniche di dettaglio, il fenomeno di liquefazione (istantanea) del fondale permeabile per effetto del moto ondoso può essere valutato in via preliminare sulla base di un approccio semplificato al mezzo poroelastico descritto in [21] e utilizzando i dati statistici sul moto ondoso dell'Alto Adriatico riportati in [22]. Si definisce preliminarmente la forma dell'eccesso di pressione neutrale all'interno del fondale come:

$$u = u_0 \exp(-\lambda z) \cos(\omega t)$$

In cui u_0 è la pressione neutrale a riposo e λ ($2\pi/L$) è il numero d'onda caratteristico per l'onda di progetto. Quest'ultimo parametro lega il moto ondoso misurabile ai fenomeni poroelastici precedentemente descritti e la sua derivazione può essere operata per via statistica sulla base di dataset pubblicati. Nel caso specifico, con particolare riferimento ai risultati contenuti in [22], è possibile operare la seguente stima dell'eccesso di sovrappressione neutrale e, conseguentemente, della profondità di equilibrio per la quale tale sovrappressione eguaglia la tensione verticale efficace per un determinato tempo di ritorno (T_R) associato all'onda estrema.

Liquefazione per moto ondoso

h_w	16,0	m	
T_R	50	anni	
Q	1,36E-05	-	
H_s^{ref}	6,69	m	
$T_p(H_s^{ref})$	7,88	s	
c	1,23E+01	m/s	
k	2,24E+01	-	
U_c	2,45E+01	-	
u_w	2,39E+01	m/s	
c/u_w	0,52	-	< 1
L	9,71E+01	m	
u_b	1,57E+02	kPa	
Δu	5,57E+01	kPa	
Z_{eq}	6,8	m	$\sigma'_v = \Delta u$

$$H_s^{RP} = \alpha_{H_s} * \left(-\ln(Q(H_s^{RP})) \right)^{1/\beta_{H_s}} + \gamma_{H_s}$$

$$1 - \left(\ln \hat{r}_n - u \right)^2$$

Table 5. Most probable extreme significant wave height for 20-, 50- and 100-year return periods.

Region	RP = 20 Year	RP = 50 Year	RP = 100 Year
Adriatic Sea	5.94	6.47	6.87
$f_{U H_s}(u_w H_s) = k \frac{u_w^{k-1}}{U_c^k} \exp \left[- \left(\frac{u_w}{U_c} \right)^k \right]$		6.69	7.12
		6.10	6.44
		6.14	6.46

Table 4. Model parameters for joint distribution of H_s and u_w . Adriatic regional subdivision.

Region	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
Adriatic Sea	1.6533	2.2548	1.1557	-0.3633	7.7434	0.5817
North Adriatic	1.6910	1.8402	1.2730	-0.0925	7.4936	0.6245
Central Adriatic	1.4848	2.5383	1.0783	-0.2775	7.7063	0.5978
South Adriatic	1.5796	2.5238	1.0601	-0.2048	7.5145	0.5886

Questa prima stima, di carattere assolutamente preliminare, indica una profondità di equilibrio attorno a 6-7 m per un'onda estrema con tempo di ritorno pari a 50 anni. È pertanto ragionevole supporre che oltre tali profondità l'effetto di liquefazione istantaneo dovuto all'onda estrema sia marginale.

8.4 FRANE SOTTOMARINE

Per quanto attiene al rischio di innesco e propagazione di frane sottomarine, siano esse dovute alla commistione degli effetti gravitativi e del moto ondoso o cosmiche, ci si riferisce principalmente al lavoro pubblicato in [24]. Sulla base di questa fonte bibliografica e in ragione di una morfologia praticamente pianeggiante dei fondali, per l'area oggetto di studio viene indicato un rischio di innesco di frane sottomarine marginale. In Figura 8.6 è riportato un estratto della cartografia numerica prodotta a valle degli studi pubblicati in [24] a supporto di quanto precedentemente affermato.

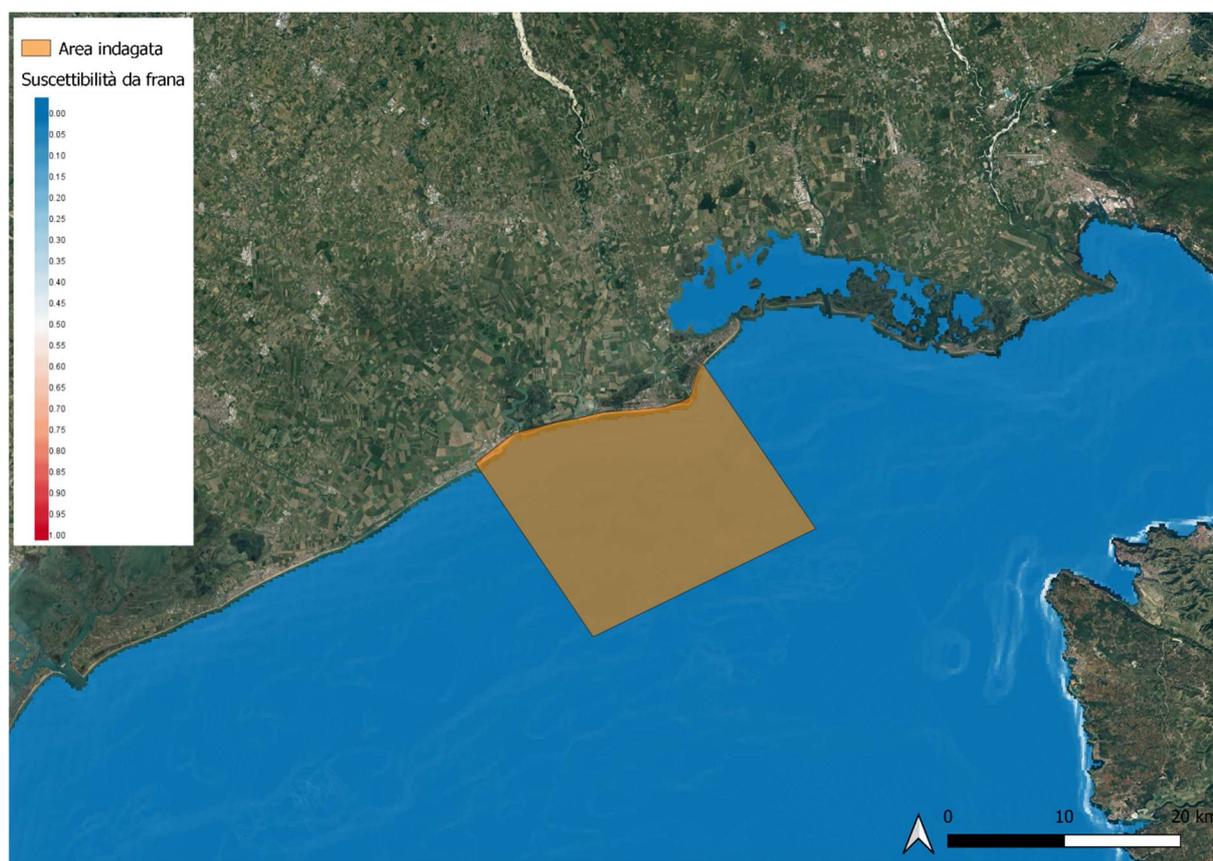


Figura 8.6: Mappa di suscettibilità a frana sottomarina

8.5 MAREMOTO

Le coste Italiane sono storicamente fra le più suscettibili a onde di maremoto nell'ambito del bacino del Mediterraneo. Per quanto attiene, nello specifico, al Mare Adriatico, l'evento storico più rilevante è legato al

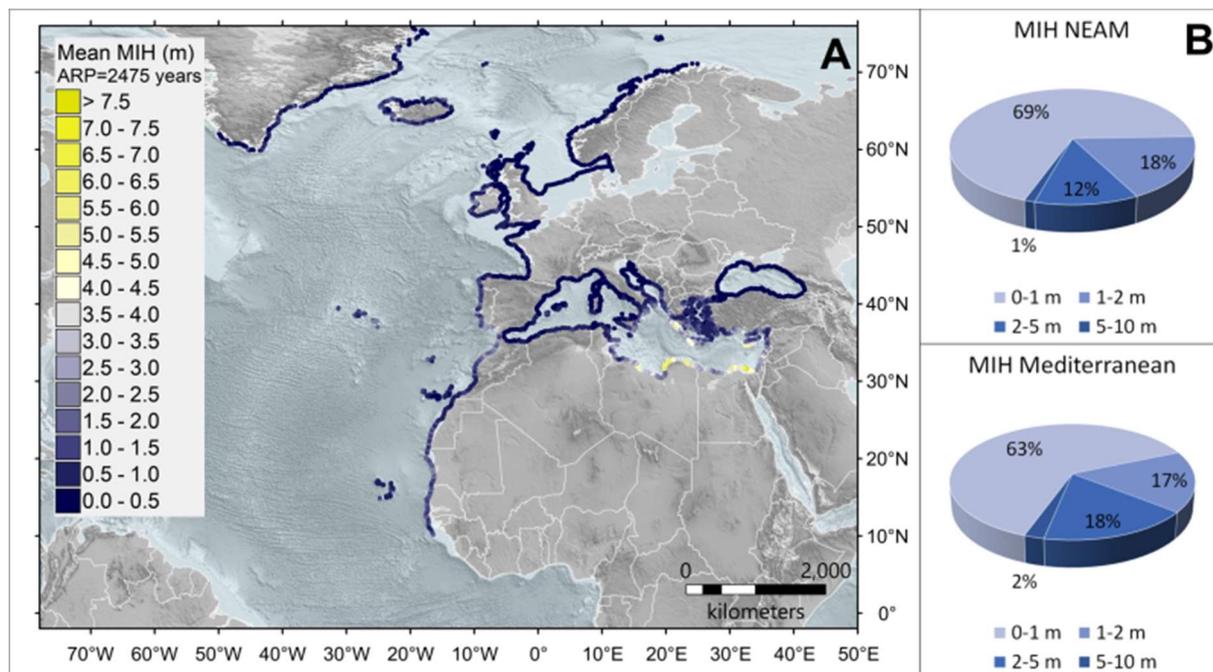


Figura 8.8: Mappa a scala sovra-continentale del rischio tsunami [23]

In termini generali, con specifico riferimento all'installazione LGN in progetto, il rischio di danni da maremoto può essere ritenuto basso per l'area oggetto di indagine.

9 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Lo studio contenuto nel presente elaborato, di carattere esclusivamente compilativo, ha messo in luce i seguenti aspetti relativi a geologia, geotecnica e georischi per l'area oggetto di indagine:

1. Per quanto riguarda gli aspetti morfo-batimetrici generali, l'area è caratterizzata da bassi fondali praticamente pianeggianti, con massime profondità non superiori a 30 m e pendenze medie dell'ordine di 0.01%.
2. La litologia dell'area in esame è caratterizzata dalla presenza di marne e argilliti carbonatiche (principalmente calcari) corrispondenti alla Piattaforma Carbonatica Friulana, coperte da sedimenti di origine marina e continentale diffusi in funzione della batimetria (fino a pochi chilometri dalla costa), con uno spessore che può raggiungere 800 metri. Superficialmente, è plausibile la presenza di sedimenti sciolti a litologia prevalentemente sabbioso/limosa con intercalazioni limoso/argillose nell'ambito delle profondità di interesse per la fondazione del sistema SPM. È tuttavia possibile il rinvenimento superficiale di forme litificate isolate (plausibilmente argillitiche) in una fascia compresa tra 10 e 40 m dal fondale.
3. L'area in esame presenta una bassa pericolosità sismica di base, connotata da valori magnitudo massima attesa (M_w) compresi fra 6.5 e 7.1 e valori di a_g al bedrock sismico (convenzionale) dell'ordine di 0.090 g per un periodo di ritorno di 500 anni. In termini di rischio, la normativa specifica [2] inquadra l'installazione prevista all'interno della categoria SRC4.
4. Sulla base delle considerazioni di carattere geologico e geotecnico generali, non è possibile escludere a priori l'insorgenza di fenomeni rilevanti associati alla liquefazione degli orizzonti sabbiosi presenti nella stratigrafia più superficiale in occasione di eventi sismici intensi. In via preliminare, per questo fenomeno si stima una probabilità di innesco bassa per tempi di ritorno dell'evento sismico pari o inferiori a 500 anni, mentre si stima una probabilità di innesco moderatamente elevata per tempi di ritorno eccedenti i 2500 anni.
5. Una stima preliminare concernente il fenomeno della liquefazione indotta dal moto ondoso indica una profondità di equilibrio attorno a 6-7 m per un'onda estrema con tempo di ritorno pari a 50 anni. È pertanto ragionevole supporre che oltre tali profondità l'effetto di liquefazione istantaneo dovuto all'onda estrema sia marginale.
6. Per quanto attiene al rischio di frane sottomarine, siano esse dovute alla commistione degli effetti gravitativi e del moto ondoso o cosismiche, si stima una probabilità di innesco marginale. Questo soprattutto in ragione della morfologia praticamente pianeggiante dei fondali.
7. Per quanto attiene al rischio tsunami, le intensità mostrate nel catalogo per gli eventi storici prossimi variano fra III e IV sulla scala Papadopoulos-Imamura (P-I), denotando eventi tendenzialmente non dannosi. In merito ai possibili effetti in prossimità della costa, il rischio di inondazione rilevato è generalmente molto basso, con valori attesi di MIH < 2 m per eventi con periodo di ritorno fino a 2500 anni. In termini generali, con specifico riferimento all'installazione LGN in progetto, il rischio di danni da maremoto può essere ritenuto basso per l'area oggetto di indagine.

In fase di ampliamento dello studio per la caratterizzazione geologica, geotecnica e sui georischi, si raccomanda di istituire un protocollo di indagine sufficientemente flessibile, al fine di gestire l'incognita legata alle forme sepolte irregolari, le quali potrebbero interferire con l'esecuzione di prove di tipo *direct-push*.

Ad ogni modo, considerando le litologie attese in prevalenza, si consiglia di adottare una combinazione di prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU), prove dilatometriche (DMT) e sondaggi geognostici in numerosità e distribuzione tali da consentire una caratterizzazione completa ed esaustiva, finalizzata al dimensionamento della fondazione prescelta per il sistema SPM. Trattandosi, quest'ultima, di una tipologia costruttiva sufficientemente circoscritta dal punto di vista geometrico, non si ritiene utile integrare la campagna di indagini invasive mediante indagini geofisiche estensive.

Si raccomanda, infine, di valutare in maniera minuziosa (mediante, ad esempio, l'esecuzione di prove di laboratorio specifiche quali prove triassiali dinamiche) il comportamento ciclico dei materiali più superficiali, al fine di ottenere informazioni adeguate alle verifiche dettagliate circa il rischio di liquefazione/mobilitazione ciclica della resistenza per effetto del sisma e del moto ondoso.

REFERENZE

- [1] EN ISO 20257-1 Installation and equipment for liquefied natural gas – Design of floating LNG installations – Part 1: General requirements
- [2] ISO 19901-2 - Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 2: Seismic design procedures and criteria
- [3] UNI EN 1997-1 Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali
- [4] UNI EN 1998-1 Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
- [5] D.M. 17 gennaio 2018 (NTC2018) “Norme Tecniche per le Costruzioni”
- [6] Giorgetti F., Mosetti F., Macchi G. (1968): Caratteristiche morfologiche, fisiche e chimiche del fondo marino del Golfo di Trieste nell'area compresa entro la congiungente Punta Grossa – Bocche di Primero, Boll. Soc. Adr. Sc., vol. LVI/1, 3-21.
- [7] Rossi S., Mosetti F., Cescon B. (1968): Morfologia e natura del fondo nel Golfo di Trieste (Adriatico Settentrionale fra Punta Tagliamento e Punta Salvore), Boll. Soc. Adr. Sc., LVI/2, 187-206.
- [8] Romeo R. (2009), Studio geofisico integrato ad alta risoluzione dei depositi marini e della struttura del substrato della riviera di Miramare - Dott. Ric. Scienze Ambientali XX ciclo, Università degli Studi di Trieste
- [9] Busetti M., Zgur F., Romeo R., Sormani L., Pettenati F. (2012). “Caratteristiche geologico-strutturali nel Golfo di Trieste”
- [10] Costa V., Doglioni C., Grandesso P., Masetti D., Pellegrini G.B. Trancanella E. 1992- Carta geologica d'Italia, Note illustrative al Foglio 63-Belluno- Istituto Poligrafico e Zecca di Stato
- [11] Busetti, Martina & Volpi, Valentina & Barison, Erika & Giustiniani, Michela & Marchi, Maurizio & Ramella, Riccardo & Wardell, Nigel & Zanolla, Claudio. (2010). Meso-Cenozoic seismic stratigraphy and the tectonic setting of the Gulf of Trieste (northern Adriatic). *GeoActa*. SP 3. 1-14
- [12] Busetti M., Zgur F., Dolcin M., Bohm G. Vrabec M, Trobec A., Babic A., 2016- Evoluzione Tettonica Tardo-Cenozoica del Golfo di Trieste- 2016. La Geologia Marina in Italia- CNR Roma- 18,19 febbraio 2016
- [13] Trobec, A., Busetti, M., Zgur, F., Baradello, L., Babich, A., Cova, A., Gordini, E., Romeo, R., Tomini, I., Poglajen, S., Diviaco, P., and Vrabec, M.: Thickness of marine Holocene sediment in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea), *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1077–1092, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1077-2018>, 2018
- [14] Giustiniani M., Tinivella U., Parolai S., Donda F., Brancolini G., Volpi V. “Integrated Geophysical Analyses of Shallow-Water Seismic Imaging with Scholte Wave Inversion: The Northern Adriatic Sea Case Study”, *Frontiers in Earth Science*, 8 (2020)
- [15] Simonini, Paolo & Ricceri, G. & Cola, Prof. PhD. Eng. Simonetta. (2007). Geotechnical characterization and properties of Venice lagoon heterogeneous silts. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*. 3. 2289-2327
- [16] Andrus R.D., Stokoe K.H., Hsein Juang C. Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation. *Earthquake Spectra*. 20(2):285-308 (2004)
- [17] Ciancimino A., Foti S., Lanzo G., “Stochastic analysis of seismic ground response for site classification methods verification”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 111. 169-183 (2018)
- [18] Danciu L., Nandan S., Reyes C., Basili R., Weatherill G., Beauval C., Rovida A., Vilanova S., Sesetyan K., Bard P-Y., Cotton F., Wiemer S., Giardini D. (2021) - The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. EFEHR Tech. Rep. 1
- [19] Russo E, Felicetta C, D Amico M, Sgobba S, Lanzano G, Mascandola C, Pacor F, Luzi L. Italian Accelerometric Archive v3.2 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (2022)

- [20] 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)
- [21] Yamamoto T., Koning H. L., Sellmeijer H., Van Hijum E., On the response of a poro-elastic bed to water waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 87(1), 193–205
- [22] Katalinic M., Parunov J., *Comprehensive Wind and Wave Statistics and Extreme Values for Design and Analysis of Marine Structures in the Adriatic Sea*, *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9(5), 522
- [23] Basili R., Brizuela B., Herrero A., Iqbal S., Lorito S., Maesano F.E., Murphy S., Perfetti P., Romano F., Scala A., Selva J., Taroni M., Thio H.K., Tiberti M.M., Tonini R., Volpe M., Glimsdal S., Harbitz C.B., Løvholt F., Baptista M.A., Carrilho F., Matias L.M., Omira R., Babeyko A., Hoechner A., Gurbuz M., Pekcan O., Yalçiner A., Canals M., Lastras G., Agalos A., Papadopoulos G., Triantafyllou I., Benckekroun S., Agrebi Jaouadi K., Ben Abdallah S., Bouallegue A., Hamdi H., Oueslati F., Amato A., Armigliato A., Behrens J., Davies G., Di Bucci D., Dolce M., Geist E., Gonzalez Vida J.M., González M., Macías Sánchez J., Meletti C., Ozer Sozdinler C., Pagani M., Parsons T., Polet J., Power W., Sørensen M.B., Zaytsev A. (2021), The making of the NEAM Tsunami Hazard Model 2018 (NEAMTHM18). *Front. Earth Sci*
- [24] Innocenti C., Battaglini L., D'Angelo S., Fiorentino A., "Submarine landslides: mapping the susceptibility in European seas. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* (2021) 54 (1)
- [25] AA.VV. "Il mare – Supplemento al bollettino ufficiale degli idrocarburi e delle georisorse", *Min. Svil. Econ., Dip. Energia, Dir. Gen. Risorse Minerarie ed Energetiche*, (2013) LVII (2)
- [26] Maramai A., Graziani L., and Brizuela B. (2019). *Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue (EMTC)*, version 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)



RINA Consulting S.p.A. | Società soggetta a direzione e coordinamento amministrativo e finanziario del socio unico RINA S.p.A.
Via Cecchi, 6 - 16129 GENOVA | P. +39 010 31961 | rinaconsulting@rina.org | www.rina.org
C.F./P. IVA/R.I. Genova N. 03476550102 | Cap. Soc. € 20.000.000,00 i.v.