



**Politecnico  
di Torino**

## **POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale  
in Sustainable Nuclear Energy**

**Tesi di Laurea Magistrale**

### **Il ruolo della modellazione CFD di fenomeni di esplosione di nubi di gas ai fini della valutazione del rischio**

**Relatori**

Prof. Andrea Carpignano

Prof.ssa Raffaella Gerboni

Dott.ssa Anna Chiara Ugenti

Ing. Luca Portè

**Candidato**

Pietro Porro

Anno Accademico 2024-2025



*A tutti i miei sbagli,  
alla mia sana Ignoranza.*



## ***ABSTRACT (ITA)***

Nello scenario di uno sviluppo industriale in continua evoluzione, la potenzialità delle nuove tecnologie cresce insieme ai danni che le stesse potrebbero provocare in caso di incidenti. Dunque, è doveroso condurre delle analisi di rischio per quantificarne le conseguenze e valutare se queste ultime rientrano all'interno della soglia ALARP o altrimenti fornire misure di prevenzione e mitigazione del danno.

Questo lavoro di tesi analizza le capacità della fluidodinamica computazionale (CFD) per calcolare i profili di sovrappressione che, in questo contesto, definiscono il danno da esplosione. L'analisi è stata condotta utilizzando il software FLACS-CFD della Gexcon AS con cui sono stati simulati degli scenari di esplosione di tre miscele di gas infiammabili caratterizzate da reattività crescenti in diversi punti di innesco. Tali eventi sono stati simulati all'interno di una geometria rappresentativa di un impianto a rischio di incidente rilevante: un molo offshore per la rigassificazione di GNL situato nel porto di Danzica.

Le simulazioni hanno prodotto dei profili di sovrappressione in corrispondenza degli elementi strutturali del caso studio. Essi sono stati analizzati da un punto di vista critico andando a verificare la coerenza con la fisica del fenomeno. Inoltre, è stato condotto un confronto con i metodi semi-empirici più utilizzati in questo contesto: il metodo TNO Multi-Energy e il metodo Baker-Strehlow-Tang (BST).

Questo studio ha mostrato che, rispetto ai metodi semi-empirici, la CFD produce dei risultati più accurati nel caso di esplosioni in geometrie complesse caratterizzate da spazi confinati e con ostacoli. Infatti, il tool CFD, a differenza dei modelli semi-empirici, fornisce la possibilità di analizzare ulteriori parametri che influenzano l'esplosione, come la posizione del punto di innesco, e ampliare lo spettro di scenari per rendere l'analisi di rischio quantitativa più esaustiva e completa. Inoltre, FLACS-CFD consente all'analista di visualizzare gli effetti dell'esplosione all'interno di aree di danno realizzate direttamente sulla geometria dell'impianto. In questo modo si ha la possibilità di prevedere quali siano gli elementi soggetti alle conseguenze peggiori e dove incrementare le misure di riduzione del rischio.

## ***ABSTRACT (ENG)***

In the context of continuous industrial development, the potential of emerging technologies increases alongside the severity of damage they may cause in the event of an accident. Therefore, it is essential to perform risk assessments aimed at quantifying the possible consequences in order to determine whether they fall within the ALARP region or to identify the need for prevention and mitigation measures.

This thesis investigates the capabilities of Computational Fluid Dynamics (CFD) in calculating overpressure profiles that, in this frame, characterize the accidental damage. The analysis was carried out using the FLACS-CFD software developed by Gexcon AS, simulating explosion scenarios involving three flammable gas mixtures with increasing reactivity, each ignited at different locations. These events were modelled within a geometry representative of a facility classified as a Major Hazard Installation: a terminal for a Floating Storage Regasification Unit (FSRU).

The simulations generated overpressure profiles in correspondence of structural elements of the case study geometry. These outputs were critically analysed to assess their consistency with the physics of explosion phenomena. Additionally, results were compared with those from two widely used semi-empirical methods in this field: the TNO Multi-Energy Method and the Baker-Strehlow-Tang (BST) Method.

This study demonstrated that, through CFD, more accurate results can be obtained for explosions occurred in semi-confined spaces with the presence of obstacles. CFD, unlike semi-empirical models, enables the exploration of additional parameters influencing explosion severity, such as ignition point location, thereby broadening the spectrum of possible scenarios and enhancing the comprehensiveness of quantitative risk assessments. Moreover, FLACS-CFD allows analysts to visualize explosion effects through damage contours directly mapped onto the facility's 3D geometry. This provides a valuable tool for identifying the most affected components and prioritizing areas for the implementation of safety measures.

# INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
1.1	SCOPO DELLA TESI .....	3
1.2	STRUTTURA DELLA TESI .....	5
2	IL CASO STUDIO .....	7
3	INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA .....	11
3.1	DINAMICA DELLE ESPLOSIONI .....	12
3.2	MISCELE ESPLOSIVE .....	15
3.3	STANDARD TECNICO NORSOK E PRINCIPI FONDAMENTALI .....	19
3.4	SOFTWARE FLACS-CFD.....	23
3.5	MODELLI UTILIZZATI.....	24
3.5.1	Dispersione – modello Q9 .....	25
3.5.2	RANS e $k - \varepsilon$ standard .....	26
3.5.3	Metodo per il calcolo della pressione .....	26
3.5.4	Metodo per la convergenza della grid.....	28
3.6	MODELLI ALTERNATIVI PER LA MODELLAZIONE DELLE ESPLOSIONI .....	28
4	METODOLOGIA .....	32
4.1	SCELTA DELLO SCENARIO .....	33
4.2	SCELTA CASI STUDIO .....	34

4.3	PREPARAZIONE DEL SET DI SIMULAZIONI .....	35
4.4	ANALISI DEI RISULTATI.....	35
5	MODELLAZIONE CFD.....	38
5.1	GEOMETRIA E SCELTA DELLO SCENARIO .....	38
5.2	MONITOR POINTS .....	40
5.3	SINGLE FIELD 3D OUTPUT.....	42
5.4	SIMULATION AND OUTPUT CONTROL.....	43
5.5	BOUNDARY CONDITIONS.....	44
5.6	INITIAL CONDITIONS.....	45
5.7	GAS COMPOSITION AND VOLUME .....	46
5.8	IGNITION .....	47
5.9	SCELTA DELLA GRID .....	47
5.10	ANALISI DI SENSIBILITA' .....	52
6	ANALISI DEI RISULTATI.....	54
6.1	ANALISI LOCALE SU SPECIFICI TARGET.....	56
6.1.1	Esplosione di Gas Naturale .....	58
6.1.2	Esplosione di miscela Metano – Idrogeno.....	62
6.1.3	Esplosione di Idrogeno .....	66
6.2	ANALISI GLOBALE: AREE DI DANNO .....	69
6.3	CONFRONTO FRA CFD E MODELLI SEMI-EMPIRICI .....	72

6.3.1	CONFRONTO CON IL TNO MULTI-ENERGY METHOD.....	73
6.3.2	Confronto con il metodo BST.....	80
6.4	CONSIDERAZIONI SUI DUE CONFRONTI PRECEDENTI E SU PHAST.....	83
7	CONCLUSIONI .....	87
	Bibliografia .....	90
	Appendice A: risultati di FLACS-CFD .....	93
	GAS NATURALE .....	94
	Innesco centrale .....	94
	Innesco nel punto 2 .....	95
	Innesco nel punto 6 .....	95
	Innesco nel punto F .....	96
	Innesco nel punto H.....	97
	MISCELA METANO-IDROGENO.....	98
	Innesco centrale .....	98
	Innesco nel punto 2 .....	99
	Innesco nel punto 6 .....	100
	Innesco nel punto F .....	101
	Innesco nel punto H.....	102
	MISCELA IDROGENO.....	103
	Innesco centrale .....	103

Innesco nel punto 2 .....	104
Innesco nel punto 5 .....	104
Innesco nel punto B .....	105
Innesco nel punto H.....	106
Appendice B: Procedura di calcolo utilizzata per ottenere i risultati attraverso i modelli semi-empirici TNO e BST .....	107
CALCOLI DI STECHIOMETRIA .....	107
CALCOLI DI ENERGIA LIBERATA DALLA COMBUSTIONE.....	108
CALCOLI DEL DANNO DI ESPLOSIONE COL METODO TNO .....	111
CALCOLI DEL DANNO DI ESPLOSIONE COL METODO BST .....	113
Appendice C: Risultati delle simulazioni su PHAST .....	115
GAS NATURALE .....	116
METANO-IDROGENO .....	119
IDROGENO.....	121

## **1 INTRODUZIONE**

L'umanità ha sempre dovuto fare i conti con il rischio, un elemento onnipresente nella sua storia. Con la Rivoluzione Industriale e il conseguente progresso tecnologico, l'uomo ha introdotto nuovi rischi, spesso più gravosi di quelli del passato. Il sociologo britannico Anthony Giddens definisce questi pericoli come *manufactured risks* [11], ovvero rischi antropici, generati direttamente dalle attività umane. Essi possono essere valutati e limitati attraverso azioni mirate (*"There is no risk which can even be described without reference to a value"*).

Questo cambiamento ha portato a una diversa percezione della tecnologia: se in passato era vista esclusivamente come motore di progresso e benessere, oggi è riconosciuta anche come potenziale fonte di pericolo. Ne deriva la necessità di adottare strategie sistematiche di prevenzione e mitigazione del rischio, specialmente nei settori industriali ad alto impatto. Il sociologo tedesco Ulrich Beck definisce la nostra epoca come società del rischio [15], evidenziando come le minacce moderne abbiano ormai una portata globale. Oggi, gli incidenti industriali non si limitano a impattare un'area circoscritta, ma possono avere conseguenze su vasta scala.

È emblematico il tragico incidente verificatosi presso Seveso nel 10 luglio del 1976 [12]. Il rilascio accidentale di una nube contenente TCDD (un sottoprodotto altamente tossico della preparazione del triclorofenolo, una sostanza impiegata nella produzione di erbicidi e battericidi), proveniente da un reattore dell'impianto chimico ICMESA (*Industrie Chimiche Meridionali Società Azionaria*), ha spinto l'UE "a dotarsi di una politica comune in materia di prevenzione dei grandi rischi industriali a partire dal 1982" [13]. La direttiva, che prende il nome di "Direttiva Seveso", è tutt'ora in vigore e viene aggiornata costantemente tenendo conto delle modifiche sulla legislazione UE e dell'evoluzione della tecnica.

Si può menzionare, oltre all'incidente di Seveso sopracitato, la catastrofe avvenuta in Bhopal in India nel 1984, in cui la dispersione in atmosfera di circa 40 tonnellate di MIC (isocianato di metile) ha provocato la morte di migliaia di persone nel giro di poche ore.

Non solo gli impianti chimici, ma anche quelli nucleari e del settore Oil&Gas sono stati teatro di gravi incidenti nel corso della loro storia. L'evento più noto che vede come protagonista un reattore nucleare è il disastro di Chernobyl del 1986. Tra gli incidenti nel settore Oil&Gas, invece, si può citare l'esplosione e il conseguente collasso della piattaforma petrolifera Piper Alpha nel Mare del Nord che ha provocato un'ingente quantità di vittime tra i lavoratori che la abitavano tra il 6 e 7 luglio del 1988 [14]. Un evento caratterizzato da meno morti ma ben più grave da un punto di vista di impatto ambientale è il disastro della Deepwater Horizon nel 2010, noto alla storia come la più grande fuoriuscita di petrolio in mare [16] e l'esplosione nella raffineria di Texas City nel 2005 [17].

Molto spesso questo genere di incidenti è causato da una scarsa consapevolezza sul concetto di sicurezza e da un'insufficiente attenzione al benessere degli impiegati e dei civili che abitano nelle vicinanze di questi impianti pericolosi. Un altro esempio molto recente riguarda la tragica esplosione avvenuta presso il deposito Eni di Calenzano nel 9 dicembre del 2024 che ha provocato la morte di cinque persone e ne ha ferite ventisei [18].

Mentre il passato ci presenta questi esempi drammatici, il futuro ci impone nuove sfide. Con il Green Deal Europeo [22], la transizione energetica verso una neutralità climatica passa attraverso l'utilizzo di gas naturale come combustibile di transizione per poi arrivare ad una piena maturità dell'utilizzo dell'idrogeno come vettore energetico chiave per il futuro. Entrambe queste sostanze, per quanto centrali nelle strategie future, non sono esenti da rischi. Anzi, presentano un potenziale esplosivo che deve essere attentamente analizzato e gestito. L'idrogeno in particolare, per via della sua elevata reattività e il suo ampio spettro di infiammabilità [8], può generare fenomeni esplosivi particolarmente severi, richiedendo approcci di valutazione del rischio più rigorosi e aggiornati.

Risulta quindi indispensabile promuovere sempre di più l'impiego di tecniche innovative che puntino a modellare accuratamente scenari incidentali complessi, valutare quantitativamente le loro conseguenze su persone, ambiente e strutture e supportare la progettazione sicura dei nuovi impianti che guideranno la transizione energetica.

### **1.1 SCOPO DELLA TESI**

Nello scenario di uno sviluppo industriale in continua evoluzione, in cui la potenzialità delle nuove tecnologie cresce insieme ai danni che le stesse potrebbero provocare in caso di eventi incidentali, è fondamentale prendere atto che questi ultimi sono sempre caratterizzati da una probabilità diversa da zero [19]. A tal proposito è doveroso condurre delle analisi di rischio al fine di quantificare nella maniera più accurata possibile i danni generati dagli eventuali incidenti per fornire delle misure di mitigazione degli stessi e/o garantire che i loro effetti rientrino all'interno di una soglia (ALARP) per cui possono essere considerati accettabili [20].

Nello specifico, questo lavoro di tesi si focalizza sull'indagine delle potenzialità della *CFD* (Computational Fluid Dynamics) come strumento innovativo per condurre l'analisi delle conseguenze provocate da scenari incidentali carattere esplosivo. La termofluidodinamica computazionale è una tecnica numerica che risolve le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia per quantificare le grandezze fisiche che descrivono il comportamento del fluido in analisi all'interno di una geometria complessa.

Le esplosioni di nubi di vapore (dette anche VCE – Vapor Cloud Explosions [8]) sono fenomeni in cui la sostanza combustibile subisce un processo chimico di combustione provocando una serie di reazioni esotermiche che trasformano i fluidi reagenti in prodotti di combustione gassosi e liberando una considerevole quantità di energia sotto forma di onda d'urto, calore e luce. Pertanto, la *CFD* si configura come uno strumento particolarmente adatto per l'analisi di scenari esplosivi, in quanto consente di riprodurre in modo dettagliato la dinamica della combustione, la propagazione dell'onda d'urto e

l'interazione con le strutture circostanti, anche in geometrie complesse. La sua capacità di descrivere con elevata risoluzione spazio-temporale l'evoluzione di un fenomeno esplosivo la rende una tecnologia preziosa nell'ambito dell'Explosion Risk Assessment (ERA), sia per la valutazione delle conseguenze, sia per il supporto alla progettazione di impianti più sicuri.

Nel contesto delle esplosioni, la grandezza da attenzionare maggiormente risulta essere la pressione generata da tale fenomeno [4]. Questa grandezza rappresenta un indicatore di energia rilasciata sotto forma di onda d'urto. Quest'ultima, propagandosi nell'ambiente, è responsabile di danni strutturali, impatti sulle persone e proiezione di oggetti non solidamente ancorati. Oltre ad essa, occorrono anche dati probabilistici (ad esempio sui possibili scenari di perdita e di innesco di nube infiammabile) che solitamente vengono presi da degli appositi database. Mediante l'utilizzo di queste informazioni, all'interno dell'ERA vengono realizzate le cosiddette curve di eccedenza o curve di superamento (*exceedance curves*), con le quali è possibile quantificare la probabilità associata ad eventi caratterizzati da valori di sovrappressione critici per l'impianto [21]. L'output di queste curve viene utilizzato come input cruciale per la fase decisionale legata ai criteri da adottare per edificare nuovi impianti o per prendere delle decisioni su impianti attualmente esistenti.

Trattandosi di un approccio in grado di mostrare uno spettro di scenari, occorre che questi ultimi siano verosimili e modellati accuratamente, onde evitare la sovrastima dei loro effetti e quindi delle misure preventive eccessivamente costose. Va evitata allo stesso modo anche la loro sottostima che, al contrario, potrebbe apportare delle misure preventive inefficaci con danni ingenti alle persone, agli elementi naturali e/o antropici presenti nell'area di danno.

Per questo motivo è fondamentale cercare un metodo che punti ad ottenere dei valori di sovrappressione il più accurati possibile. Allo stato attuale, la potenza di calcolo raggiunta dai computer consente l'utilizzo di software adibiti ad eseguire delle simulazioni termofluidodinamiche in tempi ragionevoli. All'interno di questo percorso di

tesi, verranno simulati degli scenari di esplosione di nubi di vapore per valutare le diverse tipologie di risultati prodotti dalla CFD in maniera critica, con un taglio ingegneristico improntato sull'analisi di rischio. Infine, questi risultati saranno confrontati con quelli che si otterrebbero da curve empiriche generate da correlazioni provenienti da degli esperimenti condotti in un ambiente controllato per valutare le differenze tra i due diversi approcci.

## **1.2 STRUTTURA DELLA TESI**

All'interno di questo paragrafo verrà presentato sinteticamente il contenuto di ciascuno dei capitoli successivi.

Il secondo capitolo fornisce una descrizione dettagliata del caso studio con tutte le informazioni inerenti alla funzione dell'impianto oggetto di analisi e alle sue caratteristiche tecniche. Vi sarà inoltre la descrizione dello scenario incidentale su cui sono state condotte le simulazioni.

Il terzo capitolo racchiude i contenuti teorici, normativi e una serie di nozioni al contorno che caratterizzano l'inquadramento del problema. Si parte da una descrizione della fisica del fenomeno per poi passare in rassegna il comportamento delle diverse miscele esplosive selezionate per questo lavoro di tesi. Dopodiché ci si sposta sull'inquadramento dello Standard NORSOK per evidenziare le modalità richieste per modellare le esplosioni e stimarne gli effetti e una serie di inquadramenti normativi da cui emerge la necessità per questo tipo di impianto di essere sottoposto ad analisi di rischio quantitativa. A seguire, verranno descritti i modelli empirici utilizzati come riferimento per il confronto con i risultati prodotti dalla CFD per poi concludere con la scelta e la giustificazione del software scelto, includendo una sintesi dei principali modelli implementati al suo interno.

Il quarto capitolo descrive la metodologia adottata per condurre questo lavoro di tesi e presenta, nei suoi sottoparagrafi, la sequenza di step percorsi per raggiungere l'obiettivo stabilito.

Il quinto capitolo entra nel merito della modellazione CFD del caso studio. Ogni sottosezione descrive in dettaglio le impostazioni adottate in relazione ai parametri richiesti dal software, raggruppandoli secondo le categorie previste dall'ambiente di simulazione.

Il sesto capitolo sarà dedicato all'analisi dei risultati. Verranno prima di tutto analizzate le simulazioni rappresentative dell'intero caso studio sotto diversi aspetti per evidenziare le potenzialità della CFD nell'elaborare delle conseguenze associate al rischio di esplosione. Dopodiché segue una critica sui risultati prodotti dalle analisi di sensibilità in cui si giustificano da un punto di vista fisico gli effetti che i diversi punti di innesco hanno prodotto sui risultati finali. Inoltre, si passa alla visualizzazione dei risultati sotto forma di aree di danno per analizzare quali sono le regioni della geometria soggette alle conseguenze peggiori. In conclusione, la CFD verrà confrontata con i modelli semi-empirici più utilizzati per l'analisi delle conseguenze per cercare di individuare le principali differenze fra questi processi di calcolo ed evidenziare i punti di forza della CFD come metodo ottimale per condurre un'analisi di rischio più estesa e dettagliata.

Nel settimo e ultimo capitolo si riportano le conclusioni del lavoro svolto. In esso si tracciano le principali osservazioni emerse, valutando punti di forza e limiti del software adottato e, più in generale, della CFD come strumento di supporto alle analisi di rischio di esplosione.

## **2 IL CASO STUDIO**

Dopo aver definito l'obiettivo della tesi, è fondamentale incentrare l'analisi in un contesto reale. Per questo motivo, il caso studio è contestualizzato all'interno di un progetto europeo di transizione energetica che prevede la realizzazione di un molo nel Golfo di Danzica su cui sarà attraccata una rigassificatrice galleggiante (o FSRU). Quest'ultima rigassificherà il GNL (Gas Naturale Liquefatto) per poi immetterlo nella rete di distribuzione nazionale attraverso un gasdotto che manderà il gas naturale in tutta la Polonia [23].

Tale iniziativa gode dello status di "Progetto di Importanza Comunitaria" (PCI). Si tratta di una serie di investimenti incentivati dal Parlamento Europeo volti ad aumentare il livello di sicurezza e concorrenza nel mercato energetico europeo. Ne consegue che la sua implementazione svolge un ruolo fondamentale sui presupposti della politica energetica della Polonia ma anche sugli obiettivi climatici proposti dall'Unione Europea nel Green Deal [22].

Nello specifico, l'investimento comprende la realizzazione di un molo nella baia di Danzica entro il 2028 e l'impiego di un terminale FSRU (*Floating Storage and Regasification Unit*) adattato per la ricezione e rigassificazione di circa 6,1 miliardi di  $Nm^3$  di gas naturale ogni anno. Il terminale è stato progettato affinché il gasdotto riceva il gas naturale dalla FSRU con una pressione massima operativa di 86 *bar*g e alla temperatura di 1°C. In queste condizioni, il gas naturale, caratterizzato da una densità di circa 100  $kg/m^3$ , percorre i condotti con una portata massica di circa 205  $kg/s$ .

Un altro elemento importante del progetto è l'infrastruttura che collega il molo alla Line Valve Station (LVS), situata sulla terraferma nelle immediate vicinanze del Golfo, grazie alla quale sarà possibile immettere il gas nella rete di distribuzione nazionale [23]. Uno schema semplificato dell'impianto è visibile in Figura 1.



Figura 1: Schema qualitativo del progetto Terminal FSRU [23].

La figura 2 di seguito mostra invece la geometria del molo che prevederà l'attracco della FSRU (rappresentata in maniera stilizzata in colore rosso).

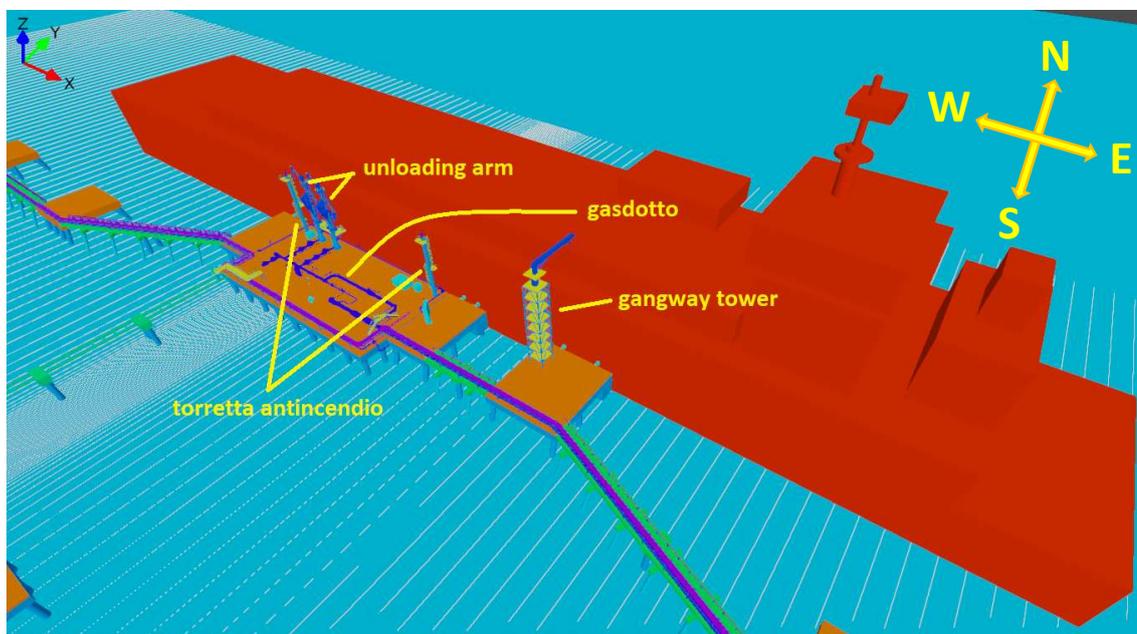


Figura 2: Schema dettagliato del progetto Terminal FSRU.

Il passaggio di gas dalla FSRU al gasdotto sottomarino avviene mediante due unloading arm (sistemi che connettono la FSRU al gasdotto). Questi ultimi sono stati progettati affinché uno risulti operativo al 100% mentre l'altro risulti disponibile nel caso di malfunzionamenti del primo. Gli unloading arm sono stati installati nella parte centrale del molo, luogo in cui è presente anche l'inizio del gasdotto e le torrette antincendio. Nelle immediate vicinanze del molo centrale, si ha un altro pontile su cui è stata installata una gangway tower, un altro elemento importante dell'impianto in quanto consente il collegamento tra la FSRU e il molo per il passaggio del personale tecnico.

All'interno di questo progetto è stato ipotizzato il seguente scenario incidentale. La caduta accidentale di un elemento strutturale del molo centrale è tale da provocare una rottura nel gasdotto localizzata nelle immediate vicinanze degli unloading arm. La suddetta rottura provoca un rilascio di gas naturale con una portata pari a  $16 \text{ kg/s}$  direzionato verso la rigassificatrice. Questo evento si verifica di notte, in condizioni atmosferiche stabili e con un vento molto debole (diretto verso nord con una velocità inferiore a  $5 \text{ m/s}$ ). Con queste condizioni meteorologiche, la dispersione accidentale di gas provoca la formazione di una nube esplosiva che investe la zona occupata dagli unloading arm. Nello specifico, la nube viene modellata come nube equivalente dalla forma parallelepipedica con un volume di  $3240 \text{ m}^3$ . In questo scenario si ha inoltre la produzione accidentale di una scintilla dovuta ad un cortocircuito di un quadro elettrico installato in prossimità dell'inizio del gasdotto. La scintilla funge da innesco debole per la nube e dà origine a un fenomeno di esplosione di nube di vapore che si verifica in corrispondenza del molo centrale.

Per gli scopi presentati nell'introduzione, il caso studio è stato ampliato andando a considerare diverse composizioni della nube esplosiva. Sebbene il suddetto impianto sia stato realizzato per processare solo gas naturale, sono state modellate delle ulteriori esplosioni partendo dal volume di nube dello scenario di dispersione precedentemente descritto e variandone le sue componenti. Nello specifico, in linea con le proposte fornite dalla Comunità Europea sulla transizione energetica, sono state modellate delle esplosioni di una miscela composta da metano e idrogeno (rispettivamente al 70% e 30% in volume) e da solo idrogeno. Oltre ad analizzare l'effetto che una maggiore reattività produce sulle conseguenze dell'esplosione, con la nube di solo idrogeno è possibile anche testare il comportamento della CFD nella modellazione di scenari in cui può verificarsi una transizione da deflagrazione a detonazione, una forma di esplosione molto più violenta in cui il fronte di fiamma si propaga a velocità supersoniche.

Dopo aver valutato gli effetti dell'esplosione delle tre diverse miscele, è stata condotta un'analisi di sensibilità sul punto d'innesco per comprendere quanto questo parametro influenzi il profilo di sovrappressione generato. In principio, un innesco debole

come una scintilla può verificarsi per diverse ragioni e in diversi punti della geometria: oltre ad un cortocircuito in una linea elettrica o in un quadro, anche l'urto tra metalli o l'utilizzo di utensili non adeguati potrebbe provocarla. Per condurre questa analisi di sensibilità, per ciascuna miscela esplosiva considerata, il punto d'innescò è stato collocato in posizioni strategiche all'interno della nube. In particolare, sono stati selezionati:

- Il centro geometrico della nube;
- I centri delle sei facce perimetrali;
- I vertici estremi del volume della nube (otto in totale).

Questa scelta permette di indagare uno spettro più ampio di scenari, così da evidenziare come la posizione dell'innescò possa influenzare la propagazione del fronte di fiamma, e quindi, le sovrappressioni sviluppate e i danni ad esse associati.

Nella Figura 3 viene mostrato schematicamente il set di simulazioni che compongono il caso studio. Il totale delle simulazioni preparate per questo lavoro di tesi ammonta quindi a 45 eventi di esplosione: ciascuno di essi è caratterizzato da una delle tre diverse miscele (gas naturale, miscela metano-idrogeno al 70%-30%, idrogeno) e da uno dei 15 diversi punti di innescò (innescò centrale, in uno degli 8 vertici o al centro di una delle 6 facce perimetrali).

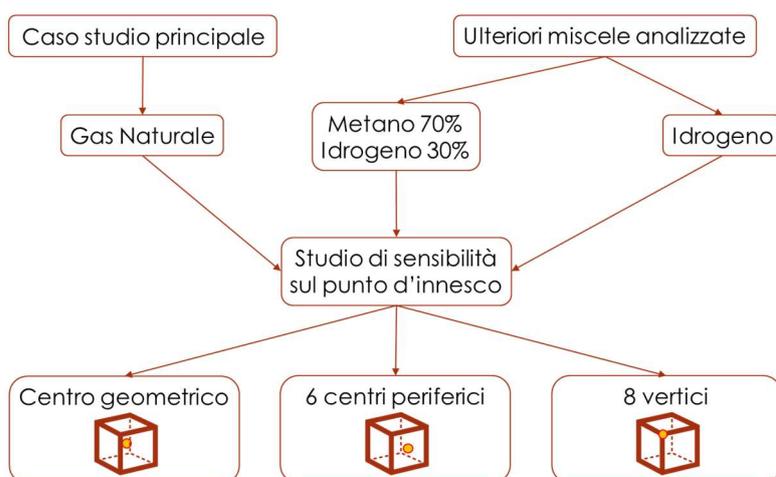


Figura 3: Schema delle simulazioni che compongono il caso studio.

### **3 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA**

Per indagare le potenzialità della Computational Fluid Dynamics (CFD da qui in avanti) nel contesto di scenari incidentali di carattere esplosivo, è necessario riprendere alcuni aspetti del contesto teorico, normativo e in merito allo stato dell'arte. Nello specifico, in questo capitolo vengono richiamate le nozioni fondamentali sulle tematiche che verranno esaminate nel dettaglio nei prossimi sotto-paragrafi.

Per entrare nel merito della tesi, è necessario richiamare i fenomeni di esplosione da un punto di vista fisico, chimico e modellistico, integrando anche delle nozioni sulle differenti miscele esplosive e sui loro comportamenti. In questo modo, è stato possibile arrivare alla preparazione delle simulazioni con una maggior consapevolezza del fenomeno e delle grandezze da estrapolare come risultati per condurre le valutazioni del rischio. Le fonti principali da cui sono state attinte queste informazioni sono il *Gas Explosion Handbook* [8] e il *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards* [33].

Inoltre, l'attività di analisi di scenari incidentali di carattere esplosivo deve attenersi a specifiche regolazioni dettate da enti di controllo che garantiscono, attraverso esse, dei livelli adeguati di sicurezza. Nel contesto Oil&Gas, un valido riferimento è rappresentato dagli Standard NORSOK [4] sia per impianti onshore che offshore. Si tratta di regolamentazioni sviluppate dall'industria petrolifera norvegese e basate su standard riconosciuti a livello internazionale. Il loro scopo è quello di fornire un riferimento agli enti regolatori sostituendo le specificazioni delle singole compagnie petrolifere.

Fra i vari software esistenti, è stato scelto FLACS-CFD della Gexcon AS. Si tratta di uno strumento appositamente realizzato per simulare scenari accidentali caratteristici di impianti di processo come dispersioni di gas tossici o infiammabili, esplosioni di gas o polveri, incendi e molto altro. Inoltre, FLACS gode di uno sviluppo e aggiornamento continuo volto a ottimizzare i processi di calcolo tenendoli al passo coi tempi e garantendo un ottimo compromesso fra la qualità dei risultati e i costi computazionali.

Infine, è stato condotto uno studio dei modelli semi-empirici più utilizzati per impiegarli come strumento di confronto al fine di valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti attraverso la CFD.

### **3.1 DINAMICA DELLE ESPLOSIONI**

L'esplosione di un gas è un processo in cui la combustione di una soluzione gassosa - costituita da un combustibile e un comburente - provoca un rapido aumento della pressione. Il valore di quest'ultima dipende da quanto velocemente si propaga il fronte di fiamma e da quanto il gas riesce ad espandersi. Per questo motivo, l'ambiente circostante svolge un ruolo fondamentale sull'espansione della nube: in spazi aperti in cui quest'ultima ha la facoltà di espandersi radialmente partendo dal punto di innesco, si raggiungono dei valori di sovrappressione minori di quelli che si raggiungerebbero nel caso in cui essa dovesse esplodere all'interno di uno spazio confinato. In quest'ultimo caso, l'espansione avviene lungo delle direzioni preferenziali in cui il fronte di fiamma può accelerare molto più velocemente [8].

Non è solo la forma dell'ambiente ad influire sulla sovrappressione, ma anche la presenza di elementi di ostruzione che il fronte di fiamma potrebbe incontrare. Gli ostacoli, infatti, promuovono la turbolenza della miscela, una caratteristica del flusso misurata dal Numero di Reynolds che mette in relazione le forze di inerzia con le forze viscosi. Un aumento della turbolenza favorisce un miglior mescolamento fra le molecole di gas all'interno della nube. Il loro moto diventa caotico e quindi anche lo stesso fronte di fiamma assumerà una forma molto irregolare. La superficie occupata risulterà maggiore di un fronte di fiamma che si propaga nella semplice direzione radiale e quindi, in regimi fortemente turbolenti, l'interfaccia più estesa tra fronte di fiamma e gas non ancora combusto non fa altro che aumentare il rateo di combustione, grandezza definita come la quantità di combustibile bruciato per unità di tempo [8].

Le esplosioni possono essere di due tipi diversi a seconda della loro cinetica. Si parla di deflagrazioni quando il fronte di fiamma si propaga a velocità subsoniche, in particolare la velocità di combustione è inferiore alla velocità del suono misurata nel gas

non combusto. Tendenzialmente, la deflagrazione è la forma di esplosione più comune. Quando invece la velocità di combustione supera la velocità del suono relativa al gas non combusto, si parla di detonazione. In questo caso, molto più raro del precedente, la sovrappressione precede il fronte di fiamma. Oltre alle differenze sui valori di velocità, si hanno anche delle differenze sull'ordine di grandezza della sovrappressione. Mentre le deflagrazioni raggiungono dei valori compresi tra pochi *mbar g* fino a qualche *bar g*, le detonazioni possono raggiungere anche sovrappressioni dell'ordine dei *20bar g* e, per questo motivo, risultano essere decisamente più pericolose delle prime [8].

In alcuni casi, durante una deflagrazione, la fiamma si diffonde in maniera turbolenta in presenza di ostacoli e luoghi confinati. L'aumento di temperatura e la conseguente espansione del gas non combusto, portano ad un aumento sia della velocità di propagazione che del rateo di combustione, oltre che un ulteriore aumento della turbolenza stessa. Si innesca così un feedback positivo per cui un fenomeno di deflagrazione potrebbe evolversi in un fenomeno di detonazione. Questo passaggio è noto come transizione da deflagrazione a detonazione e rappresenta uno scenario catastrofico che provocherebbe dei danni notevolmente maggiori rispetto a quelli provocati dalla sola deflagrazione [8].

In generale, l'evento dell'esplosione è molto rapido. Può durare tipicamente 100 – 200ms. In questo intervallo di tempo, vengono generate non solo pressioni elevate ma anche velocità di flusso considerevoli. Sono proprio queste ultime a causare un carico dinamico sulle strutture e, più in generale, su tutti gli elementi investiti dall'esplosione. Quando la fiamma inizia ad accelerare, la pressione sale repentinamente dal valore atmosferico fino a raggiungere un valore massimo. Dopodiché precipiterà altrettanto rapidamente e, per effetto dell'inerzia del flusso, raggiungerà anche dei valori inferiori alla pressione atmosferica per poi oscillare intorno a tale valore fino a stabilizzarsi su di esso [8]. Un riscontro grafico qualitativo è visibile nella Figura 4.

I parametri chiave che influenzano la risposta delle strutture saranno quindi: il picco di pressione, il tempo impiegato per raggiungerlo, l'impulso positivo (l'impulso è la grandezza rappresentata dall'integrale temporale della pressione) e l'impulso negativo. L'importanza di quest'ultima grandezza dipende molto dalla frequenza naturale della struttura. Se l'oscillazione della pressione fosse in fase con la vibrazione della struttura, anche l'impulso negativo potrebbe apportare un contributo significativo al danno totale da esplosione. In Figura 4 è mostrato il tipico andamento della pressione in seguito ad un innesco di una nube esplosiva.

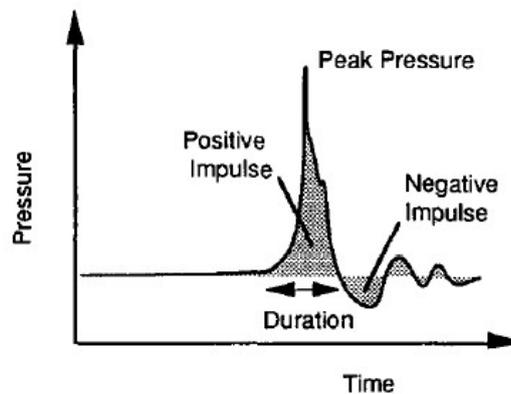


Figura 4: Evoluzione temporale della pressione [8].

Oltre ai danni strutturali provocati dalla sovrappressione, bisogna considerare che gli elevati flussi di gas combusti potrebbero proiettare tutti quegli oggetti più piccoli (come tubazioni o elementi non vincolati) nella direzione di propagazione dell'esplosione stessa. Va quindi quantificata una "forza di trascinamento" che tiene conto, oltre che della pressione dinamica (espressa come  $0,5\rho u^2$ ), anche della superficie normale alla direzione del flusso e dal coefficiente di trascinamento  $C_D$ . Quest'ultimo è legato al livello di turbolenza, al tempo impiegato dalla pressione per raggiungere il picco massimo e ad altri fattori. Nella Figura 5 è possibile osservare l'andamento temporale di pressione e forza di trascinamento di una tubazione, un elemento che tipicamente può essere soggetto a forze di trascinamento generate dall'elevato flusso di prodotti di combustione.

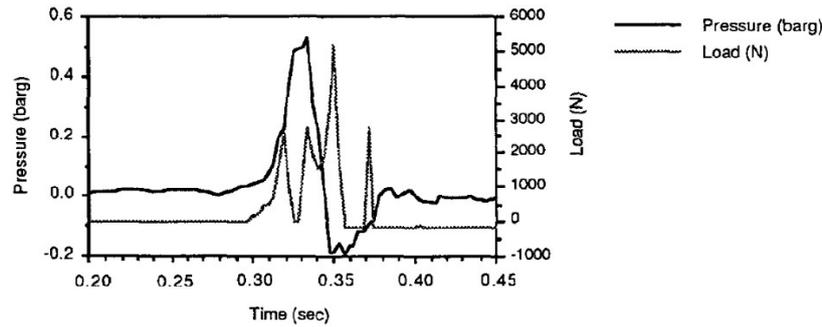
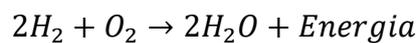
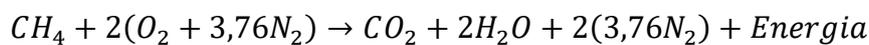


Figura 5: Risultati sperimentali da test con carico di trascinamento su una tubazione [8].

Alla luce di tutto ciò, per modellare bene un'esplosione, è fondamentale tener conto di tutti quegli elementi della geometria che fungono da pareti di confinamento o ostacoli che promuovono la turbolenza, essendo cruciali per il campo di pressione che si verifica in seguito all'evento. Oltre ad essi, per valutare possibili transizioni da deflagrazione a detonazione è doveroso analizzare nel dettaglio le miscele esplosive per conoscerne le loro caratteristiche come la reattività e i limiti di infiammabilità.

### 3.2 MISCELE ESPLOSIVE

Una miscela esplosiva allo stato gassoso è composta da molecole di combustibile e comburente (solitamente l'ossigeno presente nell'aria) che, in presenza di una sorgente di calore, può provocare una reazione chimica di combustione dando origine ad un'esplosione. La combustione di un gas comporta un rilascio di calore e di luce per via della trasformazione dell'energia del legame chimico [8]. A titolo di esempio, di seguito sono riportate le reazioni di combustione di metano e idrogeno:



Una miscela esplosiva può bruciare solo se la concentrazione di combustibile è compresa tra i due limiti di infiammabilità superiore e inferiore (*Upper Flammability Limit* e *Lower Flammability Limit*). Questi valori sono stati determinati sperimentalmente e dipendono dalle condizioni iniziali di pressione e temperatura [8].

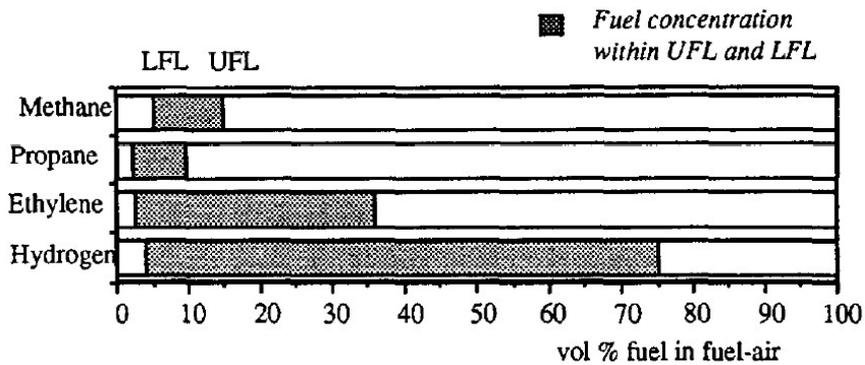


Figura 6: Intervalli di infiammabilità di alcune miscele combustibile-aria a  $p=1\text{atm}$  e  $T=25^\circ\text{C}$  [8].

In Figura 6 si possono osservare alcuni intervalli di infiammabilità caratteristici per le suddette miscele di combustibili con l'aria [8]. Si può notare come l'idrogeno sia caratterizzato dall'intervallo più esteso. Quindi è molto probabile che una miscela aria-idrogeno possa generare un'esplosione in presenza di una fonte di calore che chiuda il cosiddetto triangolo del fuoco (insieme di combustibile, comburente e fonte di calore). Se il combustibile nella miscela si trova ad una concentrazione superiore a quella dell'UFL, il rischio di esplosione si può manifestare in un tempo successivo in cui, per effetto dei fenomeni di diffusione e diluizione, la concentrazione può ridursi rientrando nel margine critico. Per questo motivo, è buona norma operare sempre con delle concentrazioni al di sotto del limite inferiore di infiammabilità. Se la temperatura aumenta, l'intervallo tra i due limiti estremi di infiammabilità aumenta a sua volta riducendo la concentrazione prevista per il LFL e aumentando la concentrazione prevista per l'UFL [8].

Inoltre, se la temperatura, aumentando, raggiunge un certo valore critico caratteristico per ogni sostanza infiammabile, quest'ultima inizia a bruciare spontaneamente in presenza di ossigeno senza il bisogno di sorgenti esterne di calore che chiudano il triangolo del fuoco. Questo fenomeno è noto come *auto-innesco* e rappresenta uno scenario catastrofico da evitare assolutamente. Fortunatamente le temperature di auto-innesco per metano e idrogeno sono relativamente alte per verificarsi in scenari di dispersione in atmosfera terrestre (rispettivamente  $600^\circ\text{C}$  e  $500^\circ\text{C}$  [9]) ma, nel caso di fuoriuscite di gas in ambiente pressurizzato, questi valori di soglia tendono a diminuire.

Un aumento di pressione comporta invece, per gli idrocarburi, un aumento del solo UFL [8]. Se invece si vogliono conoscere i limiti di infiammabilità di miscele di combustibili, si fa riferimento alla legge di Le Chatelier. A titolo di esempio, di seguito è riportata la formula utilizzata per il calcolo del LFL di una miscela costituita da due gas:

$$LFL_{mix} = \frac{100}{C_1/LFL_1 + C_2/LFL_2}$$

In cui  $C_1$  e  $C_2$  sono le concentrazioni volumetriche dei due combustibili nella miscela priva di aria.

Un'altra caratteristica utile per distinguere fra di loro le miscele esplosive è la reattività. Si tratta di una proprietà legata alla tendenza della sostanza a reagire in presenza di particolari reagenti chimici. La reattività, nonché il contrario della stabilità, influenza in modo significativo la cinetica della reazione e quindi il rateo di combustione e di formazione dei prodotti di combustione. Questi ultimi sono a loro volta strettamente correlati alla pressione che si genera in seguito a un'esplosione.

Se la composizione della miscela è perfettamente bilanciata in modo tale da non avere ossigeno in eccesso in seguito alla reazione chimica, si rientra nel caso di composizione stechiometrica. Da un punto di vista pratico, questa composizione può essere vista come quella che provoca la massima pressione [8]. Per mantenere un approccio conservativo per i motivi presentati sopra, le simulazioni dei casi studio prevederanno tutte miscele con concentrazioni pari a quelle stechiometriche.

Le miscele esaminate in questo lavoro di tesi saranno le seguenti:

- Gas naturale rigassificato;
- Idrogeno;
- Miscela metano-idrogeno.

La prima miscela risponde a delle esigenze attuali in quanto viene largamente trasportata e distribuita nelle infrastrutture del settore energetico. La seconda miscela può essere utile da esaminare nella prospettiva futura in cui l'idrogeno diventi un vettore

energetico impiegato su larga scala. In realtà, già al giorno d'oggi esistono delle infrastrutture che trasportano idrogeno: negli Stati Uniti, per esempio, circa 1600 *miglia* (più di 2500 *km*) di tubazioni sono attualmente operative per il trasporto di idrogeno verso le industrie energivore come quelle della raffinazione del petrolio e dei trattamenti chimici localizzate nella regione della Costa del Golfo [10]. Tuttavia, il trasporto di idrogeno pressurizzato in tubazioni richiede ancora degli studi approfonditi: la sua diffusione attraverso i materiali strutturali che lo confinano risulta essere una delle criticità maggiori. Oltre alla dispersione, l'idrogeno potrebbe restare intrappolato ad esempio nel reticolo cristallino della tubazione che lo trasporta. Questo fenomeno causa il decadimento delle proprietà meccaniche e strutturali della tubazione che diventa più dura e fragile (il processo è noto come *embrittlement*) [10]. Bisogna ancora stabilire se la soluzione consiste nell'apportare dei miglioramenti alla rete che trasporta gas naturale per renderla adeguata e affidabile anche per il trasporto di idrogeno oppure se è più opportuno (e sicuramente più dispendioso) generare ex-novo un circuito appositamente per il trasporto della suddetta sostanza. A tale prospettiva futura si aggiunge anche la presente utilità di testare le potenzialità della CFD nella simulazione di esplosioni di nubi di vapore che prevedono il fenomeno di transizione da deflagrazione a detonazione (DTT), sebbene tale evento risulti essere molto più raro delle sole deflagrazioni [33].

Una possibilità presa in considerazione per espandere più rapidamente il trasporto di idrogeno consiste nell'adottare parte del circuito di trasporto di gas naturale convertendolo in modo tale da poter distribuire una miscela di gas costituita da idrogeno in quantità fino al 30%. Un esempio di realizzazione di questa iniziativa consiste nell'implementazione di un'infrastruttura da parte della SNAM per alimentare i forni di un'acciaiera situata a Rho, nella provincia di Milano [31]. A tal proposito è opportuno esaminare le conseguenze provocate da un ipotetico scenario di esplosione di miscele costituite da metano e idrogeno per osservare le eventuali differenze tra esplosioni di nubi di diversa natura.

### **3.3 STANDARD TECNICO NORSOK E INQUADRAMENTO NORMATIVO**

In questa sezione, analizzando uno standard tecnico, si evidenziano gli approcci e le modalità richieste per modellare le esplosioni e stimarne gli effetti in accordo con lo stato dell'arte. Il riferimento è lo standard tecnico *NORSOK Z-013* (nello specifico, l'appendice *Procedure for probabilistic explosion simulation* [4]) che fornisce un insieme di regolamentazioni sviluppate dall'industria petrolifera norvegese per condurre un'adeguata analisi di rischio di esplosione. La scelta di questo standard è motivata dal suo intento dichiarato di costituire una linea guida autorevole per gli enti regolatori, in sostituzione degli standard adottati dalle singole compagnie.

Un'esplosione reale di una nube di vapore è un evento molto difficile da prevedere in quanto è il risultato di una concatenazione di eventi all'interno di un contesto dominato da variabili aleatorie. Affinché l'esplosione si verifichi, occorre innanzitutto che si realizzi uno scenario accidentale di perdita di gas combustibile, con la conseguente formazione di una nube nella quale la sostanza pericolosa si mescola con l'aria atmosferica sviluppando una vera e propria miscela esplosiva. La stessa, oltre a trovarsi nelle condizioni tali per cui può innescarsi, dettate dai limiti di infiammabilità superiori e inferiori, è soggetta alla dispersione dovuta alla diffusività intrinseca delle sostanze che la compongono e dalle azioni di trasporto e diluizione causate dal vento, nel caso in cui la dispersione si verifichi in spazi aperti. A questa elevata imprevedibilità che caratterizza l'evento reale bisogna aggiungere l'incertezza intrinseca delle simulazioni che, essendo una semplificazione della realtà, producono dei risultati affetti da errori legati ad approssimazioni condotte nei processi di calcolo numerico. In queste condizioni, risulta opportuno adottare un approccio conservativo, volto a garantire un margine di sicurezza nei risultati ottenuti. Tale approccio minimizza il rischio di sottostimare gli effetti di uno scenario incidentale e, allo stesso tempo, considera le condizioni più sfavorevoli per ottenere la simulazione di quello che potrebbe risultare lo scenario peggiore che si possa ottenere. D'altra parte, un conservativismo eccessivo, rappresentato ad esempio dalla scelta di condizioni al contorno surreali o improbabili, può portare ad un'eccessiva sovrastima delle conseguenze. Il che risulterebbe svantaggioso da un punto di vista

tecnico ed economico in quanto le misure di mitigazione sarebbero oltremodo dispendiose. Perciò, all'approccio conservativo è doveroso affiancare un approccio realistico che non punti ad enfatizzare eccessivamente gli effetti.

Con questo orientamento, si realizzano le simulazioni con l'obiettivo di ottenere dei risultati relativi a un numero discreto di casi rappresentativi. Generalmente, l'approccio conservativo punta alla ricerca del caso peggiore possibile che, nel contesto di esplosioni di nubi di vapore, è rappresentato dall'innesco di una nube le cui sostanze costituenti sono presenti in concentrazioni stechiometriche [4]. Per quanto concerne la sua geometria, ci si può immaginare che una nube reale possa apparire con le più svariate caratteristiche di forma ed eterogeneità. Nel mondo virtuale, questi molteplici casi vengono convogliati all'interno di uno scenario che prevede la formazione di una nube omogenea dalla forma prismatica (motivo per cui viene chiamata nube equivalente). La scelta del metodo di generazione di tale nube risulta essere uno dei passi più importanti per la simulazione termofluidodinamica. Dovendo fare delle considerazioni e delle approssimazioni, è inevitabile produrre un errore andando a considerare una nube equivalente.

Come detto, la formazione della nube è la diretta conseguenza di un fenomeno di rilascio accidentale di sostanze gassose. Perciò va collocata opportunamente all'interno del dominio computazionale nelle zone in cui essa si può sviluppare. Quindi è opportuno stabilire a monte quali sono le caratteristiche che definiscono lo scenario di perdita (punto, direzione e rateo di rilascio, condizioni meteorologiche e di ventilazione) per simulare lo scenario di dispersione che produce, come output, una nube equivalente [4]. Quest'ultima viene poi innescata all'interno di simulazioni di esplosione per ottenere gli andamenti dei parametri chiave utili a valutare le conseguenze e i danni.

La posizione dell'innesco risulta essere un elemento cruciale per l'evoluzione di un'esplosione poiché rappresenta il punto da cui nasce il fronte di fiamma e inizia a svilupparsi lungo tutta la nube. A seconda della sua posizione, il fronte di fiamma può attraversare distanze maggiori o minori e interagire con un diverso numero di ostacoli, generando livelli differenti di turbolenza e quindi di accelerazione. Anche il flusso dei

prodotti di combustione viene influenzato dal punto d'innescò: se centrale, i prodotti resterebbero intrappolati all'interno di una zona circondata da combustibile; se invece l'innescò si trovasse alle estremità, si genererebbe un percorso di efflusso preferenziale di prodotti di combustione. Tutto ciò influisce nettamente sull'andamento della pressione, perciò, una volta modellata la nube, è opportuno condurre un'analisi di sensibilità sul punto di innescò per ottenere uno spettro di casi possibili per soffermarsi su quello più critico.

Per determinare la risposta strutturale degli elementi critici dell'impianto in analisi, va analizzato il profilo di sovrappressione generato dalla reazione esplosiva e, se rilevante, anche il profilo di pressione dinamica generato dal flusso di prodotti di combustione. Queste grandezze vengono elaborate per ottenere i cosiddetti *Dimensioning Accidental Loads* (DAL) [4]. Essi possono essere definiti una volta assunto un criterio che li colleghi alle relative frequenze di accadimento. In questo modo è possibile indagare delle possibili misure di mitigazione che riducano le possibili conseguenze derivanti da scenari incidentali di questo genere.

La Figura 7 riassume l'iter appena descritto per condurre una corretta analisi del rischio di esplosione.

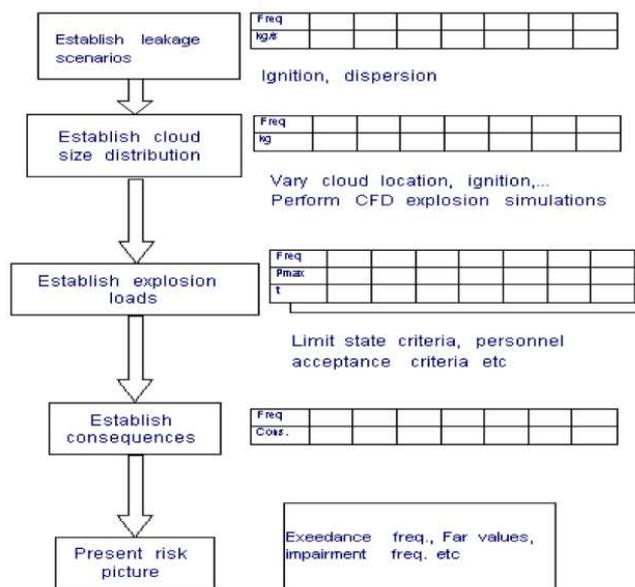


Figura 7: Schema della Procedura di calcolo del rischio di esplosione [4].

Da un punto di vista normativo, il progetto su cui è incentrato questo caso studio rientra in un contesto intermedio tra onshore e offshore, perciò è soggetto a regolamenti sia marittimi che industriali.

Osservando la Direttiva Seveso III [25], sebbene essa non si applichi ai soggetti che prevedono il “trasporto di sostanze pericolose e il deposito temporaneo intermedio direttamente connesso su strada, per ferrovia, per idrovia interna e marittima o per via aerea, comprese le attività di carico e scarico e al trasferimento da e verso un altro modo di trasporto alle banchine, ai moli o agli scali ferroviari di smistamento, al di fuori degli stabilimenti soggetti alla presente direttiva” [25] (come indicato nell’articolo 2, punto 2c della Direttiva Seveso III), il progetto rientra pienamente nella definizione di *stabilimento di soglia superiore*. Dall’articolo 3 si apprende che uno *stabilimento* è definito come “tutta l'area sottoposta al controllo di un gestore, nella quale sono presenti sostanze pericolose all'interno di uno o più impianti, comprese le infrastrutture o le attività comuni o connesse; gli stabilimenti sono stabilimenti di soglia inferiore o di soglia superiore” [25]. Si tratta inoltre di uno stabilimento di soglia superiore perché le “sostanze pericolose sono presenti in quantità pari o superiori alle quantità elencate nella colonna 3 della parte 1 o nella colonna 3 della parte 2 dell'allegato I” [25]. La soglia superata, in questo caso specifico, è quella del gas naturale ed è pari a 200 tonnellate.

Nel contesto marittimo la Commissione OSPAR, che si occupa della protezione dell’ambiente marino dell’Atlantico Nordorientale, ha pubblicato una raccomandazione per la gestione dei rischi legati allo sversamento in mare di acque da installazioni offshore [26]. Sebbene lo scenario non sia lo stesso del progetto in questione, la commissione incoraggia l’utilizzo di strumenti quantitativi per la modellazione e la caratterizzazione del rischio associato ad incidenti rilevanti in ambiente marino.

Alla luce di quanto detto, è doveroso applicare delle tecniche innovative e affidabili per condurre un’adeguata analisi di rischio per incidenti rilevanti legati a questo specifico contesto.

### **3.4 SOFTWARE FLACS-CFD**

Per indagare le potenzialità della CFD negli scenari incidentali, è stato scelto di impiegare il software FLACS-CFD della Gexcon AS. Si tratta di un software commerciale realizzato ad-hoc per la simulazione di scenari incidentali legati a fenomeni di dispersione atmosferica di sostanze pericolose, esplosioni o incendi. Grazie alla sua progressiva ottimizzazione, le simulazioni di scenari transitori con geometrie complesse sono caratterizzate da tempi e costi computazionali accessibili. Inoltre, va puntualizzato che, ad oggi, il software FLACS-CFD è stato sottoposto ad una sessantina di serie di validazione con approssimativamente 2700 simulazioni. I casi variano dalla piccola alla grande scala e spaziano da scenari di dispersione a scenari di esplosione di diverse miscele in diverse geometrie [3]. Questa constatazione solidifica la percezione del software che quindi risulta essere un buono strumento per condurre delle simulazioni di questo genere.

Strumenti alternativi come *Ansys Fluent*, pur essendo estremamente versatili e potenti, non risultano adeguati a simulazioni di esplosione in ambito industriale, a causa dei significativi costi computazionali e dell'assenza di modelli preconfigurati specifici per questo tipo di fenomeni. A differenza di FLACS, che è stato sviluppato appositamente per la simulazione di scenari incidentali, tra cui scenari esplosivi, in Fluent tutti i modelli fisici associati devono essere costruiti manualmente, aumentando considerevolmente la complessità e i tempi di preparazione della simulazione. Anche la generazione della griglia di discretizzazione del dominio rappresenta un ulteriore elemento critico: in FLACS, essa è definita in forma cartesiana con un processo semi-automatico, mentre in Fluent è necessario specificare una molteplicità di parametri, tra cui la forma e la distribuzione delle celle, con conseguente aumento del carico modellistico.

In un'analisi di rischio, l'obiettivo principale è stimare in modo affidabile il valore di parametri chiave come il picco della sovrappressione generata, piuttosto che ottenere una descrizione dettagliata di fenomeni locali, ad esempio nei pressi dello strato limite. Inoltre, Fluent non presenta un grado di validazione equivalente a quello di FLACS in questo contesto applicativo, rendendolo meno adatto dal punto di vista regolatorio.

Nell'architettura di FLACS è presente un codice CFD che risolve le equazioni di trasporto della massa ( $m$ ), quantità di moto ( $mv$ ), entalpia ( $h$ ), energia cinetica turbolenta ( $k$ ), rateo di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta ( $\varepsilon$ ), frazione massica di combustibile ( $Y_F$ ) e frazione di miscela ( $\xi$ ) all'interno di una griglia cartesiana utilizzando il metodo dei volumi finiti [3].

Una peculiarità che contraddistingue questo software dalla stragrande maggioranza dei software commerciali CFD risiede nell'utilizzo del concetto di porosità distribuita per rappresentare delle geometrie complesse all'interno di una griglia relativamente poco raffinata. Attraverso questo approccio, gli oggetti voluminosi e le pareti sono rappresentati "on-grid", e quindi si tiene conto di essi in modo esplicito rappresentandoli direttamente nella discretizzazione. Gli oggetti più piccoli, invece, non vengono rappresentati direttamente, ma il loro effetto viene modellizzato implicitamente attraverso i cosiddetti modelli "sub-grid". Il pre-processor FLACS FGC (FLACS Geometry Calculator) legge i file della griglia e della geometria e assegna le porosità a ciascun volume finito. Nelle simulazioni, il campo di porosità rappresenta la congestione locale e il confinamento. In questo modo, gli oggetti rappresentati "sub-grid" rientrano nei contributi di resistenza al flusso, generazione di turbolenza e alterazione del profilo del fronte di fiamma [3].

Inoltre, per quanto riguarda le fasi di post-processing, FLACS è dotato del tool *Flowvis* che consente di elaborare i risultati in svariati modi: si possono realizzare profili temporali dei parametri chiave che si desidera monitorare ma anche realizzare delle viste tridimensionali della geometria all'interno delle quali poter tracciare delle aree di danno relativo allo scenario simulato.

### **3.5 MODELLI UTILIZZATI**

In quest'ultimo paragrafo sono stati raccolti e sintetizzati i principali modelli implementati all'interno del software che sono stati utilizzati per condurre le simulazioni. Inoltre, viene presentato un metodo impiegato per l'analisi critica della grid.

### 3.5.1 DISPERSIONE – MODELLO Q9

Nella simulazione di un incidente esplosivo, si parte con la modellazione della dispersione della miscela in seguito ad una perdita. Questa prima simulazione calcola il volume della nube che si forma in prossimità del punto di rilascio. In uno scenario reale, quest'ultima potrebbe assumere diverse forme e presentare al suo interno delle regioni a diversa concentrazione. All'interno delle simulazioni, invece, vengono realizzate delle nubi equivalenti la cui massa corrisponde a quella relativa alla nube disomogenea ma il volume risulta essere ridotto in quanto la concentrazione viene imposta costante in ogni punto della nube. Inoltre, la sua forma finale sarà un parallelepipedo [5].

Il modello Q9 è il più recente tra i numerosi metodi di generazione di nubi equivalenti stechiometriche ed è adatto per le dispersioni in ambienti caratterizzati da un basso tenore di confinamento [6]. Tale metodo è una correlazione che è stata rivista negli anni al fine di fornire dei risultati sempre più coerenti con gli esperimenti reali. Il volume totale di nube viene calcolato sommando i singoli volumi di gas che si formano in ogni cella della grid. L'equazione che governa tale calcolo è la seguente:

$$V_{Q9} = \frac{1}{(SE)_{max}} \sum_{i=1}^n (fuel_{vol} * S * E)_i$$

In particolare,  $fuel_{vol}$  è il volume di gas in ciascuna cella in  $[m^3]$ , mentre  $S$  ed  $E$  sono rispettivamente la velocità laminare di combustione in  $[m/s]$  e il rateo di espansione dei prodotti di combustione  $[-]$  [5].

Allo stato attuale, il Q9 risulta essere un metodo che predice accuratamente le sovrappressioni da esplosione di nubi uniformi di gas. Le suddette risultano essere confrontabili con quelle che si otterrebbero in caso di esplosioni di nubi eterogenee. Ad onor del vero, quest'ultima asserzione è ancora lontana dall'essere un'affermazione definitiva. Mentre lo studio condotto da Hansen *et al.* [6] ha ottenuto dei risultati simili tra le sovrappressioni calcolate con tale metodo e quelle misurate nell'esperimento "BFETS Phase 3B tests", lo studio condotto da Tam *et al.* [7] ha concluso che l'utilizzo del

metodo Q9 porta a sottostimare le sovrappressioni misurate di un fattore superiore a due, quando queste ultime superano la soglia di 0,1 *bar*.

### 3.5.2 RANS $k - \epsilon$ STANDARD

Gli eventi di dispersione ed esplosione sono fortemente influenzati dal fenomeno della turbolenza, un fenomeno per cui il comportamento del fluido è del tutto caotico. Il moto è intrinsecamente non-stazionario anche in presenza di condizioni al contorno costanti. Per via di tutto ciò, le proprietà che caratterizzano il flusso variano in maniera randomica per cui si può adottare un approccio statistico che prevede la scomposizione di ciascuna variabile in un termine medio stazionario più un termine oscillatorio variabile [1].

Le equazioni di Navier Stokes che descrivono il comportamento di un fluido viscoso attraverso i bilanci della massa, quantità di moto, ed energia vengono quindi scomposte seguendo il metodo di decomposizione di Reynolds diventando quindi RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes). Al loro interno compaiono delle grandezze legate agli sforzi viscosi turbolenti che prendono il nome di *Sforzi di Reynolds*, i quali vengono calcolati attraverso il modello di turbolenza  $k - \epsilon$  standard. Quest'ultimo aggiunge al sistema di equazioni RANS delle equazioni aggiuntive contenenti il trasporto dell'energia cinetica turbolenta specifica ( $k$ ) e il trasporto del rateo di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta ( $\epsilon$ ). Grazie ad esse è possibile formare un sistema chiuso con le equazioni RANS e ottenere le grandezze desiderate [1].

### 3.5.3 METODO PER IL CALCOLO DELLA PRESSIONE

All'interno di FLACS, la pressione viene calcolata attraverso l'algoritmo SIMPLE, un acronimo che sta per "Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations" [1]. Si tratta di un processo iterativo in cui, partendo da dei valori ipotizzati della pressione, si apportano progressivamente delle correzioni su di essi al fine di raggiungere una convergenza verso il risultato corretto.

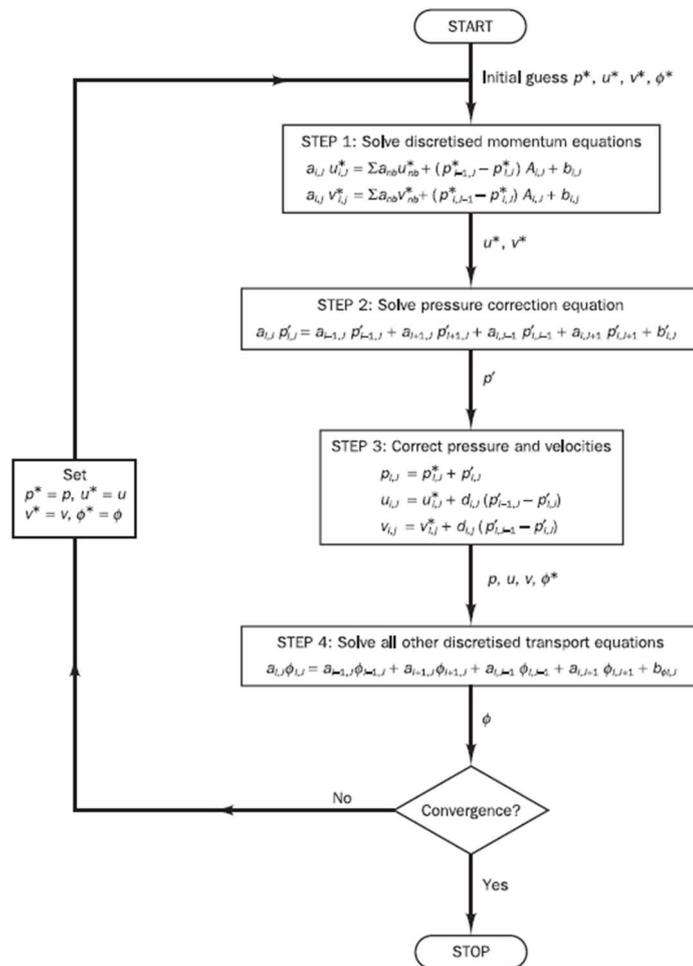


Figura 8: Algoritmo SIMPLE per il calcolo della pressione [1].

La Figura 8 illustra nel dettaglio gli step che compongono la procedura per ottenere il campo corretto di pressione. Il primo step consiste nel fornire un valore alla pressione ( $p^*$ ) per poter risolvere le equazioni di conservazione del momento discretizzate per ottenere il campo di velocità ( $u^*$  e  $v^*$ ) relativo alla pressione ipotizzata. Successivamente si risolve l'equazione di correzione della pressione per ottenere il termine correttivo ( $p'$ ) utile per correggere i valori precedenti di pressione e campo velocità. Con questi risultati, vengono risolte tutte le altre equazioni di bilancio discretizzate per poi verificare la convergenza. Se non è stata raggiunta, i valori di pressione e velocità ottenuti saranno utilizzati come i valori iniziali dell'iterazione successiva [1].

### 3.5.4 METODO PER LA CONVERGENZA DELLA GRID

La discretizzazione di un dominio continuo porta con sé inevitabilmente dei risultati affetti da errori [30]. È quindi opportuno ridurli il più possibile senza inficiare significativamente sui tempi e costi computazionali. Partendo da una griglia iniziale, quest'ultima viene confrontata con delle griglie via via più fitte per valutare quanto questo processo di raffinamento influisce sull'output di calcolo. Il metodo impiegato per questo lavoro di tesi prende il nome di *Grid Convergence Method* ed è basato sul metodo noto come *Richardson Extrapolation* [30].

Dopo aver scelto un parametro su cui condurre l'analisi (in questo caso specifico, la sovrappressione misurata ad una certa distanza dall'esplosione), si parte con la definizione di una cella rappresentativa individuandone una sua lunghezza caratteristica. Dopodiché vengono selezionati due ulteriori set di grid caratterizzati da celle progressivamente più piccole. Le lunghezze caratteristiche saranno proporzionali alla lunghezza della cella iniziale a un certo fattore di raffinamento  $r$ . Vengono poi condotti dei calcoli per ottenere l'ordine apparente  $p$ , un parametro che rientra nella computazione del *GCI* (Grid Convergence Index). L'obiettivo del raffinamento è quello di ottenere dei *GCI* sempre minori in quanto essi misurano quanto la soluzione dipenda dalla griglia usata. Un *GCI* piccolo è sinonimo di un errore di discretizzazione basso e quindi la soluzione è più affidabile. Quindi, con una grid ancora più fine, non si otterrebbero dei risultati significativamente diversi, perciò, si può concludere che, da un certo raffinamento in avanti, i risultati non dipendono più dalla risoluzione della grid e quindi risulteranno essere più accurati [30].

### 3.6 MODELLI ALTERNATIVI PER LA MODELLAZIONE DELLE ESPLOSIONI

Esistono degli strumenti alternativi alla CFD per quantificare il rischio da esplosioni. Si tratta di metodi semi-empirici che utilizzano delle curve di esplosione adimensionalizzate per effettuare delle previsioni sul carico di sovrappressione per una data sorgente di energia (posizionata al centro della nube) e una distanza dall'origine

dell'evento. I due più utilizzati sono il *TNO multi-energy method* e il *Baker-Strehlow-Tang (BST) method* [2].

Gli elementi cardine che costituiscono questi modelli sono le curve di esplosione, la determinazione della severità dell'esplosione e la definizione dell'energia liberata da tale fenomeno [33]. Le curve di esplosione sono basate su calcoli numerici mono-dimensionali relativi all'esplosione di una massa di gas. L'assunzione sulla mono-dimensionalità del fenomeno implica una simmetria sferica o emisferica. Per questo motivo, gli effetti direzionali legati alla presenza di congestioni, ostruzioni locali o posizioni del punto di innesco diverse dal centro della nube non vengono presi in considerazione. La determinazione della severità dell'esplosione si basa sulla valutazione di un parametro che può essere l'indice di severità per il TNO e la velocità di fiamma per il BST. Attraverso questo parametro, è possibile scegliere la curva rappresentativa dello scenario dall'insieme delle diverse curve di esplosione. La relazione tra la sovrappressione e la distanza può quindi essere letta dalla curva selezionata. Il terzo e ultimo elemento è l'energia liberata dall'esplosione. Essa è utile per determinare la distanza adimensionalizzata sulle curve di esplosione a cui sarà associato il valore corrispondente di sovrappressione. Per entrambi i metodi, l'energia da considerare è quella definita dal volume della porzione di nube localizzata in ambienti confinati e/o con la presenza di ostruzioni. Ad esempio, per rilasci notevoli per cui la nube infiammabile risulta essere più grande dello stabilimento, verrà considerato solo il volume di nube che occupa la zona congestionata. Se al contrario il rilascio dovesse provocare la formazione di una nube più piccola dello stabilimento, allora verrà considerato l'intero volume di nube nel calcolo dell'energia liberata dall'esplosione [33].

Per il metodo Multi-Energy, la selezione dell'indice di severità è stata condotta sulla base di dati tabellati relativi alla tipologia di innesco, la presenza di ostruzioni e la tipologia di confinamento [29]. La Figura 9 e la Figura 10 mostrano rispettivamente la tabella funzionale al processo di selezione dell'indice di severità e il set di curve di esplosione ottenuto empiricamente attraverso il metodo Multi-Energy.

Blast strength category	Ignition energy		Obstruction			Parallel plane confinement	Multi-Energy Unconfined	Class
	Low	High	High	Low	No			
	(L)	(H)	(H)	(L)	(N)			
1		H	H			C		7-10
2		H	H				U	7-10
3	L		H			C		5-7
4		H		L		C		5-7
5		H		L			U	4-6
6		H			N	C		4-6
7	L		H				U	4-5
8		H			N			4-5
9	L			L		C		3-5
10	L			L			U	2-3
11	L				N	C		1-2
12	L				N		U	1

Figura 9: Indici di severità per il TNO [29].

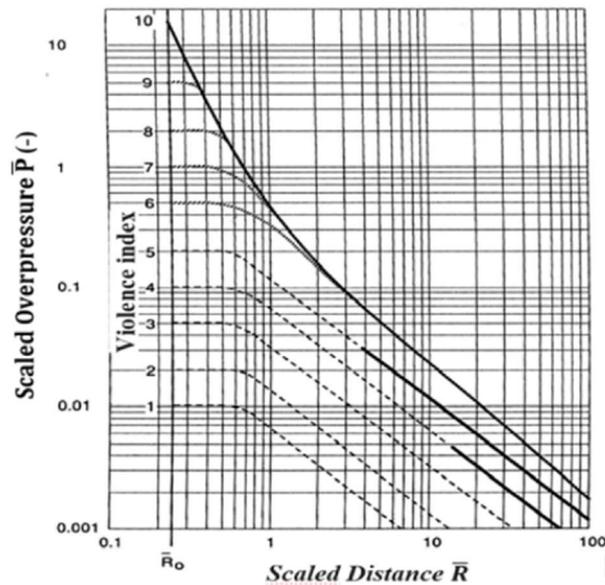


Figura 10: Curve di esplosione del metodo TNO [27].

Anche il metodo BST (Baker-Strehlow-Tang) sfrutta la stessa correlazione del Multi-Energy per il calcolo della distanza scalata. A differenza del metodo precedentemente menzionato, il discriminante per le diverse curve è il *numero di Mach relativo alla fiamma*  $M_f$ , definito come il rapporto fra la velocità apparente della fiamma divisa per la velocità del suono in atmosfera [28]. Anch'esso è stato selezionato da dei valori tabellati che tengono conto del tipo di confinamento, presenza di ostruzioni e reattività della miscela [2]. La tabella utile per la scelta del parametro  $M_f$  è riportata in Figura 11. Il set di curve di esplosione ottenuto empiricamente attraverso il metodo BST è visibile in Figura 12.

Confinement	Reactivity	Congestion		
		Low	Medium	High
2-D	<b>High</b>	0.59	DDT	DDT
	<b>Medium</b>	<b>0.47</b>	0.66	<b>1.6</b>
	<b>Low</b>	0.079	0.47	0.66
2.5-D	<b>High</b>	<b>0.47</b>	<b>DDT</b>	<b>DDT</b>
	<b>Medium</b>	<b>0.29</b>	<b>0.55</b>	<b>1.0</b>
	<b>Low</b>	0.053	<b>0.35</b>	<b>0.50</b>
3-D	<b>High</b>	<b>0.36</b>	<b>DDT</b>	<b>DDT</b>
	<b>Medium</b>	<b>0.11</b>	<b>0.44</b>	<b>0.50</b>
	<b>Low</b>	0.026	<b>0.23</b>	<b>0.34</b>

Figura 11: Tabella per selezionare il discriminante  $M_f$  [2].

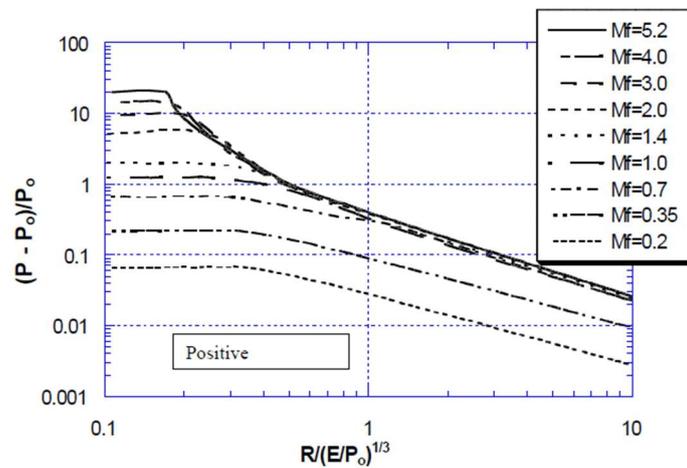


Figura 12: Diagramma per il metodo BST [28].

Il ruolo che svolgono questi modelli alternativi all'interno del presente lavoro di tesi è puramente comparativo e finalizzato a verificare che i risultati dei diversi metodi rientrino all'interno dello stesso range e valutare i pro e i contro delle diverse procedure di calcolo delle conseguenze di uno scenario incidentale di carattere esplosivo. Verrà condotta una valutazione panoramica sul tale confronto al fine di evidenziare i limiti dei modelli semi-empirici che vengono superati dall'innovativa tecnica della CFD.

## **4 METODOLOGIA**

Negli ultimi anni, la crescente attenzione alla sicurezza industriale ha reso sempre più cruciale l'analisi degli scenari incidentali, con l'obiettivo di prevenire e mitigare le loro conseguenze. L'importanza di un'adeguata valutazione del rischio è stata sottolineata nei capitoli precedenti, evidenziando come l'analisi dettagliata delle dinamiche di un evento pericoloso sia fondamentale per adottare misure di prevenzione e mitigazione efficaci.

Tra le varie tecniche disponibili, la Computational Fluid Dynamics (CFD) si è affermata come uno strumento particolarmente utile per lo studio di scenari incidentali di carattere esplosivo. La capacità di simulare la propagazione di onde di pressione, il comportamento delle miscele di gas e gli effetti dell'interazione con strutture e ostacoli rende la CFD un metodo versatile e potente per l'analisi del rischio.

Con l'obiettivo di indagarne le potenzialità, è stato scelto il software FLACS-CFD, un tool commerciale realizzato appositamente per simulare scenari incidentali di dispersioni di sostanze pericolose ed esplosioni. A differenza di altri strumenti, FLACS-CFD viene sottoposto sin dalla sua nascita a processi di validazione attraverso numerose campagne sperimentali per cui i suoi risultati, a differenza di quelli ottenibili da altri software, godono di una valenza maggiore sotto l'aspetto normativo [3].

L'analisi prevede la realizzazione di simulazioni di esplosioni di gas naturale in regime transitorio all'interno di una geometria che rappresenta dettagliatamente un impianto di distribuzione di gas naturale rigassificato, descritto nel dettaglio all'interno del capitolo 2.

Per estendere lo studio ad un contesto di transizione energetica più ampio, sono state incluse due ulteriori miscele (metano-idrogeno e solo idrogeno) che potrebbero ricoprire un ruolo fondamentale fra i combustibili attualmente impiegabili e i vettori energetici del futuro. In questo modo è possibile testare le capacità di FLACS-CFD di produrre risultati diversi per miscele più reattive e testare anche il suo comportamento verso quelle sostanze come l'idrogeno che, dopo l'innesco, potrebbero subire un processo di transizione da deflagrazione a detonazione.

Successivamente, saranno condotte per tutte le miscele delle analisi di sensibilità sul punto di innesco per verificare che FLACS-CFD produca dei risultati diversi e coerenti con la fisica che governa il fenomeno di evoluzione e propagazione delle onde di pressione. In questo modo si ha la possibilità di indagare anche quali sono i punti di innesco più critici per un'esplosione e quali sono i parametri che influenzano tale criticità.

Da queste simulazioni vengono ricavati dei risultati che saranno poi oggetto di analisi e di confronto per stabilire se gli obiettivi proposti sono stati raggiunti.

In questo capitolo verrà descritta la metodologia adottata per valutare le potenzialità di FLACS-CFD e verranno illustrati i criteri seguiti per la definizione degli scenari di simulazione, gli step intermedi condotti per preparare i casi studio e le modalità di interpretazione dei risultati, con l'obiettivo di comprendere in che misura questo approccio possa supportare la gestione del rischio in ambito industriale.

#### **4.1 SCELTA DELLO SCENARIO**

Questo lavoro di tesi è incentrato sugli incidenti provocati da esplosioni. Per questo motivo, è stato ipotizzato uno scenario di dispersione accidentale di gas con la conseguente formazione di una nube potenzialmente esplosiva. La suddetta viene poi innescata da una scintilla dando origine ad un'esplosione il cui impatto coinvolge le unità di processo presenti nelle vicinanze che possono comportarsi non solo come barriere, ma anche come ostacoli che fungono da promotori di turbolenza. Essi, quindi, svolgono un ruolo determinante sulle conseguenze in quanto influiscono drasticamente sul profilo della sovrappressione generata dal fenomeno esplosivo e sulla propagazione dei prodotti di combustione generati.

Lo scenario, inoltre, deve risultare credibile poiché deve fornire un riscontro su cui poter instaurare un processo decisionale che valuti le sue conseguenze, contestualizzandole nella realtà, per poi operare la scelta di misure preventive e cautelative con l'obiettivo di ridurre il più possibile l'impatto che l'incidente possa avere su diversi fronti, come ad esempio quello economico e sociale.

## **4.2 SCELTA CASI STUDIO**

Una volta inquadrato lo scenario, si passa alla scelta dei casi studio. Lo studio sulle conseguenze di un incidente esplosivo è stato contestualizzato all'interno di un progetto innovativo situato nel Golfo di Danzica che prevede l'installazione di una metaniera e un'unità di rigassificazione galleggiante per immettere nella rete di distribuzione polacca del GN (*Gas Naturale*) [23]. Nello specifico, la dispersione considerata avviene in seguito a una perdita localizzata nel primo tratto del condotto percorso dal GN, situato sul molo su cui attraccheranno entrambe le imbarcazioni. La scelta di questo scenario non è stata guidata da considerazioni sulla frequenza di accadimento — aspetto che, in questa tesi, non viene preso in esame — bensì da fattori funzionali all'obiettivo dello studio, ovvero la valutazione delle potenzialità del software impiegato. In particolare, tale tratto del molo risulta strategico in quanto è caratterizzato da una densità di ostacoli che favoriscono lo sviluppo della turbolenza e, al tempo stesso, ospita componenti impiantistici critici per il funzionamento dell'infrastruttura, come ad esempio gli unloading arm responsabili del trasferimento del gas naturale rigassificato verso la rete nazionale. La presenza di tali condizioni rende lo scenario particolarmente adatto a evidenziare e mettere alla prova le capacità del software nella simulazione di eventi complessi e nel calcolo delle pressioni generate in corrispondenza di elementi cruciali per il funzionamento dell'impianto.

I parametri chiave di questo caso studio saranno la sovrappressione, poiché è attraverso di essa che viene rilasciata gran parte dell'energia prodotta dall'esplosione, e la pressione dinamica, nonché la diretta conseguenza del flusso di prodotti di combustione accelerato dall'esplosione [8]. La forte dipendenza dal flusso rende quest'ultimo fenomeno altamente anisotropo e critico per tutti quegli oggetti caratterizzati da un'area di esposizione notevole e da un ancoraggio alla struttura debole che potrebbero venire scaraventati via da questo vento contingente. Per indagare meglio le conseguenze di quest'ultimo, occorre quindi analizzare nel dettaglio tutti i possibili target come tubazioni o piccoli oggetti valutando le loro aree di esposizione e coefficienti di trascinamento per poter poi valutare se la forza netta di trascinamento è tale da

compromettere la loro funzione. In questo lavoro di tesi, verrà valutata solamente la sua influenza come contributo aggiuntivo alla sovrappressione.

#### **4.3 PREPARAZIONE DEL SET DI SIMULAZIONI**

A valle della scelta dei casi studio e di un periodo di osservazione e di utilizzo del software di calcolo, vengono preparate le simulazioni di esplosione su FLACS-CFD per poi andare ad estrapolare i risultati da analizzare. Come primo passaggio, verrà preparato il set-up di simulazione andando ad inserire all'interno del software la geometria del progetto più tutte le condizioni iniziali e al contorno che definiscono lo scenario.

In seguito, verrà condotta un'analisi sulla griglia per valutare la discretizzazione ottimale che minimizzi l'errore numerico. La suddetta verrà impiegata per l'intero set di simulazioni del caso studio.

Dopo aver trovato la grid ottimale, saranno realizzate le simulazioni che prevedono l'esplosione di gas naturale nei 15 punti d'innesci descritti in precedenza. Infine, per ognuna delle 15 simulazioni, verrà cambiata la composizione della nube considerando prima la miscela metano-idrogeno e poi il solo idrogeno.

#### **4.4 ANALISI DEI RISULTATI**

I risultati delle simulazioni verranno raccolti ed elaborati nella fase di post-processing e sottoposti a un'analisi critica volta a interpretare i profili di sovrappressione ottenuti in corrispondenza di specifici target. L'analisi sarà condotta in chiave fisica e fenomenologica, tenendo conto della variabilità introdotta dalla diversa composizione delle miscele esplosive e dalla posizione del punto di innesco.

Inizialmente, l'analisi si focalizzerà su elementi impiantistici critici per il funzionamento dell'impianto. I due target selezionati per l'analisi delle conseguenze sono uno degli unloading arm e la gangway tower, rispettivamente distanti 5m e 85m dal centro della nube esplosiva. La scelta dell'unloading arm è motivata dal suo ruolo essenziale nel funzionamento dell'impianto: esso rappresenta l'elemento di connessione

tra la nave rigassificatrice e la linea di trasferimento del gas naturale realizzata sul molo. La gangway tower, invece, costituisce il principale punto di transito del personale tra la nave e la banchina. In quanto struttura destinata alla mobilità degli operatori, assume un'importanza strategica dal punto di vista della sicurezza, rendendo necessaria una valutazione specifica degli effetti sull'uomo in scenari incidentali.

L'analisi di sensibilità rispetto alla posizione del punto di innesco, oltre a essere prevista dallo standard NORSOK, è fondamentale per identificare le configurazioni più critiche in termini di danno. In condizioni reali, una nube esplosiva può essere innescata in qualsiasi punto del proprio volume, e la posizione di innesco influenza fortemente l'evoluzione del fronte di fiamma, in particolare per quanto riguarda la lunghezza del suo percorso, la direzionalità e la generazione di turbolenza. Quest'ultima dipende dal numero e dalla disposizione degli ostacoli attraversati, così come dalla possibilità dei prodotti di combustione di espandersi e dissiparsi. Tali fattori determinano, per ogni miscela, una gamma di valori di sovrappressione massima associati ai diversi punti di innesco, consentendo di individuare quelli maggiormente critici e di ampliare la portata dell'analisi quantitativa.

Dopo l'analisi puntuale dei profili di sovrappressione sui target selezionati, i risultati delle simulazioni verranno interpretati secondo una prospettiva globale, attraverso la valutazione delle aree di danno estese all'intera geometria del caso studio.

Le analisi locali e globali saranno articolate in due fasi distinte. La prima sarà focalizzata sugli effetti dell'esplosione sulle strutture: verranno identificate, all'interno della geometria, le zone soggette a danni strutturali di diversa entità, classificabili in lievi, moderati, di distruzione parziale o totale.

La seconda fase sarà dedicata all'analisi degli effetti sull'uomo. Verranno quindi individuate le aree in cui un'esplosione potrebbe causare lesioni di varia gravità, spaziando da danni lievi (come la rottura dei timpani), a danni moderati, fino a condizioni letali nelle zone più esposte. La distinzione tra danno strutturale e danno all'uomo risiede

principalmente nelle differenti soglie di sovrappressione associate a ciascun effetto, rendendo necessaria una valutazione separata per ciascun tipo di impatto.

Infine, per corroborare i risultati ottenuti dalle simulazioni su FLACS-CFD, verranno utilizzati i metodi semi-empirici TNO e BST, descritti nel capitolo 3, per ricavare i parametri chiave dello studio. Questi ultimi saranno confrontati quantitativamente con i risultati ottenuti dalle simulazioni delle esplosioni delle tre diverse miscele con punto di innesco centrale per verificare che entrambe le tecniche producano dei risultati confrontabili tra di loro. Per la procedura di calcolo dettagliata, si faccia riferimento all'Appendice B: Procedura di calcolo utilizzata per ottenere i risultati attraverso i modelli semi-empirici TNO e BST.

Per testare l'attendibilità dei risultati ottenuti dai metodi TNO e BST attraverso l'approccio grafico, verrà impiegato il software PHAST [32]. Si tratta di uno strumento che può modellare gli effetti di un'esplosione per diverse tipologie di scenario applicando i metodi sopracitati. I report completi ottenuti dai calcoli su PHAST si possono consultare all'interno dell'Appendice C: Risultati delle simulazioni su PHAST.

## **5      *MODELLAZIONE CFD***

Il presente capitolo descrive nel dettaglio la procedura di preparazione del set di casi studio utilizzato nell'ambito di questo lavoro di tesi.

Considerato che l'obiettivo è valutare l'efficacia della CFD nell'ambito dell'analisi quantitativa del rischio connesso a eventi esplosivi, è stata definita una configurazione di base comune a tutte le simulazioni. In particolare, sono stati mantenuti invariati i seguenti elementi: la geometria dello scenario, le dimensioni e la posizione della nube, la griglia di calcolo (mesh), le condizioni iniziali e le condizioni al contorno.

Altri parametri, come la composizione della nube e la posizione del punto d'innesco, sono stati variati caso per caso. Mentre le diverse composizioni rientrano nell'obiettivo di estendere l'analisi delle conseguenze da esplosione ai vettori energetici del futuro, i diversi punti d'innesco servono ad estendere le analisi di rischio di ciascuna miscela, con l'obiettivo di ampliare il numero di casi e vedere come il punto d'innesco influenza lo sviluppo dell'onda d'urto.

Le simulazioni sono state realizzate utilizzando il software FLACS-CFD, specificamente progettato per l'analisi delle conseguenze di esplosioni. In fase di pre-processing, il software si avvale del tool CASD, che consente di configurare la simulazione tramite l'inserimento sistematico dei parametri richiesti.

I paragrafi successivi descrivono i criteri adottati per la definizione di ciascun parametro, fornendo una panoramica ordinata delle sezioni che compongono la fase di preparazione della simulazione.

### ***5.1 GEOMETRIA E SCELTA DELLO SCENARIO***

La geometria utilizzata per le simulazioni, che riproduce fedelmente la configurazione del molo previsto nel progetto FSRU (descritto nel capitolo 2), è rappresentata in Figura 13. Le navi sono state disegnate in modo semplificato, poiché in questo contesto il loro

ruolo principale è quello di costituire una barriera fisica e fungere da elemento di confinamento dell'esplosione.

Invece, particolare attenzione è stata posta nella rappresentazione della regione di interesse, ovvero il molo centrale su cui avviene la formazione della nube esplosiva. In tale zona, infatti, si possono osservare i due unloading arms, l'infrastruttura tubiera che li collega al gasdotto sottomarino e altri elementi come le torrette antincendio. Inoltre, nelle immediate vicinanze del molo centrale, è stato realizzato un pontile che ospita la gangway tower, una struttura utilizzata per consentire il passaggio sicuro di persone. Come detto nel paragrafo 3.1, la presenza di ostruzioni solide può influenzare significativamente la generazione e propagazione di turbolenza e, di conseguenza, amplificare gli effetti dell'esplosione [3]. Per questo motivo, occorre realizzare le simulazioni di esplosione considerando una rappresentazione il più dettagliata possibile, in accordo con gli standard NORSOK [4].

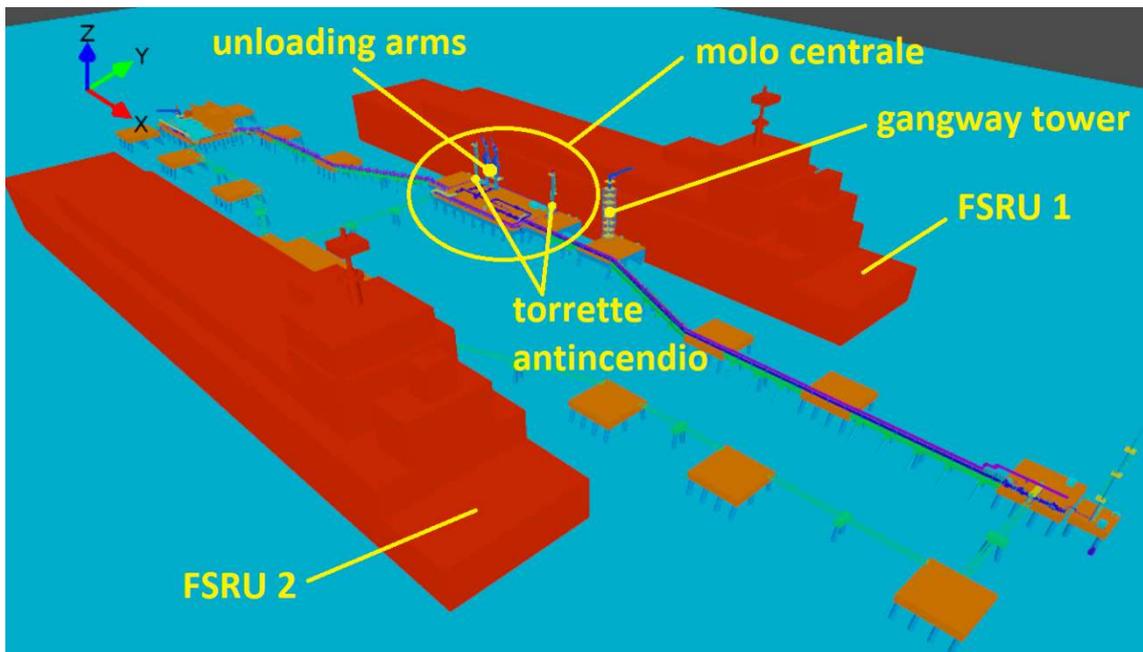


Figura 13: Geometria utilizzata per le simulazioni di esplosione.

Una volta importata la geometria, si procede con la scelta dello scenario "Gas explosion", che imposta automaticamente le condizioni operative, i modelli fisici e i parametri di calcolo specifici per simulazioni di tipo esplosivo.

## **5.2 MONITOR POINTS**

I monitor points (da qui in avanti *MP*) sono punti definiti tramite coordinate cartesiane e posizionati all'interno del dominio simulato con lo scopo di rilevare localmente le grandezze fisiche di interesse. In questo lavoro è stato predisposto un set cartesiano di MP progettato appositamente per verificare la capacità di FLACS-CFD di produrre onde di pressione più attenuate con l'aumentare della distanza dall'origine dell'esplosione ma soprattutto per misurare localmente la pressione in corrispondenza di due elementi impiantistici come l'unloading arm sulla sinistra e la gangway tower. In ultima istanza, questo pattern è stato funzionale anche per confrontare i risultati della simulazione CFD con quelli ottenuti tramite i modelli semi-empirici. Nello specifico, i 14 MP sono stati disposti a distanze crescenti dal punto di innesco lungo le tre direzioni principali, come rappresentato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Sono inoltre evidenziati il MP 10, utilizzato per valutare le conseguenze dell'esplosione relative all'unloading arm, e il MP4, utilizzato per valutare le conseguenze dell'esplosione relative alla gangway tower.

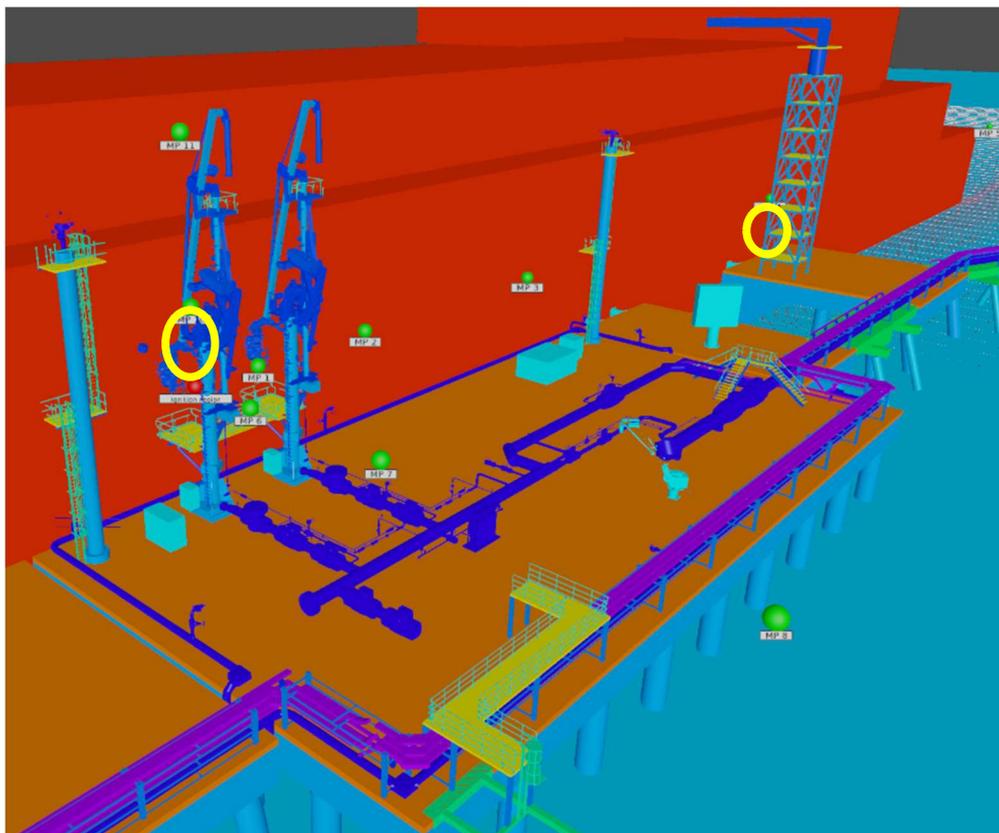


Figura 14: Set di MPs nelle tre direzioni principali.

Per garantire una buona qualità dei rilevamenti, i MP sono stati collocati all'interno delle celle di volume finito, a una distanza sufficiente dalle interfacce con le celle adiacenti. Qualora i MP venissero posizionati più vicino alle interfacce se non addirittura a cavallo fra volumi finiti consecutivi, si potrebbe incorrere in errori di interpolazione numerica [3].

Ciascun punto di monitoraggio è stato configurato per registrare le principali variabili di output rilevanti nell'ambito delle esplosioni, ovvero:

- Sovrapressione [barg]
- Pressione massima [barg]
- Pressione dinamica [Pa]

Come detto in precedenza, la pressione risulta essere il parametro chiave per lo studio delle conseguenze di scenari esplosivi. Grazie a questa disposizione cartesiana dei MP è

stato possibile rilevare la pressione localmente in corrispondenza di target critici per il funzionamento dell'impianto. Con il valore di pressione misurato nelle immediate vicinanze del target, è possibile valutare il danno strutturale grazie ad apposite soglie di danno.

### **5.3 SINGLE FIELD 3D OUTPUT**

All'interno di questo menu vengono selezionate le variabili fisiche per le quali si desidera ottenere la distribuzione spaziale all'interno del dominio simulato, sia su sezioni specifiche sia sull'intera geometria, a intervalli temporali definiti.

I dati così raccolti possono essere successivamente post-processati al fine di generare scene e animazioni che illustrano il transitorio dell'evento esplosivo simulato. La generazione di output richiede però configurazioni aggiuntive, le quali saranno trattate nel paragrafo seguente.

Per quanto riguarda il set di variabili selezionate, per uno scenario di esplosione è opportuno selezionare [3]:

- La sovrappressione [barg];
- La sovrappressione massima [barg];
- La pressione dinamica [Pa];
- Il vettore velocità [m/s];
- La frazione di prodotti di combustione [-].

Con questo set di variabili è stato possibile realizzare le viste 3D in cui vedere sull'intera geometria le varie aree di danno associate a specifici range di pressione che comportano diverse tipologie di danno: dal trascurabile fino alla distruzione totale. Oltre alle tre grandezze inserite anche nei MP, il vettore velocità è utile per analizzare il flusso di prodotti di combustione ma anche l'effetto del trascinamento da esso provocato. La frazione di prodotti di combustione, invece, favorisce un'estensione delle analisi delle conseguenze perché permette di visualizzare dove si accumulano tali sostanze all'interno

del dominio. Può essere utile per valutare la persistenza di gas asfissianti e quindi stimare il rischio di soffocamento nelle aree in cui si accumulano.

#### **5.4 SIMULATION AND OUTPUT CONTROL**

Questa sezione consente di impostare i parametri generali della simulazione e le modalità di gestione dei dati in output. La prima scelta da compiere riguarda la modalità di simulazione, tra stazionaria e transitoria. Considerando che lo scenario oggetto di analisi si evolve nel tempo, è stata selezionata l'opzione transitoria.

Successivamente, viene richiesto di specificare la durata massima del transitorio. In questo studio, tale valore è stato fissato pari a due secondi, in quanto l'innescio avviene nell'istante iniziale e il primo impulso positivo si manifesta generalmente entro il primo secondo. Tuttavia, nei monitor points (MPs) più distanti dall'origine dell'esplosione, si osservano picchi di sovrappressione via via più deboli e ritardati ma ricadono comunque all'interno dell'intervallo temporale sopraindicato.

Non è stato invece definito un limite per il numero massimo di step temporali, lasciando così al software la libertà di adattare il numero di iterazioni necessarie. In simulazioni di tipo non stazionario e non lineare, un vincolo arbitrario su questo parametro potrebbe causare l'interruzione prematura della simulazione, con il rischio di perdere informazioni significative, come i picchi di pressione nei punti più lontani, portando a una sottostima del danno.

Successivamente si richiede di specificare i parametri *CFLC* e *CFLV*. Si tratta rispettivamente dei numeri di Courant-Friedrich-Levy basati sulla velocità del suono nel fluido e sulla velocità del flusso di fluido. Il *CFLC* controlla lo step temporale in funzione della velocità del suono, in modo che la propagazione dell'onda acustica resti contenuta entro la dimensione media delle celle. È stato adottato il valore di default 5, coerente con quanto previsto nelle simulazioni di validazione. Il *CFLV*, invece, collega lo step temporale alla velocità del flusso fluido, e il suo valore è stato fissato a 0.5, anch'esso valore di default.

Il *CFLC* è più influente nelle prime fasi dell'esplosione, quando le velocità di combustione e flusso sono ridotte, mentre il *CFLV* assume maggiore rilevanza nelle fasi finali, caratterizzate da velocità elevate [3].

Il parametro *MODD* stabilisce la frequenza di salvataggio dei dati relativi all'evoluzione temporale delle variabili scalari. È stato mantenuto il valore di default 1, corrispondente alla registrazione dei dati a ogni singolo timestep. In simulazioni più lunghe (es. dispersione), questo valore può essere aumentato per limitare la quantità di dati generati, agevolando il post-processing [3].

Infine, le ultime impostazioni riguardano la DDT (Deflagration to Detonation Transition), abilitata in modalità automatica in tutte le simulazioni. Essa si attiva quando il parametro PressureGradientNormalized (*DPDX*) supera il valore di 1, condizione che si verifica esclusivamente nel caso di nubi contenenti idrogeno e aria, potenzialmente in grado di innescare una transizione da deflagrazione a detonazione.

## **5.5 BOUNDARY CONDITIONS**

Le condizioni al contorno sono state assegnate alle superfici perimetrali del dominio computazionale, identificate in FLACS-CFD come *XLO*, *YLO*, *ZLO*, *XHI*, *YHI*, *ZHI*.

Considerando che lo scenario analizzato è un'esplosione in ambiente marino scarsamente confinato, si è adottata la condizione di tipo "Plane Wave" su tutte le superfici, ad eccezione della *ZLO*. Questa scelta permette di evitare la riflessione delle onde di pressione, un fenomeno che può verificarsi quando ai margini del dominio si impone un valore fisso di pressione. Per garantire una buona qualità dei risultati, i confini del dominio sono stati posizionati a una distanza sufficientemente ampia rispetto all'area di interesse, minimizzando così le interferenze legate a riflessioni indesiderate.

Per la faccia *ZLO*, collocata al di sotto del livello del mare, è stata invece impostata una condizione "Euler". Questo tipo di condizione consente la risoluzione delle equazioni di Eulero nei volumi finiti di bordo e assicura la corretta conservazione della massa e della quantità di moto nei casi in cui il flusso sia uscente. Anche questa rappresenta una

condizione aperta, che consente ai flussi di uscire liberamente dal dominio computazionale, evitando la generazione di riflessioni spurie.

## **5.6 INITIAL CONDITIONS**

In questa sezione vengono specificati i valori iniziali relativi alla pressione, alla temperatura, al campo di turbolenza, alle condizioni atmosferiche e alla composizione dell'aria.

Per il campo di turbolenza occorre definire la “Characteristic velocity”, “Relative turbulence intensity” e “Turbulence length scale”. Il primo rappresenta la velocità media del flusso ed è impiegata per inizializzare i campi turbolenti in assenza di vento e stimare la quantità iniziale di energia cinetica turbolenta. In questo lavoro è stato scelto il valore di default pari a  $200 \text{ m/s}$ , rappresentativo di uno scenario di dispersione causato da una rottura randomica di una tubazione [3]. Il secondo è definito come il rapporto tra la componente fluttuante della velocità (assunta isotropa) e la velocità caratteristica, e contribuisce, insieme a quest'ultima, al calcolo dell'energia cinetica turbolenta all'istante iniziale. Il terzo parametro indica la scala tipica alla quale avviene la dissipazione dell'energia turbolenta. Si tratta di parametri chiave per il modello  $k - \epsilon$  per il calcolo del campo di forze generate a causa dei fenomeni turbolenti.

Per tutti questi parametri si è optato per i valori di default, in assenza di informazioni più precise sulla turbolenza della nube e in coerenza con le campagne di validazione.

I parametri di pressione e temperatura iniziali sono stati fissati rispettivamente a  $10^5 \text{ Pa}$  e  $27,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , valori coerenti con le condizioni standard atmosferiche del sito in esame.

Le impostazioni relative all'atmosfera e alla ventilazione sono state definite considerando che lo scenario si sviluppa a pochi metri sopra il livello del mare. È stata pertanto assegnata una “Ground height” pari a  $0 \text{ m}$ , e una “Ground roughness” di  $0,25 \text{ m}$ , valore rappresentativo di pochi ostacoli sparsi nella regione d'interesse.

Non sono invece stati specificati parametri come “Reference height”, “Canopy height” o “Pasquill Class”, poiché non è stata considerata la presenza del vento tra le condizioni al contorno. Tale scelta è giustificata dal fatto che il transitorio di un’esplosione è estremamente rapido e intenso, pertanto poco influenzato dall’azione del vento, a differenza di quanto avviene in altri scenari incidentali come le simulazioni di dispersione.

### **5.7 GAS COMPOSITION AND VOLUME**

In questa sezione sono definite le impostazioni relative alla posizione, dimensione e composizione della nube esplosiva.

Per quanto riguarda la sua geometria, la modellazione della nube equivalente richiede l’inserimento delle coordinate di uno dei vertici del parallelepipedo che la rappresenta, insieme alle dimensioni lungo le tre direzioni principali ( $X, Y, Z$ ). In questo modo è possibile determinare le coordinate degli altri vertici necessari a definire il volume complessivo della nube. È stata scelta come posizione quella del molo centrale per testare il fenomeno esplosivo all’interno di una geometria complessa che presenta degli elementi critici per l’impianto non solo nelle immediate vicinanze della nube ma anche in lontananza.

Per quanto concerne la composizione, sono state inserite le percentuali volumetriche dei componenti che costituiscono la frazione combustibile della nube. Nello specifico, sono state considerate tre differenti miscele stechiometriche, ciascuna caratterizzata da una specifica combinazione di specie chimiche. In Figura 15 viene riportata nel dettaglio la composizione percentuale di ciascuna miscela analizzata.

Prima composizione			Seconda composizione			Terza composizione		
GAS NATURALE			IDROGENO			METANO-IDROGENO		
Azoto	N2	0,20%	Idrogeno	H2	100,00%	Metano	CH4	70,00%
Metano	CH4	87,00%						
Etano	C2H6	8,37%				Idrogeno	H2	30,00%
Propano	C3H8	3,00%						
n-Butano	C4H10	1,43%						

Figura 15: Composizione delle tre diverse miscele simulate.

## 5.8 IGNITION

L'ultima configurazione necessaria per completare l'impostazione della simulazione riguarda l'innesco dell'esplosione. Per questo tipo di scenario, è richiesto specificare la posizione, la dimensione, l'istante temporale di attivazione e la durata del punto di innesco. Per questo scenario incidentale, l'innesco è stato provocato da un cortocircuito di un quadro elettrico localizzato nel deck centrale su cui si sviluppa la nube esplosiva.

Nel presente lavoro di tesi, l'innesco puntuale e istantaneo è stato attivato all'inizio della simulazione ( $t = 0$  s). Questo approccio consente di concentrare l'analisi sugli effetti generati dall'esplosione, senza introdurre variabili temporali aggiuntive legate alla fase di accensione.

Ai fini delle analisi di sensibilità, è stata variata unicamente la posizione spaziale del punto di innesco. Nello specifico, oltre alla posizione centrale, sono state considerate le coordinate corrispondenti agli otto vertici del volume della nube e ai sei centri delle sue facce laterali, per un totale di quindici configurazioni differenti per ciascuna delle tre miscele.

## 5.9 SCELTA DELLA GRID

Completata la definizione dello scenario, è stato necessario procedere alla generazione della grid cartesiana, suddividendo il dominio computazionale in un insieme di volumi finiti all'interno dei quali vengono risolte le equazioni di conservazione, opportunamente discretizzate. L'obiettivo legato alla scelta della grid è legato alla

minimizzazione dell'errore numerico, elemento inevitabile nel contesto di un'operazione di discretizzazione.

Conformemente alle linee guida fornite dal manuale FLACS-CFD, è stata identificata una regione di interesse coincidente con l'area occupata dalla nube esplosiva. Partendo da questa zona, che riveste un ruolo centrale nella dinamica dell'esplosione, sono state adottate celle di dimensioni ridotte, in modo da garantire una maggiore risoluzione spaziale e una descrizione più accurata dei fenomeni. Procedendo verso i bordi del dominio computazionale, le dimensioni delle celle sono state gradualmente aumentate applicando un fattore di stretching non superiore a 1,2, così da ridurre il numero complessivo di celle con una transizione lenta, evitando brusche variazioni di dimensioni che porterebbero con sé delle instabilità e dei problemi di convergenza.

Per determinare la risoluzione ottimale della grid, è stato inizialmente applicato un processo di convergenza (grid convergence), adottando il metodo della Richardson Extrapolation [30]. Tale metodologia prevede la creazione di almeno tre grid di risoluzione crescente e l'analisi dei risultati ottenuti in punti di monitoraggio predefiniti, attraverso indicatori come l'errore relativo e l'indice di convergenza della griglia (*GCI*). Nella tabella in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati i valori di sovrappressione e di pressione dinamica (denominata "DragMag") misurati in due monitor points per ciascuna delle quattro grid analizzate. Nello specifico, il MP1 dista 5m dal centro della nube equivalente mentre il MP2 dista 35m.

ID	grid size (core)	refinement factor	p_max_1 [barg]	p_max_2 [barg]	DragMag_1 [Pa]	DragMag_2 [Pa]
1	0,5	1	0,17	0,08	525,28	550,00
2	0,38	1,31	0,20	0,12	794,93	930,98
3	0,29	1,72	0,25	0,16	942,16	1416,05
4	0,22	2,25	0,42	0,21	1423,39	1984,31

Figura 16: Calcoli di grid convergence.

Dall'analisi dei risultati emerge che i valori di entrambe le grandezze aumentano all'aumentare del numero di celle, evidenziando un andamento non convergente. Questo comportamento è ulteriormente confermato dai grafici in Figura 17, in cui si nota

un progressivo incremento dei valori sia per la sovrappressione che per la pressione dinamica, oltre a una crescente discrepanza tra i due MPs con il raffinamento della grid. Tali risultati suggeriscono che il software FLACS-CFD non è in grado di garantire la convergenza numerica con l'aumentare della risoluzione spaziale.

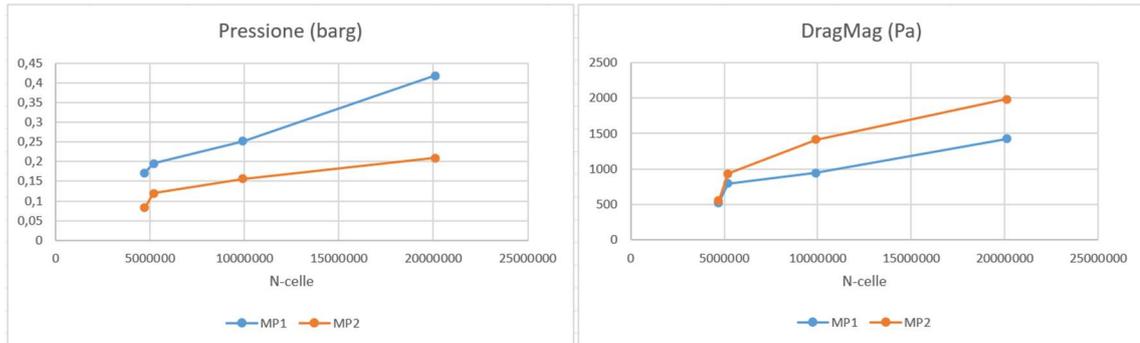


Figura 17: Grafici di grid convergence per due diversi parametri: sovrappressione (SX) e pressione dinamica (DX).

Questa osservazione è coerente con quanto riportato nel manuale del software, che attribuisce la mancata convergenza alla struttura dei modelli sub-grid. Questi ultimi consentono di rappresentare fenomeni che avvengono a scale inferiori rispetto a quelle della cella di calcolo, oltre che a calcolare la porosità del dominio adeguando la geometria reale alla discretizzazione in volumi cartesiani [3]. Quindi, a seconda della dimensione dei volumi delle celle, gli elementi della geometria (specialmente i più piccoli) vengono rielaborati diversamente, producendo così dei risultati lontani da quelli ottenuti con altri raffinamenti.

Poiché non è stato possibile trovare la griglia ottimale con il metodo appena descritto, la selezione della griglia è stata guidata dalle raccomandazioni contenute nel manuale. Esso fornisce indicazioni sulla posizione della regione di interesse, sulle dimensioni minime e massime delle celle, sull'aspect ratio massimo ammesso e sul limite del fattore di stretching. Nello specifico, la regione d'interesse dovrebbe essere un volume che circonda la nube esplosiva. Si veda a tal proposito la Figura 18.

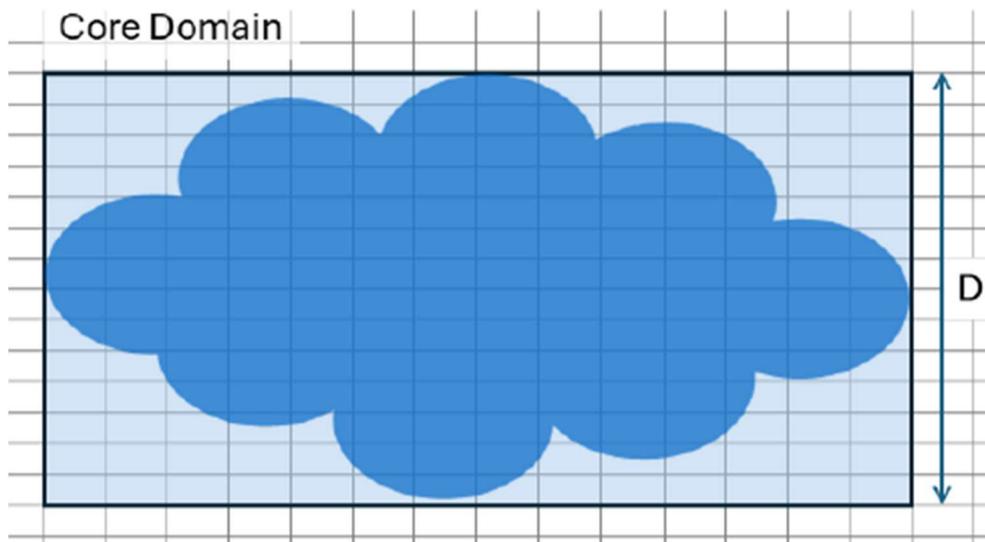


Figura 18: Schema della regione di interesse [3].

Tenendo come riferimento la dimensione minore “D” del volume della regione d’interesse, si assegnano alle lunghezze delle singole celle di tale regione comprese fra  $D/14$  e  $D/17$  [3]. Con questa configurazione, FLACS riesce a modellare accuratamente i fenomeni senza dei sovraccarichi computazionali non necessari. Allontanandosi dalla zona d’interesse, le celle subiscono un processo di stretching lento e progressivo fino ad una dimensione massima che raggiungono in lontananza pari a  $5m$ .

Queste indicazioni sono state implementate anche nelle campagne di validazione riportate nel manuale, in cui sono stati replicati virtualmente degli scenari esplosivi studiati in ambienti controllati caratterizzati da geometrie e/o composizioni di nube simili a quelli che sono oggetto di questo lavoro di tesi.

Un esempio emblematico è riportato in Figura 19, che mostra un esperimento con esplosione di una nube stechiometrica di idrogeno e aria contenuta in un pallone semisferico di  $20 m$  di diametro. Nella simulazione, la grid è stata generata utilizzando celle cubiche la cui dimensione è la media tra la minima e la massima adottata nella regione di interesse. I risultati simulati, confrontati con i valori sperimentali in Figura 20, mostrano un’elevata corrispondenza, con tutti i dati compresi all’interno della zona di accettabilità, delimitata da fattori 2 e 0.5 rispetto alla linea di perfetto accordo.

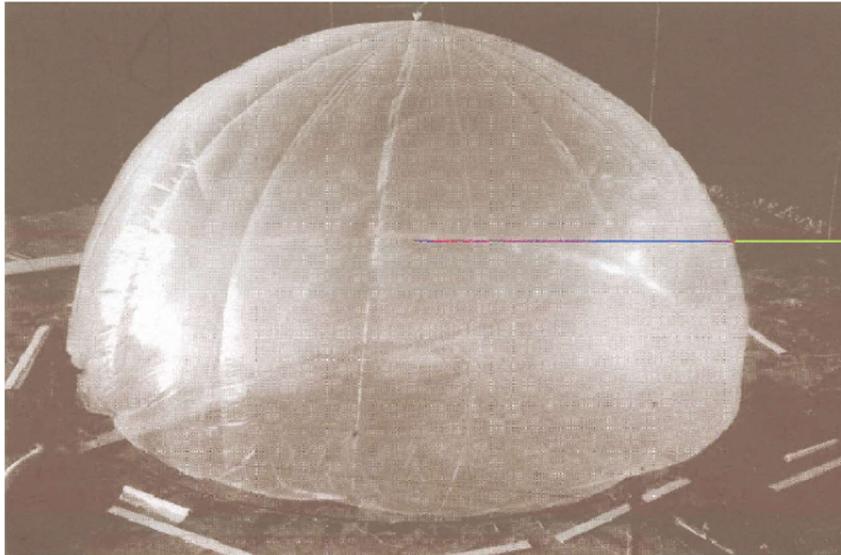


Figura 19: Esperimento "Hydrogen Balloon"[3].

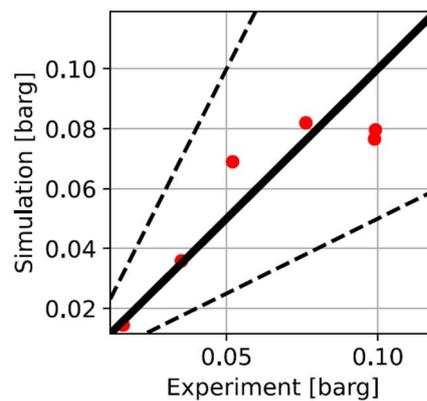


Figura 20: Validazione sulla pressione del caso "Hydrogen Balloon" [3].

Oltre a questo esperimento, sono stati osservati altri casi di validazione che trattavano miscele di gas naturale e miscele metano-idrogeno con gli stessi criteri di costruzione della griglia appena presentati. Perciò, a valle di questo studio, è stata realizzata una griglia funzionale utilizzando i criteri sopraelencati per tutte le simulazioni che compongono il set di questo lavoro di tesi.

In Figura 21, sono riportate le immagini della griglia impiegata nelle diverse simulazioni e una schermata riepilogativa dei parametri costruttivi. Nell'immagine a sinistra, è evidente l'elevata densità delle celle in prossimità della nube esplosiva.

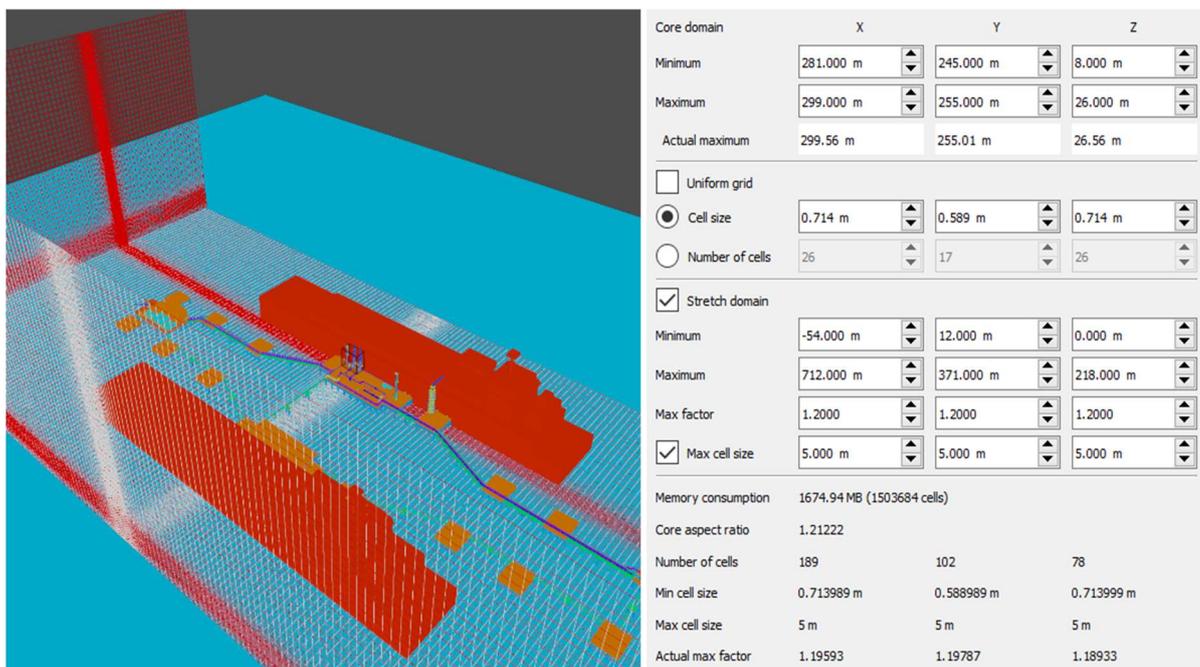


Figura 21: Grid utilizzata per il set di simulazioni del caso studio.

## 5.10 ANALISI DI SENSIBILITA'

Dopo aver individuato la griglia con la quale simulare gli scenari di esplosione con le tre diverse miscele di combustibile, sono state condotte delle analisi di sensibilità in cui è stato variato il punto di innesco della nube al fine di valutare i suoi effetti sulla sovrappressione generata dall'esplosione. In questo modo è possibile estendere l'analisi di rischio evidenziando i punti in cui l'innesco della nube genera la sovrappressione maggiore e, di conseguenza, il danno maggiore. Inizialmente, per tutte e tre le miscele esaminate, l'innesco era localizzato nel centro del parallelepipedo che rappresenta il volume di nube equivalente. Nelle analisi di sensibilità, sono state simulate delle esplosioni caratterizzate da punti di innesco disposti su ciascuno degli 8 vertici del parallelepipedo e su ciascuno dei centri delle 6 facce perimetrali. I diversi punti d'innesco sono visibili in Figura 22.

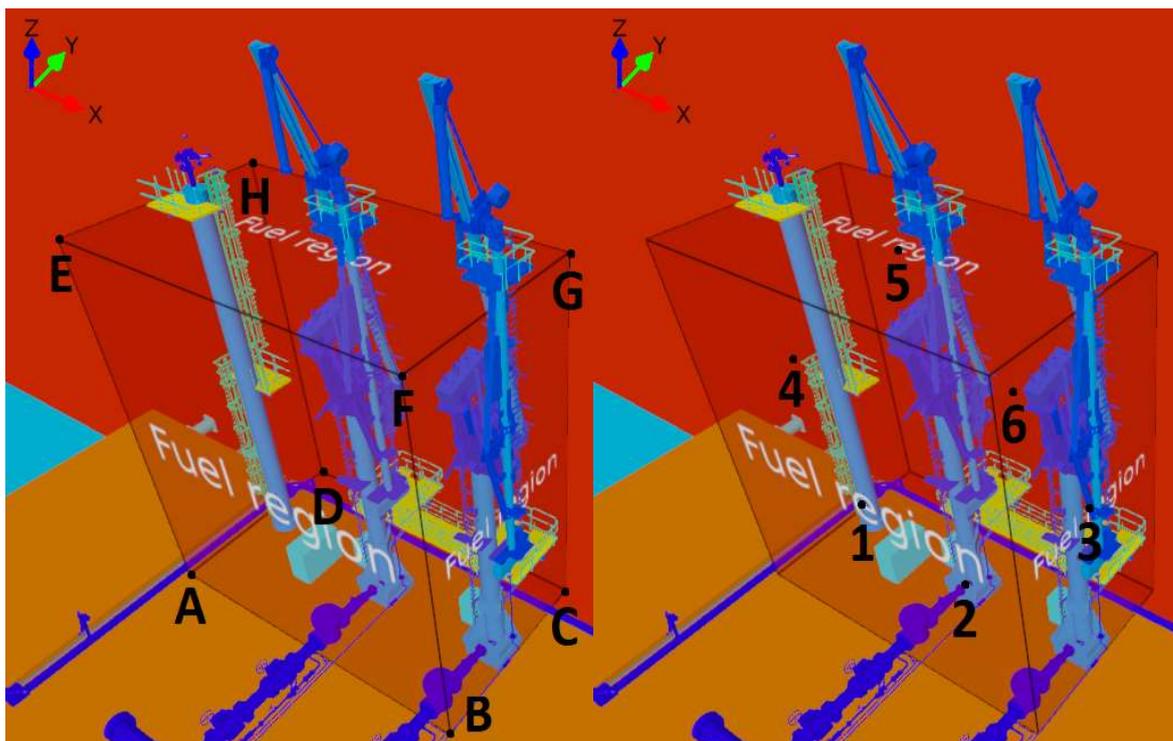


Figura 22: Analisi di sensibilità sul punto di innesco.

Il totale delle simulazioni preparate per questo studio ammonta quindi a 45 eventi di esplosione: ciascuno di essi è caratterizzato da uno dei 15 diversi punti di innesco (innesco centrale, in uno degli 8 vertici o al centro di una delle 6 facce perimetrali) e da una delle tre diverse miscele (gas naturale, idrogeno, miscela metano-idrogeno al 70%-30%).

## 6 ANALISI DEI RISULTATI

Il set di simulazioni di questo caso studio ha prodotto una serie di risultati che verranno discussi all'interno di questo capitolo per dimostrare quanto la CFD possa fornire dettagli preziosi per estendere l'analisi delle conseguenze associate a scenari di esplosione di nube di vapore. Il caso studio analizza le esplosioni di tre diverse miscele, ciascuna delle quali è stata innescata in 15 punti differenti per valutare l'influenza che il punto d'innescò esercita nei confronti del profilo di pressione (e quindi del danno), nonché il parametro chiave selezionato per questo lavoro di tesi. Con la configurazione della griglia che presenta le impostazioni indicate nel capitolo precedente, la durata delle simulazioni si aggira intorno all'ora per quanto riguarda le miscele di gas naturale e metano-idrogeno e intorno alle due ore per la nube costituita da idrogeno-aria. La differenza in termini di tempo è giustificata dal fatto che per le esplosioni di idrogeno si verifica il processo di transizione da deflagrazione a detonazione, per cui FLACS-CFD opera automaticamente un affinamento degli step temporali aumentando il numero di iterazioni e quindi il tempo totale di calcolo.

All'interno di questo capitolo non verranno discussi tutti i risultati del set di simulazioni in quanto, per alcune di loro, i commenti risulterebbero simili e ridondanti. Motivo per cui verranno discussi e osservati nel dettaglio i casi elencati nella tabella in Figura 23. Si tratta di casi rappresentativi che racchiudono al loro interno tutte le diverse evoluzioni osservate del fenomeno di esplosione.

Miscela esplosiva	punti di innescò							
	centro	1	2	3	5	6	A	B
Gas Naturale	pressione	pressione	---	pressione e trascinamento	trascinamento	pressione	pressione	---
Metano-Idrogeno	pressione	pressione	---	pressione e trascinamento	trascinamento	pressione	pressione	---
Idrogeno	trascinamento	---	pressione	---	pressione	---	---	pressione e trascinamento

Figura 23: tabella riassuntiva delle simulazioni rappresentative dell'intero set.

L'analisi partirà dai profili di pressione misurati localmente. L'analisi puntuale è una delle caratteristiche che rende la CFD un ottimo strumento per lo studio delle conseguenze associate al fenomeno di esplosione. Su FLACS-CFD, tale analisi viene

condotta per mezzo di Monitor Points che si possono disporre liberamente all'interno della geometria. Perciò, collocandoli in prossimità di elementi impiantistici, è possibile calcolare qual è la sovrappressione osservata da tali elementi e valutare quindi le conseguenze in termini di danni strutturali o danni alle persone considerando delle opportune soglie di danno. I MP scelti sono due e si trovano in corrispondenza di due elementi fondamentali per l'impianto in esame: si tratta del MP4, che si trova in corrispondenza della gangway tower, elemento di passaggio del personale addetto ai lavori che collega la rigassificatrice al molo, e del MP10, situato in prossimità dell'unloading arm, altro elemento fondamentale che consente la mandata di gas naturale dalla rigassificatrice al gasdotto realizzato sul molo. La scelta di condurre l'analisi locale su questi due MP, oltre ai motivi associati alle strutture che essi rappresentano, è giustificata anche dal fatto che si trovino a distanze diverse dal centro dell'esplosione: mentre il MP10 si trova a 5m dal centro geometrico della nube, il MP4 si trova a 85m dallo stesso centro. In questo modo si possono valutare gli effetti dell'esplosione sia sulla breve che sulla lunga distanza per trarne delle conclusioni in merito.

In questo modo verranno valutate le simulazioni partendo dalla miscela meno reattiva, ovvero quella di gas naturale, fino ad arrivare alla più reattiva (nube di solo idrogeno). Per ogni composizione di nube, verranno discussi i profili di sovrappressione e pressione dinamica per i punti d'innesco rappresentativi dell'intero set visibili in Figura 23. I valori di picco della pressione verranno valutati nell'ottica del danno associato ad essi sia in termini strutturali che in termini di danno alle persone. A tal proposito, si faccia riferimento alle seguenti tabelle mostrate in Figura 24 e Figura 25 che riportano le soglie di danno e la loro corrispondente descrizione [20].

Tipologie di danno strutturale		
Soglia [barg]	Danno	Definizione
0,015	Lieve	Rottura di vetri, danni leggeri alle tettoie, formazione di cricche
0,030	Moderato	Danni riparabili senza la ricostruzione totale della struttura
0,070	Grave	Demolizione parziale con conseguente ricostruzione della struttura
0,350	Molto grave	Collasso di almeno il 50% della struttura con conseguente ricostruzione totale
0,700	Distruzione Totale	Integrità della struttura completamente compromessa

Figura 24: Danni alle strutture [20].

Tipologie di danno al personale	
Soglia [barg]	Danno
0,17	Rottura dei timpani (1%)
0,44	Rottura dei timpani (50%)
1,00	Fatalità (1%)
1,40	Fatalità (50%)
2,00	Fatalità (100%)

Figura 25: Danni all'uomo [20].

All'analisi locale segue un'analisi globale in cui il campo di pressione calcolato da FLACS-CFD è stato utilizzato per realizzare delle aree di danno all'interno dell'intera geometria. Attraverso questo studio sarà possibile osservare la vastità di ciascuna tipologia di danno associato a determinate soglie di pressione per cui tutti gli elementi presenti all'interno di una determinata area saranno soggetti al relativo danno associato ad essa. Anche per quest'analisi, le soglie di pressione e i danni corrispondenti sono stati presi dalle tabelle precedentemente mostrate nella Figura 24 e Figura 25. Per maggiori dettagli sui risultati ottenuti, è possibile consultare l'apposita Appendice A: risultati di FLACS-CFD.

Infine, l'ultima parte di questo capitolo sarà dedicata al confronto dei risultati prodotti dalla CFD con quelli prodotti dai modelli semi-empirici. Verrà condotta un'analisi critica sulla qualità dei risultati prodotti e sulle differenze fra le tipologie di calcolo e sulle loro potenzialità. Per maggiori dettagli sulla procedura utilizzata per ottenere i risultati dai modelli semi-empirici, è possibile consultare l'apposita Appendice B: Procedura di calcolo utilizzata per ottenere i risultati attraverso i modelli semi-empirici TNO e BST.

### **6.1 ANALISI LOCALE SU SPECIFICI TARGET**

Come anticipato nel capitolo precedente, è stata condotta un'analisi di sensibilità variando la posizione del punto di innesco della nube. Nello specifico sono stati simulati un totale di 15 casi per ciascuna miscela esplosiva. Gli inneschi sono stati posizionati in corrispondenza del centro geometrico della nube equivalente, dei centri di ciascuna delle sue 6 facce perimetrali e in ciascuno dei suoi 8 vertici.

Tale analisi sarà condotta utilizzando un approccio più ingegneristico andando a valutare i risultati provenienti da quei MPs descritti all'inizio di questo capitolo disposti vicino a dei target ben specifici. In particolare, saranno attenzionati:

- il MP4 disposto in corrispondenza della gangway tower;
- il MP10 disposto in corrispondenza dell'unloading arm più vicino al centro della nube.

La loro posizione precisa si può osservare nella Figura 26.

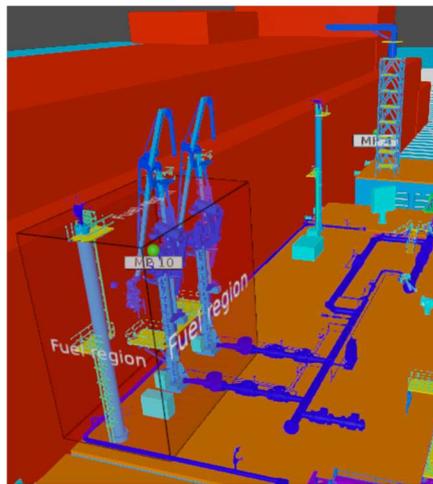


Figura 26: Vista dei MPs utilizzati per l'analisi di sensibilità.

Per ragioni di praticità, vengono di seguito riportati in Figura 27 nuovamente i punti di innesco nominati con le lettere dalla A alla H per i vertici e con i numeri da 1 a 6 per i centri delle facce perimetrali.

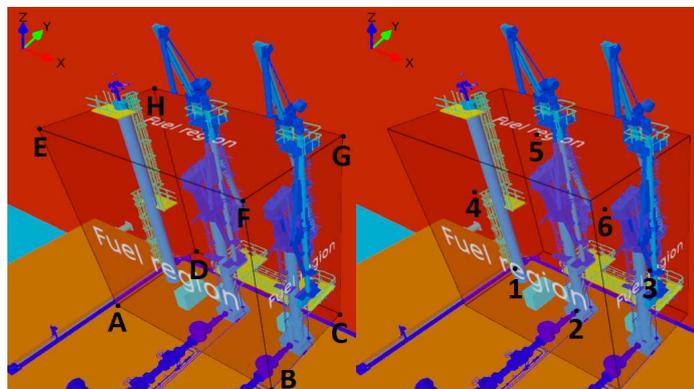


Figura 27: punti d'innesco periferici.

### 6.1.1 ESPLOSIONE DI GAS NATURALE

Dall'analisi di sensibilità, osservando i valori misurati nel MP10 (disposto a 5m dal centro della nube in corrispondenza dell'unloading arm), l'evento che ha prodotto le conseguenze peggiori in termini di sovrappressione è quello caratterizzato dall'innesco posizionato nel centro della nube. Per questa deflagrazione, il combustibile è dotato di una bassa reattività e il fenomeno di propagazione della fiamma è dovuto alla sola diffusività molecolare. Per queste ragioni, tale processo risulta essere relativamente lento e, per questo motivo, fortemente influenzato dalla turbolenza [33]. La presenza di una struttura complessa come l'unloading arm nelle immediate vicinanze dell'innesco contribuisce notevolmente alla deformazione del fronte di fiamma massimizzando il meccanismo di feedback positivo che provoca un aumento della pressione. La fiamma, inoltre, si propaga in tutte le direzioni continuando a incontrare ostruzioni senza favorire la fuoriuscita dei prodotti di combustione i quali, non trovando vie di sfogo, restano intrappolati influenzando a loro volta sulla sovrappressione.

Le esplosioni innescate nei centri delle facce perimetrali della nube hanno prodotto dei valori di pressione inferiori. In questi casi, i prodotti di combustione riescono a fuoriuscire più facilmente lungo le direzioni perpendicolari alla faccia su cui è avvenuto l'innesco. Fra questi ultimi, l'evento più grave corrisponde all'esplosione con innesco nel punto 6 poiché, a causa della parte laterale dello scafo della nave che confina la nube, si assiste a una riflessione dell'onda di pressione e i prodotti di combustione hanno una maggiore difficoltà a disperdersi nell'atmosfera. Segue poi l'esplosione innescata nel punto 1 in cui gran parte del fronte di fiamma è diretto verso la parete della rigassificatrice ma, trovandosi in una regione non confinata, consente una corsia preferenziale più ampia per la fuoriuscita dei prodotti di combustione. Mentre questi ultimi due casi hanno prodotto delle sovrappressioni simili a quelle relative alla sovrappressione con innesco centrale, tutti gli altri (come, ad esempio, il punto 3) hanno prodotto dei picchi inferiori del 50% circa.

Infine, le esplosioni innescate nei vertici (come, ad esempio, nel punto A) hanno portato a delle sovrappressioni ulteriormente più basse, circa il 60-70% di quelle prodotte dall'innesco centrale. In questi casi, la fuoriuscita dei prodotti di combustione è ancora più agevolata perché avviene in più direzioni.

La Figura 28 riporta i profili di sovrappressione rilevati dal Monitor Point 10 dei casi rappresentativi precedentemente commentati. Inoltre, sono presenti i valori che identificano le soglie di danno relative alle strutture circostanti (in rosso) e all'essere umano (in blu) [20].

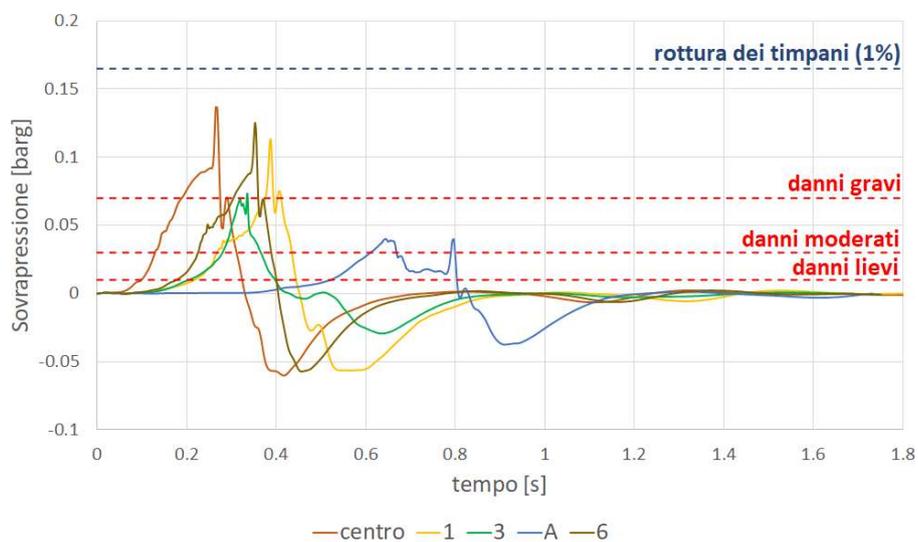


Figura 28: profili di sovrappressione ottenuti da un'esplosione di Gas Naturale in 5 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze dell'unloading arm (MP10).

Osservando il grafico in Figura 28, si può dedurre che tutti i fenomeni di deflagrazione di gas naturale analizzati producono dei danni strutturali che vanno dai moderati ai gravi. Anche il picco del profilo di sovrappressione più basso (relativo al punto A) si trova al di sopra della soglia minima che caratterizza i danni moderati. Una struttura soggetta a queste sovrappressioni potrebbe subire dei cedimenti parziali che potrebbero portare ad una ricostruzione totale del target attenzionato [20]. Per quanto riguarda il rischio riferito all'uomo, nessuno dei casi prevede una sovrappressione tale da poter provocare dei danni moderati come la rottura dei timpani [20].

Per quanto riguarda invece il MP4, disposto a 85m di distanza dal centro della nube e in corrispondenza della gangway tower, i valori di sovrappressione sono decisamente inferiori rispetto a quelli registrati nel MP10 proprio per via della notevole differenza in termini di distanza dal centro della nube.

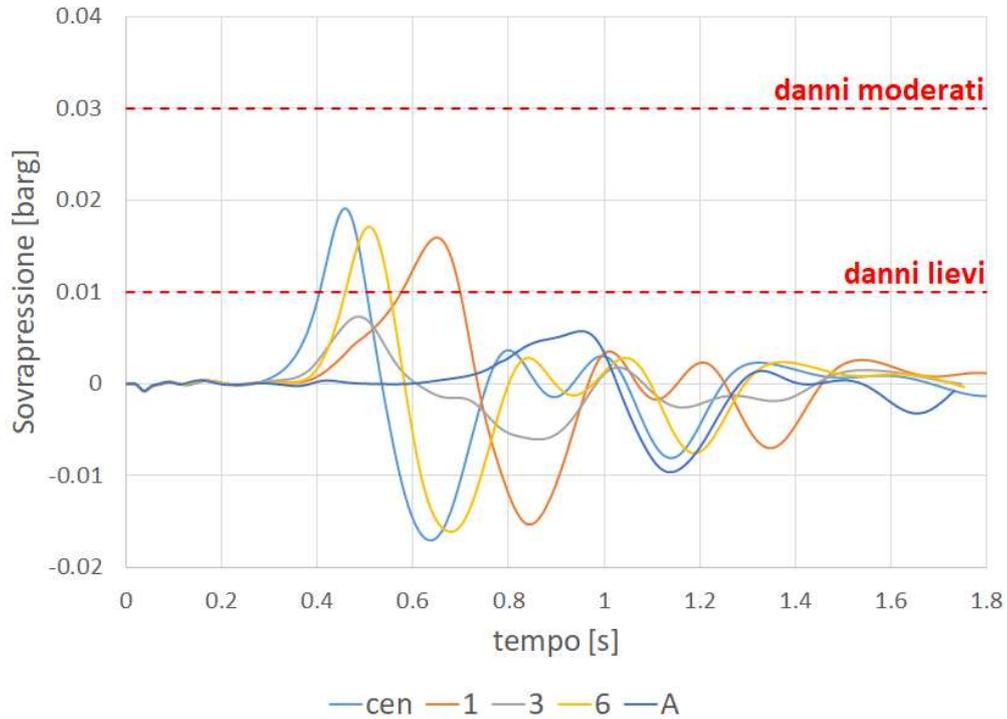


Figura 29: profili di sovrappressione ottenuti da un'esplosione di Gas Naturale in 5 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze della gangway tower (MP4).

Osservando il grafico in Figura 29 si può notare che una struttura distante 85m dalla nube come la gangway tower subisce al più dei danni lievi come, ad esempio, delle cricche locali [20]. La salute dell'uomo non risulta essere compromessa.

Per quanto riguarda invece la pressione dinamica, i fenomeni analizzati non hanno prodotto dei contributi significativi alla pressione totale. La Figura 30 mostra i profili massimi e minimi di pressione dinamica rispetto ai diversi punti di innesco. Nello specifico, si ottiene il valore massimo in corrispondenza dell'innesco nel punto 3 (centro della faccia perpendicolare alla direzione X+) mentre il valore minimo lo si ottiene nel caso di esplosione con innesco nel punto 5 (centro della faccia perpendicolare alla direzione Z+). Si può notare come il valore massimo risulti essere inferiore di un ordine

di grandezza rispetto alla minima sovrappressione visibile in Figura 28. Ragione per cui il suo contributo al danno strutturale risulta essere praticamente influente.

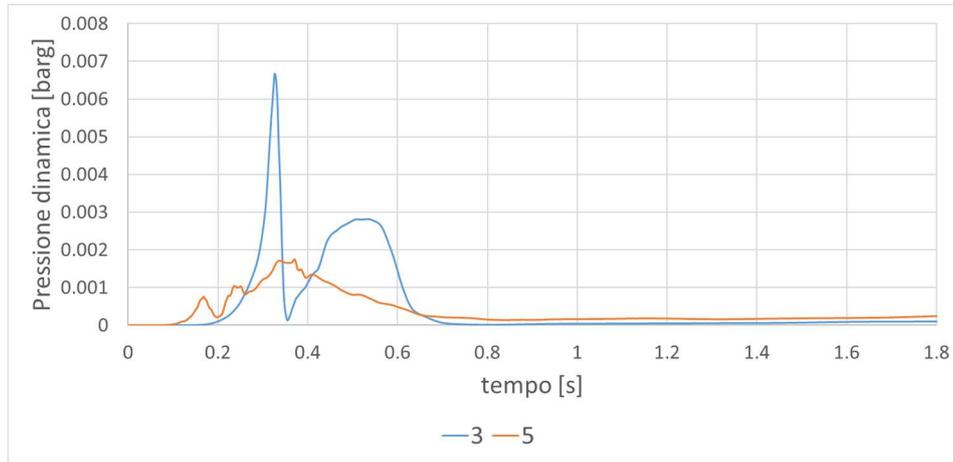


Figura 30: profili di pressione dinamica ottenuti da un'esplosione di Gas Naturale in 2 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze dell'unloading arm (MP10).

Anche per la pressione dinamica i risultati misurati nel MP4, distante 85m dalla nube, risultano essere notevolmente inferiori rispetto ai valori registrati nel MP10. A differenza della sovrappressione, la pressione dinamica è soggetta a una maggiore omogenizzazione all'aumentare della distanza dall'origine dell'esplosione. Come si può vedere in Figura 31, i due profili sono molto più simili tra di loro di quanto non lo siano i profili visti in Figura 30. Ciò è dovuto a una progressiva omogenizzazione del profilo di velocità del vento di esplosione [33].

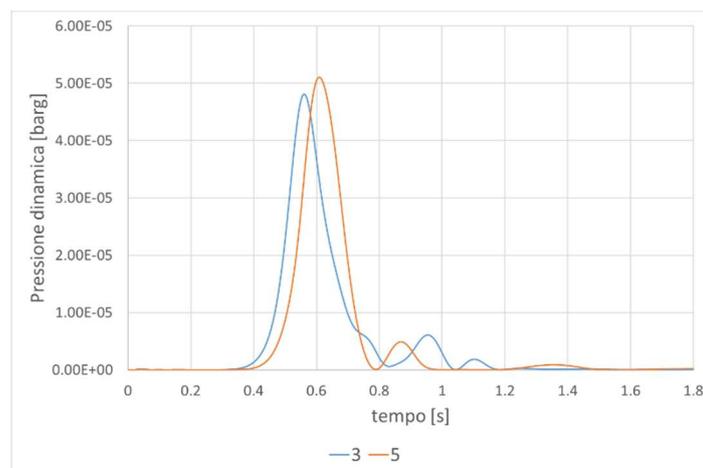


Figura 31: profili di pressione dinamica ottenuti da un'esplosione di Gas Naturale in 2 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze della gangway tower (MP4).

### 6.1.2 ESPLOSIONE DI MISCELA METANO – IDROGENO

Anche l'esplosione della suddetta miscela consisteva in una deflagrazione, perciò, la fisica del fenomeno è del tutto analoga alla precedente. La differenza notevole fra i due casi riguarda la reattività: a differenza del gas naturale, questa miscela, essendo più reattiva, ha provocato delle conseguenze peggiori sia in termini di sovrappressione che di pressione dinamica, in accordo con quanto emerso dagli esperimenti [33].

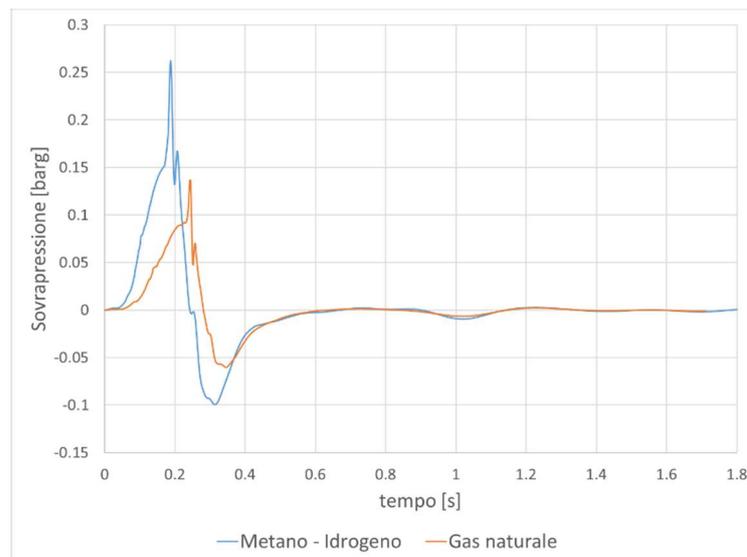


Figura 32: Confronto fra profili di sovrappressione ottenuti da deflagrazioni di Gas naturale e miscela Metano-Idrogeno.

In Figura 32 sono riportati i profili di sovrappressione misurati nel MP10 in seguito a deflagrazioni innescate nel centro della nube per le due diverse miscele. Ciò che si può notare è che la maggiore reattività ha portato a un picco di sovrappressione pari circa al doppio di quello ottenuto dall'innescò del gas naturale. Inoltre, la maggiore reattività velocizza il transitorio diminuendo il tempo che caratterizza la fase positiva dell'impulso.

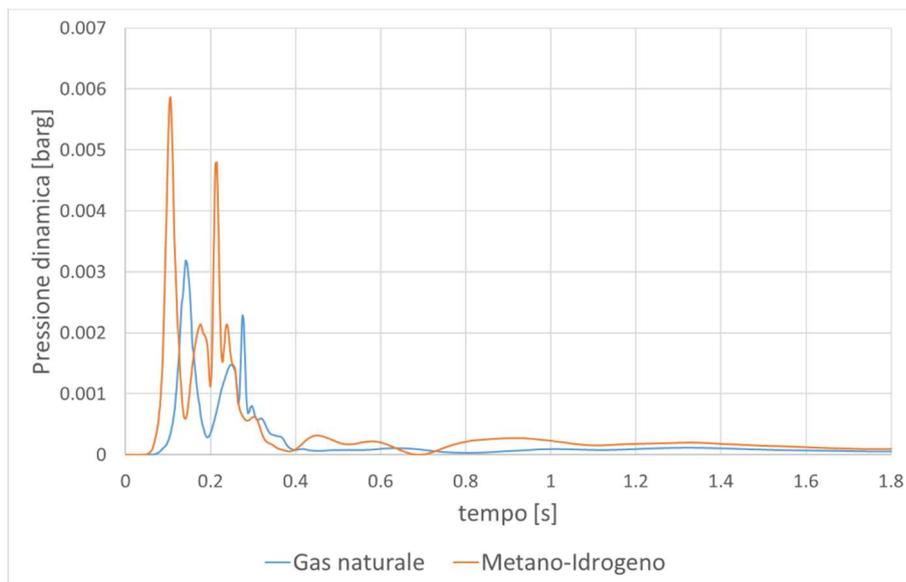


Figura 33: Confronto fra profili di pressione dinamica ottenuti da deflagrazioni di diverse miscele.

Anche il grafico di confronto fra pressioni dinamiche visibile in Figura 33 mostra come il transitorio caratteristico della miscela di Metano – Idrogeno risulta essere più rapido: i picchi di pressione si verificano prima rispetto ai picchi relativi al gas naturale.

La Figura 34 riporta i profili di sovrappressione rilevati dal Monitor Point 10 degli stessi casi commentati nel paragrafo relativo al gas naturale. Confrontandola con la Figura 28, ci si accorge che per ciascun punto di innesco il profilo è molto simile. Le differenze sostanziali risiedono nella maggiore amplificazione dell'onda di pressione. Per una miscela di questo genere, si ottengono sempre dei danni gravi alla struttura dell'unloading arm, anche per i casi meno gravi come quelli relativi ad inneschi disposti ai vertici della nube. Da un punto di vista di danni per l'uomo, le deflagrazioni peggiori caratterizzate da inneschi nel centro della nube o nei centri delle facce 1 e 6, si può avere anche una bassa probabilità di rottura dei timpani [20].

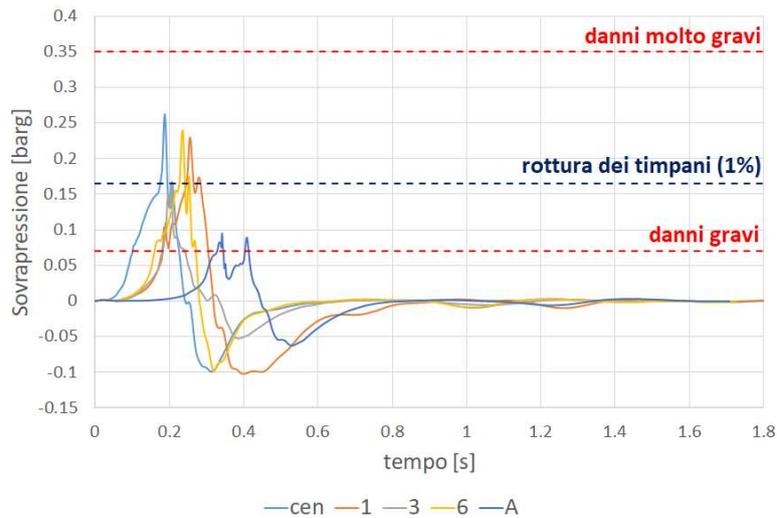


Figura 34: profili di sovrappressione ottenuti da un'esplosione di miscela Metano – Idrogeno in 5 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze dell'unloading arm (MP10).

Anche per quanto riguarda il MP4 i profili di sovrappressione, riportati in Figura 35, risultano analoghi a quelli del gas naturale. Anche in questo caso, la maggiore reattività provoca dei danni superiori: un target posizionato a 85m dal centro della nube come la gangway tower potrebbe subire, nel peggiore dei casi (esplosioni innescate nel centro o nei punti 1 o 6) dei danni moderati, i quali potrebbero portare ad una totale ricostruzione della struttura [20]. Nei casi meno gravi i danni, come per esplosioni innescate ai vertici o nei centri delle altre facce perimetrali, i danni risultano essere lievi. La salute dell'uomo invece non risulta essere compromessa da queste onde d'urto.

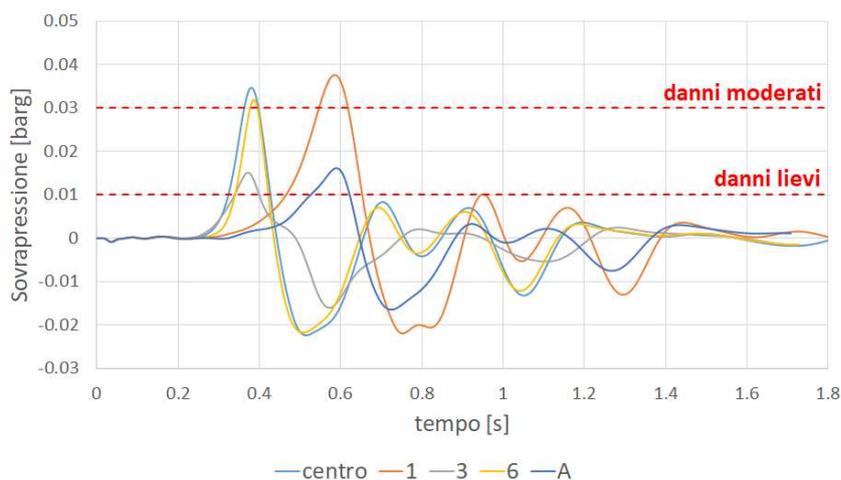


Figura 35: profili di sovrappressione ottenuti da un'esplosione di miscela Metano – Idrogeno in 5 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze della gangway tower (MP4).

Anche per questo tipo di miscela le pressioni dinamiche non aggiungono un contributo determinante alla pressione totale in quanto risultano essere più piccole di un ordine di grandezza rispetto ai valori minori di sovrappressione registrati nei due monitor points. Nel MP4, inoltre, come nel caso del gas naturale, si assiste ad un fenomeno analogo di attenuazione delle differenze fra il picco massimo e minimo di pressione dinamica. I profili di pressione dinamica misurati nelle vicinanze dell'unloading arm e della gangway tower sono visibili rispettivamente in Figura 36 e Figura 37.

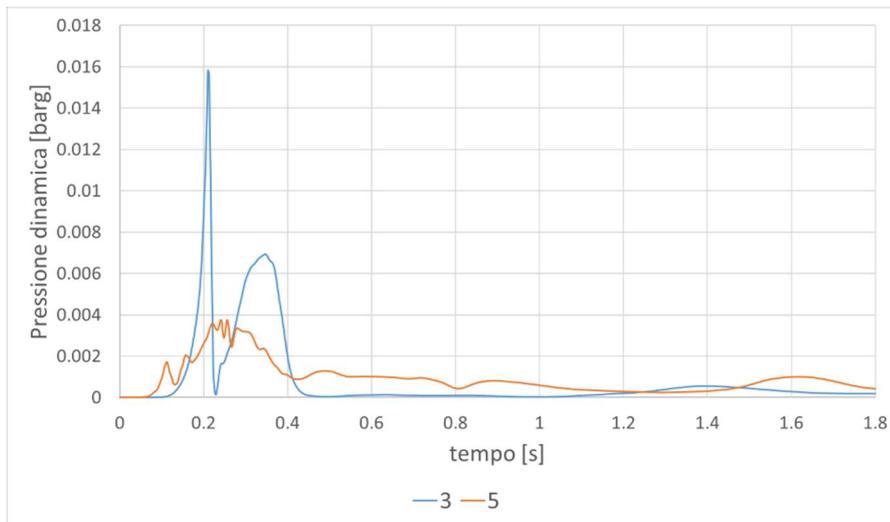


Figura 36: profili di pressione dinamica ottenuti da un'esplosione di miscela Metano – Idrogeno in 2 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze dell'unloading arm (MP10).

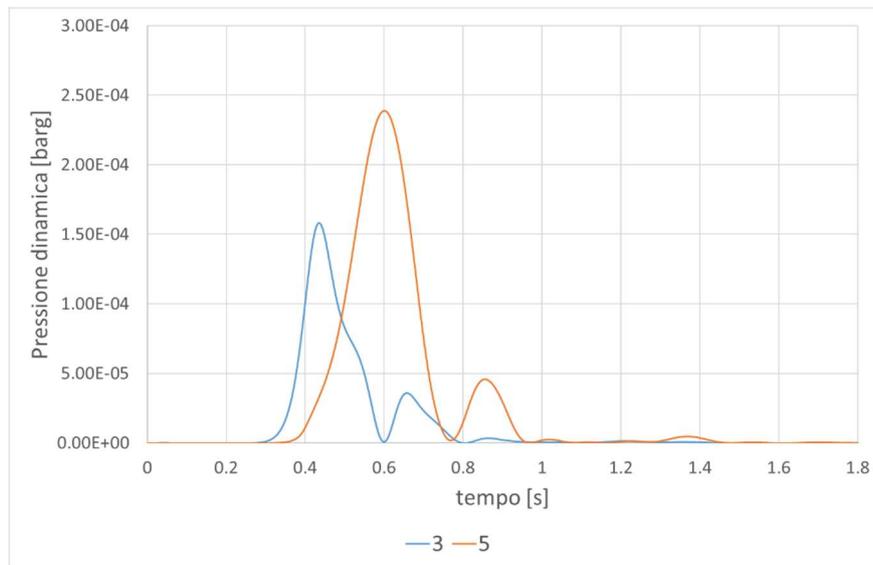


Figura 37: profili di pressione dinamica ottenuti da un'esplosione di Metano - Idrogeno in 2 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze della gangway tower (MP4).

### 6.1.3 ESPLOSIONE DI IDROGENO

A differenza delle miscele precedenti, l'esplosione di una nube di idrogeno ha portato ad una transizione da deflagrazione a detonazione (DDT) nei primi istanti dello scenario. In questi casi, la propagazione del fronte di fiamma avviene a velocità supersoniche e ha provocato delle onde di pressione con dei picchi maggiori dei precedenti anche di due ordini di grandezza. Per quanto molto poco probabile rispetto alle deflagrazioni, questo scenario si può verificare anche in condizioni di confinamento nullo e congestione media [33].

I risultati provenienti dalle analisi di sensibilità sul punto di innesco hanno portato a delle conclusioni opposte rispetto a quelle relative ai fenomeni di deflagrazione. Se nei primi, i risultati peggiori si ottenevano in corrispondenza del centro e in alcuni centri di facce perimetrali, in questo caso sono le esplosioni innescate nei vertici a produrre i risultati peggiori. Ciò è dovuto al fatto che il fronte di fiamma si trova a percorrere delle lunghezze maggiori attraversando più ostacoli nel suo tragitto. La maggior turbolenza generata, unita alla elevata reattività della miscela, rende le esplosioni innescate ai vertici più gravi anche di un ordine di grandezza. Il caso peggiore lo si ha in corrispondenza dell'innesco localizzato nel vertice B in quanto la presenza di un ostacolo nelle immediate vicinanze come il tubo di mandata a valle dell'unloading arm rappresenta un notevole disturbo per il fronte di fiamma che accelera in maniera molto ripida già nelle sue fasi iniziali di propagazione.

Inoltre, gli inneschi localizzati nelle regioni inferiori della nube hanno prodotto delle conseguenze peggiori rispetto a quelli posizionati nelle zone centrali o superiori. Il motivo è legato alla tendenza dell'idrogeno a muoversi verso l'alto, essendo un gas più leggero di quelli presenti in atmosfera. Questa tendenza ascensionale contribuisce positivamente all'accelerazione della fiamma e quindi della reazione di combustione.

In Figura 38 sono riportati i profili di sovrappressione relativi agli inneschi nei punti 2, 5 e B per mostrare le conseguenze precedentemente commentate. Tali profili sono stati

misurati dal MP10, disposto a 5m dal centro della nube e in corrispondenza dell'unloading arm.

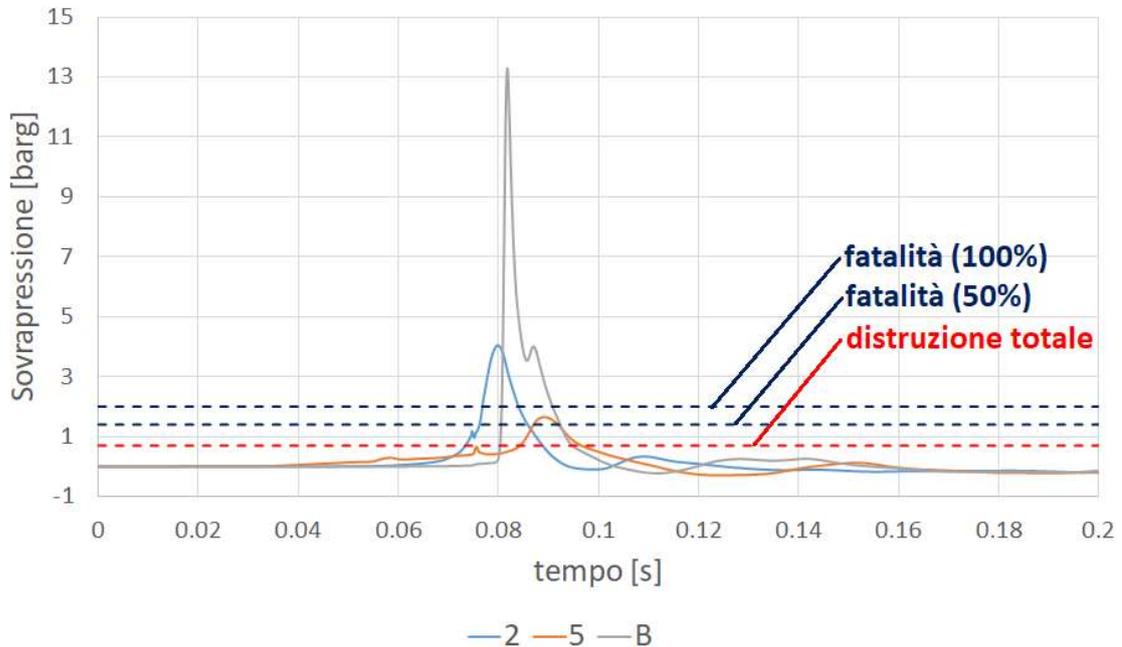


Figura 38: profili di sovrappressione ottenuti da un'esplosione di Idrogeno in 3 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze dell'unloading arm (MP10).

Osservando la Figura 38 si può notare che anche la sovrappressione più bassa ottenuta (relativa all'innesco posizionato nel centro della faccia superiore della nube, il punto 5) può provocare la distruzione totale dell'unloading arm. Guardando invece le soglie di danno relative all'uomo, lo stesso picco potrebbe provocare la morte di un uomo con un 50% di probabilità. I casi peggiori, invece, superano abbondantemente (in particolare il caso di esplosione innescata nel vertice A) la soglia di morte certa. Inoltre, per ragioni visive, è stato ristretto l'intervallo temporale per visualizzare meglio un impulso che, a differenza di quelli visti nelle deflagrazioni, si verifica in un arco inferiore ai 2ms, un ordine di grandezza in meno rispetto all'intervallo caratteristico degli impulsi positivi dovuti alla sola deflagrazione.

Osservando il fenomeno da una distanza superiore, in corrispondenza del MP4, si nota una notevole riduzione dei picchi di pressione e un'attenuazione delle differenze fra loro. I profili di sovrappressione sono riportati in Figura 39.

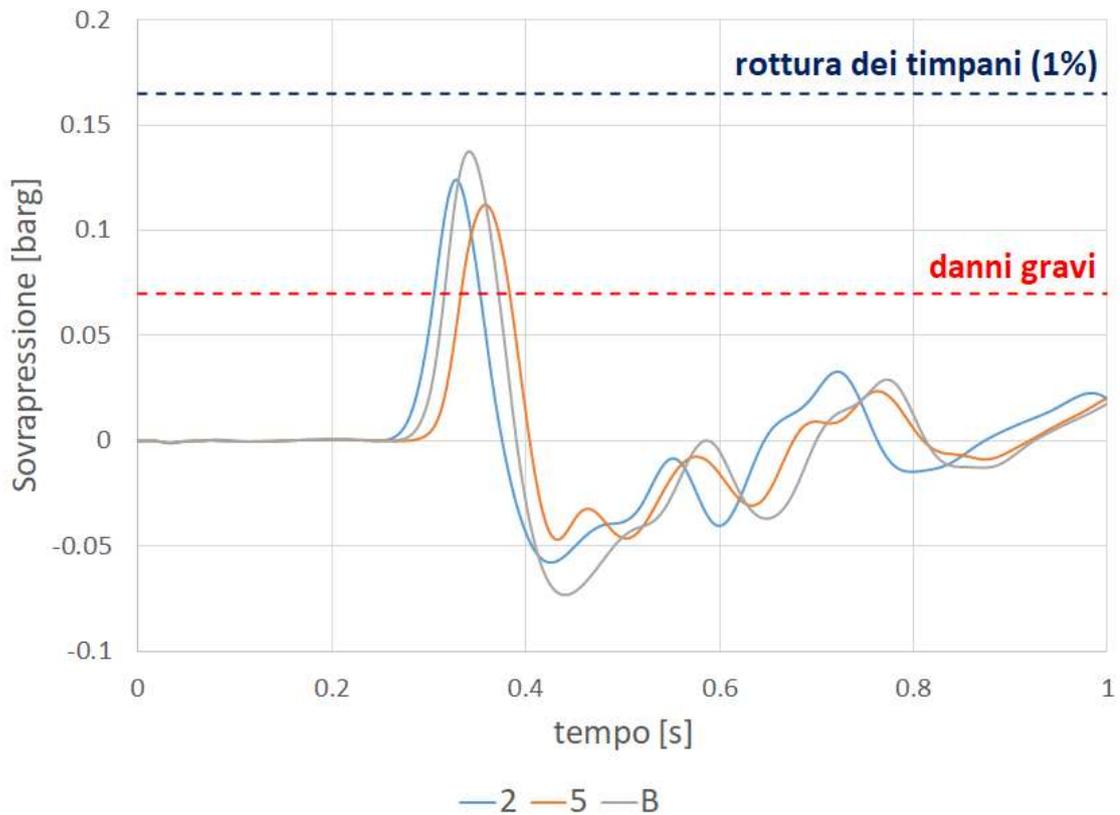


Figura 39: profili di sovrappressione ottenuti da un'esplosione di Idrogeno in 3 diversi punti di innesco misurati nelle vicinanze della gangway tower (MP4).

Con questa detonazione, un target come la gangway tower, posta a 85m dall'origine dell'esplosione, è soggetta a danni gravi che potrebbero portare alla demolizione parziale della struttura e alla conseguente necessità di doverla ricostruire totalmente. Sotto l'aspetto legato ai danni all'uomo invece, i picchi risultano essere insufficienti per un danno moderato come può essere la rottura dei timpani [20].

Per quanto riguarda la pressione dinamica, anche per questo parametro lo scenario peggiore è rappresentato dall'innesco localizzato nel vertice B per via della forte accelerazione iniziale provocata dalla turbolenza che si sviluppa in seguito all'ostacolo rappresentato dalla tubazione. Gli scenari che invece hanno prodotto i risultati minori sono quelli caratterizzati dall'innesco centrale e da tutti quelli disposti nelle vicinanze del MP10. Per l'innesco centrale, il motivo risiede nel minor tragitto compiuto dal fronte di fiamma durante il transitorio. Per gli altri invece, il motivo è legato ad una breve distanza dal monitor point per cui non è stato possibile raggiungere una velocità elevata in

corrispondenza di esso. Anche per le pressioni dinamiche, come per le sovrappressioni, i valori ottenuti da uno scenario di deflagrazione con transizione a detonazione sono diversi ordini di grandezza superiori rispetto ai valori ottenuti dalle deflagrazioni delle miscele precedenti. Osservando ad esempio i valori di pressione dinamica ottenuti da esplosioni con innesco centrale e nel punto B, si nota che anche il solo vento di esplosione è in grado di generare una sovrappressione che può portare alla distruzione totale dell'unloading arm e alla morte certa.

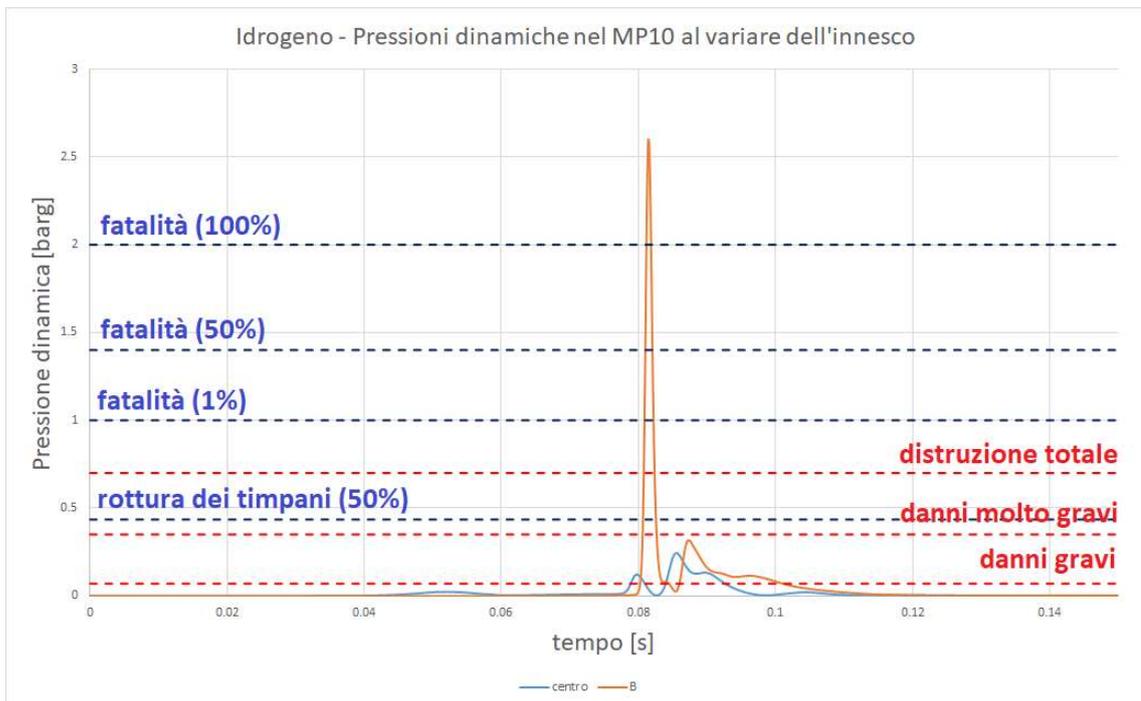


Figura 40: profili di pressione dinamica ottenuti da un'esplosione di Idrogeno in 2 diversi punti di innesco.

## 6.2 ANALISI GLOBALE: AREE DI DANNO

Un'altra possibilità fornita da FLACS-CFD per analizzare i risultati consiste nella rappresentazione in 3D dei valori di pressione massimi registrati durante l'intero transitorio. Attraverso questa tecnica di post-processing, è possibile personalizzare la scala cromatica delle pressioni da plottare per ottenere delle aree di danno conformi ai valori utilizzati nei paragrafi precedenti. Nello specifico, la scala cromatica per rappresentare il danno strutturale è stata realizzata in accordo con la tabella mostrata in Figura 24.

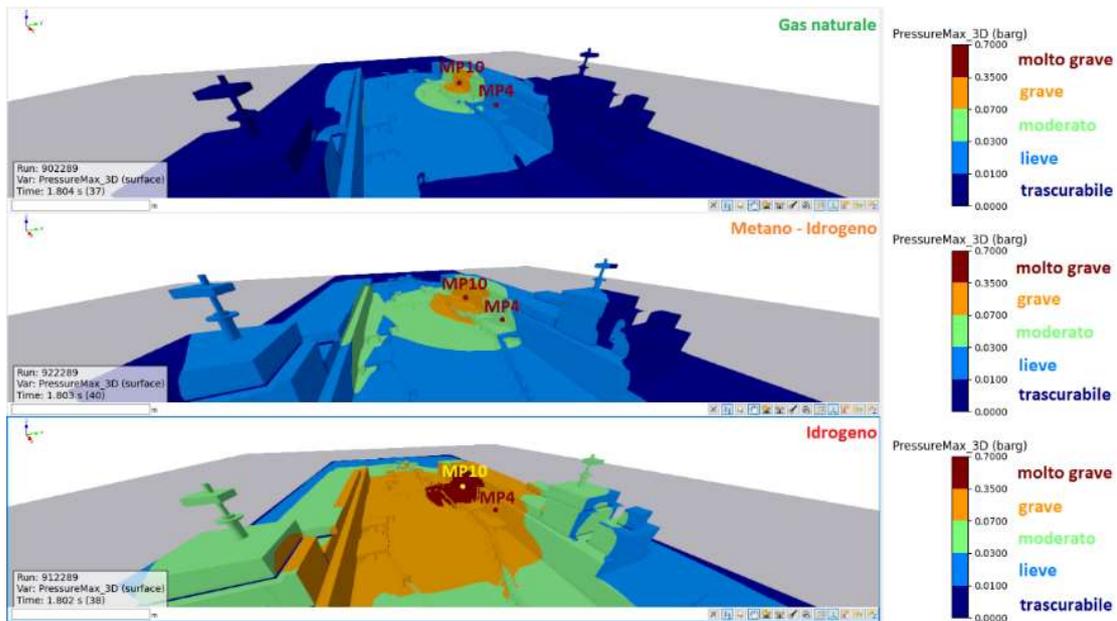


Figura 41: aree di danno alle strutture per esplosioni con innesco centrale di tre miscele di combustibile diverse.

Attraverso la Figura 41 si può apprezzare più chiaramente la differenza delle conseguenze delle tre esplosioni in termini di danno strutturale. Il caso meno pericoloso, ovvero quello del gas naturale, prevede dei danni lievi in buona parte del molo, dei danni moderati in corrispondenza del deck centrale e dei danni gravi solo nelle immediate vicinanze della nube.

Spostandosi sul caso intermedio in cui l'esplosione riguarda una nube di metano-idrogeno, oltre a una maggiore estensione delle aree di danno si assiste anche al fenomeno di riflessione dell'onda d'urto in corrispondenza dell'eventuale seconda rigassificatrice ormeggiata nella parte opposta del molo. L'area di danni moderati ricopre gran parte dei deck mentre quella dei danni gravi è localizzata nei pressi del deck centrale.

Il caso più grave che prevede l'innesco della nube di idrogeno, in cui si assiste a un processo di transizione da deflagrazione a detonazione, prevede invece dei danni molto gravi in corrispondenza del deck centrale che, a causa della forte onda d'urto, subirebbe un collasso quasi totale, mentre dei danni gravi per gran parte del molo.

La scala cromatica è stata personalizzata una seconda volta per analizzare le soglie di danno caratteristiche per la salute umana in accordo con la tabella in Figura 25.

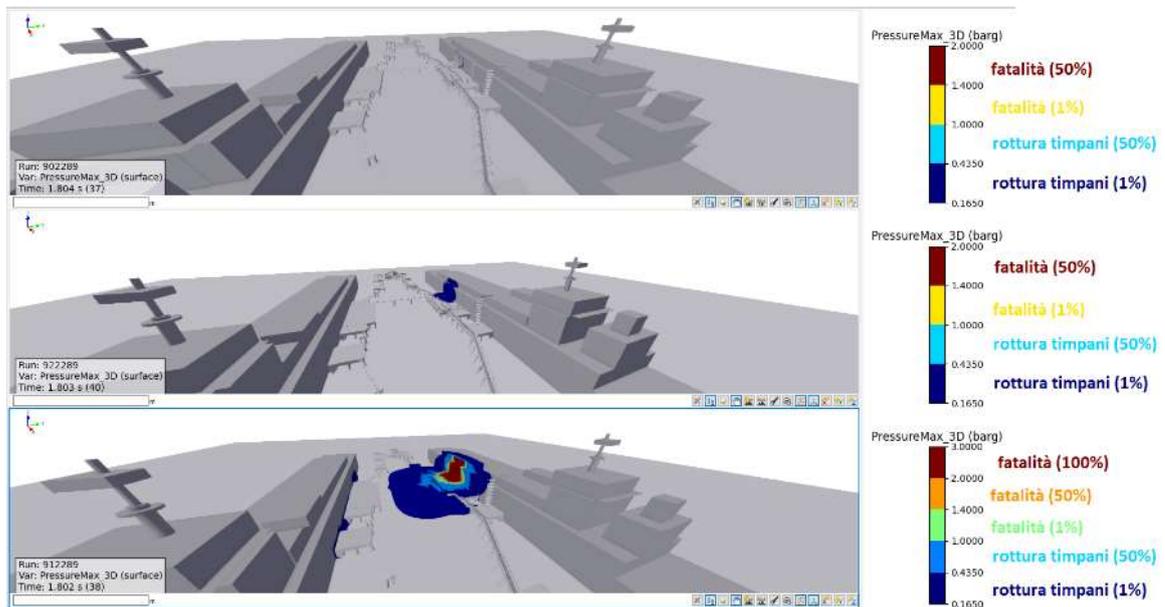


Figura 42: aree di danno alla salute per esplosioni con innesco centrale di tre miscele di combustibile diverse.

Osservando la Figura 42, in linea con quanto detto anche nei paragrafi precedenti sull'analisi di sensibilità, si può vedere come la deflagrazione di gas naturale non provochi danni significativi alla salute, a differenza della deflagrazione della miscela metano-idrogeno che, al più, può provocare danni lievi come la rottura dei timpani solo nella zona in cui si verifica l'esplosione. L'elevata reattività dell'idrogeno, invece, può provocare la morte nelle immediate vicinanze dell'esplosione e danni via via meno gravi in un'area molto più estesa rispetto a quella descritta nel caso della miscela metano-idrogeno.

Grazie a tutte queste considerazioni sulle aree di danno è possibile individuare delle misure di mitigazione del danno di esplosione. Ad esempio, osservando la notevole differenza fra le deflagrazioni delle miscele di gas naturale e metano-idrogeno rispetto alla detonazione d'idrogeno, per quest'ultimo caso, vista la notevole estensione delle aree di danno, è più opportuno progettare impianti caratterizzati da delle distanze di sicurezza superiori rispetto a quelle considerate per impianti che trattano miscele meno reattive come le prime due menzionate precedentemente.

### 6.3 CONFRONTO FRA CFD E MODELLI SEMI-EMPIRICI

Per evidenziare le potenzialità della CFD nel produrre dei risultati che consentono un'analisi di rischio quantitativa più estesa e dettagliata rispetto alle alternative attualmente presenti e largamente utilizzate dagli analisti, questo lavoro di tesi procede con un confronto fra i risultati ottenuti dalla CFD con quelli ottenuti dai modelli semi-empirici. Il primo obiettivo consiste nel verificare che anch'essi, con una modalità del tutto differente, arrivino a dei risultati confrontabili con quelli ottenuti dal software di calcolo. Il secondo obiettivo consiste nel valutare le differenze fra le due procedure e mettere in luce le limitazioni principali dei metodi semi-empirici che vengono superate da questa tecnica innovativa.

Va precisato che il confronto è stato fatto considerando solo le esplosioni delle tre miscele innescate al centro della nube. Per ciascuno dei tre scenari di esplosione, sono stati estrapolati i dati di sovrappressione e pressione dinamica calcolati in corrispondenza di un set cartesiano di 14 MPs disposti a distanze progressivamente crescenti dal punto di innesco. Il set utilizzato per il confronto è visibile in Figura 43.

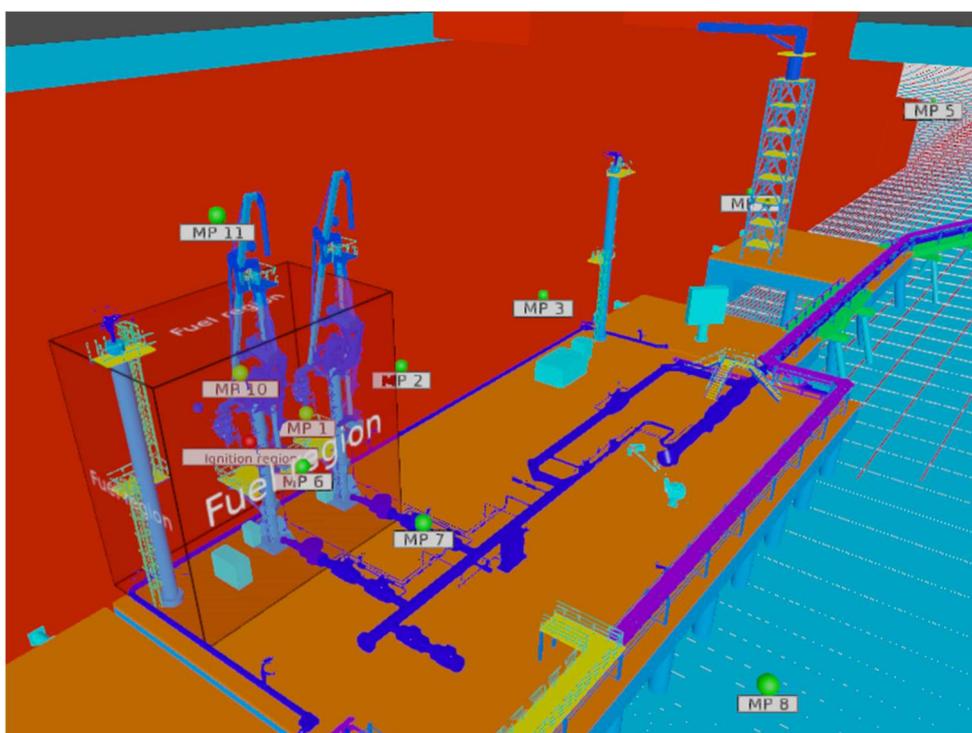


Figura 43: Vista dello scenario per confronto con modelli semi-empirici: nube, innesco e MPs.

### 6.3.1 CONFRONTO CON IL TNO MULTI-ENERGY METHOD

Innanzitutto, è stato operato un confronto con il modello TNO Multi-Energy. Con tale modello, sono stati analizzati i casi di esplosione di tutte e tre le miscele che compongono il caso studio: gas naturale, metano-idrogeno e solo idrogeno. Come caso rappresentativo, in questo paragrafo si riporta il confronto fra i risultati ottenuti, per ciascuna delle tre miscele, a 35m di distanza dal punto di innesco. Il valore di sovrappressione scelto dalle simulazioni CFD per il confronto con i risultati prodotti dal TNO corrisponde al valore massimo ottenuto dai tre MPs disposti a 35m dal centro della nube equivalente.

Per calcolare con il metodo Multi-Energy i valori di sovrappressione e pressione dinamica, sono stati utilizzati il valore di distanza scalata e la coppia di indici di pericolosità caratteristici del fenomeno esplosivo. Il primo è stato ricavato partendo dai dati di distanza effettiva, pressione atmosferica ed energia di combustione della nube calcolata precedentemente con dei calcoli di stechiometria. Per quanto riguarda gli indici di severità, invece, è stata utilizzata la seguente tabella [29] in cui, partendo dalle informazioni legate alle condizioni iniziali e le condizioni al contorno, è stata individuata una possibile gamma di indici di severità relativi al fenomeno da analizzare.

Blast strength category	Ignition energy		Obstruction			Parallel plane confinement	Multi-Energy Unconfined	Class
	Low	High	High	Low	No			
	(L)	(H)	(H)	(L)	(N)			
1		H	H			C		7-10
2		H	H				U	7-10
3	L		H			C		5-7
4		H		L		C		5-7
5		H		L			U	4-6
6		H			N	C		4-6
7	L		H				U	4-5
8		H			N			4-5
9	L			L		C		3-5
10	L			L			U	2-3
11	L				N	C		1-2
12	L				N		U	1

Figura 44: Indici di pericolosità [29].

Per quanto riguarda la miscela di gas naturale, è stata considerata un'energia di innesco bassa poiché nelle simulazioni l'innesco è puntuale e istantaneo (ad esempio,

una scintilla). Il tipo di ostruzione selezionato è “Low” in quanto sono presenti degli elementi che ostacolano la propagazione dell’esplosione come i due unloading arms, la torre di controllo e le tubature visibili poco sopra il pavimento del molo centrale. La scelta “Low” sulle ostruzioni è legata al fatto che gli ostacoli risultano essere pochi e distanziati, inoltre il volume bloccato è inferiore al 30% del volume occupato dalla nube. L’ultima decisione da prendere riguarda il confinamento. Poiché la nube si forma tra il pavimento del molo e la parte laterale dello scafo della rigassificatrice, è stata scelta l’opzione di confinamento. In questo modo, l’esplosione di gas naturale in analisi corrisponde a un indice di severità compreso fra 3 e 5. In Figura 45 viene riportato il grafico su cui è stato condotto il calcolo del range di pressione (in azzurro chiaro) che si ottiene dall’intersezione della distanza scalata con le curve di esplosione relative agli indici di severità 3 e 5. Si può osservare che la sovrappressione minima risulta essere leggermente superiore a 0.03 *barg* mentre la massima risulta essere leggermente inferiore a 0.2 *barg*. In rosso, invece, è stato rappresentato il picco massimo di sovrappressione che FLACS ha registrato in corrispondenza dei MP posizionati a 35m di distanza dall’innesco centrale. Osservando la Figura 45, si può vedere che il risultato proveniente dalla CFD si avvicina molto di più al valore di pressione ottenuto in corrispondenza dell’indice di severità 3 ed è invece parecchio distante dal valore di pressione relativo all’indice di severità 5. Un approccio conservativo applicato al calcolo semi-empirico porterebbe l’analista a considerare una conseguenza più grande di quasi un ordine di grandezza rispetto a quella ottenuta dalla CFD, andando a sovrastimare eccessivamente il danno provocato da una tale deflagrazione.

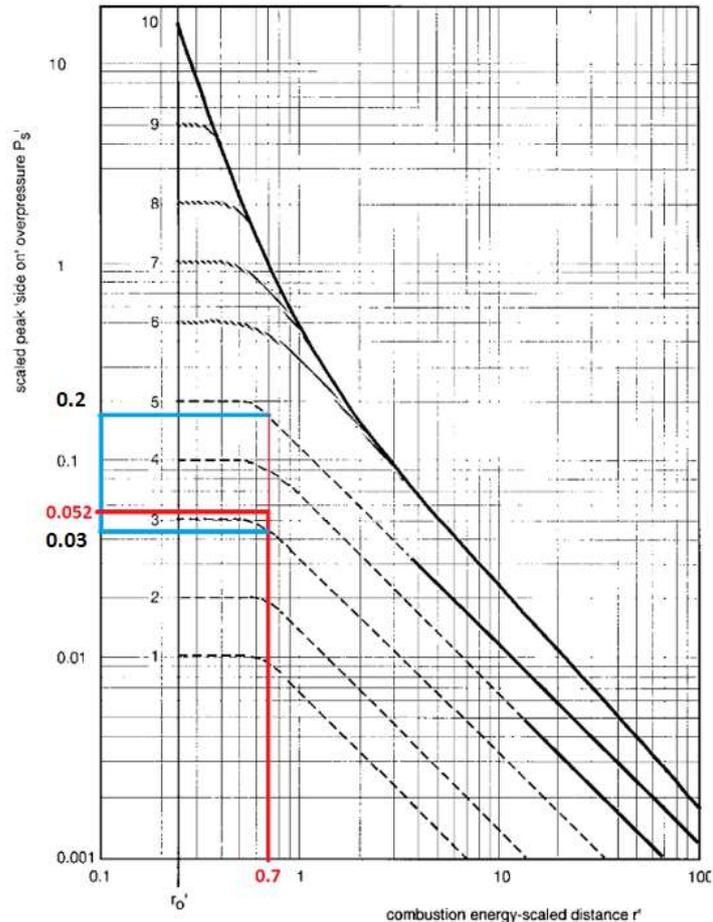


Figura 45: Risultati di sovrappressione per GN (TNO Multi-Energy). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di sovrappressione scalata.

Per le altre due miscele le condizioni iniziali e al contorno sono le stesse; tuttavia, è opportuno fare delle considerazioni sulle diverse reattività. La miscela metano-idrogeno è più reattiva del gas naturale a causa della presenza dell'idrogeno ad una concentrazione non trascurabile (30%). Per questo motivo, a parità di condizioni geometriche, non è possibile assegnare lo stesso range di severità ignorando la diversa reattività. In assenza di indicatori che supportino il processo decisionale sulla base della reattività, in maniera conservativa è stato scelto un indice di severità compreso fra 5 e 7 per la miscela metano-idrogeno. Il solo idrogeno, infine, è una sostanza di gran lunga più reattiva del gas naturale, motivo per cui, in maniera analoga alla precedente, è stato scelto un indice di severità compreso fra 7 e 10 sebbene nel TNO solo l'indice 10 è quello caratteristico per le detonazioni.

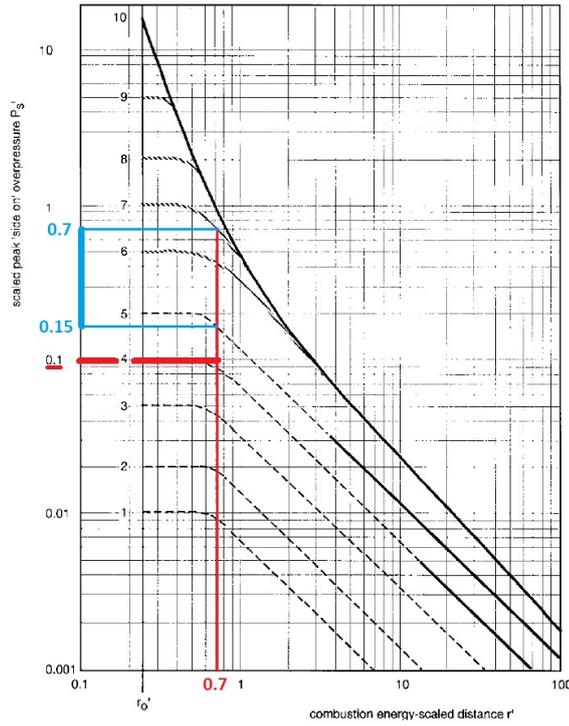


Figura 46: Risultati di sovrappressione per CH4+H2 (TNO Multi-Energy). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di sovrappressione scalata.

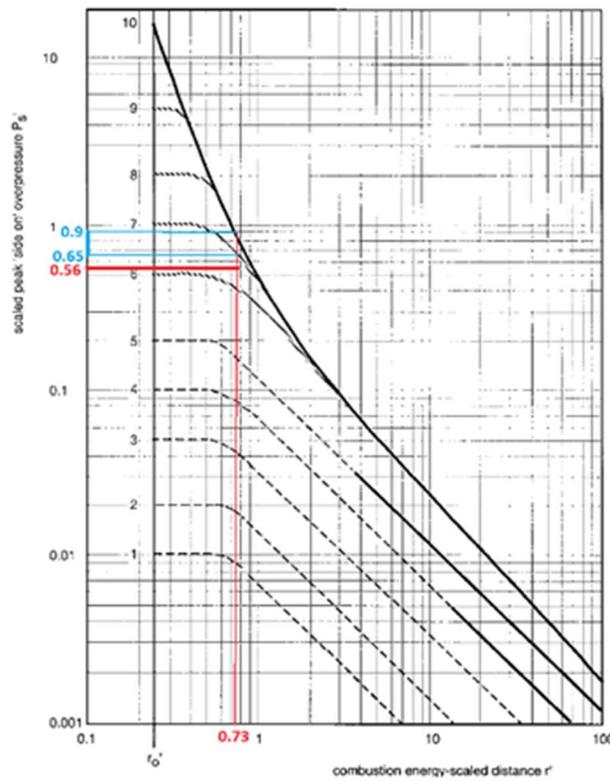


Figura 47: Risultati di sovrappressione per H2 (TNO Multi-Energy). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di sovrappressione scalata.

In Figura 46 si può osservare il range di pressioni ottenuto dal calcolo TNO Multi Energy in azzurro chiaro e il valore ottenuto dalla CFD in rosso. Tali risultati sono relativi alla deflagrazione della miscela metano-idrogeno rilevati a 35m dall'origine dell'esplosione. Per quanto riguarda quest'ultima miscela, il valore ottenuto è leggermente al di sotto della banda individuata dal modello empirico. Evidentemente la considerazione fatta sulla reattività può esser stata troppo conservativa.

In Figura 47 viene riportato il caso analogo riguardante l'idrogeno. Anche in questo grafico si vede il valore ottenuto dalla CFD al di sotto della banda individuata dal modello empirico in corrispondenza degli indici di severità 7 – 10. Anche in questo caso la valutazione degli indici di severità è stata molto conservativa. Tuttavia, in questo scenario, si verifica anche il fenomeno di transizione a detonazione per cui l'indice di severità da considerare è il massimo valore possibile, quindi 10, che riporta dei valori di pressione ancora più lontani rispetto a quelli ottenuti dalla CFD.

All'interno del TNO Multi-Energy Method è possibile condurre anche delle valutazioni sulla pressione dinamica in maniera del tutto analoga alla precedente. Partendo dalle medesime valutazioni su distanza scalata e indici di severità, sono stati ottenuti i seguenti risultati visibili in Figura 48 per quanto riguarda l'esplosione della nube di gas naturale. I risultati relativi alle miscele metano-idrogeno e solo idrogeno sono invece visibili rispettivamente in Figura 49 e Figura 50. Per ciascuno dei tre casi si può vedere come FLACS-CFD ottenga dei risultati sempre al di sotto di quelli ricavati dal TNO. La distanza maggiore la si registra nel caso in cui la miscela esplosiva è costituita da metano e idrogeno. Questa constatazione avvalorata l'ipotesi che, nel suddetto caso, la valutazione sugli indici di severità può essere stata fin troppo conservativa.

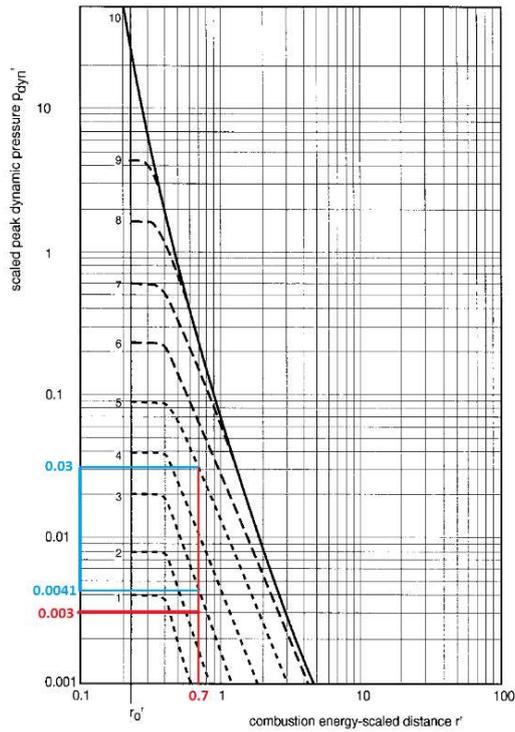


Figura 48: Risultati di pressione dinamica per GN (TNO Multi-Energy). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di pressione dinamica scalata.

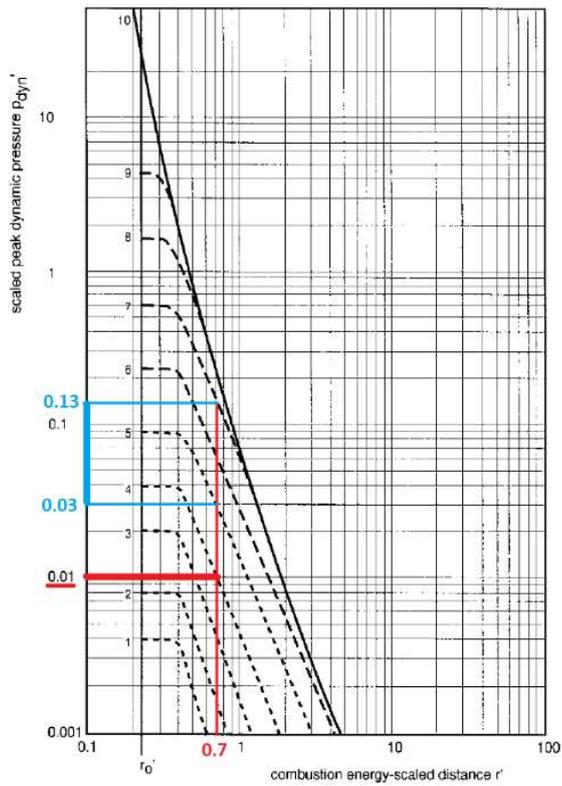


Figura 49: Risultati di pressione dinamica per H<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> (TNO Multi-Energy). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di pressione dinamica scalata.

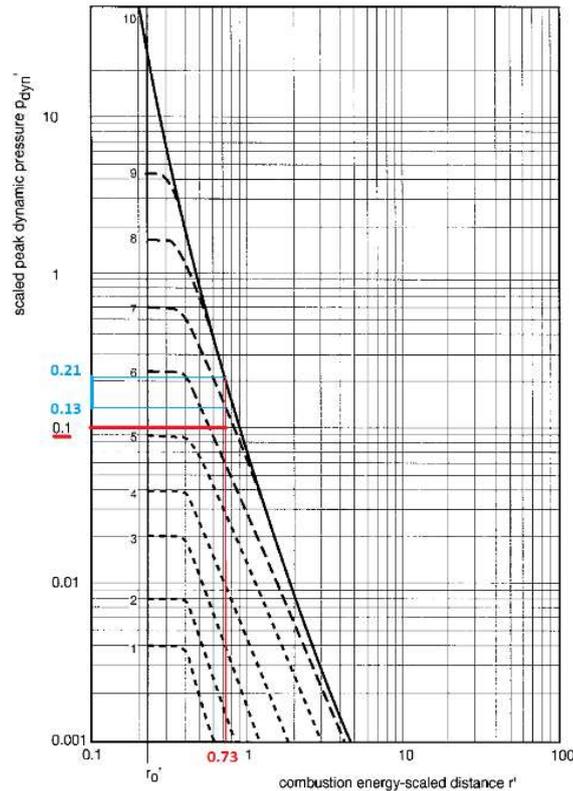


Figura 50: Risultati di pressione dinamica per H2 (TNO Multi-Energy). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di pressione dinamica scalata.

Si può concludere che le stime di sovrappressione elaborate dal software CFD risultano essere in ciascuno dei tre casi meno conservative di quelle provenienti dall'utilizzo di tale modello. Inoltre, l'applicazione di questo metodo potrebbe essere affetta da errori di valutazione come quelli sugli indici di severità. Perciò, se utilizzati come alternativa alla CFD, è più probabile ottenere dei risultati più distanti da quelli che potrebbero verificarsi realmente. Per quanto riguarda la pressione dinamica, come detto precedentemente, i risultati ottenuti dal TNO Multi Energy sono sempre maggiori rispetto al valore ottenuto da FLACS-CFD. Si può quindi affermare che, con questo modello empirico, il rischio di sovrastimare gli effetti di un'esplosione è parecchio elevato e ciò potrebbe indurre degli interventi poco efficienti da un punto di vista economico ai fini di prevenire e/o mitigare il danno.

### 6.3.2 CONFRONTO CON IL METODO BST

Il secondo modello semi-empirico più utilizzato per il calcolo delle conseguenze è il metodo BST. Con quest'ultimo è possibile calcolare gli effetti dell'esplosione di una miscela di combustibile partendo dalla distanza scalata che viene ricavata nello stesso modo in cui viene ricavata nel TNO Multi-Energy. A differenza degli indici di severità, il BST distingue le esplosioni in funzione del parametro  $M_f$  che indica la velocità apparente della fiamma [33]. Quest'ultimo parametro è stato ricavato dalla tabella presentata in Figura 51 in cui i parametri decisionali vertono sulla tipologia di confinamento, reattività e congestione.

Confinement	Reactivity	Congestion		
		Low	Medium	High
2-D	<b>High</b>	0.59	DDT	DDT
	<b>Medium</b>	<b>0.47</b>	0.66	<b>1.6</b>
	<b>Low</b>	0.079	0.47	0.66
2.5-D	<b>High</b>	<b>0.47</b>	<b>DDT</b>	<b>DDT</b>
	<b>Medium</b>	<b>0.29</b>	<b>0.55</b>	<b>1.0</b>
	<b>Low</b>	0.053	<b>0.35</b>	<b>0.50</b>
3-D	<b>High</b>	<b>0.36</b>	<b>DDT</b>	<b>DDT</b>
	<b>Medium</b>	<b>0.11</b>	<b>0.44</b>	<b>0.50</b>
	<b>Low</b>	0.026	<b>0.23</b>	<b>0.34</b>

Figura 51: Tabella di velocità di fiamma [2].

Per tutte e tre le miscele è stato scelto un confinamento "2.5D" in quanto l'esplosione si propaga nelle tre dimensioni ma è confinata da due superfici piane quali il pavimento del molo e la parte laterale dello scafo della nave rigassificatrice. I valori per questa tipologia di confinamento vengono estrapolati dalla media dei valori relativi ai confinamenti 2D e 3D [33]. Per ciascuna delle tre miscele, invece, è stata scelta una reattività diversa. La miscela di gas naturale è notoriamente poco reattiva, essendo prevalentemente composta da gas metano che è caratterizzato da delle basse velocità di propagazione del fronte di fiamma. Al contrario, la nube composta da idrogeno e aria in condizioni stechiometriche è molto reattiva per via delle elevate velocità di fiamma raggiunte dall'idrogeno con la possibilità di incorrere nel fenomeno di transizione da deflagrazione a detonazione [33]. Per quanto riguarda invece la miscela di combustibile metano-idrogeno, è stata scelta una reattività media sebbene in un esperimento di esplosione realizzato con una miscela di metano al 60% e idrogeno al 40% si era giunti

alla conclusione che tale miscela fosse caratterizzata da un'alta reattività [33]. Nel caso della miscela analizzata in questo lavoro di tesi, la composizione è leggermente diversa in quanto il metano è presente al 70% mentre l'idrogeno al 30%. Inoltre, nelle simulazioni su FLACS-CFD tale miscela non ha portato alla DDT, fenomeno che si avrebbe secondo tale metodo nel caso di esplosioni di miscele molto reattive in "2.5D" e con un congestionamento medio. Per questo motivo, tale miscela è stata analizzata considerando una media reattività.

Tutte queste considerazioni hanno portato alla scelta di un  $M_f$  pari a:

- 0.35 per la miscela di gas naturale;
- 0.55 per la miscela metano-idrogeno;
- 5.2 per nube con solo idrogeno (valore corrispondente al fenomeno di DDT).

Nelle curve del BST non compare quella caratterizzata da un valore pari a 0.55. La valutazione degli effetti di esplosione della miscela metano-idrogeno è stata quindi condotta utilizzando la curva corrispondente a un  $M_f$  pari a 0.7 per non ricadere sulla stessa curva utilizzata per la miscela di gas naturale e per mantenere un approccio conservativo.

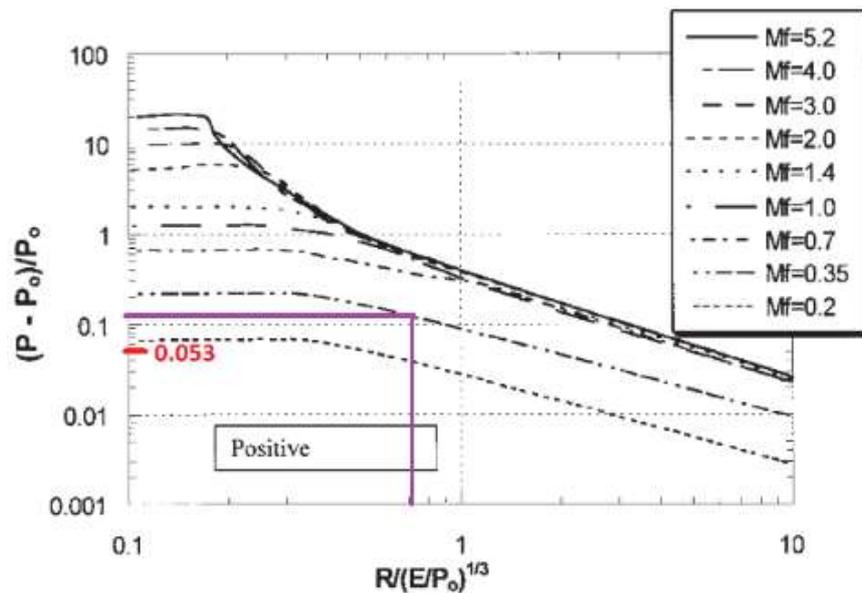


Figura 52: Risultati di sovrappressione per GN (BST). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di sovrappressione scalata.

La Figura 52 mostra il risultato di sovrappressione misurato a 35m dall'origine dell'esplosione per una deflagrazione di gas naturale. In rosso è stato riportato il risultato ottenuto dalla CFD mentre in viola quello ottenuto dal BST. Osservando il grafico, si può affermare che il valore proveniente dal suddetto metodo è circa il doppio rispetto a quello proveniente dalla CFD.

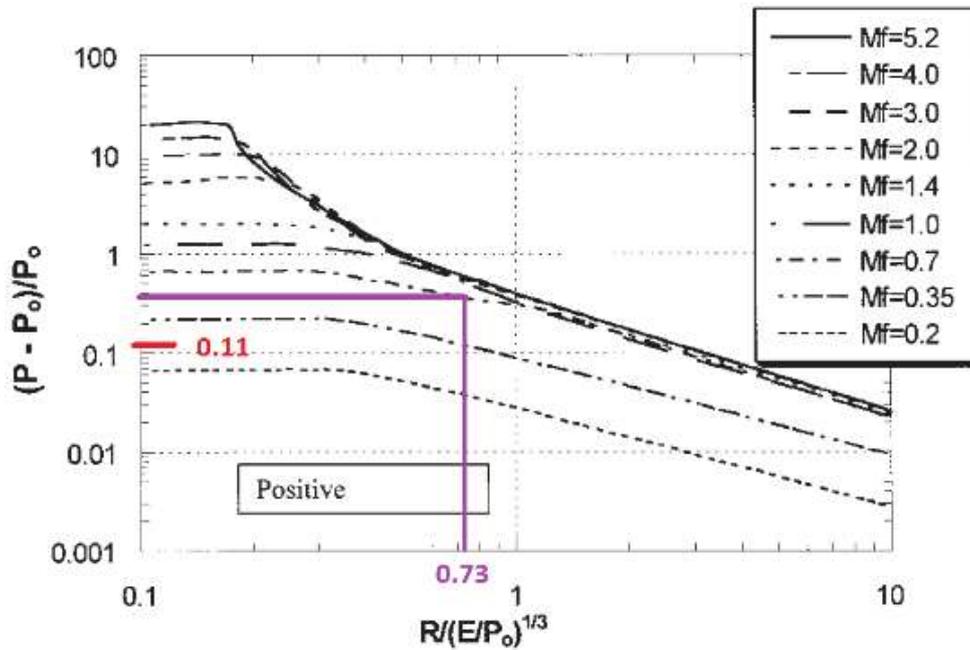


Figura 53: Risultati di sovrappressione per H2+CH4 (BST). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di sovrappressione scalata.

In Figura 53, invece, viene mostrato il confronto fra il BST e la CFD per la deflagrazione della miscela metano-idrogeno. Anche qui i risultati sono relativi ad una distanza di 35m dall'origine dell'esplosione. In assenza di una curva relativa ad un  $M_f$  pari a 0,55, è stata scelta la curva successiva che corrisponde a un valore  $M_f$  pari a 0,7. In questo caso, il BST ha prodotto un valore di pressione circa tre volte superiore a quello ottenuto dalla CFD. Osservando il grafico, si può notare come il risultato proveniente da FLACS-CFD sia più vicino a quello che si otterrebbe con la curva immediatamente inferiore a quella utilizzata, ovvero quella associata a un  $M_f$  pari a 0,35.

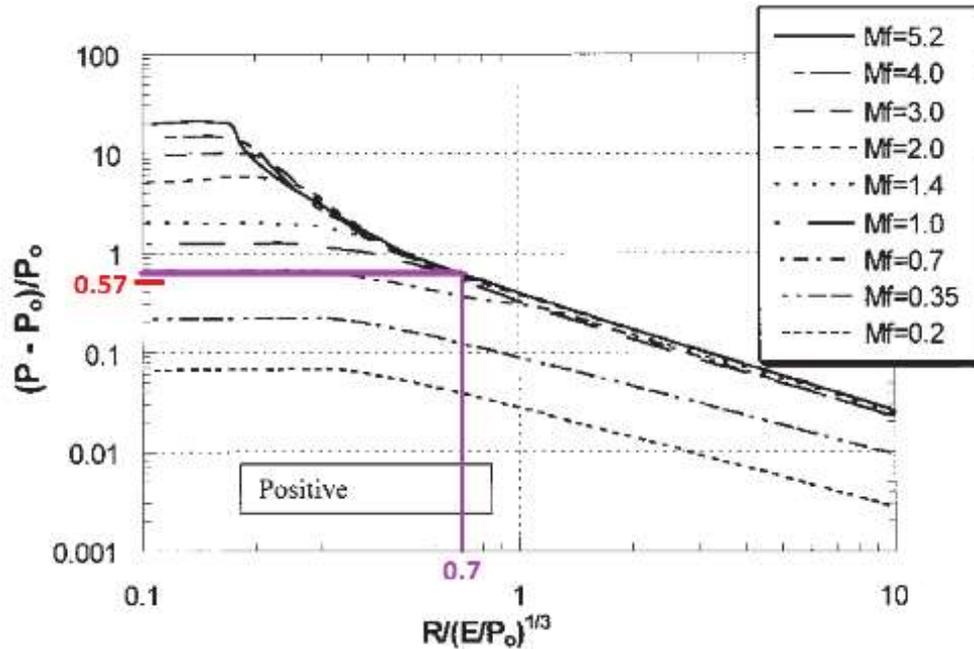


Figura 54: Risultati di sovrappressione per H2 (BST). In ascissa i valori di distanza scalata, in ordinata i valori di sovrappressione scalata.

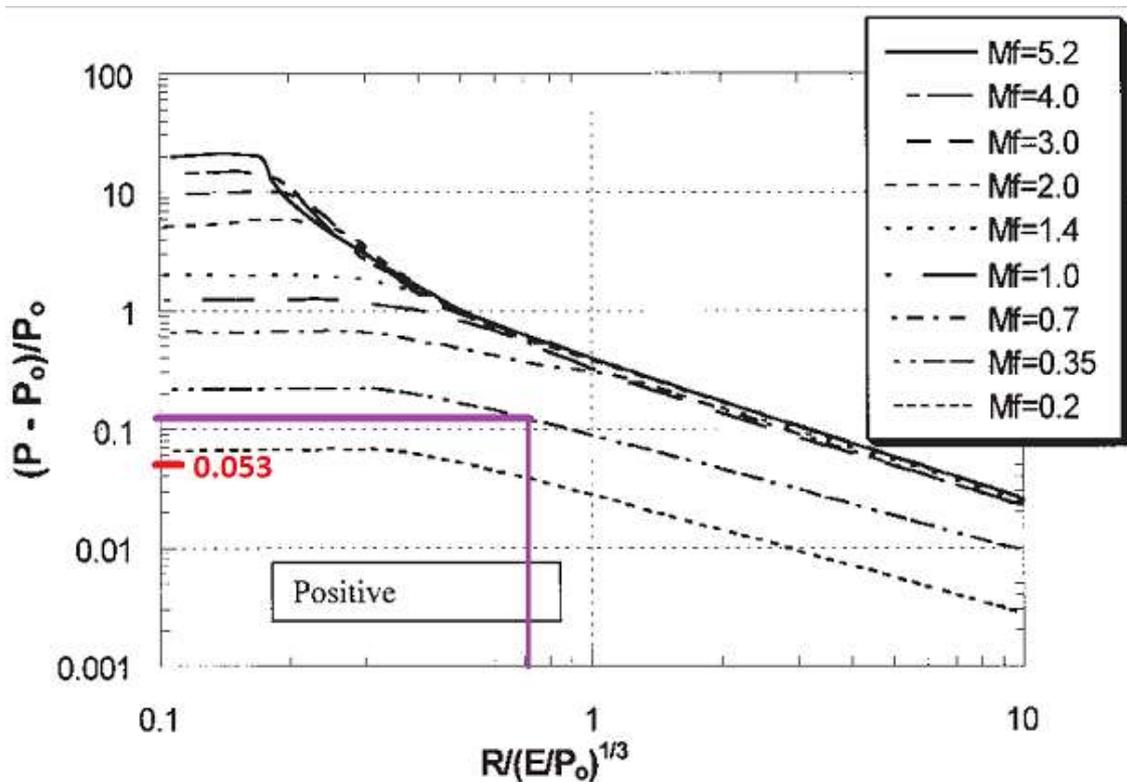
Infine, la Figura 54 mostra il confronto relativo alla detonazione della nube di idrogeno. A differenza dei due casi precedenti, i risultati ottenuti da FLACS-CFD e dal BST sono molto vicini fra di loro. Anche il BST, come il TNO visto in precedenza, tende a produrre dei risultati sempre più conservativi rispetto a quelli ottenuti dalla CFD.

#### 6.4 CONSIDERAZIONI SUI DUE CONFRONTI PRECEDENTI E SU PHAST

Nei paragrafi precedenti sono stati confrontati i risultati ottenuti da FLACS-CFD con quelli ottenuti dai due modelli semi-empirici più utilizzati per predire le conseguenze delle esplosioni. Il confronto è stato condotto per analizzare le analogie e differenze che fra questi modelli e la tecnica della CFD. A valle dello studio grafico, si è passati all'utilizzo del TNO e del BST implementati all'interno del software PHAST.

Quest'ultimo, a differenza del metodo grafico, produce dei risultati più leggibili in quanto risolve numericamente le curve di esplosione restituendo direttamente il valore di sovrappressione come output. Per il metodo grafico invece, che prevede la lettura delle curve logaritmiche, è molto più difficile ottenere lo stesso livello di chiarezza. Su PHAST i risultati si possono raccogliere in forma tabellare in funzione della distanza dall'origine

dell'esplosione, impostando i valori estremi dell'intervallo e l'incremento relativo agli step spaziali. Per una visione globale del confronto, si osservi la seguente Figura 55.



Distanza [m]	Sovrapressione [barg]	
	PHAST	FLACS-CFD
5	0,22	0,14
15	0,22	0,13
35	0,12	0,05
85	0,05	0,02

Figura 55: Confronto tra risultati ottenuti con metodo grafico, PHAST e FLACS-CFD.

Nella Figura 55 sono stati riportati i calcoli per la sovrappressione misurata a 35m dal centro della nube utilizzando il metodo BST nel caso in cui la miscela esplosiva fosse composta da gas naturale, già presentati in Figura 52. Oltre ad essi, la tabella sottostante riporta, per quattro distanze dal centro dell'esplosione, i valori di sovrappressione ottenuti da PHAST e quelli ottenuti da FLACS CFD. Come si può osservare sul grafico, una volta individuata la distanza adimensionale sull'asse delle ascisse, si ottiene un valore di sovrappressione superiore a 0,1 barg. Tale risultato è in linea con quello proveniente da

PHAST che, a differenza della prima modalità, è in grado di fornire un valore numerico con maggior accuratezza e tempestività perché lo fa contemporaneamente per ogni valore di distanza su cui si desidera indagare (i risultati ottenuti sono presenti all'interno dell'apposita Appendice C: Risultati delle simulazioni su PHAST). Per questo motivo, PHAST risulta essere uno degli strumenti più efficaci per l'applicazione dei modelli semi-empirici, superando il tradizionale approccio grafico. Tuttavia, va sottolineato che tali modelli si basano su equazioni numeriche monodimensionali e assumono una propagazione dell'esplosione simmetrica, tipicamente sferica o emisferica. Questo tipo di assunzione semplificata limita fortemente la capacità di rappresentare effetti direzionali, la presenza di elementi geometricamente complessi, come ostacoli, confinamenti irregolari o congestioni, e soprattutto non consente una valutazione realistica dell'influenza della posizione del punto d'innesco, che viene considerato idealmente al centro della nube. Tali condizioni rendono il modello distante dalla complessità degli scenari reali [33].

Osservando la tabella in Figura 55, emerge chiaramente come i modelli semi-empirici restituiscano risultati tendenzialmente più conservativi rispetto a quelli ottenuti con l'approccio CFD. Questo accade perché i modelli semi-empirici non riescono a cogliere le dinamiche locali del fenomeno e tendono a sovrastimare l'entità delle conseguenze per garantire ampi margini di sicurezza. L'approccio CFD, al contrario, integra in maniera esplicita la geometria reale dell'impianto, consente una descrizione tridimensionale dettagliata della nube e della sua interazione con l'ambiente circostante, e risolve localmente le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia su una griglia di volumi finiti. Questo consente non solo di ottenere risultati meno conservativi, ma soprattutto di riprodurre scenari molto più aderenti alla realtà, anche in condizioni in cui l'innesco non avvenga nel centro della nube o in presenza di forti asimmetrie geometriche.

In conclusione, i modelli semi-empirici restano strumenti utili per analisi preliminari, rapide e applicabili quando non si dispone di dettagli progettuali o di una geometria precisa dell'impianto. In questi contesti, rappresentano una base per una prima stima

delle conseguenze potenziali. Tuttavia, nel momento in cui l'analisi si sposta su uno scenario più definito e complesso, l'impiego della CFD si rivela più strategico e funzionale. Sebbene richieda un numero maggiore di dati di input, oltre a costi e tempi computazionali superiori, consente una valutazione più realistica e puntuale del rischio, con evidenti vantaggi in termini di pianificazione di misure di prevenzione e mitigazione più calibrate, evitando sovrastime che potrebbero portare a soluzioni eccessivamente onerose o non necessarie.

## **7 CONCLUSIONI**

L'obiettivo di questo studio è stato quello di valutare l'efficacia della fluidodinamica computazionale (CFD) nell'ambito delle analisi quantitative di rischio associate a scenari esplosivi utilizzando il software commerciale FLACS-CFD. L'indagine è partita da un caso studio realistico che prevede la deflagrazione di una nube esplosiva di gas naturale, originatasi a seguito di una dispersione accidentale. Lo scenario è stato contestualizzato all'interno di una geometria dettagliata e rappresentativa di un impianto di rigassificazione offshore soggetto a rischio di incidente rilevante.

Per riprodurre un insieme più ampio e realistico di scenari, il punto di innesco non è stato considerato solo nella posizione centrale della nube, ma è stato fatto variare lungo i vertici e i centri delle facce perimetrali della stessa. Questo ha consentito di valutare la sensibilità delle conseguenze esplosive alla posizione dell'innesco, mostrando come le condizioni locali influiscano significativamente sull'intensità e sulla propagazione dell'onda d'urto generata.

L'analisi è stata ulteriormente estesa ad altre due miscele: una miscela metano-idrogeno (70%-30%), coerente con gli scenari energetici di transizione, e una miscela stechiometrica idrogeno-aria, rappresentativa di un possibile scenario futuro incentrato sull'utilizzo dell'idrogeno come vettore energetico. Anche per queste due miscele è stato condotto uno studio sistematico variando la posizione del punto di innesco, al fine di confrontare l'intensità delle esplosioni in relazione alla loro reattività chimica. Le simulazioni hanno evidenziato che al crescere della reattività, l'energia rilasciata dall'esplosione e le sovrappressioni generate aumentano sensibilmente, fino a includere fenomeni complessi come la transizione da deflagrazione a detonazione (DDT) nel caso della nube di idrogeno.

Uno degli aspetti più significativi emersi dall'utilizzo della CFD riguarda la possibilità di condurre valutazioni mirate su specifici elementi all'interno della geometria impiantistica, come ad esempio bracci di carico (unloading arms) o torri di collegamento (gangway tower). Grazie alla disponibilità di soglie di danno associate a intervalli di

sovrapressione, è stato possibile stimare il livello di danneggiamento strutturale e relativo all'essere umano indotto dalle onde d'urto sui singoli target. In aggiunta, è stata condotta un'analisi spaziale sull'intera geometria dell'impianto per mappare le cosiddette aree di danno, distinguendo zone soggette a danni trascurabili da quelle in cui si potrebbe verificare una demolizione completa o effetti letali sulla salute del personale.

Questa capacità di analisi localizzata e tridimensionale rappresenta un chiaro punto di forza della CFD rispetto ai modelli più semplificati, consentendo non solo di individuare le zone a maggior rischio, ma anche di ottimizzare le strategie di prevenzione e mitigazione, focalizzandole sulle aree critiche. Inoltre, la possibilità di inserire una grande quantità di dati di input (geometria dettagliata, condizioni atmosferiche, caratteristiche della miscela) permette di estendere notevolmente lo spettro degli scenari riproducibili, avvicinando l'analisi a contesti operativi reali.

Sulla base delle simulazioni condotte, si può concludere che una nube di gas naturale di circa  $3000\text{ m}^3$  è in grado di generare danni strutturali gravi soltanto nelle immediate vicinanze del punto di rilascio (in particolare lungo il molo centrale). Tuttavia, i picchi di sovrapressione ottenuti risultano non sufficienti a causare danni letali alla salute del personale, neppure nelle zone prossime all'esplosione. Di contro, le due miscele alternative hanno mostrato conseguenze sensibilmente più severe, richiedendo distanze di sicurezza maggiori e suggerendo la necessità di riconsiderare le attuali strategie di mitigazione del rischio in vista di un loro possibile impiego su scala industriale.

La CFD si è dimostrata, dunque, uno strumento disponibile e tecnicamente maturo per supportare l'analisi quantitativa del rischio, grazie alla sua capacità di risolvere localmente le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia in geometrie complesse.

Oltre alle sovrapressioni, è possibile estendere l'analisi a grandezze che caratterizzano meglio la natura multi-fisica del fenomeno esplosivo, come:

- l'impulso dell'onda d'urto, utile per valutare sollecitazioni a fatica e vibrazioni strutturali analizzando la frequenza di risonanza dei target attenzionati;
- l'evoluzione della nube esplosiva e della nube di prodotti di combustione, con possibili implicazioni in termini di esposizione a gas tossici e rischio di asfissia;
- la propagazione del flusso termico, per stimare danni alla salute quali ustioni o danni ad apparecchiature elettroniche.

Grazie al continuo sviluppo tecnologico e all'aumento della potenza di calcolo, sarà possibile in futuro migliorare ulteriormente le capacità predittive della CFD, perfezionando la costruzione delle griglie di calcolo e migliorando la convergenza numerica dei risultati, soprattutto in condizioni altamente transitorie, riducendo l'incertezza nelle valutazioni di danno. Un ulteriore progresso potrebbe derivare dall'integrazione con algoritmi in grado di simulare la risposta dinamica delle strutture investite dall'esplosione, aumentando il realismo delle simulazioni.

Infine, il lavoro ha incluso un confronto tra l'approccio CFD e quello basato su modelli semi-empirici, utilizzati sia con un metodo grafico sia attraverso l'utilizzo del software PHAST. Questi ultimi, pur risultando più conservativi, richiedono un set di dati di input molto più limitato, assumono simmetrie ideali e non richiedono una geometria dettagliata per l'elaborazione dei risultati. Pertanto, si rivelano utili nelle fasi iniziali di progettazione o in assenza di informazioni dettagliate. Tuttavia, per fasi progettuali avanzate o per analisi in contesti complessi e realistici, la CFD si impone come lo strumento più completo, in grado di fornire valutazioni di rischio più affidabili, dettagliate e funzionali alla progettazione di misure proporzionate, evitando sia sottostime che sovrastime delle conseguenze esplosive.

## Bibliografia

- [1] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed. Harlow: PEARSON Education, 2007.
- [2] T. Pierorazio, K. Baker, and K. Ketchum, "An update to the Baker-Strehlow-Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table," *Process Safety Progress*, vol. **24**, pp. 1–8, 2005, doi: 10.1002/prs.10048.
- [3] Gexcon AS, *FLACS-CFD v24.1 User's Manual*, 2024.
- [4] NORSOK STANDARD, *Risk and emergency preparedness assessment*, 3rd ed., Standard Z-013, 2010.
- [5] J. Stewart and S. Gant, "A review of the Q9 equivalent cloud method for explosion modelling," *Health and Safety Executive (HSE)*, Buxton, UK, 2019.
- [6] Hansen, O.R., Gavelli, F., Davis, S.G., Middha, P. (2013), Equivalent cloud methods used for explosion risk and consequence studies, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, 511-527.
- [7] Tam, V.H.Y., Wang, M., Savvides, C.N., Tunc, E., Ferraris, S. and Wen, J.X. (2008), Simplified flammable gas volume methods for gas explosion modelling from pressurized gas releases: A comparison with large scale experimental data, *ICHEME Hazards XX, Symposium Series 154*.
- [8] D. Bjerketvedt, J. R. Bakke, and K. Van Wingerden, "Gas explosion handbook," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 52, pp. 1–150, 1997.
- [9] "Temperatura di autoignizione," *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, Oct. 6, 2023. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Temperatura\\_di\\_autoignizione](https://it.wikipedia.org/wiki/Temperatura_di_autoignizione). Accessed: Mar. 10, 2025.
- [10] "Hydrogen pipelines," *U.S. Department of Energy*, [Online]. Available: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>. Accessed: Mar. 10, 2025.
- [11] Giddens, Anthony. "Risk and Responsibility." *The Modern Law Review*, vol. 62, no. 1, 1999, pp. 1–10. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/1097071>. Accessed 11 Mar. 2025.
- [12] "Disastro di Seveso," *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, Feb. 6, 2025. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Disastro\\_di\\_Seveso](https://it.wikipedia.org/wiki/Disastro_di_Seveso). Accessed: Mar. 12, 2025.
- [13] "Direttiva Seveso," *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, Dec. 8, 2024. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Direttiva\\_Seveso](https://it.wikipedia.org/wiki/Direttiva_Seveso). Accessed: Mar. 12, 2025.
- [14] "Piper Alpha" *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, Feb. 7, 2025. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Piper\\_Alpha](https://en.wikipedia.org/wiki/Piper_Alpha). Accessed: Jun. 05, 2025.

- [15] Beck, Ulrich (1992). *"Risk Society: Towards a New Modernity."* Translated by Ritter, Mark. London: Sage Publications. ISBN 978-0-8039-8346-5.
- [16] "Deepwater Horizon," *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, Mar. 12, 2025. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Deepwater\\_Horizon](https://it.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon). Accessed: Mar. 12, 2025.
- [17] "Esplosione nella raffineria di Texas City," *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, Feb. 7, 2025. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Esplosione\\_nella\\_raffineria\\_di\\_Texas\\_City](https://it.wikipedia.org/wiki/Esplosione_nella_raffineria_di_Texas_City). Accessed: Mar. 12, 2025.
- [18] "Disastro di Calenzano: le verità nascoste dietro l'esplosione," *Gestori Carburanti*, Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.gestoricarburanti.it/2025/01/10/disastro-di-calenzano-le-verita-nascoste-dietro-lesplosione/>. Accessed: Mar. 13, 2025.
- [19] "Risoluzione del Parlamento europeo sull'esplosione di una fabbrica a Tolosa (Francia)," *Parlamento Europeo*, Oct. 3, 2001. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-5-2001-0493\\_IT.html?redirect](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-5-2001-0493_IT.html?redirect). Accessed: Mar. 13, 2025.
- [20] A. Carpignano, "Risk Analysis Booklet", Politecnico di Torino, 2017.
- [21] K. J. Glynn, "Use of the exceedance curve approach in occupied building risk assessment," *Symposium Series No. 156, Hazards XXII*, IChemE, 2011.
- [22] C. Europea, «European Commission,» [Online]. Available: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en). Accessed: Mar. 20, 2025.
- [23] Gaz-System SA, «terminal-fsru,» [Online]. Available: <https://www.gaz-system.pl/pl/terminal-fsru.html>. Accessed: Mar. 20, 2025.
- [24] the American Society of Mechanical Engineers, *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*, no. 20. ASME V&V, 2009.
- [25] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2012/18/UE sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, L 197/1, 2012.
- [26] OSPAR Commission, *OSPAR Recommendation 2012/5 for a Risk-Based Approach to the Management of Produced Water Discharges from Offshore Installations*, 2012.
- [27] H. Hellas, C. Chaib, e M. Verzea, "Abacus to Determine the Probability of Death or Glass Breakage to the Overpressure Effect by two Methods: TNT and TNO Multi-Energy," *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, vol. 2, no. 1, pp. xx-xx, Jan. 2020, ISSN 1454-2358.

- [28] P. Pierorazio, T. Baker, e K. Ketchum, *An Update to the Baker-Strehlow-Tang Vapor Cloud Explosion Prediction Methodology Flame Speed Table*, Baker Engineering and Risk Consultants, Inc., Jan. 2004.
- [29] L. Mercx e A. C. van den Berg, *Methods for the Calculation of Physical Effects "Yellow Book"*, 3rd ed., 2nd rev., TNO – The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 2005, ch. 5, "Vapour Cloud Explosion".
- [30] Celik et al. "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications" . In: *Journal of Fluids Engineering* 130.078001-1 (2008) (cit. on pp. 14, 15, 26).
- [31] SNAM S.p.A, Snam, RINA e Gruppo GIVA: effettuato primo test al mondo con un mix di gas naturale e idrogeno al 30% nella lavorazione dell'acciaio (comunicato stampa), Milano, 19 maggio 2021
- [32] DNV, "Consequence analysis with Phast," DNV, [Online]. Available: <https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast/>.
- [33] John Wiley & Sons, Inc., *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards*, 2nd ed., Center for Chemical Process Safety, 2010.

## Appendice A: risultati di FLACS-CFD

All'interno di questa appendice sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni delle esplosioni delle tre miscele in cinque punti d'innesci rappresentativi. Si faccia riferimento alle seguenti immagini per avere un'idea più chiara sulla posizione dell'innesci all'interno della nube e sui Monitor Points selezionati.

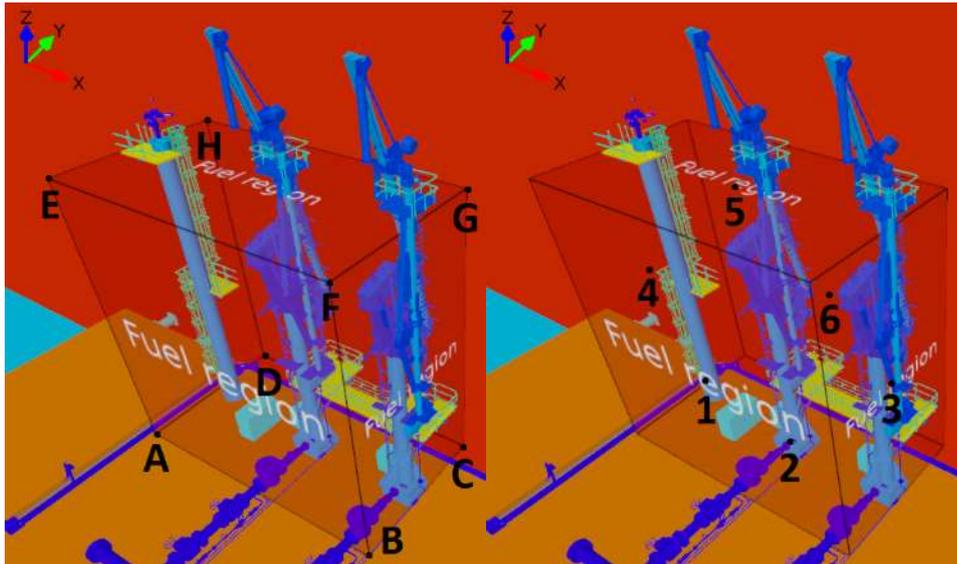


Figura 56: nomenclatura dei punti di innesci.

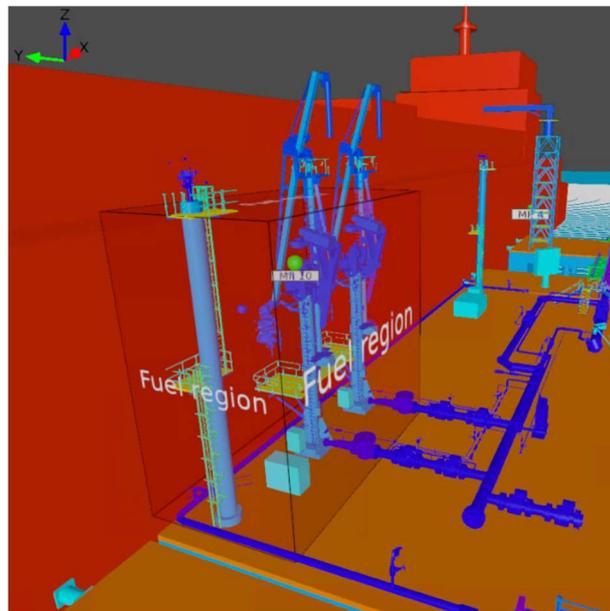


Figura 57: vista con i due Monitor Points e il volume equivalente di nube.

## GAS NATURALE

### INNESCO CENTRALE

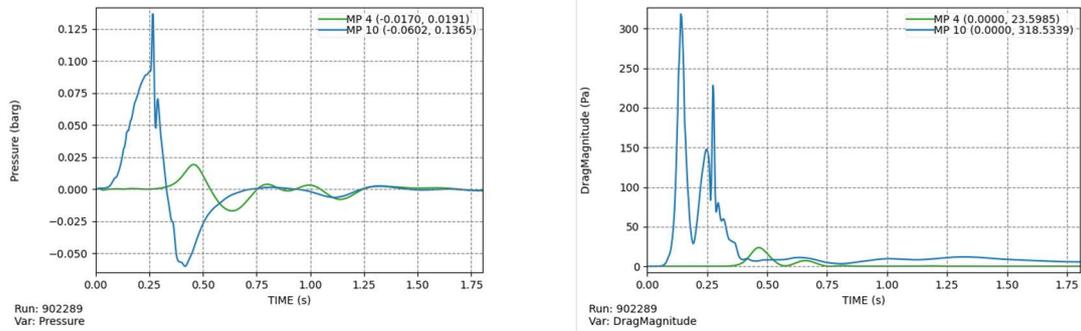


Figura 58: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Gas Naturale con innesco centrale.

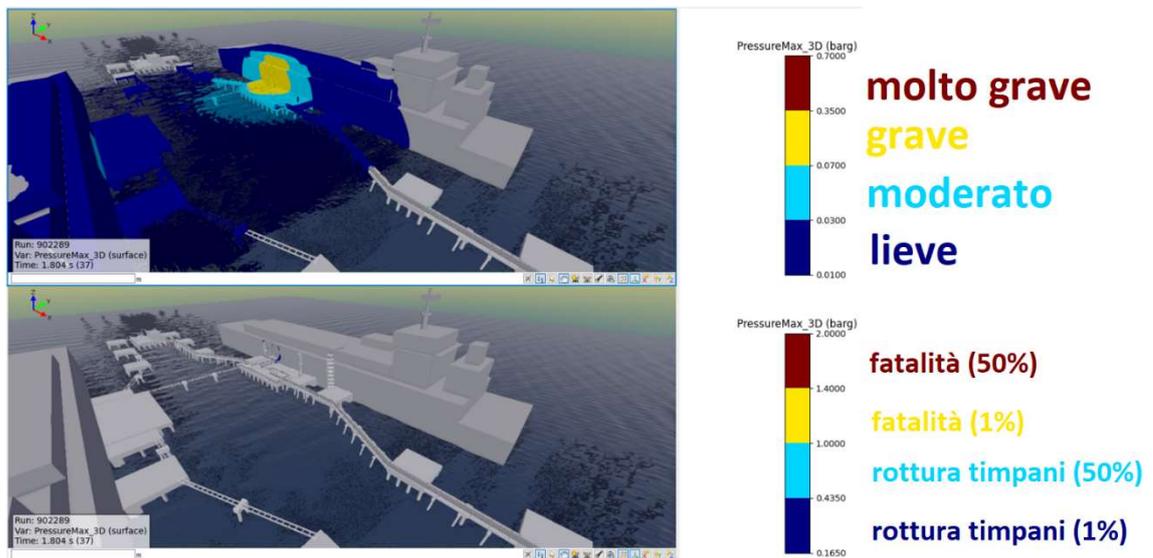


Figura 59: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Gas Naturale con innesco centrale.

## INNESCO NEL PUNTO 2

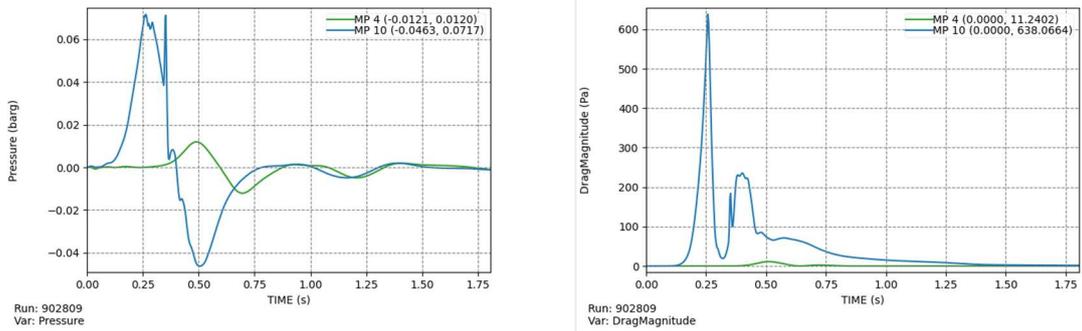


Figura 60: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Gas Naturale con innesco nel punto 2.

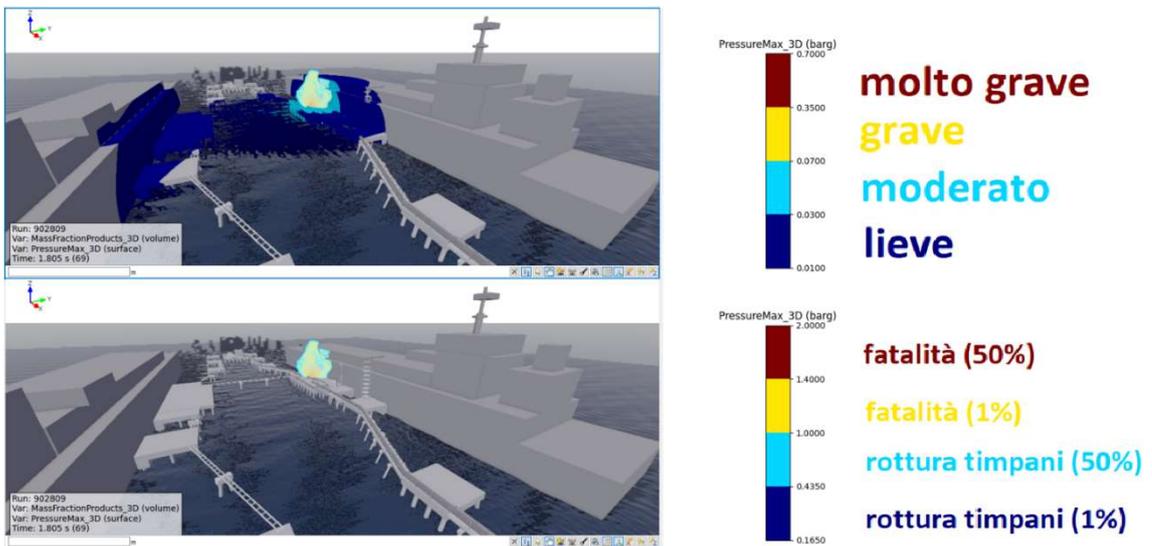


Figura 61: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Gas Naturale con innesco nel punto 2.

## INNESCO NEL PUNTO 6

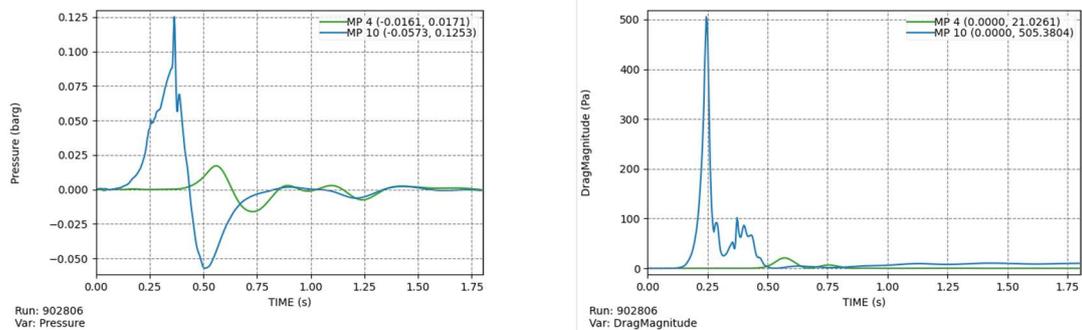


Figura 62: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Gas Naturale con innesco nel punto 6.

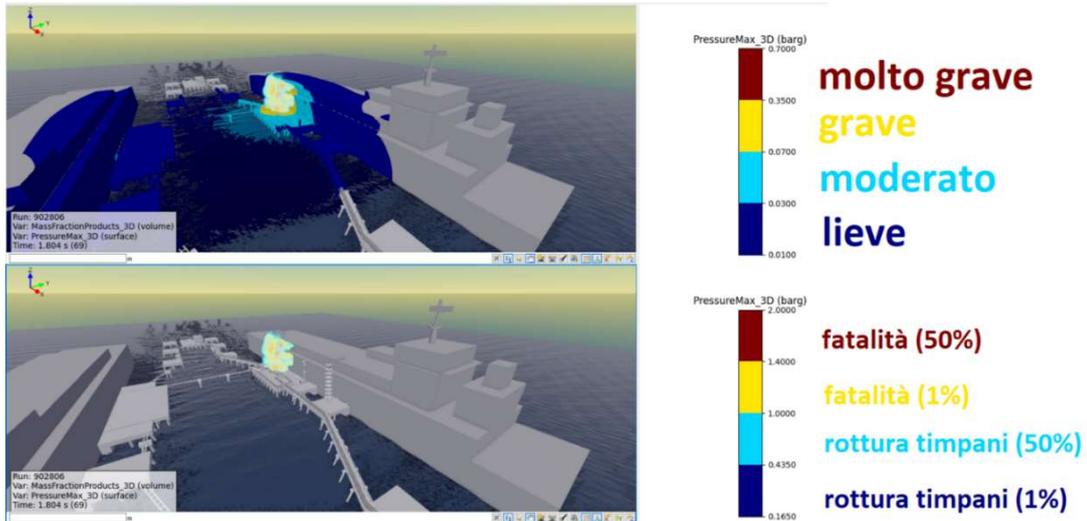


Figura 63: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Gas Naturale con innesco nel punto 6.

### INNESCO NEL PUNTO F

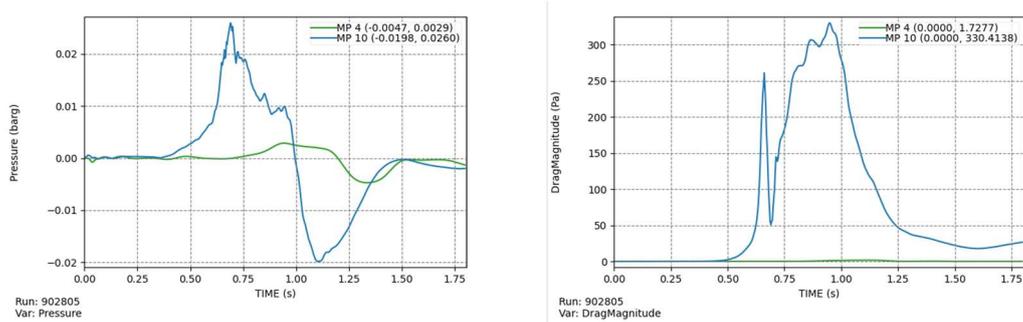


Figura 64: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Gas Naturale con innesco nel punto F.

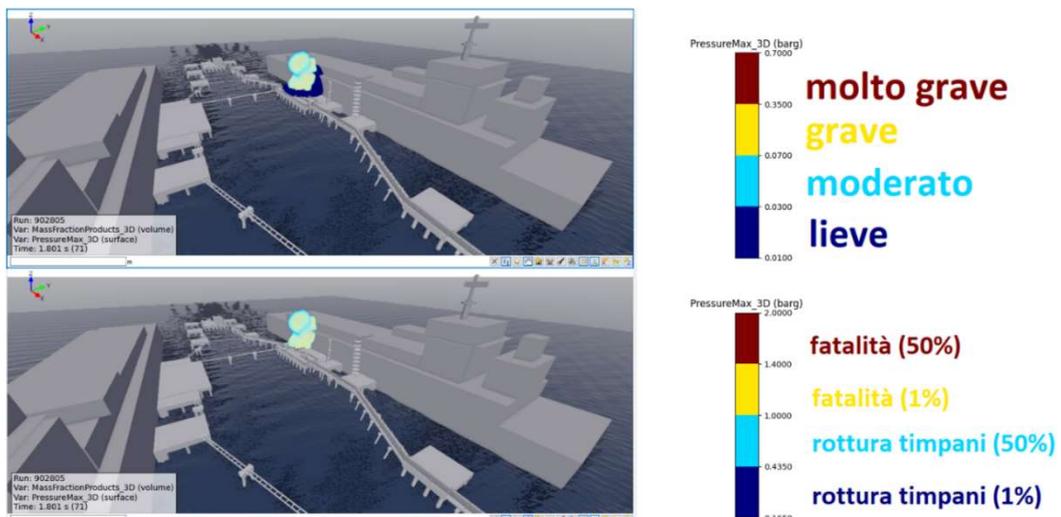


Figura 65: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Gas Naturale con innesco nel punto F.

**INNESCO NEL PUNTO H**

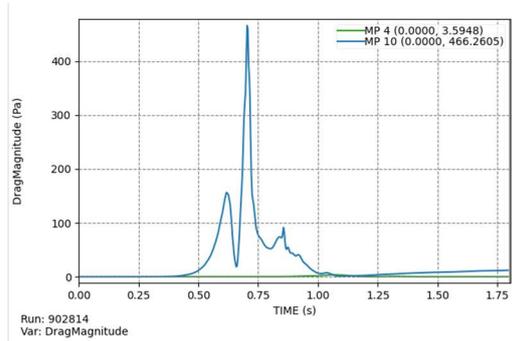
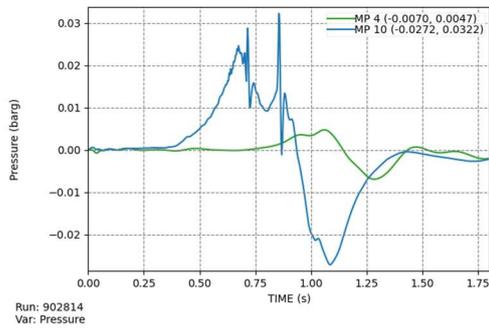


Figura 66: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Gas Naturale con innesco nel punto H.

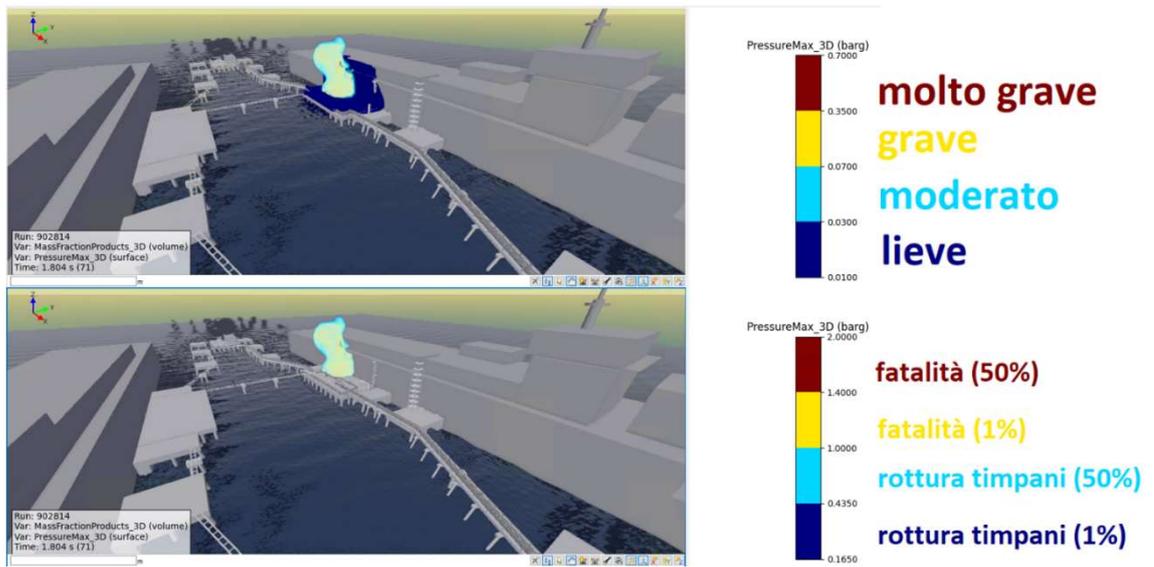


Figura 67: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Gas Naturale con innesco nel punto H.

## MISCELA METANO-IDROGENO

### INNESCO CENTRALE

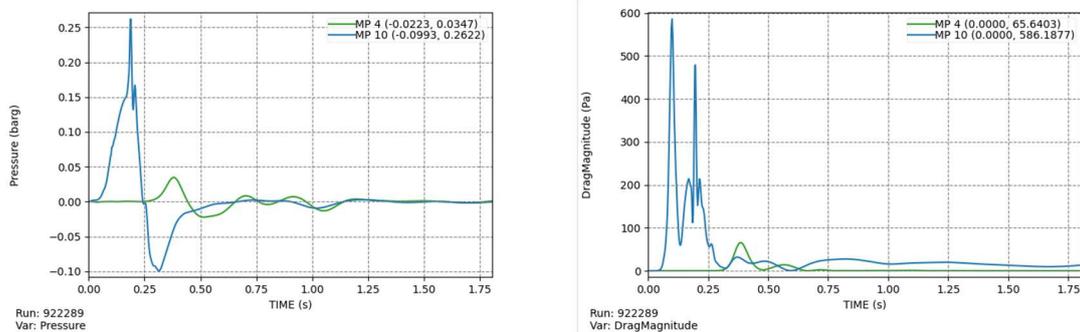


Figura 68: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Metano-Idrogeno con innesco centrale.

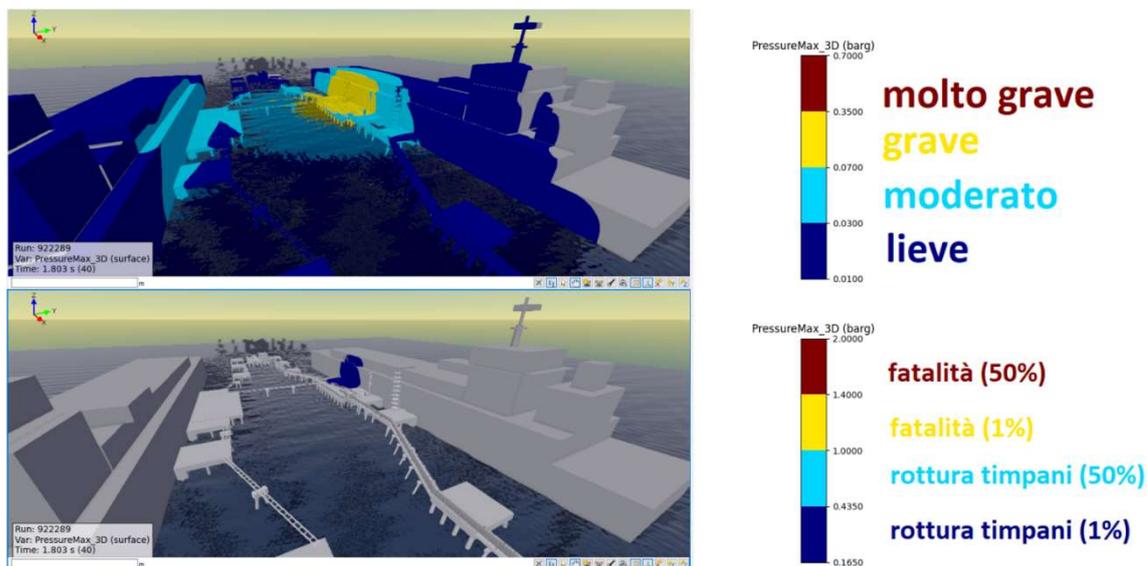


Figura 69: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Metano-Idrogeno con innesco centrale.

INNESCO NEL PUNTO 2

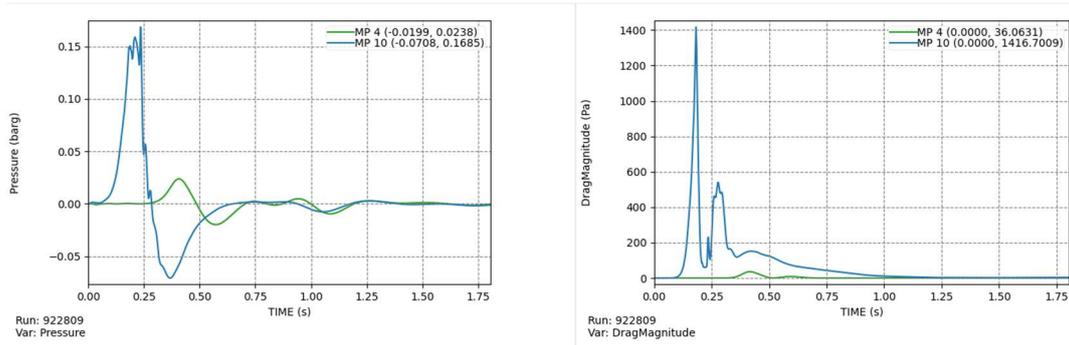


Figura 70: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Metano-Idrogeno con innesco nel punto 2.

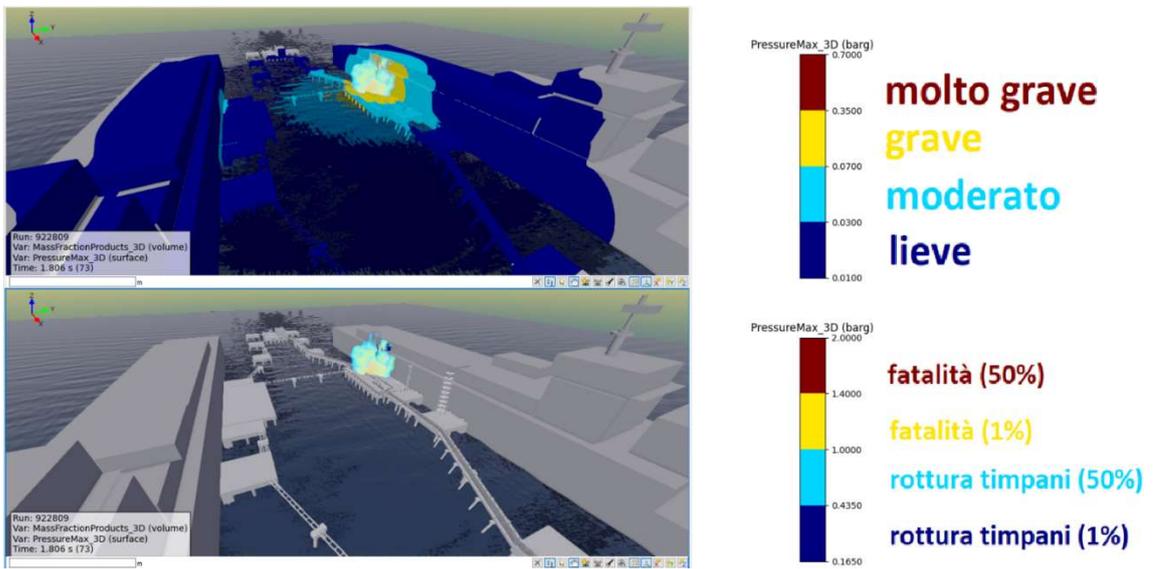


Figura 71: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Metano-Idrogeno con innesco nel punto 2.

*INNESCO NEL PUNTO 6*

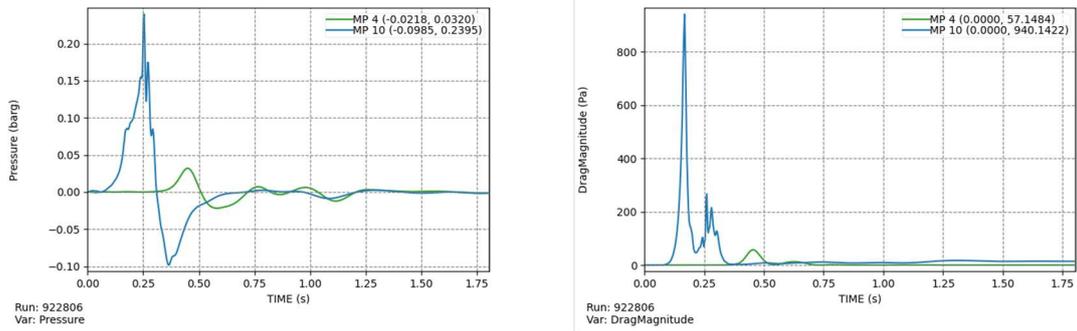


Figura 72: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Metano-Idrogeno con innesco nel punto 6.

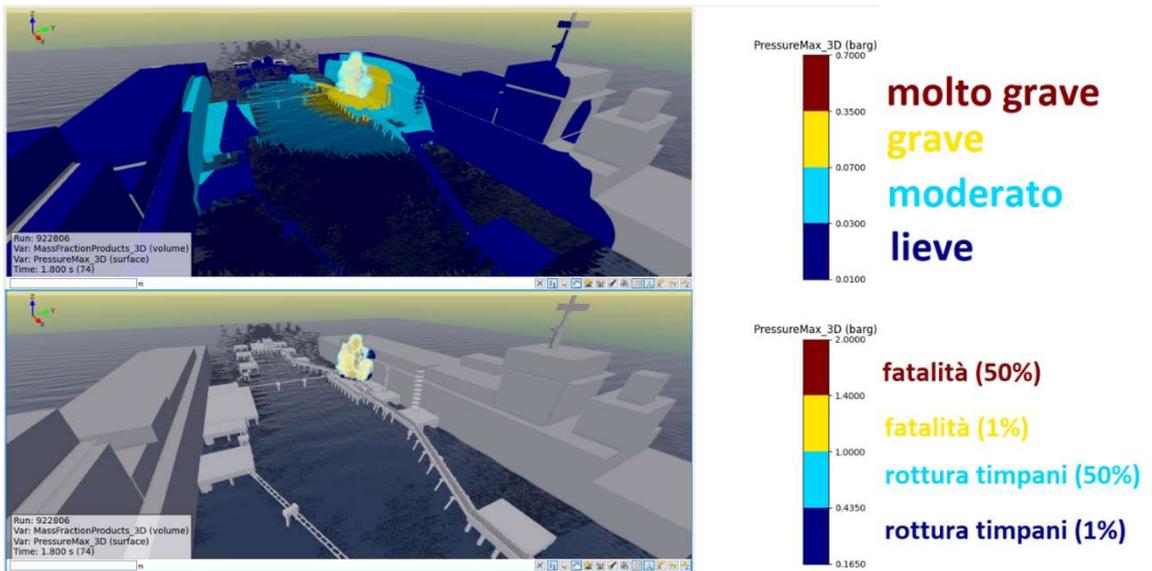


Figura 73: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Metano-Idrogeno con innesco nel punto 6.

**INNESCO NEL PUNTO F**

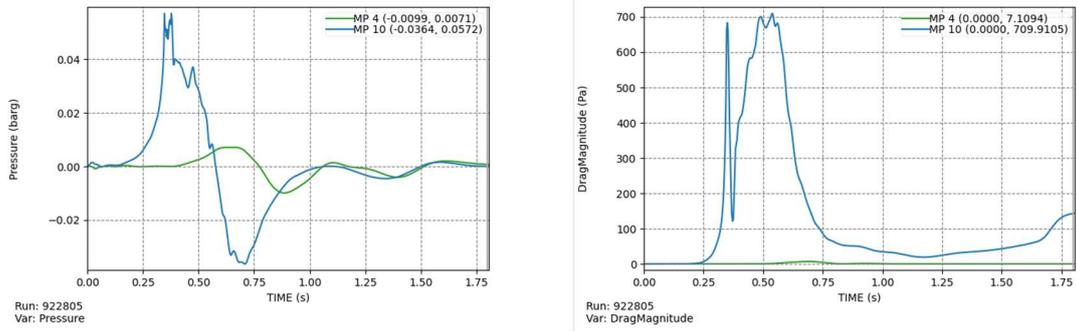


Figura 74: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Metano-Idrogeno con innesco nel punto F.

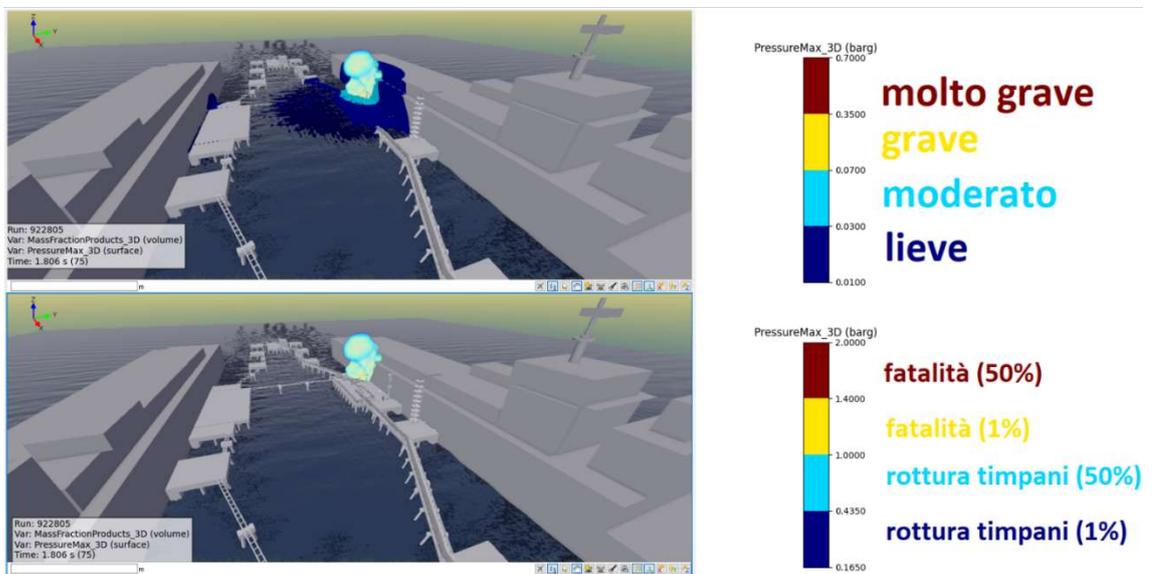


Figura 75: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Metano-Idrogeno con innesco nel punto F.

**INNESCO NEL PUNTO H**

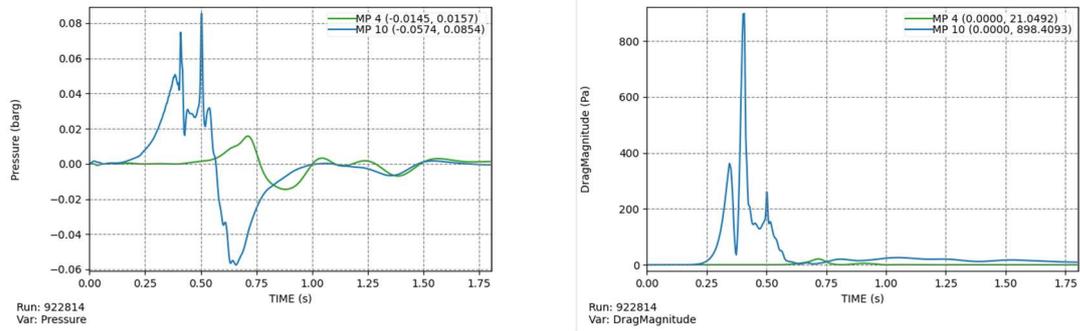


Figura 76: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Metano-Idrogeno con innesco nel punto H.

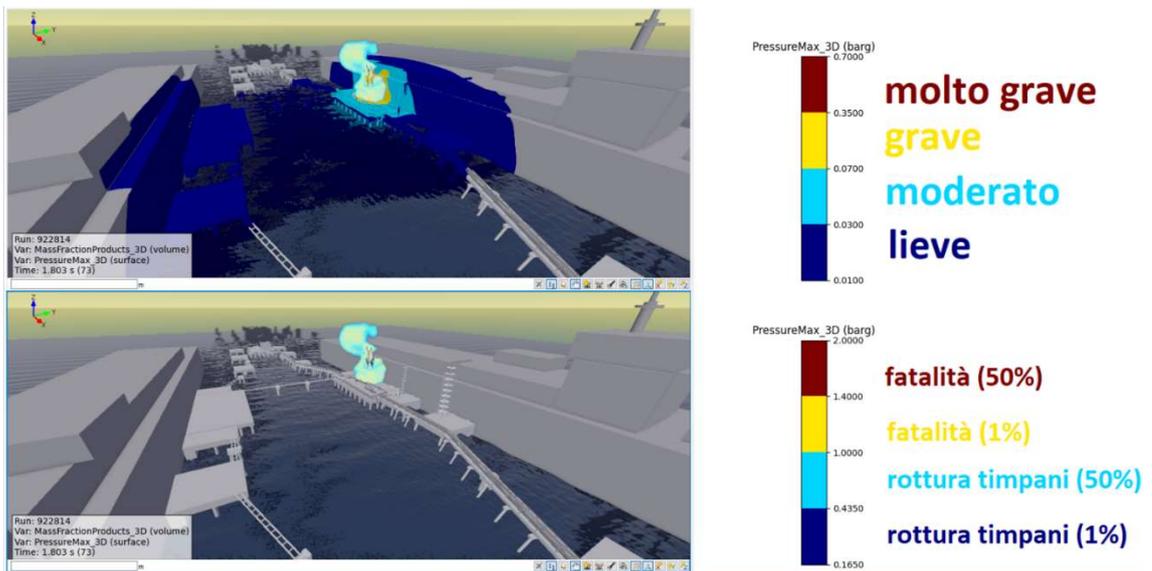


Figura 77: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Metano-Idrogeno con innesco nel punto H.

## MISCELA IDROGENO

### INNESCO CENTRALE

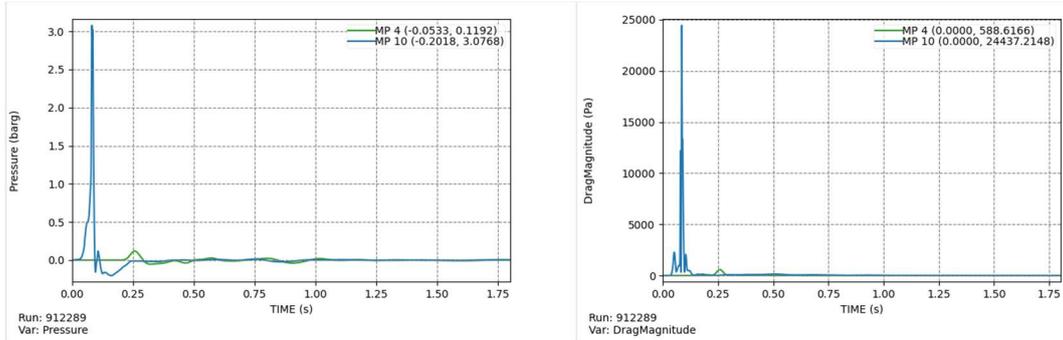


Figura 78: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Idrogeno con innesco centrale.

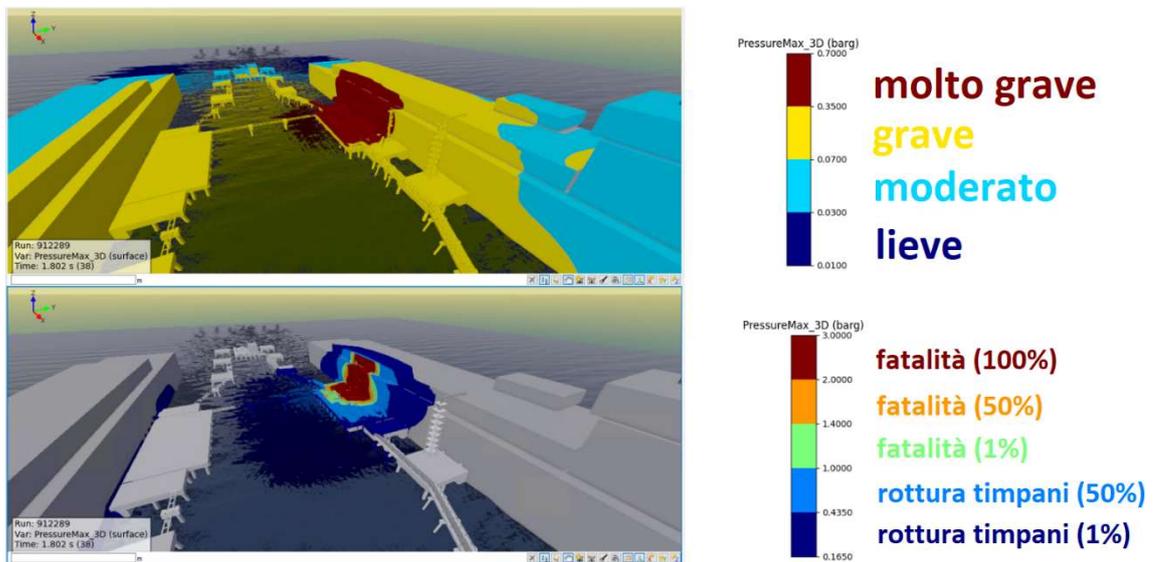


Figura 79: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Idrogeno con innesco centrale.

## INNESCO NEL PUNTO 2

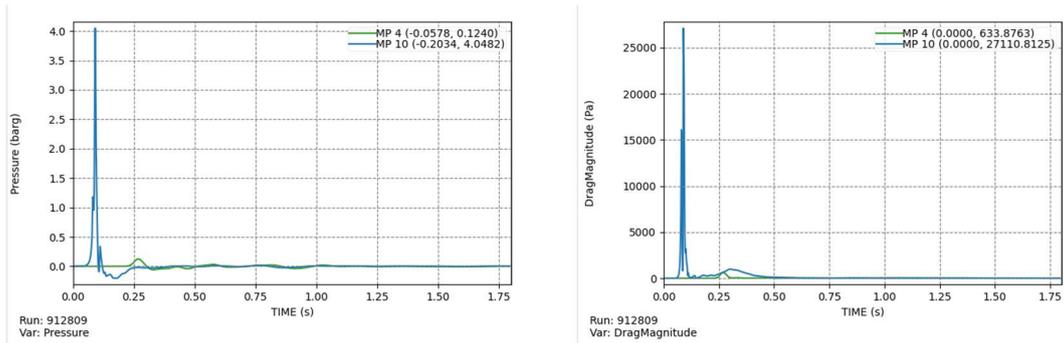


Figura 80: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Idrogeno con innesco nel punto 2.

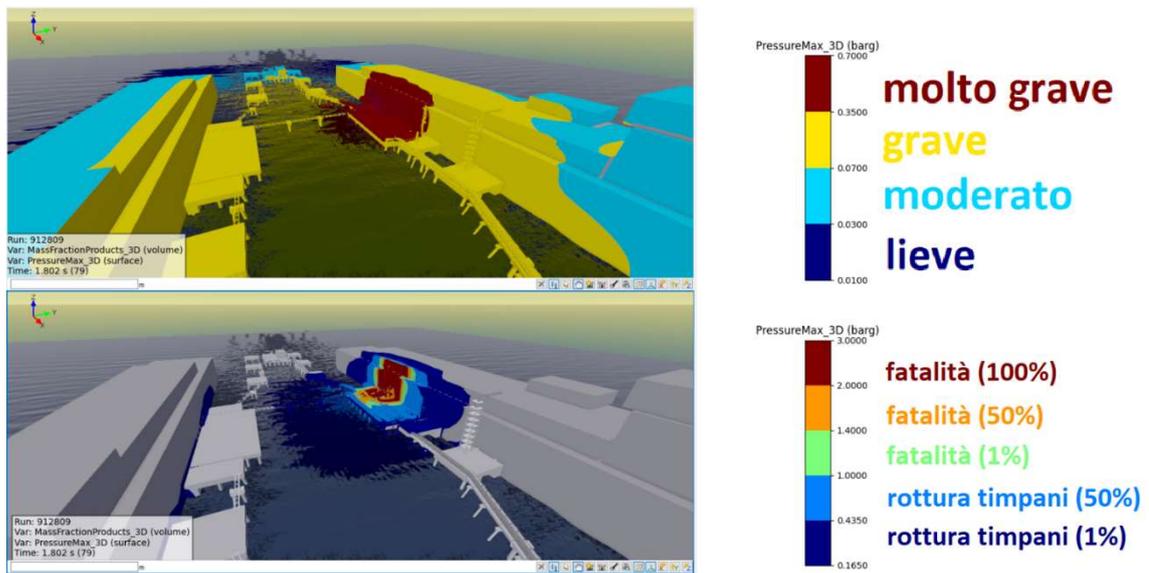


Figura 81: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Idrogeno con innesco nel punto 2.

## INNESCO NEL PUNTO 5

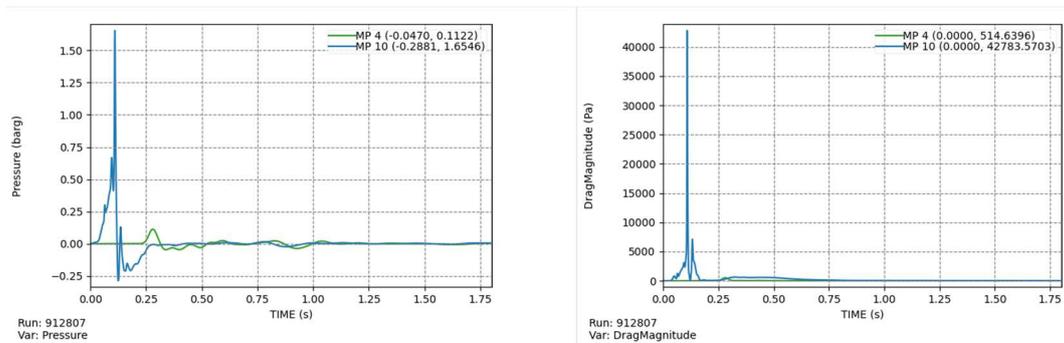


Figura 82: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Idrogeno con innesco nel punto 5.

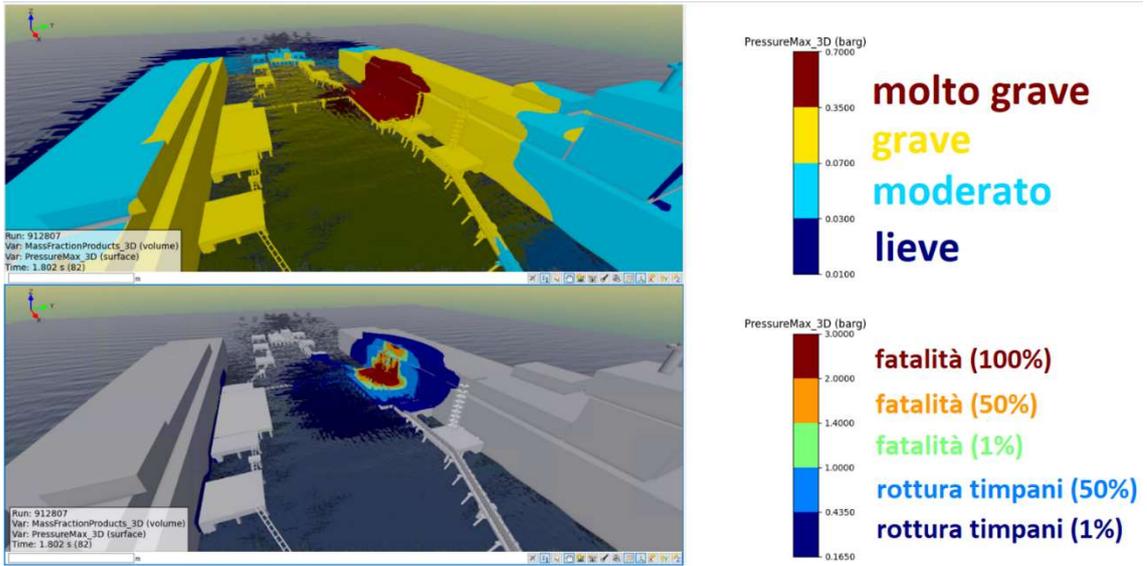


Figura 83: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Idrogeno con innesco nel punto 5.

### INNESCO NEL PUNTO B

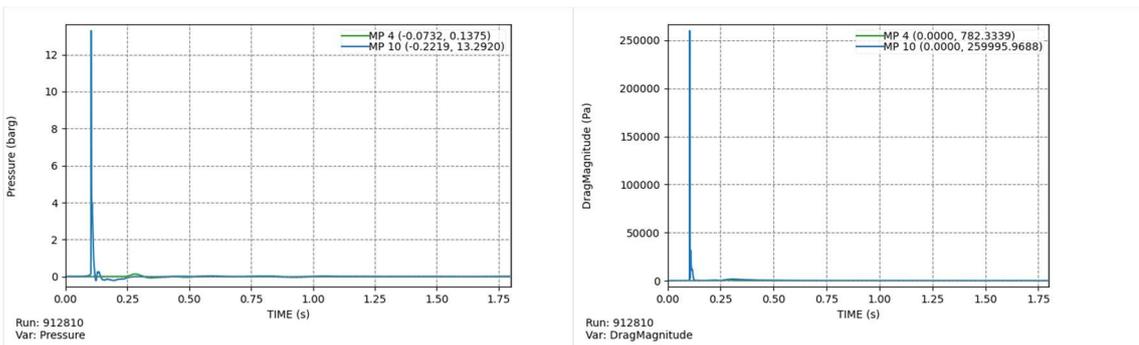


Figura 84: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Idrogeno con innesco nel punto B.

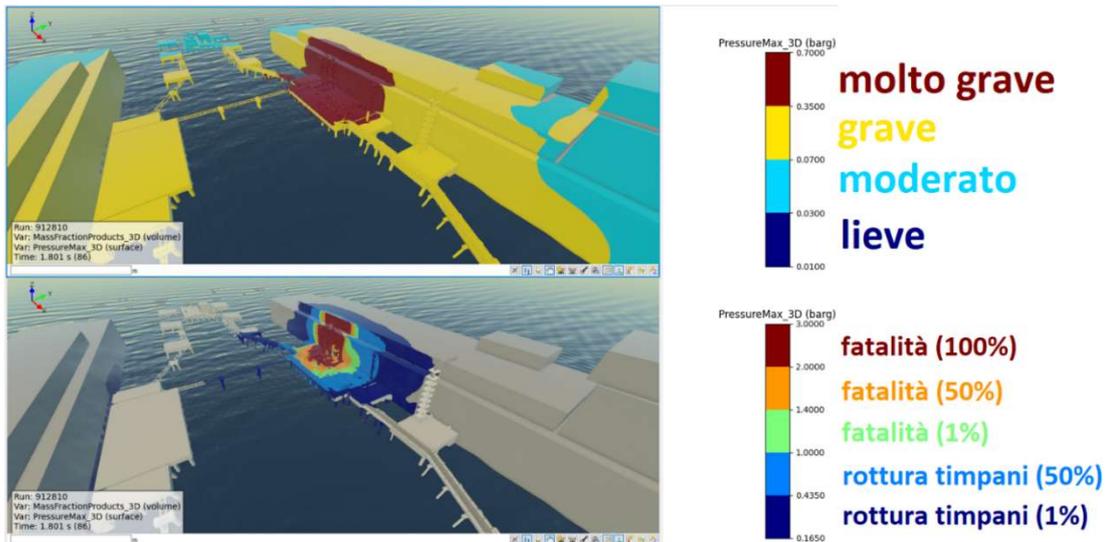


Figura 85: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Idrogeno con innesco nel punto B.

### INNESCO NEL PUNTO H

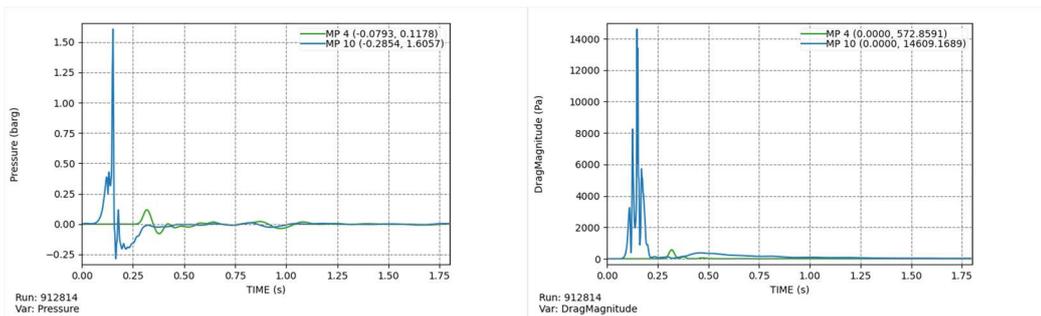


Figura 86: profili temporali di sovrappressione e pressione dinamica per Idrogeno con innesco nel punto H.

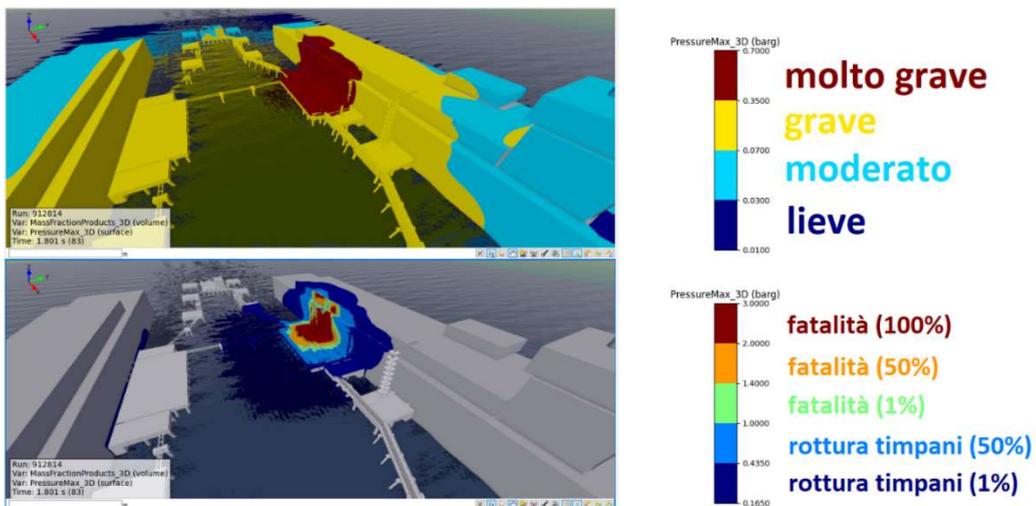


Figura 87: aree di danno a strutture (in alto) e alle persone (in basso) per Idrogeno con innesco nel punto H.

## Appendice B: Procedura di calcolo utilizzata per ottenere i risultati attraverso i modelli semi-empirici TNO e BST

All'interno di questa appendice viene mostrata nel dettaglio la procedura di calcolo che ha consentito lo sviluppo dei modelli semi-empirici TNO e BST all'interno di fogli di calcolo realizzati su Microsoft Excel.

### CALCOLI DI STECHIOMETRIA

Per ciascuna delle miscele esplosive analizzate, sono stati condotti dei calcoli di stechiometria al fine di quantificare la porzione di nube equivalente occupata dal combustibile e la porzione restante occupata dall'aria atmosferica.

Calcoli di stechiometria: GAS NATURALE	Componente	Formula	Frazione vol. componente*	moli O2 [mol]	O2 totale [mol]	O2 complessivo [mol]	Reazione Stechiometrica
	Azoto	N2	2,00E-03	---	---	2,28E+00	---
	Metano	CH4	8,70E-01	2	1,74E+00		$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
	Etano	C2H6	8,37E-02	3,5	2,93E-01		$C_2H_6 + 3,5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$
	Propano	C3H8	3,00E-02	5	1,50E-01		$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$
	n-Butano	C4H10	1,43E-02	6,5	9,30E-02		$C_4H_{10} + 6,5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$
Miscela Nube	R. Stech.	Frazione Vol. Combustibile					
Aria	1,08E+01		8,45E-02				
Combustibile	1						

\*Legge di Avogadro per i gas ideali: concentrazioni molari = concentrazioni volumetriche

Figura 88: Calcoli di stechiometria per la miscela di gas naturale.

Calcoli di stechiometria: METANO-IDROGENO	Componente	Formula	Frazione vol. componente*	moli O2 [mol]	O2 totale [mol]	O2 complessivo [mol]	Reazione Stechiometrica
	Metano	CH4	70,00%	2	1,40E+00	1,55E+00	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
	Idrogeno	H2	30,00%	0,5	1,50E-01		$H_2(g) + 0,5 O_2(g) \rightarrow H_2O(l)$
	Miscela Nube	R. Stech.	Frazione Vol. Combustibile				
	Aria	7,38E+00					
Combustibile	1		12%				

\*Legge di Avogadro per i gas ideali: concentrazioni molari = concentrazioni volumetriche

Figura 89: Calcoli di stechiometria per la miscela metano-idrogeno.

Calcoli di stechiometria: IDROGENO	Componente	Formula	Frazione vol. componente*	moli O2 [mol]	O2 totale [mol]	O2 complessivo [mol]	Reazione Stechiometrica
	Idrogeno	H2	100%	0,5	0,5	0,5	$H_2(g) + 0,5 O_2(g) \rightarrow H_2O(g)$
	Miscela Nube	R. Stech.	Frazione Vol. Combustibile				
Aria	2,38E+00		0,30				
Combustibile	1						

\*Legge di Avogadro per i gas ideali: concentrazioni molari = concentrazioni volumetriche

Figura 90: Calcoli di stechiometria per la nube di idrogeno.

All'interno di ciascuna tabella mostrata in Figura 88, Figura 89 e Figura 90 sono state inserite le sostanze che compongono la nube esplosiva con le relative concentrazioni

volumetriche e reazioni di combustione bilanciate in rapporto stechiometrico. I coefficienti di bilanciamento sono stati utilizzati per calcolare il numero di moli di ossigeno necessarie per ottenere una combustione totale di ciascuna sostanza. Queste ultime sono state sommate per ottenere la quantità complessiva di ossigeno necessaria per la combustione dell'intera nube.

Sapendo che l'ossigeno è presente nell'atmosfera al 21% in volume, è stato calcolato il rapporto stechiometrico fra l'aria atmosferica e il combustibile per poi ricavare la percentuale di volume di nube occupata dal combustibile mediante la seguente formula:

$$(\%)_{Vol,comb} = \frac{R_{comb}}{R_{aria} + R_{comb}}$$

Dove  $R$  si riferisce al rapporto stechiometrico rispettivamente di combustibile e aria.

### **CALCOLI DI ENERGIA LIBERATA DALLA COMBUSTIONE**

Una volta ottenuta la percentuale del volume di nube equivalente occupato dal combustibile, sono stati condotti dei calcoli per quantificare l'energia liberata dalla combustione di ciascuna delle tre miscele riportati in Figura 91, Figura 92 e Figura 93.

Geometria	R_innesco [m]	85				
	Vol. nube [m <sup>3</sup> ]	3240,00				
	Vol. comb [m <sup>3</sup> ]	2,74E+02				
Valori di massa [kg] ed energia di combustione [J] dei singoli componenti	Componenti	CH4	C2H6	C3H8	C4H10	Fonti e formule
	Vol [m <sup>3</sup> ]	2,38E+02	2,29E+01	8,21E+00	3,91E+00	$V_{comp} = (\%)_{comb} * V_{combustibile}$
	Densità[kg/m <sup>3</sup> ]	0,65095	1,2271	1,8147	2,415	NIST Database
	Massa [kg]	1,55E+02	2,81E+01	1,49E+01	9,45E+00	$m_{comp} = \rho_{comp} * V_{comp}$
	Ental. Comb [kJ/mol]	890,7	1560,7	2219,2	2877,5	NIST Database
	PM [kg/mol]	0,01604	0,03007	0,0441	0,05812	NIST Database
	Ental. Comb [kJ/kg]	55530	51902,22813	50321,99546	49509,63524	$H_{comp}[kJ/kg] = H_{comp}[kJ/mol] * PM_{comp}$
	Ener. Comb. [J]	8,61E+09	1,46E+09	7,50E+08	4,68E+08	$H_{comp}[J/kg] = H_{comp}[kJ/kg] * 1000$
Valori nube	Massa comb tot [kg]	2,07E+02				
	Ener. Comb. Tot [J]	1,13E+10				

Figura 91: Calcoli di massa ed energia per un'esplosione di nube di Gas Naturale.

Geometria	R_innesco [m]	85		
	Vol. nube [m <sup>3</sup> ]	3240,00		
	Vol. comb [m <sup>3</sup> ]	386,6		
Valori di massa [kg] ed energia di combustione [J] dei singoli componenti	Componenti	CH4	H2	Fonti e formule
	Vol [m <sup>3</sup> ]	2,71E+02	1,16E+02	$V_{comp} = (\%)_{comp} * V_{combustibile}$
	Densità[kg/m <sup>3</sup> ]	0,65095	0,0805	NIST Database
	Massa [kg]	1,76E+02	9,34E+00	$m_{comp} = \rho_{comp} * V_{comp}$
	Ental. Comb [kJ/mol]	890,7	285,83	NIST Database
	PM [kg/mol]	0,01604	0,002	NIST Database
	Ental. Comb [kJ/kg]	5,55E+04	1,43E+05	$H_{comp}[kJ/kg] = H_{comp}[kJ/mol] * PM_{comp}$
Ener. Comb. [J]	9,78E+09	1,33E+09	$H_{comp}[J/kg] = H_{comp}[kJ/kg]*1000$	
Valori nube	Massa comb tot [kg]	1,85E+02		
	Ener. Comb. Tot [J]	1,11E+10		

Figura 92: Calcoli di massa ed energia per un'esplosione di nube di Metano-Idrogeno.

Geometria	R_innesco [m]	85		
	Vol. nube [m <sup>3</sup> ]	3240,00		
	Vol. comb [m <sup>3</sup> ]	958,31		
Valori di massa [kg] ed energia di combustione [J] dei singoli componenti	Componente	H2		Fonti e formule
	Vol [m <sup>3</sup> ]	958,3		$V_{comp} = (\%)_{comp} * V_{combustibile}$
	Densità[kg/m <sup>3</sup> ]	0,0805		NIST Database
	Massa [kg]	77,19		$m_{comp} = \rho_{comp} * V_{comp}$
	Ental. Comb [kJ/mol]	285,83		NIST Database
	PM [kg/mol]	0,002		NIST Database
	Ental. Comb [kJ/kg]	1,42E+05		$H_{comp}[kJ/kg] = H_{comp}[kJ/mol] * PM_{comp}$
Ener. Comb. [J]	1,09E+10		$H_{comp}[J/kg] = H_{comp}[kJ/kg]*1000$	
Valori nube	Massa comb tot [kg]	77,19		
	Ener. Comb. Tot [J]	1,09E+10		

Figura 93: Calcoli di massa ed energia per un'esplosione di nube di Idrogeno.

Nel primo blocco di ciascuna figura sono presenti le informazioni di partenza: la distanza dal punto di innesco in corrispondenza di cui si vuole calcolare il danno dell'esplosione, il volume totale occupato dalla nube equivalente (dato a priori) e il volume di combustibile ottenuto dalla semplice moltiplicazione tra il volume totale della nube e la concentrazione volumetrica di combustibile.

Nel blocco centrale sono presenti invece i calcoli che portano all'ottenimento dell'energia di combustione sprigionata da ciascuna reazione di ciascun componente della miscela esplosiva. Partendo dal volume di ciascun componente e dalla sua densità alle condizioni di 27,7°C e 1bar, è stata calcolata la massa di ciascun componente. Da

quest'ultima e dalle informazioni riguardanti l'entalpia specifica di combustione e il peso molecolare di ciascuna sostanza, è stata ricavata l'energia che ciascuna di esse libera in seguito a una reazione di combustione completa. Le informazioni riguardanti la densità, l'entalpia specifica di combustione e il peso molecolare sono state prelevate dal database del NIST consultabile online.

Nella parte finale sono state riassunte le informazioni complessive della nube sommando le masse di ciascun componente e le energie liberate da ciascuna reazione di combustione. Mentre l'energia è il parametro chiave che serve per le valutazioni relative al danno da esplosione, la massa è stata utilizzata come ulteriore mezzo per confrontare i calcoli semi-empirici con quelli di FLACS-CFD.

Valori nube		Massa comb tot [kg]	2,07E+02						
		Ener. Comb. Tot [J]	1,13E+10						
ITER	TIME	PMAX	VMAX	IP	FUEL	RATE	DT	PMEAN	
[#]	[s]	[barg]	[m/s]	[#]	[kg]	[kg/s]	[s]	[barg]	
0	0.000000	0.000	0.0	0	1.96E+02	-9.35E-07	8.40E-03	0.000	

Figura 94: Confronto fra calcoli di massa per la nube di Gas Naturale.

Valori nube		Massa comb tot [kg]	1,85E+02						
		Ener. Comb. Tot [J]	1,11E+10						
ITER	TIME	PMAX	VMAX	IP	FUEL	RATE	DT	PMEAN	
[#]	[s]	[barg]	[m/s]	[#]	[kg]	[kg/s]	[s]	[barg]	
0	0.000000	0.000	0.0	0	1.75E+02	-8.57E-07	8.21E-03	0.000	

Figura 95: Confronto fra calcoli di massa per la nube di Metano-Idrogeno.

Valori nube		Massa comb tot [kg]	77,19						
		Ener. Comb. Tot [J]	1,09E+10						
ITER	TIME	PMAX	VMAX	IP	FUEL	RATE	DT	PMEAN	
[#]	[s]	[barg]	[m/s]	[#]	[kg]	[kg/s]	[s]	[barg]	
0	0.000000	0.000	0.0	0	7.40E+01	-4.12E-07	7.20E-03	0.000	

Figura 96: Confronto fra calcoli di massa per la nube di Idrogeno.

Nelle immagini appena riportate si possono osservare, oltre ai valori finali di massa ed energia di ciascuna delle tre nubi, anche la prima iterazione delle simulazioni di FLACS-CFD per l'esplosione ciascuna miscela. Si possono osservare delle leggere differenze, in particolare, il tool CFD registra sempre valori inferiori rispetto a quelli ottenuti dal calcolo su Excel. La ragione di ciò risiede nella presenza di elementi di ostacolo appartenenti alla geometria del caso studio che occupano una percentuale del volume della nube. Essa, quindi, sarà caratterizzata da un volume effettivo inferiore e, di conseguenza, una massa inferiore. Questa leggera (e inevitabile) differenza in termini di massa irrobustisce ulteriormente la corrispondenza fra il calcolo sinora condotto e l'inizializzazione della simulazione all'interno del software CFD.

### CALCOLI DEL DANNO DI ESPLOSIONE COL METODO TNO

All'interno di questa sezione vengono mostrati i calcoli del danno di esplosione registrato a 85m dal punto di innesco per ciascuna delle tre miscele analizzate.

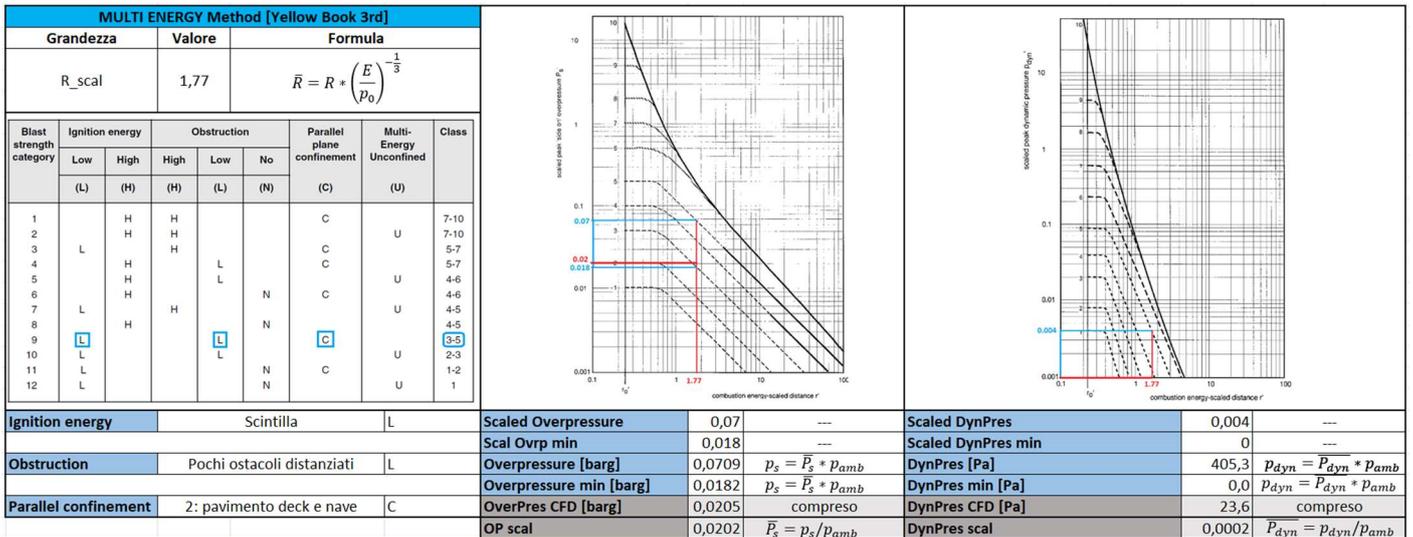


Figura 97: danno di esplosione per la nube di Gas Naturale ottenuto con il metodo TNO.

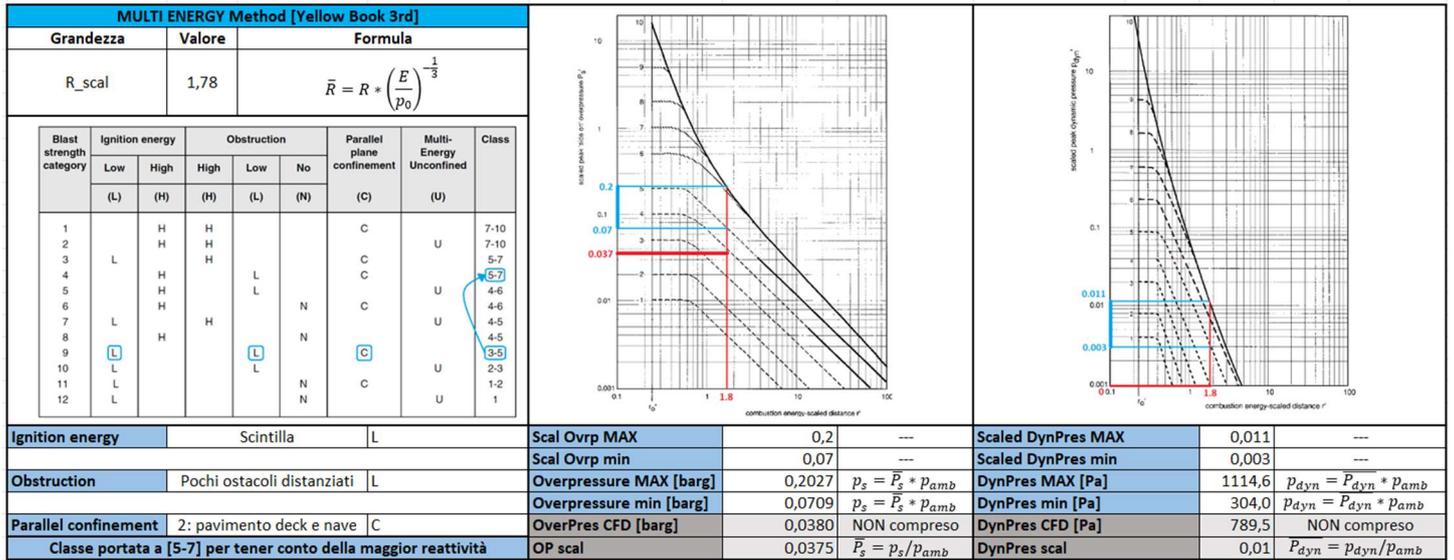


Figura 98: danno di esplosione per la nube di Metano-Idrogeno ottenuto con il metodo TNO.

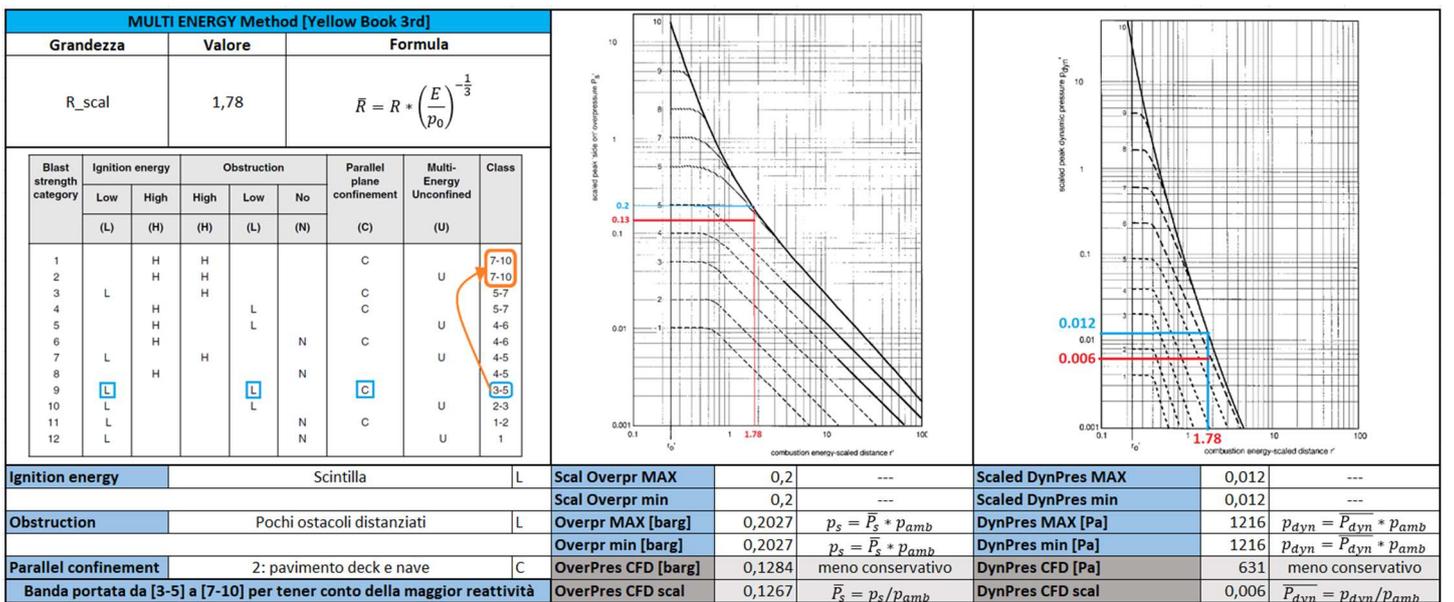


Figura 99: danno di esplosione per la nube di Idrogeno ottenuto con il metodo TNO.

Il primo passo consiste nel calcolo della distanza adimensionalizzata. Per ottenere questo valore, sono stati inseriti nella formula presente nelle tabelle il valore di distanza dal punto di innesco, l'energia di combustione della nube in analisi e la pressione atmosferica. La distanza adimensionalizzata ottenuta è stata poi utilizzata per collocarsi nella giusta coordinata all'interno dei grafici che mappano la sovrappressione scalata in funzione del parametro appena ottenuto. Segue poi una selezione delle curve di pressione che è stata condotta utilizzando la tabella presente nella parte sinistra di

ciascuna delle tre immagini. Poiché il TNO non tiene conto delle diverse reattività delle varie miscele, a parità di condizioni geometriche, sono state scelte delle classi di pericolosità maggiori rispetto a quelli caratteristici del Gas Naturale. All'interno di ciascun grafico, mentre i risultati del TNO sono contraddistinti dal colore blu, i risultati ottenuti dalla CFD sono contraddistinti dal colore rosso. Si può notare che in ogni caso, FLACS-CFD ottiene dei risultati meno conservativi rispetto ai valori massimi ottenuti dal TNO. Inoltre, nel caso dell'esplosione della nube di metano-idrogeno, è possibile notare come la stima della classe di pericolosità sia stata così conservativa da ottenere un range di valori di sovrappressioni possibili completamente al di sopra del valore ottenuto da FLACS-CFD.

### CALCOLI DEL DANNO DI ESPLOSIONE COL METODO BST

All'interno di questa sezione vengono mostrati i calcoli del danno di esplosione registrato a 85m dal punto di innesco per ciascuna delle tre miscele analizzate.

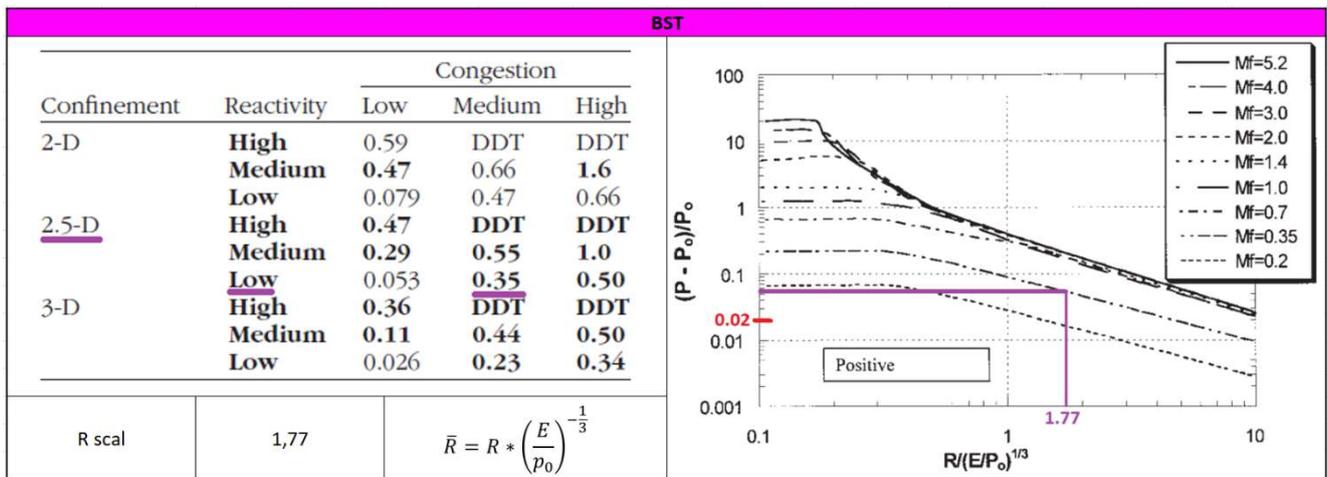


Figura 100: danno di esplosione per la nube di Gas Naturale ottenuto con il metodo BST.

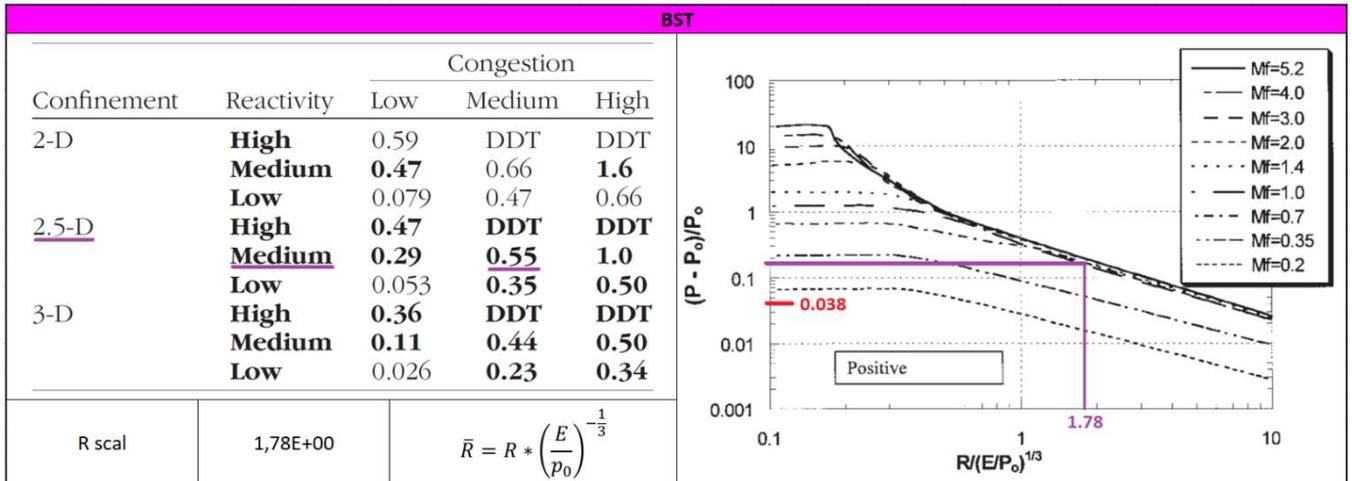


Figura 101: danno di esplosione per la nube di Metano-Idrogeno ottenuto con il metodo BST.

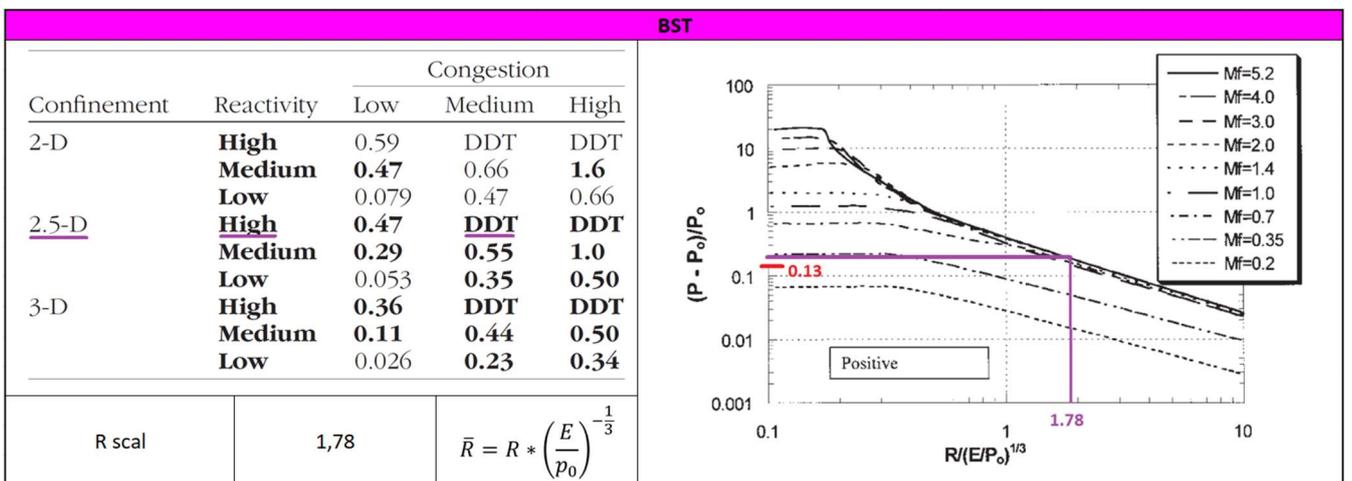


Figura 102: danno di esplosione per la nube di Idrogeno ottenuto con il metodo BST.

Dalle tabelle riportate si può notare come il BST condivide con il TNO il calcolo di distanza scalata. La differenza sostanziale risiede invece nella scelta della curva di pressione che, in questo caso, è ottenuta selezionando il numero di Mach relativo alla fiamma  $M_f$  attraverso i parametri di confinamento, reattività e congestionamento. In particolare, nel caso dell'esplosione della nube di idrogeno, i tre parametri portano ad una condizione di DDT a cui è associato il massimo valore possibile del  $M_f$ , ovvero 5,2. In Viola si possono osservare i risultati ottenuti dal metodo semi-empirico mentre in rosso i risultati ottenuti da FLACS-CFD.

Per ciascuna delle tre miscele, il software ha prodotto dei risultati meno conservativi.

## ***Appendice C: Risultati delle simulazioni su PHAST***

Di seguito sono mostrati i report ottenuti dal suddetto software all'interno dei quali è possibile osservare i dati di input inseriti e le tabelle finali che riportano le sovrappressioni e gli impulsi misurati in corrispondenza delle distanze dal punto di innesco.

Per quanto concerne il metodo TNO, viene richiesto il materiale infiammabile (per il gas naturale, la miscela è stata approssimata al solo metano in quanto la sua concentrazione è pari all'87%), la sua massa e il suo volume. Poiché la nube si trova completamente all'interno della geometria, è stata utilizzata un'efficienza di esplosione pari al 100%. Per quanto riguarda l'indice di violenza, è stato preso il valore massimo ottenuto dalla tabella visibile in Figura 44.

Gli input richiesti dal BST sono, come per il TNO, la sostanza infiammabile e la sua massa. Oltre a questi, viene richiesto il numero di Mach caratteristico del fronte di fiamma e la tipologia di innesco (impostata su "soft" per modellare un innesco debole come ad esempio una scintilla).

I calcoli per entrambi i metodi riportano i risultati in forma tabellare con le sovrappressioni corrispondenti alle distanze dall'origine dell'esplosione. La tabella è stata realizzata con una distanza minima pari a  $0m$ , una distanza massima pari a  $100m$  con degli step di  $1m$ .

## GAS NATURALE

Dati di input per il metodo TNO		
Flammable mass in cloud	<b>210</b>	kg
Unconfined explosion strength	<b>5</b>	
Unconfined explosion efficiency	<b>100</b>	%
Number of confined sources	<b>1</b>	
Option for specifying size of confined sources	<b>Use volumes</b>	
<b>Strength of confined source</b>	<b>Volume of confined source [m3]</b>	
5	3240	
Range spaziale		
Minimum distance	<b>0</b>	m
Maximum distance	<b>100</b>	m
Distance step size	<b>1</b>	m
Quantità calcolate		
Unconfined energy	<b>0</b>	kJ
Confined energies	<b>1,1E+07</b>	kJ

Figura 103: Input per i calcoli di esplosione di gas naturale con il metodo TNO Multi-Energy.

Dati di input per il metodo BST		
Flammable mass in cloud	<b>210</b>	kg
Mach number supplied	<b>Yes</b>	
Mach number	<b>0,35</b>	
Correction for the ground effect	<b>1</b>	
Ignition sources - ('Soft' is the only possible value at present)	<b>Soft</b>	
Range spaziale		
Minimum distance	<b>0</b>	m
Maximum distance	<b>100</b>	m
Distance step size	<b>1</b>	m
Quantità calcolate		
Ignition energy	<b>1,05E+07</b>	kJ
Modified ignition energy	<b>1,05E+07</b>	kJ
Overpressure [bar]	Radius [m]	Mass [kg]
0,02068	211,995	210
0,1379	29,8312	210
0,2068	16,8279	210

Figura 104: Input per i calcoli di esplosione di gas naturale con il metodo BST.

Distance [m]	Overpressure 1 [bar]	Distance [m]	Overpressure 1 [bar]
0	0,203		
1	0,203	26	0,201
2	0,203	27	0,197
3	0,203	28	0,193
4	0,203	29	0,188
5	0,203	30	0,183
6	0,203	31	0,178
7	0,203	32	0,172
8	0,203	33	0,167
9	0,203	34	0,162
10	0,203	35	0,157
11	0,203	36	0,153
12	0,203	37	0,149
13	0,203	38	0,145
14	0,203	39	0,141
15	0,203	40	0,138
16	0,203	41	0,134
17	0,203	42	0,131
18	0,203	43	0,128
19	0,203	44	0,125
20	0,203	45	0,122
21	0,203	46	0,120
22	0,203	47	0,118
23	0,203	48	0,115
24	0,204	49	0,113
25	0,203	50	0,111
Distance [m]	Overpressure 1 [bar]	Distance [m]	Overpressure 1 [bar]
51	0,109	76	0,073
52	0,107	77	0,072
53	0,105	78	0,071
54	0,103	79	0,070
55	0,101	80	0,069
56	0,099	81	0,069
57	0,097	82	0,068
58	0,096	83	0,067
59	0,094	84	0,066
60	0,092	85	0,065
61	0,091	86	0,065
62	0,089	87	0,064
63	0,088	88	0,063
64	0,087	89	0,062
65	0,085	90	0,062
66	0,084	91	0,061
67	0,083	92	0,060
68	0,082	93	0,060
69	0,080	94	0,059
70	0,079	95	0,059
71	0,078	96	0,058
72	0,077	97	0,057
73	0,076	98	0,057
74	0,075	99	0,056
75	0,074	100	0,056

Figura 105: risultati dettagliati della sovrappressione generata dalla deflagrazione di gas naturale con il metodo TNO Multi-Energy.

Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]	Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]
0	0,22	2306,5			
1	0,22	2286,2	26	0,16	642,1
2	0,22	2203,5	27	0,15	618,7
3	0,22	2153,8	28	0,15	597,0
4	0,22	2077,9	29	0,14	576,8
5	0,22	1980,3	30	0,14	557,9
6	0,22	1871,9	31	0,13	540,3
7	0,22	1761,0	32	0,13	523,9
8	0,22	1652,5	33	0,13	508,5
9	0,23	1549,2	34	0,12	494,1
10	0,23	1452,6	35	0,12	480,6
11	0,23	1363,0	36	0,12	468,0
12	0,23	1280,6	37	0,11	456,0
13	0,22	1205,0	38	0,11	444,8
14	0,22	1135,7	39	0,11	434,3
15	0,22	1072,5	40	0,10	424,3
16	0,21	1014,6	41	0,10	415,0
17	0,21	961,6	42	0,10	406,1
18	0,20	913,1	43	0,10	397,7
19	0,19	868,7	44	0,10	389,8
20	0,19	827,9	45	0,09	382,3
21	0,18	790,4	46	0,09	375,2
22	0,18	755,8	47	0,09	368,4
23	0,17	724,0	48	0,09	360,7
24	0,17	694,5	49	0,09	353,3
25	0,16	667,3	50	0,08	346,2
Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]	Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]
51	0,08	339,4	76	0,06	227,1
52	0,08	332,8	77	0,06	224,1
53	0,08	326,5	78	0,06	221,2
54	0,08	320,4	79	0,06	218,4
55	0,08	314,5	80	0,05	215,7
56	0,08	308,9	81	0,05	213,0
57	0,07	303,4	82	0,05	210,4
58	0,07	298,2	83	0,05	207,8
59	0,07	293,1	84	0,05	205,3
60	0,07	288,1	85	0,05	202,9
61	0,07	283,4	86	0,05	200,5
62	0,07	278,8	87	0,05	198,2
63	0,07	274,3	88	0,05	195,9
64	0,07	270,0	89	0,05	193,7
65	0,07	265,8	90	0,05	191,6
66	0,07	261,8	91	0,05	189,4
67	0,06	257,8	92	0,05	187,4
68	0,06	254,0	93	0,05	185,3
69	0,06	250,3	94	0,05	183,3
70	0,06	246,7	95	0,05	181,4
71	0,06	243,2	96	0,05	179,5
72	0,06	239,8	97	0,05	177,6
73	0,06	236,5	98	0,04	175,8
74	0,06	233,3	99	0,04	174,0
75	0,06	230,2	100	0,04	172,3

Figure 1: risultati dettagliati della sovrappressione generata dalla deflagrazione di gas naturale con il metodo BST.

## METANO-IDROGENO

Dati di input per il metodo TNO		
Flammable mass in cloud	<b>185</b>	kg
Unconfined explosion strength	<b>7</b>	
Unconfined explosion efficiency	100	%
Number of confined sources	<b>1</b>	
Option for specifying size of confined sources	<b>Use volumes</b>	
Strength of confined source	Volume of confined source [m3]	
7	3240	
Range spaziale		
Minimum distance	<b>0</b>	m
Maximum distance	<b>100</b>	m
Distance step size	<b>1</b>	m
Quantità calcolate		
Unconfined energy	<b>0</b>	kJ
Confined energies	<b>9,9E+06</b>	kJ

Figura 106: Input per i calcoli di esplosione di miscela metano-idrogeno con il metodo TNO Multi-Energy.

Distance [m]	Overpressure 1 [bar]	Distance [m]	Overpressure 1 [bar]
0	1,01		
1	1,01	26	0,88
2	1,01	27	0,86
3	1,01	28	0,83
4	1,01	29	0,81
5	1,01	30	0,78
6	1,01	31	0,76
7	1,01	32	0,73
8	1,01	33	0,71
9	1,01	34	0,68
10	1,01	35	0,66
11	1,01	36	0,64
12	1,01	37	0,62
13	1,01	38	0,60
14	1,01	39	0,58
15	1,01	40	0,56
16	1,01	41	0,54
17	1,01	42	0,52
18	1,01	43	0,51
19	1,01	44	0,49
20	1,00	45	0,47
21	0,99	46	0,46
22	0,97	47	0,45
23	0,95	48	0,43
24	0,93	49	0,42
25	0,91	50	0,41
Distance [m]	Overpressure 1 [bar]	Distance [m]	Overpressure 1 [bar]
51	0,39	76	0,21
52	0,38	77	0,20
53	0,37	78	0,20
54	0,36	79	0,20
55	0,35	80	0,19
56	0,34	81	0,19
57	0,33	82	0,19
58	0,32	83	0,18
59	0,31	84	0,18
60	0,30	85	0,18
61	0,29	86	0,17
62	0,29	87	0,17
63	0,28	88	0,17
64	0,27	89	0,17
65	0,26	90	0,16
66	0,26	91	0,16
67	0,25	92	0,16
68	0,25	93	0,16
69	0,24	94	0,15
70	0,24	95	0,15
71	0,23	96	0,15
72	0,23	97	0,15
73	0,22	98	0,15
74	0,22	99	0,14
75	0,21	100	0,14

Figura 107: risultati dettagliati della sovrappressione generata dalla deflagrazione di una miscela metano-idrogeno con il metodo TNO Multi-Energy.

## IDROGENO

Dati di input per il metodo TNO	
Flammable mass in cloud	<b>78</b> kg
Unconfined explosion strength	<b>10</b>
Unconfined explosion efficiency	100 %
Number of confined sources	<b>1</b>
Option for specifying size of confined sources	<b>Use volumes</b>
Strength of confined source	Volume of confined source [m3]
10	3240
Range spaziale	
Minimum distance	<b>0</b> m
Maximum distance	<b>100</b> m
Distance step size	1 m
Quantità calcolate	
Unconfined energy	0 kJ
Confined energies	9,36E+06 kJ

Figura 108: Input per i calcoli di esplosione di idrogeno con il metodo TNO Multi-Energy.

Dati di input per il metodo BST		
Flammable mass in cloud	<b>78</b>	kg
Mach number supplied	<b>Yes</b>	
Mach number	<b>5,2</b>	
Correction for the ground effect	1	
Ignition sources - ('Soft' is the only possible value at present)	Soft	
Range spaziale		
Minimum distance	<b>0</b>	m
Maximum distance	<b>100</b>	m
Distance step size	1	m
Quantità calcolate		
Ignition energy	9,36E+06	kJ
Modified ignition energy	9,36E+06	kJ
Overpressure [bar]	Radius [m]	Mass [kg]
0,02068	550,157	78
0,1379	109,372	78
0,2068	76,8045	78

Figura 109: Input per i calcoli di esplosione di idrogeno con il metodo BST.

Distance [m]	Overpressure 1 [bar]	Distance [m]	Overpressure 1 [bar]
0	19,7097		
1	19,7097	26	1,52358
2	19,7097	27	1,39451
3	19,7097	28	1,28219
4	19,7097	29	1,18386
5	19,7097	30	1,09729
6	19,7097	31	1,02067
7	19,7097	32	0,952523
8	19,7097	33	0,891641
9	19,7097	34	0,837018
10	19,7097	35	0,787816
11	16,4737	36	0,743331
12	12,5946	37	0,702971
13	9,8816	38	0,666233
14	7,927	39	0,632688
15	6,48201	40	0,60197
16	5,38939	41	0,573763
17	4,54665	42	0,547793
18	3,88514	43	0,523824
19	3,3577	44	0,50165
20	2,93124	45	0,481092
21	2,58209	46	0,46199
22	2,29296	47	0,444206
23	2,05108	48	0,427618
24	1,84683	49	0,412116
25	1,67288	50	0,397604
Distance [m]	Overpressure 1 [bar]	Distance [m]	Overpressure 1 [bar]
51	0,383996	76	0,20225
52	0,371216	77	0,198392
53	0,359195	78	0,194674
54	0,347871	79	0,19109
55	0,337189	80	0,187633
56	0,327099	81	0,184296
57	0,317556	82	0,181073
58	0,308519	83	0,177958
59	0,299951	84	0,174948
60	0,291819	85	0,172035
61	0,284091	86	0,169217
62	0,27674	87	0,166488
63	0,26974	88	0,163845
64	0,263068	89	0,161283
65	0,256702	90	0,158799
66	0,250624	91	0,15639
67	0,244814	92	0,154052
68	0,239256	93	0,151782
69	0,233935	94	0,149578
70	0,228836	95	0,147436
71	0,223948	96	0,145355
72	0,219256	97	0,143331
73	0,21475	98	0,141362
74	0,210421	99	0,139446
75	0,206257	100	0,137582

Figura 110: risultati dettagliati della sovrappressione generata dalla detonazione di una nube di idrogeno con il metodo TNO Multi-Energy.

Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]	Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]
0	20,27	6512,2			
1	20,27	6186,7	26	0,82	699,8
2	20,27	5969,6	27	0,78	679,5
3	20,27	5568,1	28	0,73	660,8
4	20,27	4897,6	29	0,70	643,5
5	20,27	4188,7	30	0,66	627,4
6	20,27	3554,5	31	0,63	612,3
7	20,27	3025,1	32	0,61	598,0
8	15,59	2595,7	33	0,58	584,3
9	9,00	2251,0	34	0,56	571,3
10	6,23	1974,4	35	0,54	558,7
11	4,76	1751,3	36	0,52	546,5
12	3,84	1570,3	37	0,51	534,5
13	3,20	1422,2	38	0,49	522,8
14	2,72	1300,0	39	0,48	511,3
15	2,35	1198,2	40	0,46	499,9
16	2,06	1112,9	41	0,45	488,5
17	1,82	1040,7	42	0,44	477,3
18	1,62	979,1	43	0,43	466,1
19	1,46	926,2	44	0,42	454,9
20	1,32	880,5	45	0,41	443,7
21	1,20	840,6	46	0,40	432,4
22	1,10	805,6	47	0,39	422,4
23	1,02	774,6	48	0,38	413,7
24	0,94	747,0	49	0,37	405,4
25	0,88	722,2	50	0,30	379,7
Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]	Distance [m]	Overpressure [bar]	Impulse [N.s/m <sup>2</sup> ]
51	0,35	389,6	76	0,21	262,7
52	0,35	382,2	77	0,21	259,4
53	0,34	375,1	78	0,20	256,1
54	0,33	368,2	79	0,20	252,9
55	0,32	361,6	80	0,20	249,7
56	0,32	355,3	81	0,19	246,7
57	0,31	349,1	82	0,19	243,7
58	0,30	343,1	83	0,19	240,8
59	0,30	337,4	84	0,18	238,0
60	0,29	331,8	85	0,18	235,2
61	0,28	326,5	86	0,18	232,5
62	0,28	321,3	87	0,17	229,9
63	0,27	316,2	88	0,17	227,3
64	0,27	311,3	89	0,17	224,8
65	0,26	306,6	90	0,17	222,3
66	0,26	302,0	91	0,16	219,9
67	0,25	297,6	92	0,16	217,5
68	0,25	293,2	93	0,16	215,2
69	0,24	289,0	94	0,16	213,0
70	0,24	285,0	95	0,16	210,7
71	0,23	281,0	96	0,16	208,6
72	0,23	277,1	97	0,15	206,5
73	0,22	273,4	98	0,15	204,4
74	0,22	269,7	99	0,15	202,3
75	0,21	266,2	100	0,15	200,3

Figura 111: risultati dettagliati della sovrappressione generata dalla detonazione di una nube di idrogeno con il metodo BST.

