

	<b>PROGETTISTA</b>  <i>Tecnologia Ricerca Rischi</i>	<b>COMMESSA</b>	<b>UNITA'</b> -
	<b>LOCALITA'</b> REGIONE LIGURIA	<b>REL-MEC-E-15019</b>	
	<b>PROGETTO / IMPIANTO</b> FSRU Alto Tirreno e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti		<b>Rev.</b> 0

Rif. TRR: 72438

**EMERGENZA GAS  
INCREMENTO DI CAPACITÀ DI RIGASSIFICAZIONE (DL 17.05.2022, n. 50)**

**FSRU Alto Tirreno e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti**

**Rapporto Preliminare di Sicurezza  
per la fase di Nulla Osta di Fattibilità (NOF)  
ai sensi del D.Lgs. 105/15**

**Allegato C.4.1.1.9  
Studio di approfondimento RPT**

0	Emissione per permessi	C. Nicoli	G.Romano	G. Lanza	Febbraio 2024
<b>Rev.</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Elaborato</b>	<b>Verificato</b>	<b>Approvato</b>	<b>Data</b>



# **FSRU Alto Tirreno e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti**

**Rapporto Preliminare di Sicurezza  
per la fase di Nulla Osta di Fattibilità (NOF)  
ai sensi del D.Lgs. 105/15**

**Allegato C.4.1.1.9  
Studio di approfondimento RPT**



## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>IL FENOMENO DELLA TRANSIZIONE RAPIDA DI FASE.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>TEST SPERIMENTALI SU LARGA SCALA .....</b>	<b>8</b>
3.1	Test “Burro” (1980).....	8
3.2	Test “Coyote” (1981).....	9
3.3	Test “Lorient” (1982) .....	11
3.4	Test “Falcon” (1987) .....	12
<b>4</b>	<b>SCENARIO 1R .....</b>	<b>13</b>
4.1	Approfondimento delle ipotesi incidentali relative al trasferimento liquido-liquido condotto a valle del rapporto preliminare di sicurezza .....	14
4.1.1	Ipotesi n. 1R a .....	14
4.1.2	Ipotesi n. 1R b.....	15
4.1.3	Ipotesi n. 1R c .....	16
4.2	Approfondimento degli scenari incidentali relativi al trasferimento liquido-liquido condotto a valle del rapporto preliminare di sicurezza .....	18
4.3	Definizione dell’energia e della sovrappressione liberate a seguito di RPT causata dal rilascio di GNL dalle manichette di carico da FSRU a nave metaniera .....	20
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>23</b>

## ALLEGATI

**Allegato 1** – Elaborato TNO





## 1 INTRODUZIONE

La transizione rapida di fase (RPT) è un fenomeno di esplosione fisica legato allo sversamento di grandi quantità di GNL in acqua. Il fenomeno, analizzato mediante diverse campagne sperimentali negli anni '80, è stato ritenuto non in grado di generare sovrappressioni significative, se non nelle immediate vicinanze del punto di rilascio, e conseguentemente non atto a causare un danno strutturale <sup>(1)</sup>.

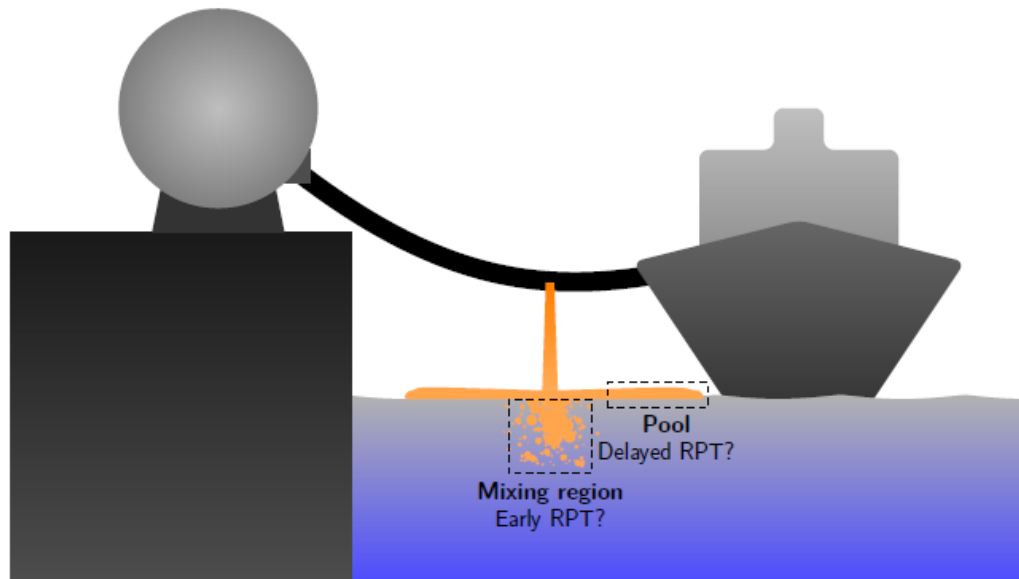


Figura 1 – Schematizzazione di un rilascio di GNL in acqua

Lo sversamento di GNL in acqua è caratterizzato dalle seguenti fasi:

1. Rottura del contenimento: a causa di un evento incidentale, il contenimento di GNL viene rotto e, se al di sopra del livello del mare, il GNL cade sulla superficie dell'acqua sotto forma di getto.
2. Impatto del getto: il getto di GNL impatta sulla superficie dell'acqua e si rompe in goccioline separate.
3. Miscelazione delle gocce con l'acqua: se la quantità di moto del getto è sufficientemente grande, le gocce inizialmente penetrano la superficie e si immergono nell'acqua. Si forma così una regione di miscelazione caotica.
4. Formazione del *pool* e spandimento: in virtù del fatto che la densità del GNL è circa la metà di quella dell'acqua, le gocce di GNL galleggiano e eventualmente riemergono sulla superficie qualora immerse. Si realizza quindi una "piscina" di GNL che si diffonde sulla superficie di acqua.
5. *Boil-off*: la temperatura di ebollizione del GNL è pari a circa  $-162^{\circ}\text{C}$ , mentre l'acqua mantiene una temperatura di circa  $0^{\circ}\text{C}$ , quindi durante il suo spandimento la piscina inizia a bollire. Poiché il metano è di gran lunga il componente più volatile, il vapore risultante è quasi esclusivamente metano. Ciò provoca un graduale cambiamento di composizione, che aumenta le quantità relative degli alcani più pesanti come etano, propano e butano.





A seconda delle modalità di sversamento, si possono verificare due tipologie di RPT:

- RPT precoce: la transizione rapida di fase avviene all'interno della regione di miscelazione in un momento qualsiasi durante l'evento di sversamento;
- RPT ritardato: la transizione rapida di fase avviene all'interno della "piscina" in spandimento, non all'interno della regione di miscelazione. Tipicamente avviene solo dopo una quantità di tempo considerevole dall'inizio dello sversamento di GNL (ordine dei minuti).

La trattazione presentata di seguito consta di tre parti: una prima parte teorica in cui viene descritta la fisica del problema, una seconda parte in cui vengono presentate le evidenze sperimentali emerse durante le prove di sversamento di grandi quantità di GNL in acqua e una terza parte in cui viene analizzato il caso specifico dello sversamento di GNL provocato dal rilascio dalle manichette flessibili di scarico GNL da FSRU a nave metaniera (scenario 1R).





## 2 IL FENOMENO DELLA TRANSIZIONE RAPIDA DI FASE

Il meccanismo alla base della transizione rapida di fase è stato oggetto di ricerca per diversi gruppi di lavoro a seguito della sua scoperta negli anni '60 <sup>(2), (3), (4)</sup>.

La teoria ad oggi più diffusa <sup>(5)</sup> sostiene che il fenomeno si realizzi in 5 fasi:

1. **Ebollizione a film:** la differenza di temperatura tra l'acqua di mare e il GNL è talmente grande che si instaura un regime di ebollizione a film. Ciò significa che nel momento in cui si realizza lo sversamento, la pozza o la goccia di GNL rimane isolata dall'acqua da un film di vapore composto principalmente da metano. Conseguentemente, il flusso di calore rimane relativamente basso e l'evaporazione rimane in un regime di quasi-equilibrio. Tutta l'energia trasferita al GNL viene spesa per la sua evaporazione e la sua temperatura rimane vicina al punto di bolla, che inizialmente è di circa  $-162^{\circ}\text{C}$ .
2. **Collasso del film:** a prescindere dalla tipologia di RPT (anticipato o ritardato), in base alla quale varia il suo meccanismo, ad un certo punto il film collassa e il GNL viene in contatto con l'acqua determinando un aumento di diversi ordini di grandezza del flusso di calore trasferito da una fase all'altra.
3. **Surriscaldamento rapido al SLT (*superheat limit temperature*):** poiché l'interfaccia liquido-liquido presenta relativamente pochi siti di nucleazione, il tasso di evaporazione inizialmente non è in grado di tenere il passo con il forte aumento del flusso di calore. Gran parte del calore viene speso per surriscaldare il GNL, ossia il liquido viene riscaldato significativamente oltre la sua temperatura di ebollizione. Il liquido surriscaldato si trova in uno stato metastabile e può passare allo stato di equilibrio corrispondente se disturbato. Se non disturbato a sufficienza, esiste una temperatura massima alla quale il liquido deve passare, indipendentemente dalle perturbazioni esterne. Questo è chiamato limite di surriscaldamento.
4. **Nucleazione omogenea:** una volta approssiato il limite di surriscaldamento, la vaporizzazione del liquido avviene spontaneamente all'interno di tutto il suo volume per nucleazione omogenea. Questo è l'inizio della transizione rapida da uno stato liquido ad uno stato bifase.
5. **Espansione esplosiva:** se fosse in equilibrio meccanico con l'ambiente circostante, il nuovo stato occuperebbe oltre 100 volte il volume dello stato di liquido surriscaldato originale. Il fluido è inizialmente costretto a rientrare nel volume originale, quindi la pressione aumenta drasticamente prima che abbia il tempo di espandersi. Poiché questa transizione avviene rapidamente, viene osservata come una forte e distruttiva esplosione di vapore. L'evento comporta onde di pressione e un notevole rilascio di energia attraverso il lavoro di espansione.

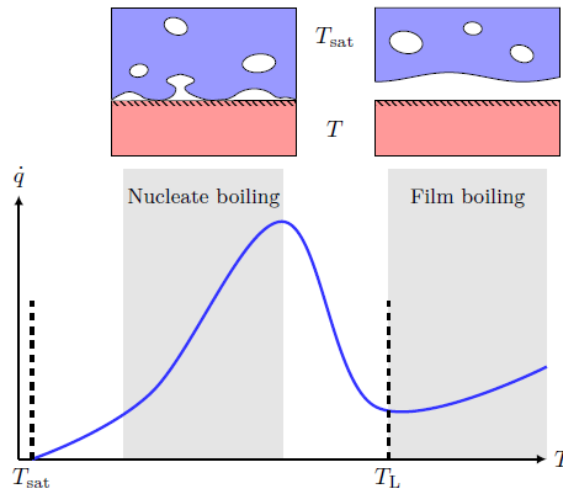
Sulla base di quanto sopra riportato, la transizione rapida di fase può essere classificata come un'esplosione fisica, in quanto non coinvolge reazioni di combustione, bensì vede come evento innescante il collasso del film e il conseguente contatto tra GNL e acqua.





La difficoltà principale nel prevedere la RPT è proprio la previsione di questa fase, il cui meccanismo varia a seconda del fatto che si tratti una RPT precoce (ebollizione delle gocce) o una RPT ritardata (ebollizione del pool).

Nel caso di RPT ritardata, rilevante per il caso di *pool boiling*, si fa tipicamente riferimento alla curva di ebollizione rappresentata in Figura 2.



**Figura 2 – Curva di ebollizione per pool boiling**

Nel caso in esame, il GNL assume il ruolo di fluido in ebollizione e l'acqua di superficie calda. Secondo la teoria descritta sopra, la RPT si attiva nel momento in cui il film collassa, che nel caso di *pool boiling* è definito dalla posizione sulla curva di ebollizione:

$$\text{se } T_L < T_w : \text{Film boiling (no RPT)} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\text{se } T_L > T_w : \text{Contatto liquido-liquido (rischio di RPT)} \quad \text{Eq. (2)}$$

dove:  $T_w$  = temperatura dell'acqua,  $T_L$  = temperatura di Leidenfrost.

La temperatura di Leidenfrost di un fluido tipo GNL è solitamente difficile da prevedere con una buona accuratezza, ma generalmente è di poco inferiore alla temperatura critica del fluido <sup>(5)</sup>:

$$T_L \approx \frac{27}{32} T_{\text{crit}} \quad \text{Eq. (3)}$$

La temperatura critica per una miscela tipo di GNL è intorno ai  $-70^\circ\text{C}$ . Considerando che normalmente l'acqua con cui il GNL viene in contatto non ghiaccia, si può assumere che la sua temperatura sia intorno agli  $0^\circ\text{C}$ . Questo significa che si ricade nell'Equazione 1 e quindi non si realizza RPT.

Tuttavia, questo è vero solo per il GNL con una composizione pari a quella iniziale (stoccata). Man mano che il *boil-off* procede la frazione di metano all'interno del GNL diminuisce, pertanto sulla base dell'Equazione 3 la temperatura critica della miscela e la temperatura di Leidenfrost aumentano. Nel momento in cui la





temperatura di Leidenfrost raggiunge la temperatura dell'acqua, il rischio di RPT si concretizza (Equazione 1).

Pertanto, la sfida di prevedere l'innesco di una RPT ritardata si riduce alla previsione di quando e dove si verifica la condizione  $T_L > T_w$ . Traducendo l'affermazione in termini di frazione di metano necessaria per soddisfare il criterio di innesco, questo significa:

- Il GNL deve bollire fino a raggiungere una concentrazione di metano pari a circa il 30-50 mol% prima di soddisfare la condizione per cui  $T_L \sim T_w$ . Ciò dipende dalle quantità relative degli alcani più pesanti in miscela.
- Una volta soddisfatta la condizione di innesco, rimane solo il 10-20% della quantità originale di GNL.

Per quanto riguarda la RPT precoce, essa si realizza nella regione di miscelazione caotica al di sotto del punto di impatto del getto di GNL. Questa regione contiene gocce di GNL in fase di ebollizione immerse nell'acqua, che inizialmente si muovono verso il basso per inerzia, ma alla fine tornano in superficie per galleggiamento. Secondo la teoria generale della RPT, l'evento di innesco è avviato da un improvviso e significativo contatto liquido-liquido. La previsione di questo step per una RPT precoce è molto più difficile che nel caso di RPT ritardata, poiché il grado di contatto liquido-liquido non è più governato da una semplice curva di ebollizione, bensì una sua descrizione necessiterebbe di una simulazione multifase dettagliata della regione di miscelazione su scale temporali sufficientemente lunghe da poter descrivere il fenomeno. Per questo motivo ad oggi si considera la RPT precoce un problema irrisolto nell'industria del GNL.







### 3 TEST SPERIMENTALI SU LARGA SCALA

Come anticipato all'interno della Sezione 2, durante gli anni '80 sono state eseguite diverse campagne sperimentali di sversamento di GNL in acqua su larga scala.

Tra le principali si citano:

- Burro tests (1980)
- Coyote tests (1981)
- Lorient tests (1982)
- Falcon tests (1987)

Per ogni campagna sperimentale si riportano di seguito le condizioni investigate e i principali risultati ottenuti.

#### 3.1 TEST "BURRO" (1980)

I test "Burro" sono stati eseguiti dal Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) al Naval Weapons Center a China Lake, California, sponsorizzati dal Dipartimento di Energia U.S. e dal Gas Research Institute.

Sono stati simulati un totale di 8 rilasci di GNL investigando le condizioni operative nei seguenti range <sup>(6)</sup>:

- volume: 24 - 39 m<sup>3</sup>;
- portata: 11.3 - 18.4 m<sup>3</sup>/min.

I fenomeni di transizione rapida di fase sono stati osservati durante i test n. 6 e n.9, le cui condizioni operative sono riportate nella Tabella 1.

Test	Volume spillato	Portata spillata	Durata del rilascio	Composizione		
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /min]	[s]	[% mol C <sub>1</sub> ]	[% mol C <sub>2</sub> ]	[% mol C <sub>3</sub> ]
Burro-6	27,5	12,8	129	92,8	5,8	1,43
Burro-9	24,2	18,4	79	83,1	13,9	3,0

Tabella 1 – Condizioni operative RPT Burro tests; in verde i test con la sovrappressione maggiore <sup>(6)</sup>

La RPT più severa è stata registrata durante il test Burro-9, quando ad una distanza di 30 m dal punto di rilascio è stata misurata una sovrappressione pari a 0,05 bar <sup>(7)</sup>. Per quanto riguarda la tipologia di RPT, durante il test Burro-9 sono state registrate numerose transizioni di fase precoci, mentre durante il Burro-6 sono state registrate transizioni di fasi ritardate.





### 3.2 TEST “COYOTE” (1981)

I test “Coyote”, eseguiti sempre dal Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) al Naval Weapons Center a China Lake, California, sono una continuazione dei test “Burro” e sono stati progettati appositamente per approfondire il fenomeno della transizione rapida di fase.

Sono stati simulati un totale di 13 rilasci di GNL investigando le condizioni operative nei seguenti range <sup>(6)</sup>:

- volume: 3 - 14 m<sup>3</sup>;
- portata: 6 - 19 m<sup>3</sup>/min.

I fenomeni di transizione rapida di fase sono stati osservati per i test n.1, n.4, n.8 e n.10, le cui condizioni operative sono riportate nella Tabella 2.

Test	Volume spillato	Portata spillata	Durata del rilascio	Composizione		
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /min]	[s]	[% mol C <sub>1</sub> ]	[% mol C <sub>2</sub> ]	[% mol C <sub>3</sub> ]
Coyote-1	14	6	45,8	n.d.	n.d.	n.d.
Coyote-4	3,8	6,8	51,9	78,8	17,3	3,9
	6	12,1	92,4			
	5,2	18,5	141,2			
Coyote-8	3,7	7,4	30	99,7	0,3	0
	5,4	14,2	23			
	9,7	19,4	30			
Coyote-10	4,6	13,8	105,3	70,2	17,2	12,6
	4,5	19,3	147,3			
	5	18,8	143,5			

Tabella 2 – Condizioni operative RPT Coyote tests; in verde i test con la sovrappressione maggiore <sup>(6)</sup>

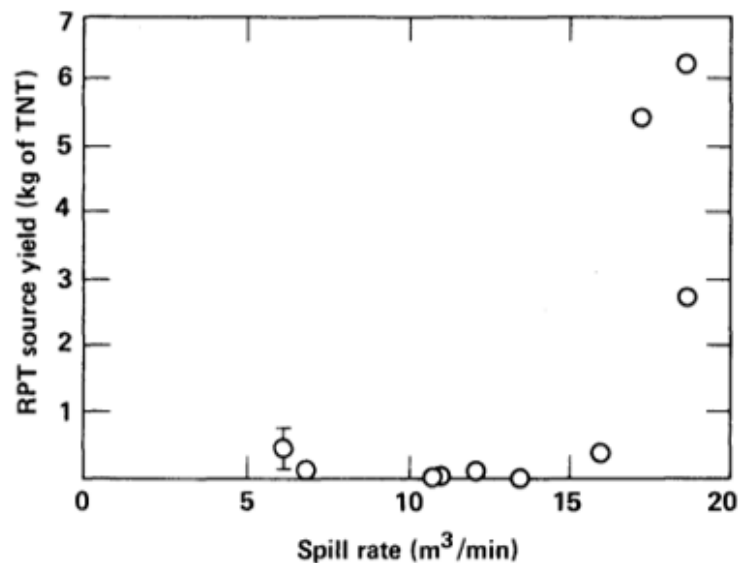


Figura 3 – Test Coyote <sup>(8)</sup>





Le RPT più severe sono state registrate durante i test Coyote-8 e Coyote-10, quando in corrispondenza del punto di rilascio è stata misurata una sovrappressione pari a circa 1 bar <sup>(6)</sup>. Per quanto riguarda la tipologia di RPT, fatta eccezione per il test Coyote-1, tutte le transizioni di fase registrate erano del tipo precoce.

Dai risultati riportati in Tabella 2 è possibile osservare un legame tra la sovrappressione generata e la portata rilasciata: all'aumentare della portata rilasciata, la sovrappressione aumenta. I dati indicano una soglia apparente intorno ai 15 m<sup>3</sup>/min. La stessa dipendenza è confermata anche dai dati riportati all'interno di Figura 3.





### 3.3 TEST “LORIENT” (1982)

I test “Lorient” sono stati eseguiti a Lorient, Francia dalla società Gaz De France in collaborazione con Shell e British Gas, al fine di simulare la completa rottura dei bracci di carico delle navi metaniere.

Sono stati simulati un totale di 28 rilasci di GNL investigando le condizioni operative nei seguenti range <sup>(6)</sup>:

- volume: 1 - 9 m<sup>3</sup>;
- portata: 38,3 m<sup>3</sup>/min.

Durante i test sono stati osservati numerosi fenomeni di transizione rapida di fase, con la massima esplosione pari a 4.15 kg di TNT equivalente <sup>(9)</sup>.

Dalle immagini dei test riportate in Figura 4 è possibile osservare come a seguito del rilascio di 9 m<sup>3</sup> di GNL non siano osservabili danneggiamenti significativi alle condotte di rilascio GNL.



Figura 4 – Istantanee test Lorient, 3 ottobre 1982





### 3.4 TEST “FALCON” (1987)

I test “Falcon” sono stati eseguiti dal Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) al Frenchman Flat a Nevada Test Site, sponsorizzati dal Dipartimento del Trasporto U.S. e dal Gas Research Institute.

Sono stati simulati un totale di 5 rilasci di GNL investigando le condizioni operative nei seguenti range <sup>(6)</sup>:

- volume: 21 - 67 m<sup>3</sup>;
- portata: 8.7 - 30.3 m<sup>3</sup>/min.

I fenomeni di transizione rapida di fase sono stati osservati durante i test n. 4 e n. 5, le cui condizioni operative sono riportate nella Tabella 3.

Test	Volume spillato	Portata spillata	Durata del rilascio	Composizione		
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /min]	[s]	[% mol C <sub>1</sub> ]	[% mol C <sub>2</sub> ]	[% mol C <sub>3</sub> ]
Falcon-4	44,9	8,7	309,7	91	8	
Falcon-5	43,9	30,3	86,9	88		10

**Tabella 3 – Condizioni operative RPT Falcon tests; in verde i test con la sovrappressione maggiore <sup>(6)</sup>**

Sulla base delle informazioni riportate in letteratura, non è possibile definire il valore di sovrappressione generato a seguito delle due transizioni rapide di fase.





## 4 SCENARIO 1R

Nel paragrafo seguente si analizza il fenomeno della transizione rapida di fase nel caso di rilascio di GNL dalle manichette flessibili di scarico da nave metaniera a FSRU (scenario 1R).

Il Gas Naturale Liquefatto (GNL) viene trasferito dai serbatoi della nave metaniera ai serbatoi della FSRU mediante bracci di carico collegati a manichette flessibili. Nell'analisi di rischio presentata all'interno del Rapporto Preliminare di Sicurezza si è considerato l'uso contemporaneo, durante le operazioni di carico, di 4 manichette flessibili di diametro nominale 12".

Rispetto allo scenario 12R, che riguarda il possibile rilascio di GNL dalle manichette flessibili di carico da FSRU a nave metaniera di piccola/media taglia (metaniere *small scale* LNG), la portata di GNL trasferita nello scenario 1R è pari a circa 2000 m<sup>3</sup>/h, contro i 500 m<sup>3</sup>/h di GNL trasferiti da FSRU a nave metaniera *small scale*. Per questo motivo nel proseguo della trattazione si farà riferimento conservativamente allo scenario 1R e non allo scenario 12R.

L'analisi presentata di seguito si compone delle seguenti parti:

1. Approfondimento delle ipotesi incidentali relative al trasferimento liquido-liquido condotto a valle del Rapporto Preliminare di Sicurezza
  - a. Ridefinizione dell'ipotesi 1R
  - b. Aggiornamento delle frequenze di accadimento delle ipotesi 1R(a), 1R(b), 1R(c)
2. Approfondimento degli scenari incidentali relativi al trasferimento liquido-liquido condotto a valle del Rapporto Preliminare di Sicurezza
  - a. Aggiornamento dei tempi di intervento dei sistemi di sicurezza
  - b. Aggiornamento delle simulazioni degli scenari incidentali
3. Definizione dell'energia e della sovrappressione liberate a seguito di RPT causata dal rilascio di GNL dalle manichette di carico da FSRU a nave metaniera
  - a. Derivazione del valore di energia liberata a seguito di RPT tramite confronto tra i parametri di portata e quantità di GNL derivati dalle simulazioni di cui al punto 2.b. e i corrispondenti valori disponibili in letteratura
  - b. Confronto del valore di energia ricavato al punto 3.a. con il valore di energia di impatto ricavato da simulazioni di collisione navale attraverso il supporto della simulazione numerica strutturale al fine di determinare la resistenza meccanica della nave al fenomeno di transizione rapida di fase
  - c. Definizione della sovrappressione equivalente all'energia liberata ricavata al punto 3.a. attraverso l'utilizzo del software Effects 7.52 edito da TNO.





#### 4.1 APPROFONDIMENTO DELLE IPOTESI INCIDENTALI RELATIVE AL TRASFERIMENTO LIQUIDO-LIQUIDO CONDOTTO A VALLE DEL RAPPORTO PRELIMINARE DI SICUREZZA

Terminata la prima stesura del Rapporto Preliminare di Sicurezza consegnato a luglio 2023, l'estensore del RPdS ha avuto la possibilità di salire a bordo della Golar Tundra per approfondire i sistemi di sicurezza installati sulla nave. Questo ha consentito ai tecnici SNAM e all'estensore del RPdS di assistere ad una serie di test funzionali eseguiti a bordo nave sotto il coordinamento del comandante e dell'equipaggio della Golar Tundra. Tali test hanno permesso di verificare in campo le modalità e i tempi di intervento dei sistemi di sicurezza in caso di rilascio di GNL durante le operazioni di trasferimento liquido-liquido, consentendo al tempo stesso di ridefinire alcuni scenari rispetto a quanto riportato all'interno del RPdS.

In riferimento allo scenario 1R, l'analisi di rischio condotta nell'ambito del Rapporto Preliminare di Sicurezza riportava una schematizzazione delle ipotesi incidentali assimilabili a quelle della rottura di una tubazione (rottura parziale e rottura totale). Gli approfondimenti postumi al RPdS hanno permesso di rivalutare queste ipotesi al fine di renderle rappresentative della reale rottura di una manichetta e del contributo che le condizioni meteo-marine avverse potrebbero apportare al fenomeno. Pertanto, le ipotesi relative allo scenario 1R sono state rivalutate e sono state individuate tre casistiche:

- 1R (a): rottura significativa (20% DN) del tratto flessibile di una manichetta di travaso;
- 1R (b): "strappo" (100% DN) dei tratti flessibili delle 4 manichette di travaso a causa dell'allontanamento delle due navi generato da condizioni meteo-marine avverse;
- 1R (c): "decoupling" delle 4 manichette di travaso a causa dell'allontanamento delle due navi generato da condizioni meteo-marine avverse e intervento del sistema ERS (emergency release shutdown).

##### 4.1.1 Ipotesi n. 1R a

La presente ipotesi si riferisce alla possibilità che durante le operazioni di carico FSRU avvenga la rottura significativa del tratto flessibile di una delle manichette di travaso. Si analizza la sola rottura significativa in quanto le procedure di manutenzione periodica adottate nell'ambito del SGS permettono di escludere la rottura totale delle manichette.

Considerando 75 operazioni di scarico della nave metaniera all'anno ed un tempo effettivo di scarico del GNL pari a circa 21 h a scarico, è possibile calcolare un fattore di utilizzo delle manichette pari a 1.600 ore/anno. Combinando tale valore con l'occorrenza di perdita significativa dai bracci di carico ricavata dal Report IOGP 434-01 ed. 2019 si ottiene una frequenza finale dell'ipotesi pari a  $1,46 \cdot 10^{-4}$  occ/anno.

**Frequenza finale 1R a:  $1,46 \cdot 10^{-4}$  occ/anno**





La frequenza finale dell'ipotesi risulta superiore a  $10^{-6}$  occ/anno, pertanto l'ipotesi risulta credibile secondo i criteri adottati e sarà ulteriormente sviluppata nei paragrafi successivi.

#### 4.1.2 Ipotesi n. 1R b

La presente ipotesi è estremamente cautelativa e si riferisce alla possibilità che durante le operazioni di carico FSRU si verifichino condizioni meteo marine avverse così repentine e severe da non consentire l'interruzione controllata della scarica, indurre moti ondososi tali da danneggiare gli ormeggi al punto di allontanare le due navi e il contemporaneo fallimento delle protezioni ERS, con conseguente condizione di strappo delle manichette di trasferimento.

La frequenza delle condizioni meteo avverse severe è stata calcolata sulla base di documenti di progetto, già trasmessi in fase di istanza al Commissario e disponibili in Allegato C.4.1-B<sup>1</sup>. In particolare, considerando che il sistema di ormeggio è stato progettato con un valore di intensità del vento massimo di 24.1 m/s (circa 47 nodi) per periodi di ritorno di 100 anni, dallo studio meteomarinario sono state cautelativamente individuate le occorrenze annue di eventi con intensità del vento superiori a 20 m/s (circa 39 nodi) per il sito di riferimento, calcolando un valore pari a  $2 \cdot 10^{-5}$  occ/anno.

Annuale - Ws (m/s) /Dir(*N) -Dati DHI - FSRU- Alto Tirreno - 44.28°N 8.51°E - Frequenza di Occorrenza(%)																						
Dir (°N)	Ws(m/s)																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Total
0.0	0.549	1.540	2.022	2.091	2.012	1.768	1.487	1.246	0.962	0.749	0.594	0.413	0.294	0.152	0.065	0.037	0.016	0.006	0.003	0.001	0.001	16.010
30.0	0.591	1.548	1.280	0.636	0.274	0.110	0.067	0.033	0.025	0.016	0.008	0.007	0.003	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.604
60.0	0.627	1.623	1.346	0.776	0.398	0.149	0.046	0.013	0.005	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.990
90.0	0.629	1.722	1.897	1.227	0.690	0.365	0.144	0.062	0.019	0.007	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.774
120.0	0.611	1.714	2.091	1.362	0.732	0.395	0.219	0.102	0.034	0.021	0.015	0.012	0.006	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	7.319
150.0	0.507	1.544	1.788	1.114	0.544	0.231	0.097	0.039	0.021	0.013	0.007	0.008	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	5.923
180.0	0.408	1.162	1.508	1.084	0.701	0.446	0.267	0.153	0.073	0.040	0.023	0.015	0.013	0.006	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	5.907
210.0	0.329	0.703	0.885	0.905	0.756	0.546	0.365	0.267	0.184	0.123	0.097	0.052	0.044	0.032	0.014	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	5.310
240.0	0.293	0.409	0.367	0.287	0.172	0.099	0.059	0.041	0.027	0.016	0.011	0.006	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.790
270.0	0.284	0.348	0.213	0.118	0.063	0.038	0.019	0.006	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.094
300.0	0.332	0.497	0.359	0.250	0.194	0.151	0.128	0.106	0.079	0.068	0.044	0.024	0.013	0.007	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.260
330.0	0.440	1.064	1.423	1.878	2.661	3.498	4.171	4.744	4.972	4.578	3.558	2.330	1.438	0.713	0.330	0.144	0.054	0.014	0.005	0.003	0.001	38.018
Omnidir	5.600	13.875	15.179	11.728	9.198	7.795	7.069	6.813	6.404	5.637	4.361	2.873	1.817	0.920	0.428	0.193	0.075	0.021	0.008	0.003	0.002	100.000

**Tabella 4 – Estratto dallo studio meteomarinario**

Considerando 75 operazioni di scarico della nave metaniera all'anno ed un tempo effettivo di scarico del GNL pari a circa 21 h a scarico, è possibile calcolare un fattore di utilizzo delle manichette pari a 1.600 ore/anno. Combinando tale valore con l'occorrenza delle condizioni meteo avverse severe si ottiene il valore della causa della presente ipotesi pari a  $3,65 \cdot 10^{-6}$  occ/anno:

$$F = 2 \cdot 10^{-5} \text{ occ/anno} \cdot \frac{1600 \text{ ore/anno}}{8760 \text{ ore/anno}} = 3,65 \cdot 10^{-6} \text{ occ/anno}$$

<sup>1</sup> In particolare: All.C.4.1-B-Studio meteomarinario (REL-300-E-12090)







La frequenza finale dell'ipotesi è stata calcolata mediante albero di guasto.

CAUSE:

1. Condizioni meteo-marine avverse durante operazioni di scarica GNL da nave metaniera verso FSRU

MANCATO INTERVENTO PROTEZIONI:

1. Mancato intervento del sistema di sgancio rapido delle manichette ERS.

**Frequenza finale 1R b:  $1,26 \cdot 10^{-7}$  occ/anno**

La frequenza finale dell'ipotesi risulta inferiore a  $10^{-6}$  occ/anno, pertanto l'ipotesi non risulta credibile secondo i criteri adottati.

#### 4.1.3 Ipotesi n. 1R c

Al fine di approfondire l'evento, si ritiene utile valutare anche la sequenza degli eventi con l'intervento del sistema di sicurezza ERS, la cui frequenza è pari alla frequenza di condizioni meteo avverse severe durante operazioni di scarica GNL da nave metaniera verso FSRU. La presente ipotesi si riferisce alla possibilità che durante le operazioni di carico FSRU si verificano condizioni meteo marine avverse così repentine e severe da non consentire l'interruzione controllata della scarica, indurre moti ondosi tali da danneggiare gli ormeggi al punto di allontanare le due navi, in configurazione STS, considerando il funzionamento del sistema di sgancio rapido delle manichette.

La frequenza delle condizioni meteo avverse severe è stata calcolata sulla base di documenti di progetto, già trasmessi in fase di istanza al Commissario e disponibili in Allegato C.4.1-B<sup>2</sup>. In particolare, considerando che il sistema di ormeggio è stato progettato con un valore di intensità del vento massimo di 24.1 m/s (circa 47 nodi) per periodi di ritorno di 100 anni, dallo studio meteomarinario sono state cautelativamente individuate le occorrenze annue di eventi con intensità del vento superiori a 20 m/s (circa 39 nodi) per il sito di riferimento, calcolando un valore pari a  $2 \cdot 10^{-5}$  occ/anno:

<sup>2</sup>

*In particolare: All.C.4.1-B-Studio meteomarinario (REL-300-E-12090)*





Annuale - Ws (m/s) /Dir(^N) -Dati DHI - FSRU- Alto Tirreno - 44.28°N 8.51°E - Frequenza di Occorrenza(%)																						
Dir (°N)	Ws(m/s)																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Total
0.0	0.549	1.540	2.022	2.091	2.012	1.768	1.487	1.246	0.962	0.749	0.594	0.413	0.294	0.152	0.065	0.037	0.016	0.006	0.003	0.001	0.001	16.010
30.0	0.591	1.548	1.280	0.636	0.274	0.110	0.067	0.033	0.025	0.016	0.008	0.007	0.003	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.604
60.0	0.627	1.623	1.346	0.776	0.398	0.149	0.046	0.013	0.005	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.990
90.0	0.629	1.722	1.897	1.227	0.690	0.365	0.144	0.062	0.019	0.007	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.774
120.0	0.611	1.714	2.091	1.362	0.732	0.395	0.219	0.102	0.034	0.021	0.015	0.012	0.006	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	7.319
150.0	0.507	1.544	1.788	1.114	0.544	0.231	0.097	0.039	0.021	0.013	0.007	0.008	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	5.923
180.0	0.408	1.162	1.508	1.084	0.701	0.446	0.267	0.153	0.073	0.040	0.023	0.015	0.013	0.006	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	5.907
210.0	0.329	0.703	0.885	0.905	0.756	0.546	0.365	0.267	0.184	0.123	0.097	0.052	0.044	0.032	0.014	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	5.310
240.0	0.293	0.409	0.367	0.287	0.172	0.099	0.059	0.041	0.027	0.016	0.011	0.006	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.790
270.0	0.284	0.348	0.213	0.118	0.063	0.038	0.019	0.006	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.094
300.0	0.332	0.497	0.359	0.250	0.194	0.151	0.128	0.106	0.079	0.068	0.044	0.024	0.013	0.007	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.260
330.0	0.440	1.064	1.423	1.878	2.661	3.498	4.171	4.744	4.972	4.578	3.558	2.330	1.438	0.713	0.330	0.144	0.054	0.014	0.005	0.003	0.001	38.018
Omnidir	5.600	13.875	15.179	11.728	9.198	7.795	7.069	6.813	6.404	5.637	4.361	2.873	1.817	0.920	0.428	0.193	0.075	0.021	0.008	0.003	0.002	100.000

**Tabella 5 – Estratto dallo studio meteomarinario**

Considerando 75 operazioni di scarico della nave metaniera all'anno ed un tempo effettivo di scarico del GNL pari a circa 21 h a scarico, è possibile calcolare un fattore di utilizzo delle manichette pari a 1.600 ore/anno. Combinando tale valore con l'occorrenza delle condizioni meteo avverse severe si ottiene il valore della causa della presente ipotesi pari a  $3,65 \cdot 10^{-6}$  occ/anno:

$$F = 2 \cdot 10^{-5} \text{occ/anno} \cdot \frac{1600 \text{ ore/anno}}{8760 \text{ ore/anno}} = 3.65 \cdot 10^{-6} \text{ occ/anno}$$

### Frequenza finale 1R c: $3,65 \cdot 10^{-6}$ occ/anno

La frequenza finale dell'ipotesi risulta superiore a  $10^{-6}$  occ/anno, pertanto l'ipotesi risulta credibile secondo i criteri adottati e sarà ulteriormente sviluppata nei paragrafi successivi.





#### **4.2 APPROFONDIMENTO DEGLI SCENARI INCIDENTALI RELATIVI AL TRASFERIMENTO LIQUIDO-LIQUIDO CONDOTTO A VALLE DEL RAPPORTO PRELIMINARE DI SICUREZZA**

Nella valutazione degli scenari incidentali la caratterizzazione del termine sorgente e la durata del rilascio rivestono primaria importanza.

Per quanto concerne la geometria del rilascio, non ci sono variazioni rispetto a quanto presentato in fase di Rapporto Preliminare di Sicurezza. Nel caso di danneggiamento delle manichette di travaso si è considerato:

- 20% del diametro della manichetta per la perdita significativa;
- 100% del diametro della manichetta per lo strappo.

Per il calcolo della portata di efflusso nel caso di strappo delle manichette di trasferimento GNL, è stata considerata la massima portata di esercizio per ogni manichetta nell'assetto operativo di utilizzo contemporaneo di più manichette, corrispondente a un quarto della portata operativa di scarico GNL dalla nave metaniera, pari a circa 254 kg/s, nell'assetto operativo di utilizzo contemporaneo di n. 4 manichette (scenario 1R c).

Per il calcolo del quantitativo totale rilasciato è necessaria la valutazione del tempo di rilascio, coincidente con il tempo di intervento necessario per eliminare la perdita. All'interno del Rapporto Preliminare di Sicurezza il tempo di intervento utilizzato per la stima delle conseguenze relative al rilascio dalle manichette di trasferimento GNL è stato conservativamente considerato pari a 300 s, sulla base delle indicazioni fornite dal D.M. 15.05.1996 in caso di presenza di valvole motorizzate ad azionamento remoto manuale da un solo punto. Come anticipato nella sezione precedente, a seguito di una serie di test funzionali eseguiti a bordo della Golar Tundra sotto coordinamento del comandante e dell'equipaggio della nave, in presenza di tecnici SNAM e dell'estensore del Rapporto Preliminare di Sicurezza, è stato possibile verificare in campo le modalità e i tempi di intervento dei sistemi di sicurezza in caso di rilascio di GNL durante le operazioni di trasferimento liquido-liquido. Tali test funzionali hanno dimostrato tempi di intervento di gran lunga inferiori rispetto a quelli riportati nel D.M. 15.05.1996, motivo per cui nell'analisi presentata di seguito sono stati utilizzati dei tempi di intervento diversi rispetto a quelli originariamente presentati nel RPdS.

In particolare:

- manichette di trasferimento GNL – perdita significativa: 2,4 minuti, di cui 120 s per l'azionamento a distanza delle valvole motorizzate ed il tempo restante per la chiusura delle valvole di sezionamento motorizzate (calcolato sulla base del diametro delle manichette di trasferimento).

Per quanto riguarda l'ERS, il comandante della Golar Tundra ha fornito la documentazione attestante il tempo di intervento del sistema ERS come di seguito riportato:

- manichette di trasferimento GNL – strappo con intervento ERS: 37,2 secondi, tempo per il completamento dell'intervento di sgancio rapido.





Sulla base delle considerazioni riportate al paragrafo 4.1, si è proceduto ad una quantificazione degli scenari incidentali relativi alle ipotesi n. 1R a e n. 1R c. Per lo scopo del presente documento, è stato considerato solo lo scenario n. 1R a, in quanto la dinamica dell'evento n. 1R c prevede il rilascio a bordo FSRU e non a mare (in prossimità della parte rigida della manichetta).

Per la definizione della portata scaricata, in analogia a quanto fatto per il Rapporto Preliminare di Sicurezza, è stato utilizzato il modello di calcolo in concessione d'uso alla società scrivente PHAST 8.71 edito da DNV. Considerando un foro pari al 20% del diametro della manichetta, la portata scaricata in caso di evento incidentale risulta essere pari a 36.6 kg/s. Il quantitativo complessivo di GNL scaricato in mare è pari a 6080 kg, calcolato come somma della portata di scarico dell'ipotesi di rottura parziale (36.6 kg/s) per una durata di 144 s sommato all'hold up del tratto flessibile di 1 manichetta (809 kg di GNL).





#### **4.3 DEFINIZIONE DELL'ENERGIA E DELLA SOVRAPPRESSIONE LIBERATE A SEGUITO DI RPT CAUSATA DAL RILASCIO DI GNL DALLE MANICHETTE DI CARICO DA FSRU A NAVE METANIERA**

Sulla base dei risultati delle simulazioni di cui al punto 4.2, è stata indagata la possibilità di utilizzare software di modellazione fluidodinamica avanzata per simulare il fenomeno della transizione rapida di fase. Da un'analisi approfondita delle possibili alternative è emerso che, ad oggi, per la modellazione dell'RPT i software CFD presentano due importanti limitazioni:

- la difficoltà nella rappresentazione accurata della curva di ebollizione caratteristica del fenomeno;
- la difficoltà nella simulazione dell'interazione tra le gocce di GNL e l'acqua una volta che questi entrano in contatto, fenomeno che dipende da numerose variabili tra cui la composizione del GNL.

A queste problematiche si sommano una serie di complicazioni numeriche legate all'elevatissimo gradiente termico che si manifesterebbe tra la temperatura dell'acqua (circa 5°C) e la temperatura del GNL (-160°C). In letteratura si trovano alcuni tentativi di modellazione del fenomeno, le cui conclusioni tuttavia concordano nel ribadire l'importanza dell'approccio sperimentale all'analisi.

Per i motivi sopra esposti, la caratterizzazione del fenomeno di transizione rapida di fase è stata condotta confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con i test sperimentali presi a riferimento nel Capitolo 3, che sono gli stessi su cui si basa la validazione dei modelli CFD riconosciuti e impiegati a livello nazionale ed internazionale, la cui validità è ampiamente dimostrata in letteratura. Questo ha permesso di ricavare un valore di TNT equivalente da confrontare con il valore di energia di impatto simulato con il supporto dell'analisi numerico-strutturale nel caso di collisione navale al fine di determinare la resistenza meccanica della nave al fenomeno. Infine è stato possibile simulare la sovrappressione generata dalla transizione rapida di fase.

Prendendo a riferimento la portata scaricata (36.6 kg/s) e la quantità scaricata (6080 kg) nel caso di rilascio di GNL a seguito di rottura significativa (20% DN) del tratto flessibile di una manichetta di travaso, i test Coyote, ed in particolare il test Coyote-1, risultano essere rappresentativi del caso in esame. In riferimento alla Figura 3, considerando una portata scaricata pari a 5 m<sup>3</sup>/min (36.6 kg/s), il fenomeno causerebbe la liberazione di una quantità di energia pari a circa 0.5 kg di TNT equivalente, ossia circa 2 MJ.

Attraverso un'analisi di tipo strutturale è possibile verificare se l'entità dell'impatto sia tale da poter causare danni critici alla struttura. Sulla base delle simulazioni di collisione navale condotte con il supporto dell'analisi numerica strutturale disponibili in Allegato D.6.1 al Rapporto Preliminare di Sicurezza, emerge che l'energia di impatto tra LNG carrier e nave mercantile di pari dimensioni (180000 t di dislocamento), stimata in 655 MJ, genera deformazione plastica sulla fiancata della nave garantendo comunque condizioni di sicurezza rispetto alle pareti interne dei serbatoi di LNG. Pertanto, valutando un impatto di due ordini di grandezza





inferiore, si può affermare che esso non possa essere ritenuto significativo ai fini della sicurezza della nave.

Inoltre, come evidenziato chiaramente anche dalle immagini riportate in Figura 4, è chiaro che la sovrappressione di picco generata da una transizione rapida di fase sia una condizione locale, imparagonabile al volume che verrebbe coinvolto nel caso di un'esplosione. Pertanto, si può concludere che la sovrappressione generata dal fenomeno non sia in grado di provocare un danneggiamento strutturale della nave. Al fine di valutare tale sovrappressione, si è scelto di utilizzare il software Effects 7.52 edito da TNO. I risultati sono presentati in Figura 5.



**Figura 5 – Sovrappressione generata**

In virtù del fatto che la nave metaniera e la FSRU durante le operazioni di trasferimento saranno posizionate ad una distanza di circa 5 m l'una dall'altra, considerando anche che il modello del TNT equivalente in prossimità del rilascio non è in grado di descrivere il fenomeno in maniera accurata a causa delle turbolenze e dei gradienti che si generano, si è proceduto a quantificare la sovrappressione generata dalla transizione rapida di fase ad una distanza pari a 2 m. Essa risulta essere pari a 1.75 bar. Come si può osservare dalla curva sopra riportata, ad una distanza di 10 m si raggiunge una sovrappressione pari a 0.1 bar e a 60 m pari a 0.01 bar. Come anticipato sopra, diversamente dal caso di un'esplosione che coinvolge un volume nettamente maggiore, questa condizione è strettamente localizzata, motivo per cui, unitamente alle considerazioni sopra riportate, non si ritiene possa essere in grado di causare danni strutturali alla nave.





## 5 CONCLUSIONI

La transizione rapida di fase (RPT) è un fenomeno di esplosione fisica legato allo sversamento di grandi quantità di GNL in acqua. Scopo del presente documento è la quantificazione della sovrappressione generata dallo sversamento di GNL in mare a seguito di rilascio dalle manichette flessibili di carico da FSRU a nave metaniera. A favore di sicurezza nell'analisi presentata si è fatto riferimento allo scenario 1R a, ossia la rottura significativa delle manichette flessibili di scarico da nave metaniera a FSRU, in quanto rappresentativo di quantità maggiori di GNL sversato in mare.

Trattandosi di un fenomeno molto complesso, la trattazione proposta considera una combinazione tra analisi di rischio e analisi di letteratura. Considerando la portata e la quantità scaricata, si è stabilita un'analogia tra il caso in esame e i test Coyote di cui al paragrafo 3.2. Nota la massa di TNT equivalente, confrontando l'energia di impatto ricavata dalle simulazioni di collisione navale condotte con il supporto dell'analisi numerica strutturale disponibili in Allegato D.6.1 al Rapporto Preliminare di Sicurezza, è possibile osservare che l'energia rilasciata nel caso analizzato non provoca danni strutturali critici alle pareti dei serbatoi di LNG della nave. Infine, è stata calcolata la sovrappressione generata dall'RPT utilizzando il modello TNT del software Effects 7.52 edito da TNO. I risultati indicano che ad una distanza di 2 m, pari a metà della distanza tra le navi in caso di operazioni di trasferimento ship-to-ship, si raggiunge una sovrappressione pari a 1.75 bar, che decade rapidamente all'aumentare della distanza. Diversamente dal caso di un'esplosione, che coinvolge un volume nettamente maggiore, questa condizione è strettamente localizzata, motivo per cui, unitamente alle considerazioni sopra riportate, si può ritenere che la transizione rapida di fase generi conseguenze non significative e limitate alla zona di impatto.





## 6 BIBLIOGRAFIA

- (1) Uguccioni, G., Pezzo, T., Valente, E., Carpaneto, R., “*Aspetti di sicurezza dei terminali di rigassificazione GNL*”
- (2) Katz, D.L., “*Superheat limit explosion*” in *Chemical Engineering Progress* (1972)
- (3) Nakanishi, E., Reid, R.C., “*Liquid natural gas – water reactions*” in *Chemical Engineering Progress* (1971)
- (4) Enger, T., Hartman, D.E., Seymour, E.V., “*Explosive boiling of liquefied hydrocarbon/water systems*” in *Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the 1972. Cryogenic Engineering Conference*, National Bureau of Standards (1972)
- (5) Reigstad, G. A., Lervag, K., Aursand, E., “*The risk of rapid phase transition in LNG spilled on water*”, SINTEF Energy Research (2020)
- (6) Melhem., G., Ozog, H., “*Understand LNG rapid phase transitions*” in *Hydrocarbon Processing* (2006)
- (7) Koopman, R.P., Cederwall, R.T. *et al.*, “*Analysis of Burro series 40 m3 LNG spill experiments*” in *Journal of Hazardous Materials* (1982)
- (8) Ermak, D.L., Koopman, R.P., McRae, T.G., Hogan, W.J., “*LNG spill experiments: dispersion, RPT and vapor burn analysis*” in *American Gas Association Transmission Conference*, Chicago (1982)
- (9) Nedelka, D., Sauter, V., Goanvic, J., Ohba, R., “*Last developments in Rapid Phase Transition knowledge and modelling techniques*” in *Offshore Technology Conference*, Houston (2003)

