

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E INDUSTRIALE

**Tesi di Laurea Magistrale in
Ingegneria della Sicurezza Civile e Industriale**

**Valutazione del rateo di evaporazione di una pozza di
GNL al fine di redigere linee guida per l'intervento**

Relatore: prof. Chiara Vianello

Laureando: PIETRO BERTONCELLI

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Ai miei genitori

Sommario

| | |
|---|----|
| Introduzione | 1 |
| Capitolo I - Inquadramento | 2 |
| 1.1 Ruolo del GNL | 2 |
| 1.2 Descrizione tecnica | 3 |
| 1.3 Principali scenari di rischio | 4 |
| Capitolo II - Materiali e metodi | 8 |
| 2.1 Campagna sperimentale | 8 |
| 2.2 Contenitori per test di evaporazione | 9 |
| 2.3 Strumentazione | 10 |
| 2.4 GNL | 10 |
| 2.5 Condizioni meteorologiche | 11 |
| 2.6 Prove di combustione | 11 |
| Capitolo III - Risultati | 13 |
| 3.1 Evaporazione da pozza di GNL | 13 |
| 3.1.1 Test 01 | 13 |
| 3.1.2 Test 05 | 16 |
| 3.1.3 Test 04 | 18 |
| 3.1.4 Test 02 | 20 |
| 3.1.5 Test 03 | 21 |
| 3.1.6 Test 10 | 22 |
| 3.2 Incendio di una pozza di GNL | 24 |
| 3.2.1 Test 09 | 24 |
| Capitolo IV - Discussione | 25 |
| 4.1 Evaporazione da pozza di GNL | 25 |
| Conclusione | 31 |
| Bibliografia | 32 |

Introduzione

Negli ultimi anni, anche in Italia si è diffuso sempre più l'utilizzo del Gas Naturale Liquefatto come carburante per i veicoli pesanti, in alternativa al più tradizionale gasolio o alle soluzioni che sfruttano il metano gassoso. La maggiore diffusione di questa tecnologia porta però con sé alcuni rischi, legati alle peculiari caratteristiche della sostanza, che in precedenza erano limitati a determinati siti industriali, mentre sono ora presenti anche nella quotidianità dei contesti civili.

Le soluzioni per mitigare o affrontare questi rischi non possono prescindere dalla conoscenza approfondita del fenomeno. Molti degli scenari di rischio tipici del Gas Naturale Liquefatto dipendono dalla formazione di una nube di vapori infiammabili a seguito di uno sversamento accidentale.

In quest'ottica si colloca il presente lavoro, con lo scopo di giungere ad una valutazione sperimentale del rateo di evaporazione di una pozza di Gas Naturale Liquefatto. Si potranno così ottenere dati che in futuro potranno essere utili alle organizzazioni preposte alla gestione del rischio o degli eventuali incidenti.

Il presente elaborato consiste dunque di un primo capitolo introduttivo, comprendente la dettagliata descrizione della sostanza studiata. Dopodiché segue un secondo capitolo dedicato alla descrizione degli esperimenti compiuti. I risultati ottenuti sono esposti nel terzo capitolo; la discussione e contestualizzazione dei quali è sviluppata nella quarta sezione, prima del riepilogo conclusivo.

Capitolo I - Inquadramento

Il Gas Naturale Liquefatto, di seguito indicato nella forma italiana abbreviata *GNL*, costituisce una importante risorsa energetica, con applicazioni in svariati ambiti. Nel presente capitolo se ne darà una trattazione introduttiva, utile a contestualizzare gli esperimenti successivamente descritti.

1.1 Ruolo del GNL

Come il nome chiarisce, il GNL è una sostanza liquida ottenuta tramite la liquefazione del gas naturale, estratto dai giacimenti tramite installazioni apposite oppure, in origine, come prodotto secondario delle perforazioni petrolifere. Il processo di liquefazione non è immediato, e la tecnologia necessaria per poterlo condurre è stata sviluppata nella seconda metà dell'Ottocento. Il primo impianto per la produzione di GNL fu costruito in West Virginia, negli Stati Uniti, nel 1912, e divenne operativo nel 1917 (Sotoodeh 2022). Il successivo sviluppo della tecnologia vide l'applicazione a diversi settori tecnologici, comportando purtroppo anche diversi incidenti: si ricorda nel 1944 l'esplosione di un impianto di produzione di GNL a Cleveland, in Ohio negli Stati Uniti, che causò 128 morti. In risposta agli incidenti vi fu però una spinta alla maggiore comprensione dei fenomeni legati all'uso di questa sostanza, in modo da poterne aumentare la sicurezza. Nel 1959 entrò in servizio la prima nave oceanica dedicata al trasporto di GNL, gettando le basi per sviluppare nei decenni successivi una fitta rete di rotte commerciali e infrastrutture dedicate.

Al giorno d'oggi, il GNL vede le sue applicazioni principali sia come combustibile sia come efficiente modalità di trasporto del gas naturale su lunghe distanze. Complici infatti i recenti sviluppi nella situazione geopolitica mondiale, è sorta la necessità per molti Paesi di diversificare le proprie fonti d'approvvigionamento di gas naturale. In tal senso il GNL costituisce una soluzione, in quanto permette di trasportare via mare grandi quantità di gas liquefatto. Una volta giunto a destinazione, il GNL viene nuovamente portato in fase gassosa in appositi impianti detti rigassificatori.

In ambito civile e industriale invece il GNL viene utilizzato come carburante per mezzi di trasporto e per gli impianti di riscaldamento in alcune strutture; un incentivo all'utilizzo

del GNL rispetto ad altre sostanze proviene dalla sua maggiore densità d'energia e dalle sue minori emissioni dannose (Osorio-Tejada, Llera-Sastresa e Scarpellini 2017).

La maggiore diffusione di veicoli alimentati a GNL comporta statisticamente un maggiore rischio di incidenti coinvolgenti tali automezzi; l'esposizione aumenta inoltre poiché si infittisce la rete di distributori stradali di carburante, che devono essere riforniti da apposite autocisterne.

La necessità di approfondire le implicazioni di eventuali scenari incidentali coinvolgenti il GNL in ambito civile alimenta un ambito di ricerca in cui si colloca la presente tesi.

1.2 Descrizione tecnica

Il GNL è un liquido criogenico incolore e inodore ottenuto dalla liquefazione del gas naturale; un campione di sostanza è visibile in Figura I.1. Il rapporto di espansione è 1:600, da cui discende la sua comodità come modalità di trasporto del gas. A differenza del comune gas di petrolio, il gas naturale a temperatura ambiente si trova al di sopra del proprio punto critico, pertanto non è possibile ottenerne la liquefazione per sola compressione: è necessario operare un raffreddamento per poter giungere alla fase liquida, detta liquido criogenico.

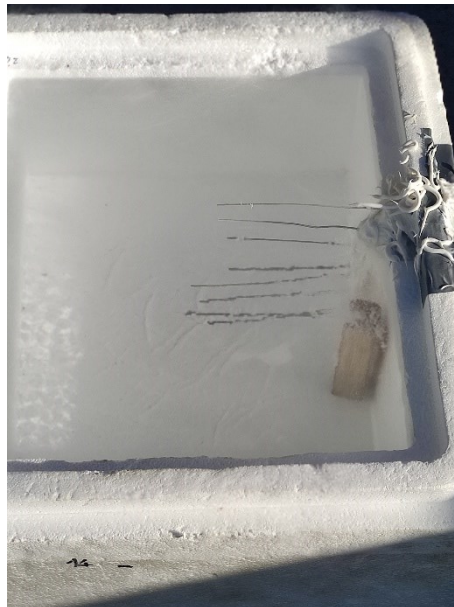


Figura I.1. *GNL all'interno di uno dei contenitori usati per i test.*

Il gas naturale è una miscela costituita principalmente da metano, con contributi minori di altri idrocarburi come etano, propano, butano, o altri gas come azoto. La presenza delle frazioni minori di altri gas influenza le proprietà chimico-fisiche della sostanza, che

dunque dipendono dalla sua composizione. In Tabella I.1 sono riportati i valori tipici delle principali grandezze d'interesse (Mokhatab, et al. 2014). In aggiunta, il gas naturale è atossico e non è chimicamente aggressivo, escludendo la presenza di impurità in uscita dagli impianti di trattamento post estrazione.

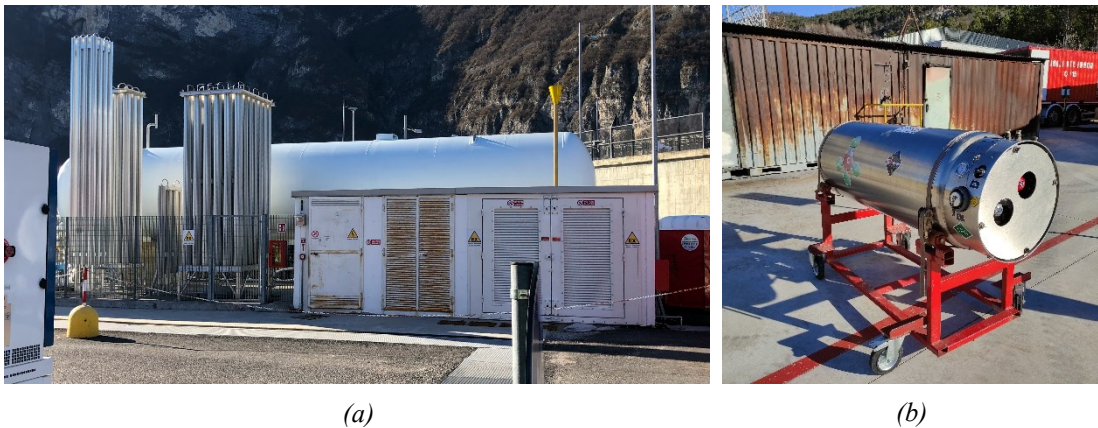
Tabella I.1. *Principali caratteristiche fisiche del GNL.*

| Grandezza | Valore | U.M. |
|---------------------------------|---------------|----------------------|
| Frazione molare CH ₄ | 0.87 ÷ 0.99 | -- |
| Punto d'ebollizione | -162 | °C |
| Densità | 430 ÷ 470 | kg·m ⁻³ |
| Densità dei vapori a -160 °C | 1.822 | kg·m ⁻³ * |
| Campo d'infiammabilità | 5 ÷ 15 | % |

* (Hissong 2007)

I parametri riportati variano anche durante la vita del GNL stesso, in quanto le diverse frazioni molarie evaporano in parti differenti, cambiando la composizione della fase rimasta liquida (Jung, et al. 2022).

Essendo un liquido criogenico, il GNL va stoccato in specifici serbatoi atmosferici con elevate prestazioni di isolamento termico; dev'essere inoltre presente un sistema di controllo e gestione del gas evaporato. Alcuni esempi di serbatoi sono visibili in **Figura**



I.2.

Figura I.2. *(a) Serbatoio normalmente utilizzato nei distributori stradali di GNL. Può essere disposto anche in posizione verticale. Si notano gli scambiatori di calore a fascio tubiero. (b) Serbatoio normalmente installato sugli autoveicoli.*

1.3 Principali scenari di rischio

Le caratteristiche proprie del GNL presentano aspetti di pericolosità, che possono portare a situazioni di rischio di varia tipologia.

I rischi legati alla natura infiammabile del GNL sono (Mishra e Mishra 2021):

- Jet fire: è il fenomeno che si manifesta in seguito all'innescò di un getto in pressione di materiale in fase liquida e/o in fase gassosa che fuoriesce da un'apertura in un contenitore, sia essa prevista o accidentale. Il risultato è dunque un dardo di fiamma caratterizzato da un'elevata lunghezza e da una netta direzionalità, che può innescare reazioni a catena nel caso in cui altri contenitori o impianti si trovino coinvolti dalla fiamma.
- Pool fire: si manifesta quando si ha uno sversamento di liquido, che si accumula formando una pozza, successivamente innescata. A differenza del *jet fire*, l'incendio di pozza si sviluppa verticalmente, con eventuali inclinazioni della fiamma a causa del vento. Le conseguenze dell'irraggiamento si manifestano in maniera radiale rispetto alla pozza.
- Flash fire: nel caso in cui la fuoriuscita di materiale, sia essa in pressione oppure un semplice accumulo, non sia innescata nell'immediato bensì in un secondo momento, si ha il tempo affinché si formi una nuvola di vapori o gas infiammabili, che può diffondersi nell'area circostante. Il *flash fire* si manifesta quando a seguito di un innesco la nube infiammabile brucia senza sviluppare rilevanti sovrappressioni. La durata della combustione è molto rapida, e i danni sono generalmente limitati all'area ricompresa all'interno della nube.
- Vapour cloud explosion (VCE): la dinamica dello sviluppo del fenomeno è simile a quanto descritto per il *flash fire*, con la differenza che in questo caso la nube di vapori, anziché consumarsi normalmente, esplose, con la creazione di una rilevante sovrappressione. I danni possono manifestarsi a distanze anche molto elevate dal luogo d'innescò; la magnitudine aumenta nel caso in cui lo sviluppo della nube sia caratterizzato da ostacoli come ad esempio impianti industriali, spazi ristretti, elementi di ostruzione.
- Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE): il fenomeno si manifesta quando una certa quantità di vapori in pressione viene rilasciata istantaneamente a causa del collasso del contenitore e si innesca. Lo scenario tipico è quello di una bombola o cisterna coinvolta dalle fiamme di un precedente incendio, che hanno il doppio effetto di aumentare la temperatura della fase liquida all'interno del contenitore, aumentando dunque anche la pressione dei vapori, e di indebolire

strutturalmente le pareti del recipiente. La pericolosità del BLEVE è dovuta anche al rischio di proiezione di frammenti di notevoli dimensioni ad elevate distanze. Sebbene l'applicabilità del fenomeno al GNL fosse dibattuta, è registrato almeno un caso in cui il fenomeno si è manifestato (Planas-Cuchi, et al. 2004).

Altri rischi discendono invece dalle temperature molto basse del liquido criogenico:

- Fragilità dei materiali: diversi materiali costruttivi, tra cui i normali acciai, a contatto con le basse temperature del GNL diventano suscettibili ai meccanismi di rottura fragile. A questo fenomeno si imputano le cause dell'evento del 1944 a Cleveland (Raj 2007). La normativa tecnica internazionale riconosce un elenco di materiali utilizzabili a diretto contatto con il GNL, tra cui ad esempio acciai inossidabili austenitici oppure leghe di rame (ISO 16903 2015).
- Rapid Phase Transition (RPT): la transizione rapida di fase si manifesta in caso di sversamenti di GNL sulla superficie di bacini idrici. L'acqua si trova alla temperatura ambiente, e in caso di rilascio di liquido criogenico può trasmettergli rapidamente ingenti quantità di energia, causando un violento e repentino passaggio di fase da liquido a gassoso. Il fenomeno è a tutti gli effetti equiparabile ad un'esplosione, ad eccezione dell'assenza di combustione. Date le sue caratteristiche è un evento improbabile in un normale contesto civile.
- Rollover: fenomeno esclusivo dei grandi serbatoi di stoccaggio, consistente in un repentino rimescolamento spontaneo del liquido, se precedentemente disomogeneo. Al rimescolamento si accompagna una notevole produzione di vapori, che possono sollecitare i dispositivi di sicurezza e la struttura del serbatoio.

Infine, pur non essendo tossico, il GNL può presentare indirettamente alcuni rischi anche potenzialmente mortali per la salute delle persone:

- Ustione da freddo: il liquido criogenico si trova a una temperatura di circa -160 °C, e un contatto con la pelle o i vestiti di una persona può portare a conseguenze anche fatali.
- Asfissia: i vapori di GNL appena separatisi dalla fase liquida si trovano a temperature molto basse, e in tali condizioni la loro densità è maggiore di quella dell'aria; in caso di formazione di nube questa tende dunque a stratificare verso il basso. Il gas naturale inoltre è di per sé inodore, per cui in caso di sversamento

una persona ignara potrebbe trovarsi avvolta in un'atmosfera povera di ossigeno senza rendersene conto.

Molti di questi rischi dipendono dalla presenza ed estensione di una nube di vapori. Riveste dunque notevole importanza la conoscenza dei meccanismi di formazione.

Capitolo II - Materiali e metodi

Nel presente capitolo si riportano i materiali e le metodologie utilizzati nelle prove sperimentali.

2.1 Campagna sperimentale

Gli esperimenti sono stati condotti in collaborazione con il personale del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco appartenente al Nucleo NBCR di Mestre; allo scopo sono state utilizzate le strutture della Scuola provinciale antincendi gentilmente messe a disposizione dal Corpo permanente dei Vigili del fuoco della Provincia autonoma di Trento. Lo scopo degli esperimenti è condurre test di evaporazione in ambiente del GNL, in differenti condizioni di flusso di calore, per giungere ad una valutazione del rateo di evaporazione della sostanza.

La campagna di esperimenti ha visto lo svolgimento di più test; ai fini dello studio ne sono stati considerati inerenti solo alcuni, le cui caratteristiche sono elencate in Tabella II.1. Le principali differenze tra i vari test riguardano le proprietà geometriche e termodinamiche del contenitore, riassunte in Tabella II.2.

Tabella II.1. *Caratteristiche salienti degli esperimenti.*

| Esperimento | Fenomeno | Contenitore | Quantità GNL [kg] | Acquisizione dati di massa | Acquisizione temperature |
|-------------|--------------|-------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Test 01 | Evaporazione | Box03 | 0.649 | Bilancia | Termocoppie |
| Test 02 | Evaporazione | Ghiotta2 | 15.94 | Cella di carico | -- |
| Test 03 | Evaporazione | Ghiotta2 | 15.30 | Cella di carico | -- |
| Test 04 | Evaporazione | Box11 | 4.345 | Bilancia | -- |
| Test 05 | Evaporazione | Box04 | 4.938 | Bilancia | Termocoppie |
| Test 09 | Combustione | Ghiotta1 | 7.64 | -- | -- |
| Test 10 | Evaporazione | Ghiotta1 | 8.16 | Cella di carico | -- |

Tabella II.2. *Caratteristiche costruttive dei contenitori.*

| Contenitore | Lato 1 [m] | Lato 2 [m] | Altezza [m] | Spessore [m] | Materiale | Massa [kg] | Termocoppie |
|-------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|
| Box03 | 0.100 | 0.100 | 0.180 | 0.030 | Polistirolo* | 0.9771 | Sì |
| Box04 | 0.240 | 0.290 | 0.200 | 0.045 | Polistirolo | 0.8874 | Sì |
| Box11 | 0.295 | 0.195 | 0.305 | 0.045 | Polistirolo | 0.4056 | No |
| Ghiotta1 | 0.750 | 0.485 | 0.110 | 0.002 | Acciaio | 18.24 | No |
| Ghiotta2 | 0.695 | 0.695 | 0.097 | 0.020 | Acciaio | 12.38 | No |

* Uno dei lati è costituito da un pannello di vetro sintetico per consentire l'ispezione visiva del contenuto.

2.2 Contenitori per test di evaporazione

Per lo svolgimento dei test sono stati utilizzati contenitori di due tipologie, mostrate in Figura II.1:

- box in acciaio (denominati “ghiotte”);
- box in polistirolo, eventualmente dotati di termocoppie.

Per ottenere dati d’interesse i recipienti contenenti il GNL erano costantemente pesati durante le prove di evaporazione. I contenitori di dimensioni minori erano inoltre dotati di termocoppie. I sensori erano disposti al centro di uno dei lati del contenitore, lungo una linea verticale, con una distanza tra loro di 2 cm, come indicato in Figura II.2.



Figura II.1. (a) Ghiotta in acciaio, posizionata sulla cella di carico. (b) Box in polistirolo, dotato di termocoppie.

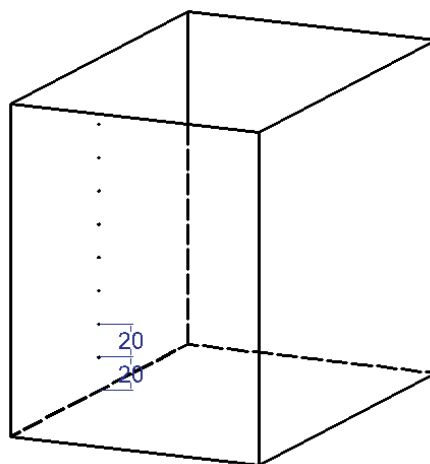


Figura II.2. Disposizione delle termocoppie nei contenitori equipaggiati. Misure in [mm].

2.3 Strumentazione

Le strumentazioni utilizzate durante la campagna sperimentale sono le seguenti:

- Bilancia di precisione PCE-BSH® Scale model 6000, con risoluzione di 0.1 g e precisione di ± 0.3 g;
- Cella di carico Polacco Balance PMA.IT, con risoluzione 0.02 kg;
- Termocoppie tipo T, con range $-200 \div 400$ °C e precisione ± 2.5 °C.

La bilancia e le termocoppie erano collegate tramite un modulo di acquisizione dati, visibile in Figura II.3. I valori registrati dalla cella di carico sono stati estrapolati da un filmato continuo del display. La scelta dell'utilizzo della bilancia di precisione piuttosto che della cella di carico è dipesa dalle quantità di GNL utilizzato durante l'esperimento.

Per le prove svolte in presenza di fiamme non è stato possibile utilizzare i sistemi di pesatura, per evitare danneggiamenti a causa delle temperature elevate.

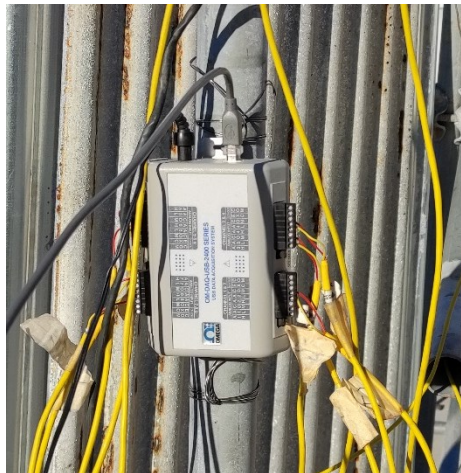


Figura II.3. Modulo di acquisizione dati utilizzato durante la campagna sperimentale.

2.4 GNL

Il materiale utilizzato per la campagna sperimentale è costituito da GNL per autotrazione acquistato presso un distributore stradale sito in prossimità del campo prove. Il liquido è stato stoccato e trasportato tramite un serbatoio criogenico, del tipo normalmente installato sui veicoli.

La composizione del GNL utilizzato negli esperimenti è riportata in Tabella II.3. Il liquido era conservato a una temperatura compresa tra -160 °C e -170 °C e a tali condizioni presentava una densità di $453.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Tabella II.3. *Composizione del GNL usato nelle prove.*

| Sostanza | [% vol] |
|-----------------|----------------|
| Metano | 89.480 |
| Etano | 8.759 |
| Propano | 1.160 |
| Azoto | 0.498 |
| Iso-butano | 0.041 |
| Normal-butano | 0.028 |
| Iso-pentano | 0.023 |
| Normal-pentano | 0.011 |

2.5 Condizioni meteorologiche

La campagna sperimentale è stata svolta all'aria aperta, per motivi di sicurezza. Le condizioni meteorologiche comportano dunque un'influenza ai fini del calcolo dell'evaporazione. Dette condizioni sono riportate in Tabella II.4.

Tabella II.4. *Dati meteorologici.*

| Esperimento | Data | Temperatura dell'aria [°C] | Umidità [%] | Velocità del vento [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Direzione del vento [°] |
|--------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------|---|--------------------------------|
| Test 01 | 11/01/2022 | 11.0 | 26 | 1.6 | 340 (NO) |
| Test 02 | 11/01/2022 | 10.8 | 27 | 2.9 | 349 (NO) |
| Test 03 | 11/01/2022 | 9.0 | 32 | 1.9 | 348 (NO) |
| Test 04 | 11/01/2022 | 9.2 | 32 | 2.8 | 348 (NO) |
| Test 05 | 12/01/2022 | 4.9 | 35 | 0.5 | 56 (NE) |
| Test 09 | 12/01/2022 | 6.9 | 31 | 1.4 | 307 (NO) |
| Test 10 | 12/01/2022 | 6.9 | 30 | 0.9 | 84 (E) |

2.6 Prove di combustione

Durante la campagna di test, alcuni degli esperimenti hanno previsto la combustione del GNL. Quelle prove esulano dallo scopo di questo approfondimento, pertanto non si entrerà nei dettagli, bensì ci si limiterà a qualche descrizione di carattere informativo.

Analogamente ai test di evaporazione, la pozza di liquido criogenico è stata simulata tramite l'utilizzo di un contenitore in acciaio. Si sono raccolti dati di temperatura, con l'ausilio di due serie di termocoppie disposte lungo due direzioni: la prima verticalmente rispetto al centro della pozza, la seconda ad altezza costante e radialmente rispetto ad esso.

I test sono stati filmati in continuo tramite varie telecamere; sono inoltre state effettuate riprese in infrarosso della fiamma con l'ausilio di una termocamera maneggiata da un operatore.

L'innesco della pozza è stato dato manualmente dal personale dei Vigili del fuoco mediante una comune asta per l'accensione dei bracieri nelle simulazioni antincendio.

Capitolo III - Risultati

Nel seguente capitolo si riportano i profili sperimentali dell'andamento della massa nel corso dell'esperimento. Analizzando i dati è stato possibile calcolare il rateo di evaporazione, inteso come la variazione di massa per unità di tempo e per unità di superficie. Ove possibile, come controprova della correttezza dei calcoli si sono utilizzati i profili di temperatura forniti dalle termocoppie: verificando il tempo dopo cui ogni sensore si è trovato al di sopra del pelo libero del liquido è possibile stimare la velocità di evaporazione.

3.1 Evaporazione da pozza di GNL

Gli esperimenti saranno qui descritti non nell'ordine di esecuzione, bensì seguendo le affinità presenti relativamente alla pianificazione del loro svolgimento. Si è mantenuta la numerazione assegnata in campo.

3.1.1 Test 01

Il test è stato condotto utilizzando il Box03, dotato di termocoppie e posizionato sulla bilancia di precisione. Sono stati introdotti 648.8 g di GNL. La bilancia ha acquisito la massa ogni 10 s. Durante lo svolgimento del test, si è verificata una perdita di tenuta della giunzione tra il polistirolo e il pannello trasparente costituente uno dei lati, con conseguente perdita di GNL. I dati successivi all'inizio della perdita non sono dunque stati tenuti in considerazione.

Il contenitore realizzato in polistirolo, consente di considerare il test come svolto in condizioni adiabatiche, pertanto a regime l'unico apporto di energia proveniva dalla superficie di interfaccia con l'aria.

In Figura III.1 è riportato l'andamento della massa di GNL durante il test. La fase iniziale presenta un picco dovuto all'operazione di carico di GNL, e un successivo rapido calo della quantità. Tale repentina evaporazione è con tutta probabilità dovuta al calore trasmesso al liquido dal contenitore, che si trovava a temperatura ambiente. Una volta raggiunto l'equilibrio termico tra il box e il GNL è apprezzabile una fase stazionaria, che ha inizio da $t = 660$ s e termina a partire da $t = 1440$ s a causa della perdita di tenuta. Alla fase stazionaria corrisponde un valore circa costante del rateo di evaporazione, come visibile in Figura III.2.

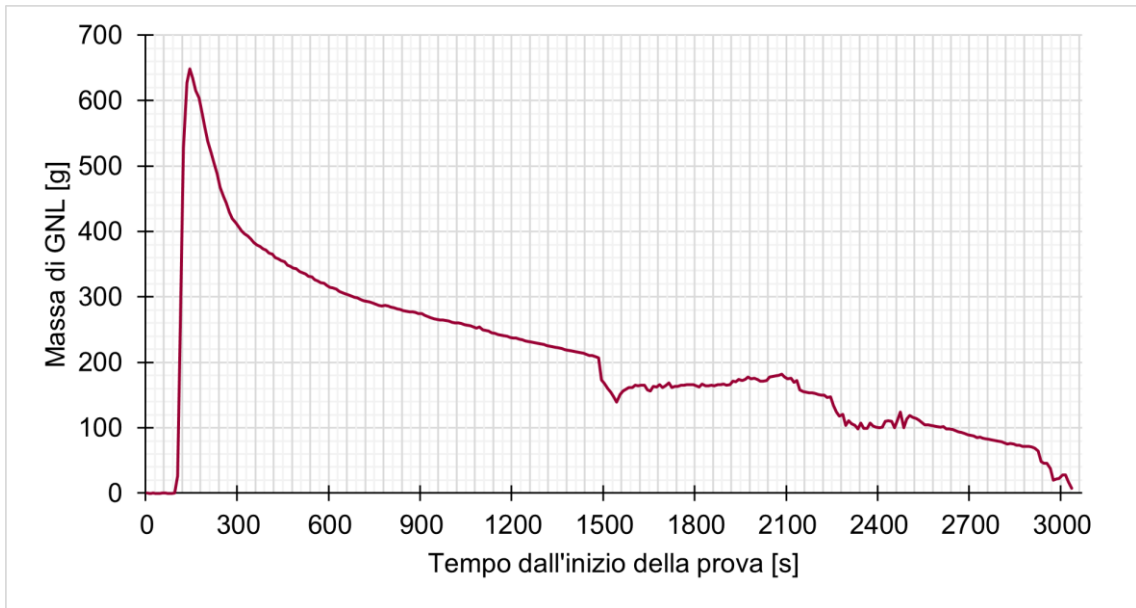


Figura III.1. *Andamento della massa di GNL durante il Test 01.*

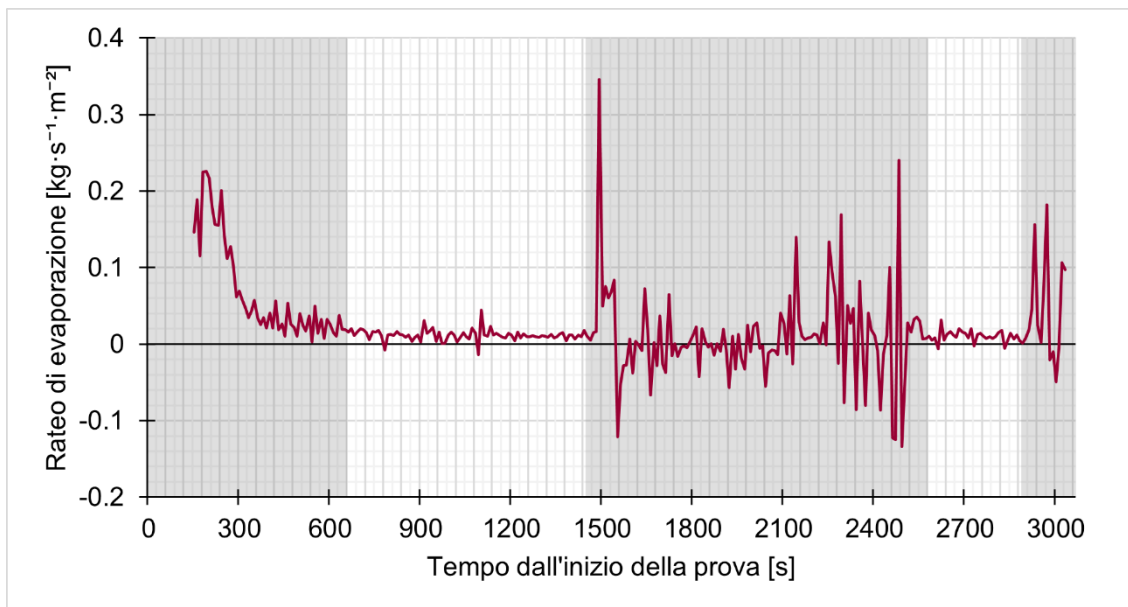


Figura III.2. *Rateo di evaporazione istantaneo durante il Test 01. Con campitura grigia sono indicati gli intervalli temporali non presi in considerazione nel calcolo.*

Dall'analisi di questi dati, tramite una media dei valori calcolati istantaneamente si è giunti a un valore di rateo di evaporazione pari a $R = 0.0112 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Il profilo di temperatura all'interno del liquido è rappresentato in Figura III.3, con attenzione particolare ai primi minuti dell'esperimento. Il riferimento temporale utilizzato è allineato con quello impiegato dalla bilancia di precisione, pertanto i dati sono sincronizzati.

Le termocoppie sono collocate verticalmente lungo una parete del contenitore, con una distanza fissa tra loro e pari a 2 cm. Anche la distanza tra il sensore inferiore e il fondo del contenitore assume lo stesso valore. Con l'evaporazione del liquido il pelo libero si abbassa progressivamente, portando all'emersione delle termocoppie dal bagno di GNL. Tale passaggio è chiaramente individuabile nell'andamento delle temperature registrate, poiché uscendo dalla fase liquida a temperatura costante si ha un repentino incremento dei valori. Conoscendo infine le dimensioni del contenitore è possibile determinare il volume compreso tra ogni sensore, e facendo la differenza tra i tempi di emersione di due sensori successivi si può ricavare il tempo necessario all'evaporazione di quella data quantità di GNL. In tal modo è possibile ricavare una stima del rateo di evaporazione.

Purtroppo non è stato possibile applicare la procedura sopra descritta, in quanto la repentina evaporazione data dall'apporto termico proveniente dal raffreddamento delle pareti del contenitore ha portato all'emersione anticipata di una parte significativa delle 8 termocoppie installate. Non è stato dunque possibile ricavare, durante la fase stazionaria, un intervallo di tempo in cui si sia compiuta l'evaporazione di un volume di GNL ricompreso tra due sensori.

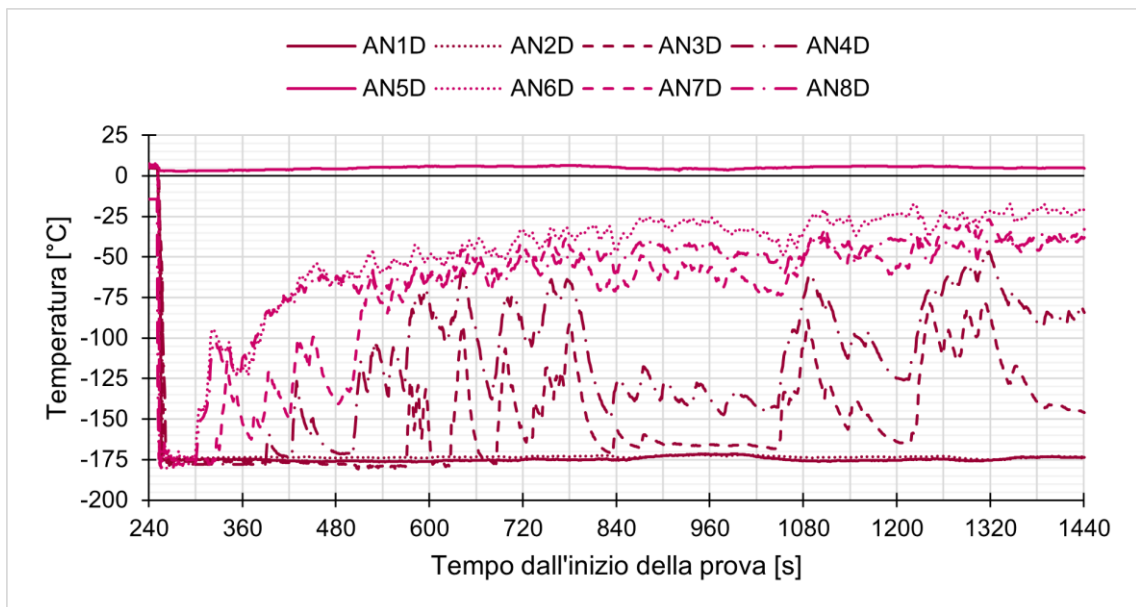


Figura III.3. Dettaglio dei profili di temperatura all'interno del box durante il Test 01.

3.1.2 Test 05

Il Test 05 è stato svolto in maniera concettualmente analoga al già descritto Test 01, utilizzando però come contenitore il Box04, anch'esso dotato di termocoppie disposte secondo lo stesso schema.

Sono stati utilizzati 4937.9 g di GNL e la bilancia di precisione ha acquisito i dati ogni 10 s.

In Figura III.4 è riportato l'andamento della massa di gas liquefatto. La variazione nella pendenza, apprezzabile dal secondo $t = 4200$ s, dipende dal passaggio del contenitore da una condizione di illuminamento solare diretto a una situazione di ombreggiamento. Tale cambiamento ha dunque determinato un minore apporto energetico sotto forma di irraggiamento solare. Il piccolo picco osservabile poco dopo l'istante $t = 1800$ s è dovuto all'inserimento temporaneo di un oggetto nel contenitore allo scopo di verificare il livello del liquido. Questa improvvisa variazione di massa comporta una fluttuazione estrema nel rateo di evaporazione istantaneo, che è dunque stata omessa dal calcolo della media.

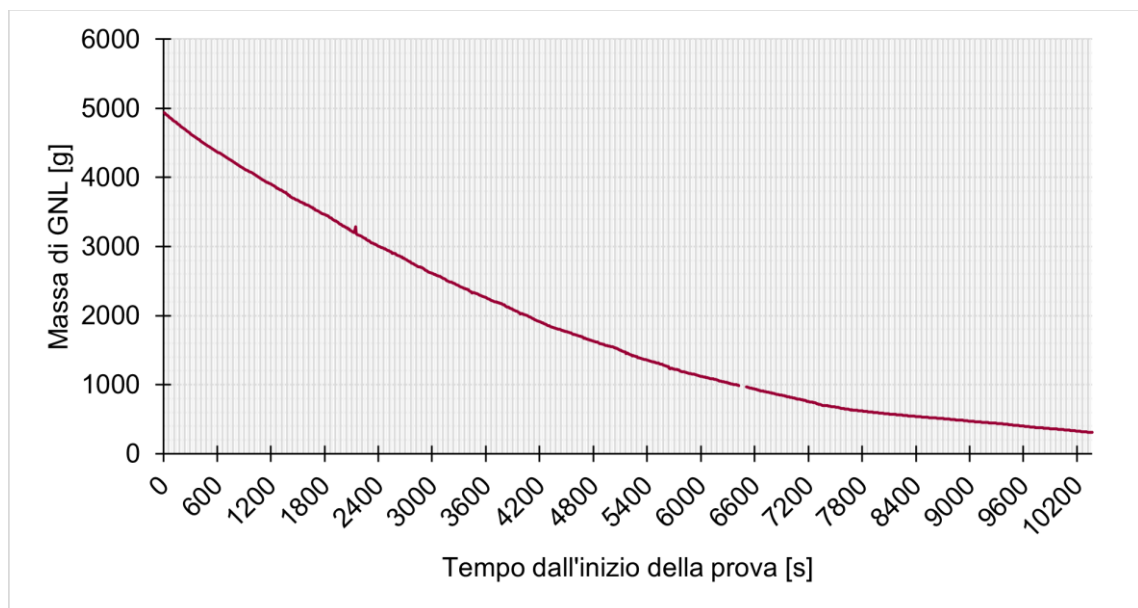


Figura III.4. Andamento della massa di GNL durante il Test 05.

In analogia al caso precedente, si è considerata come fase stazionaria la prima parte della prova, prima della variazione delle condizioni di irraggiamento.

In Figura III.5 è riportato l'andamento del rateo di evaporazione istantaneo. Poiché il valore oscilla molto, per chiarezza espositiva il grafico è stato realizzato rielaborando i dati tramite una media mobile di ordine 5.

Tramite il calcolo della media dei valori ricavati puntualmente in fase stazionaria si è giunti a un rateo di evaporazione $R = 0.0100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

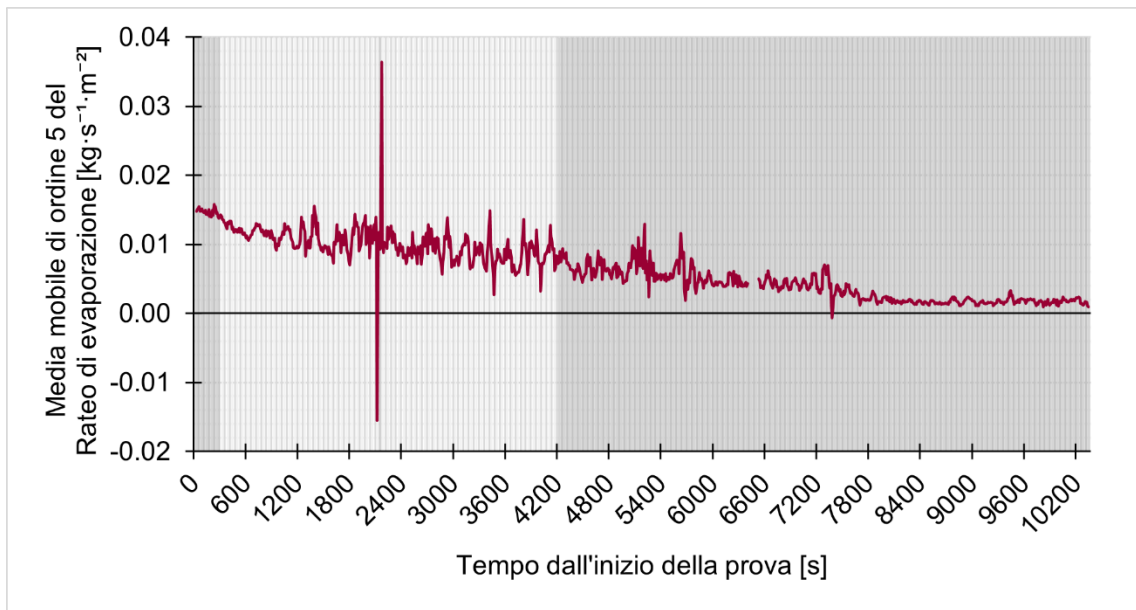


Figura III.5. Media mobile di ordine 5 del rateo di evaporazione istantaneo durante il Test 05. Con campitura grigia sono indicati gli intervalli temporali non presi in considerazione nel calcolo.

Analogamente al Test 01, si è proceduto ad analizzare i dati registrati dalle termocoppie, per ottenere una stima speditiva della velocità di evaporazione del liquido. I dati sono riportati in Figura III.6. I dati acquisiti dai sensori ricadono in buona parte all'interno dell'intervallo temporale in cui è possibile ricavare informazioni valide.

Due dei sensori risultano essere emersi dal liquido dopo un tempo significativamente maggiore rispetto gli altri; ciò è dovuto al fatto che la termocoppia è costituita da una coppia di fili metallici sottili, che quindi si deformano facilmente. Mentre il punto d'inserzione del sensore nel box è sicuramente distante 2 cm dal punto subito inferiore e subito superiore, lo stesso non si può dire dell'effettivo punto di campionamento, corrispondente all'estremità della coppia di fili. Essi possono infatti essere stati piegati verso l'alto o verso il basso, posizionandosi ad un livello inferiore e quindi registrando un tempo maggiore per l'evaporazione del GNL soprastante.

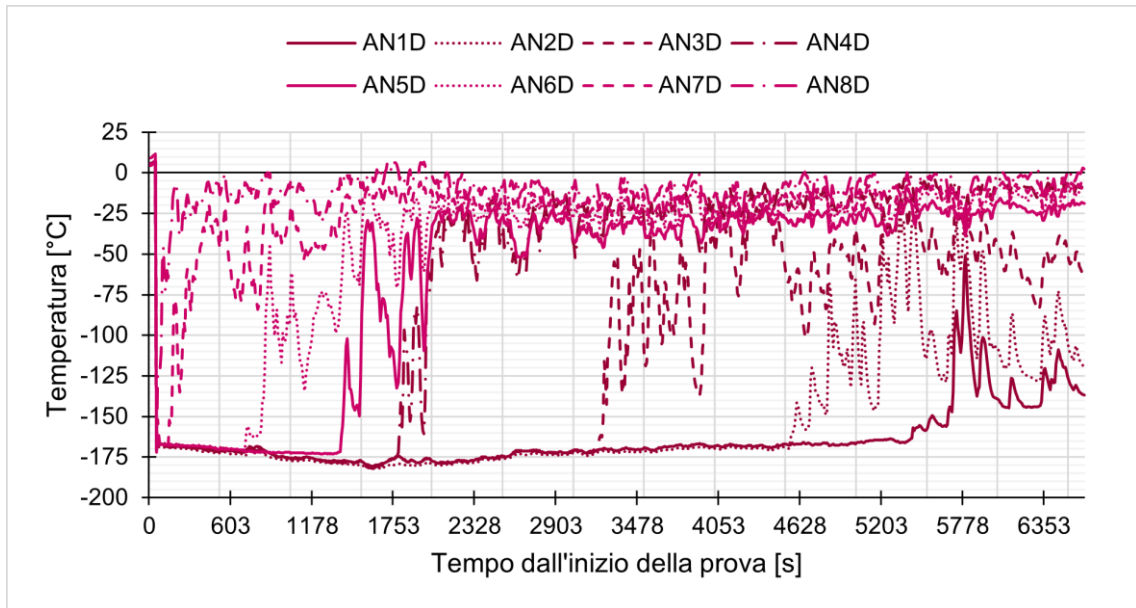


Figura III.6. Profili di temperatura all'interno del box durante il Test 05.

Nonostante l'influenza di queste inesattezze, il valore speditivo di rateo di evaporazione calcolato tramite le termocoppie risulta essere $R = 0.0147 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Questo risultato, avendo quantomeno lo stesso ordine di grandezza, costituisce una conferma dei valori estratti dall'analisi della perdita di massa dal contenitore.

3.1.3 Test 04

Il Test 04 è stato condotto utilizzando il Box 11, non dotato di termocoppie. L'analisi si è pertanto basata sui soli dati relativi al calo di massa all'interno del contenitore, in cui sono stati inseriti all'inizio 4344.8 g di GNL.

Come

visibile

in

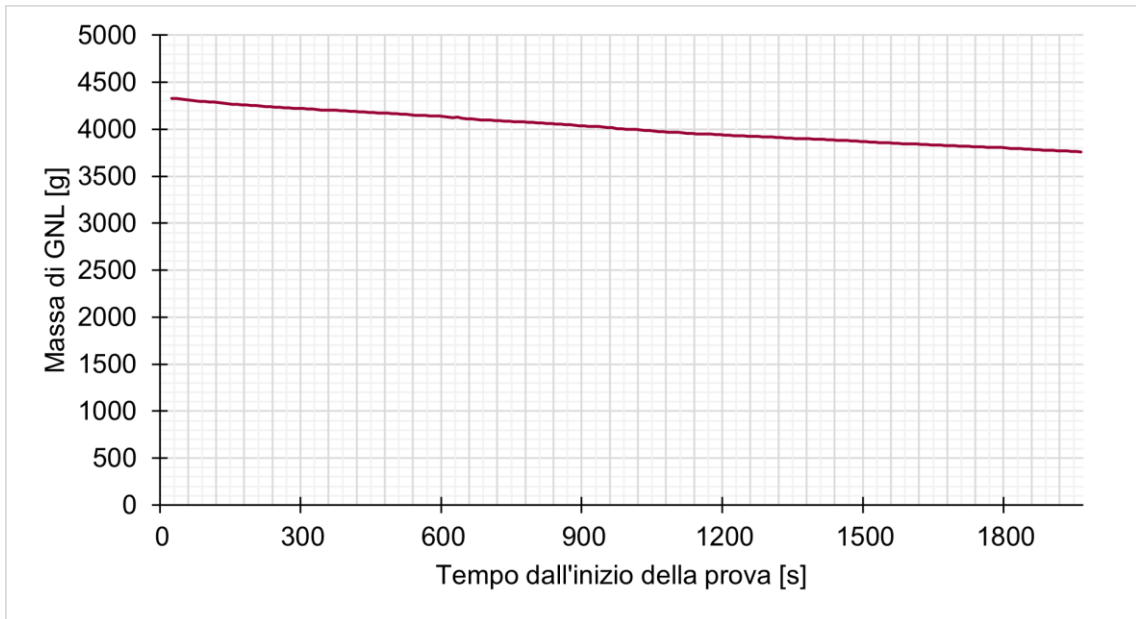


Figura III.7 e in Figura III.8, durante lo svolgimento del test la massa di GNL ha attraversato dei momenti in cui il calo è avvenuto in maniera turbolenta, comportando delle oscillazioni marcate nel calcolo del rateo di evaporazione. Pertanto ai fini dell'analisi si è proceduto a identificare le fasi di stazionarietà del fenomeno, individuandole negli intervalli da $t = 190$ s a $t = 480$ s e da $t = 660$ s a $t = 900$.

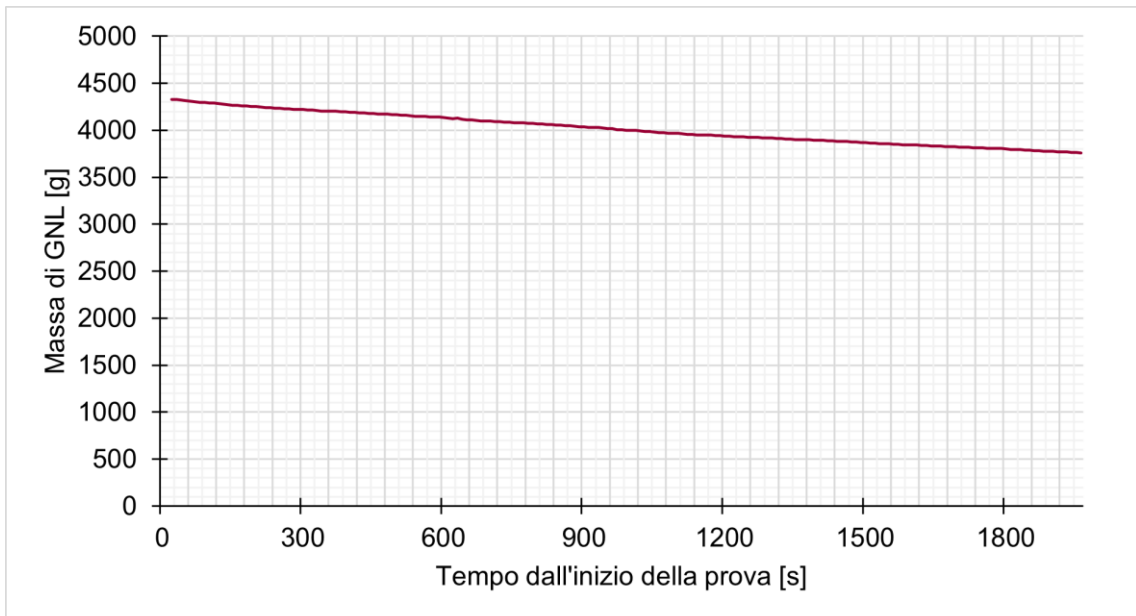


Figura III.7. Andamento della massa di GNL durante il Test 04.

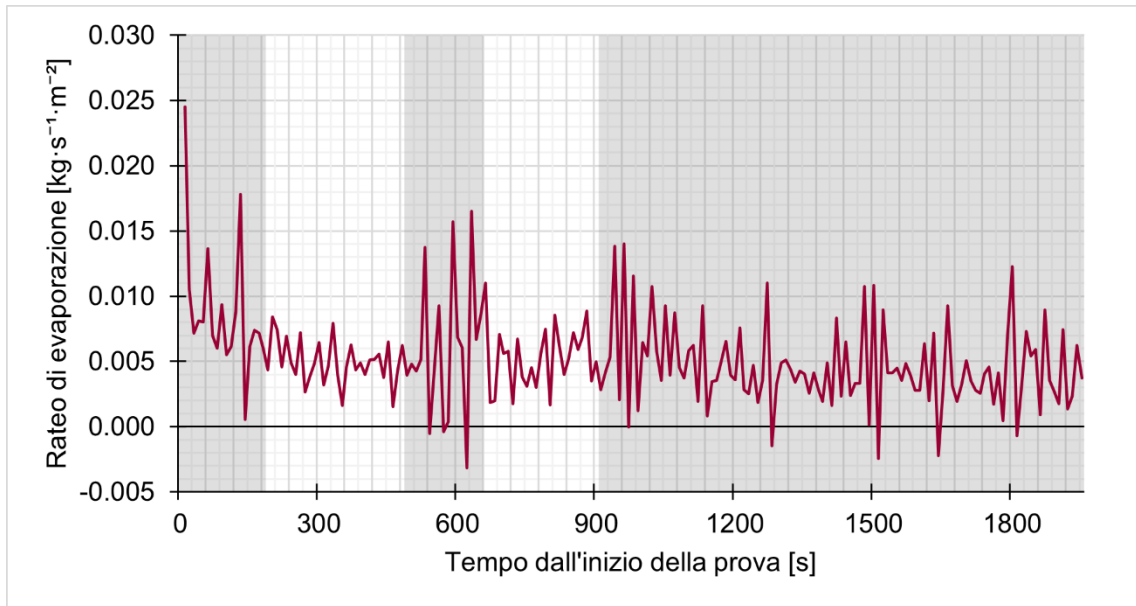


Figura III.8. Rateo di evaporazione istantaneo durante il Test 04. Con campitura grigia sono indicati gli intervalli temporali non presi in considerazione nel calcolo.

La media dei valori istantanei valutata sugli intervalli di stazionarietà conduce a un rateo di evaporazione pari a $R = 0.0051 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.1.4 Test 02

A differenza dei test precedentemente descritti, il presente esperimento è stato condotto utilizzando come contenitore la Ghiotta02, realizzata in acciaio e messa a disposizione dai Vigili del fuoco; non è dotata di termocoppie. Sono stati utilizzati 15.94 kg di GNL.

L'osservazione della massa del GNL è stata effettuata posando il contenitore su di una piattaforma di carico atta a sopportare pesi elevati, il cui display è stato filmato senza interruzioni durante tutta la prova. Il filmato ottenuto è stato campionato ogni 30 s, estraendo il dato del peso visualizzato. Il maggiore intervallo di acquisizione rispetto alle prove è determinato dalla minore sensibilità dello strumento di misura.

In Figura III.9 e Figura III.10 è possibile vedere rispettivamente l'andamento della massa come rilevato dalla cella di carico e il calcolo puntuale del rateo di evaporazione.

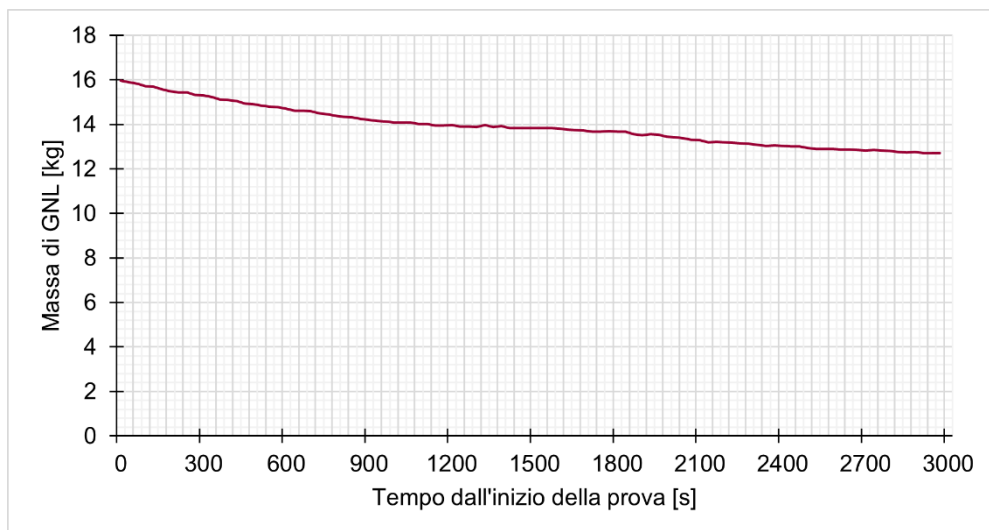


Figura III.9. Andamento della massa di GNL durante il Test 02.

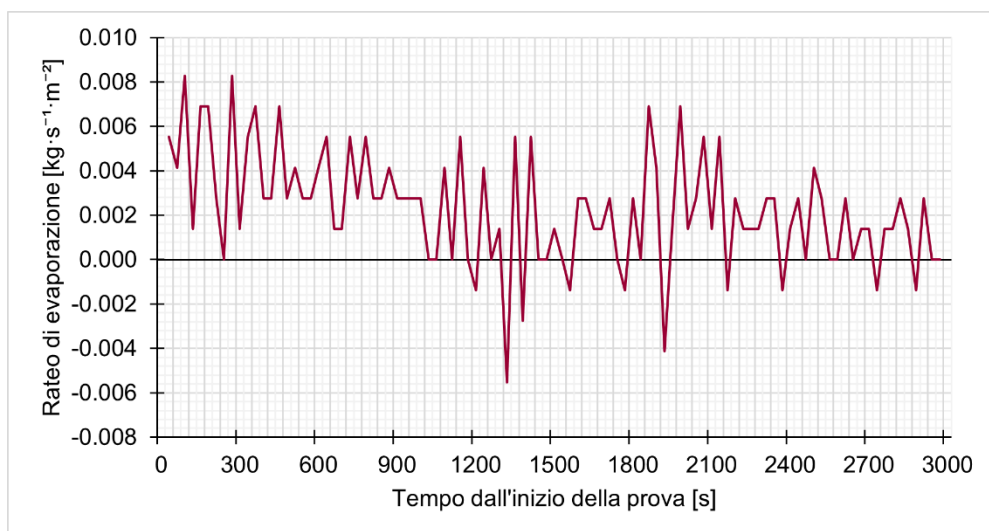


Figura III.10. Rateo di evaporazione istantaneo durante il Test 02.

La media dei valori restituisce il rateo di evaporazione specifico $R = 0.0023 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.1.5 Test 03

Il presente test è stato svolto in diretta successione al Test 02. Il set up sperimentale è lo stesso, e si è provveduto semplicemente a inserire nuovo GNL nella ghiotta, continuando l'acquisizione dati con le stesse modalità di registrazione e campionatura. Sono stati utilizzati 15,3 kg di liquido criogenico.

Analogamente al caso precedente, l'andamento della massa di GNL e il rateo di evaporazione istantaneo sono riportati rispettivamente in Figura III.11 e Figura III.12.

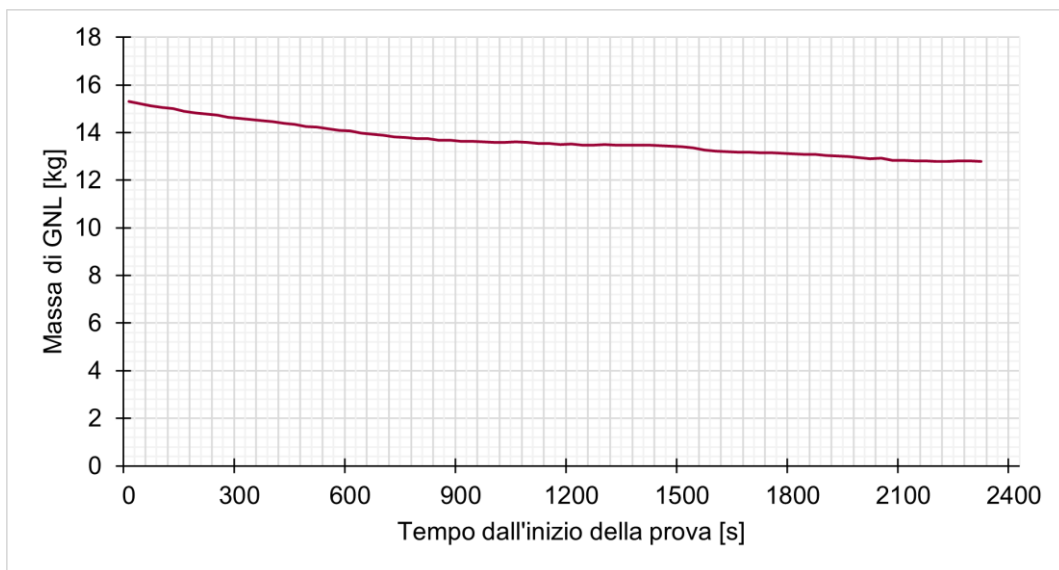


Figura III.11. *Andamento della massa di GNL durante il Test 03.*

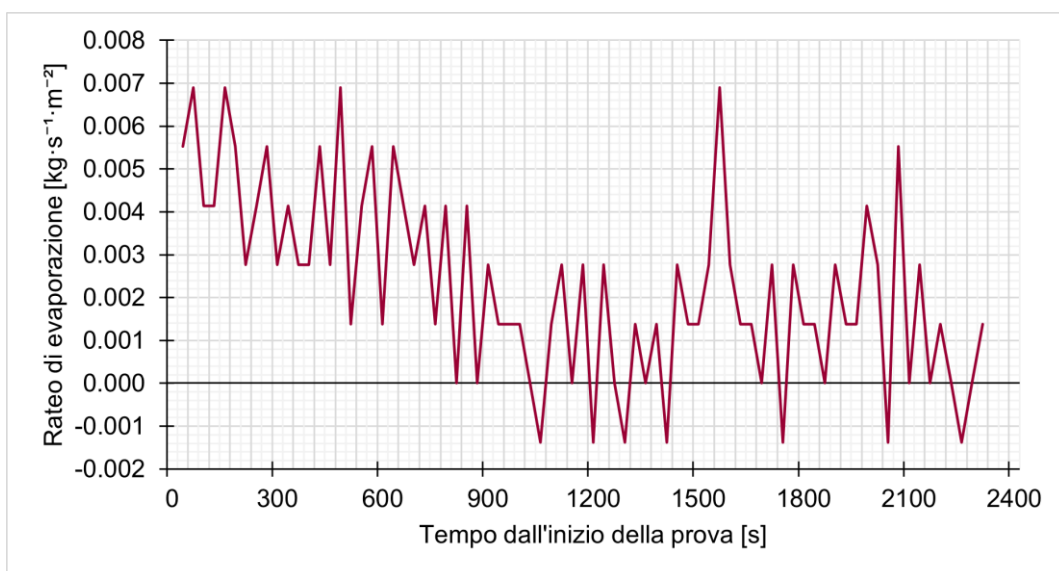


Figura III.12. *Rateo di evaporazione istantaneo durante il Test 03.*

La media dei valori restituisce il rateo di evaporazione specifico $R = 0.0024 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.1.6 Test 10

Il Test 10 è stato svolto in modalità analoghe ai test precedentemente descritti, con l'uso del contenitore Ghiotta1 riempito con 8.16 kg di GNL e posizionato sulla cella di carico. Le modalità di acquisizione dati sono le medesime del Test 02 e del Test 03.

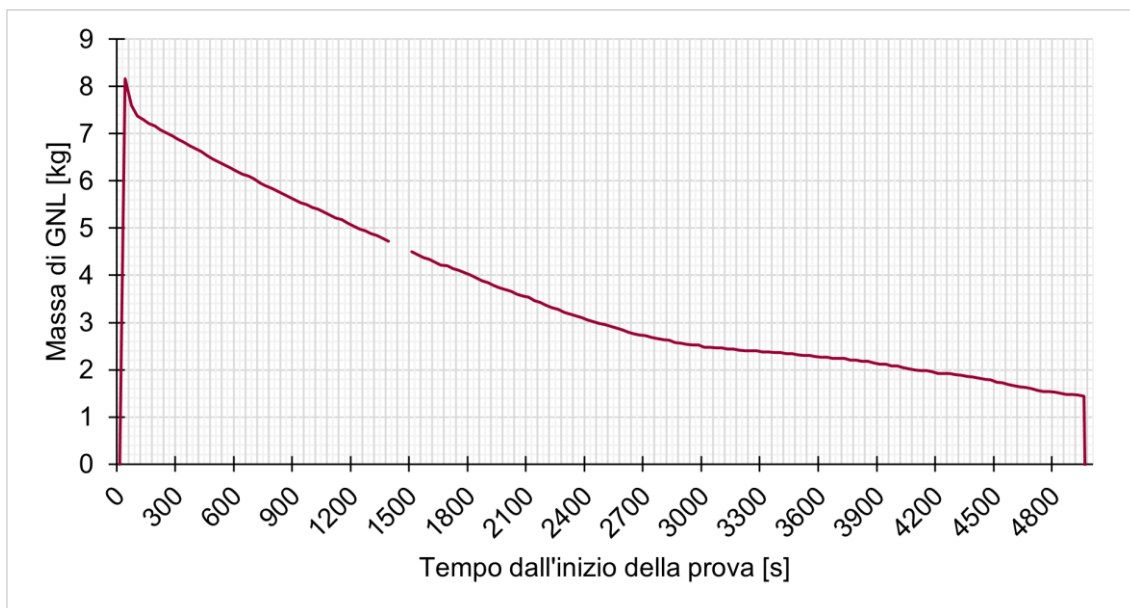


Figura III.13. Andamento della massa di GNL durante il Test 10.

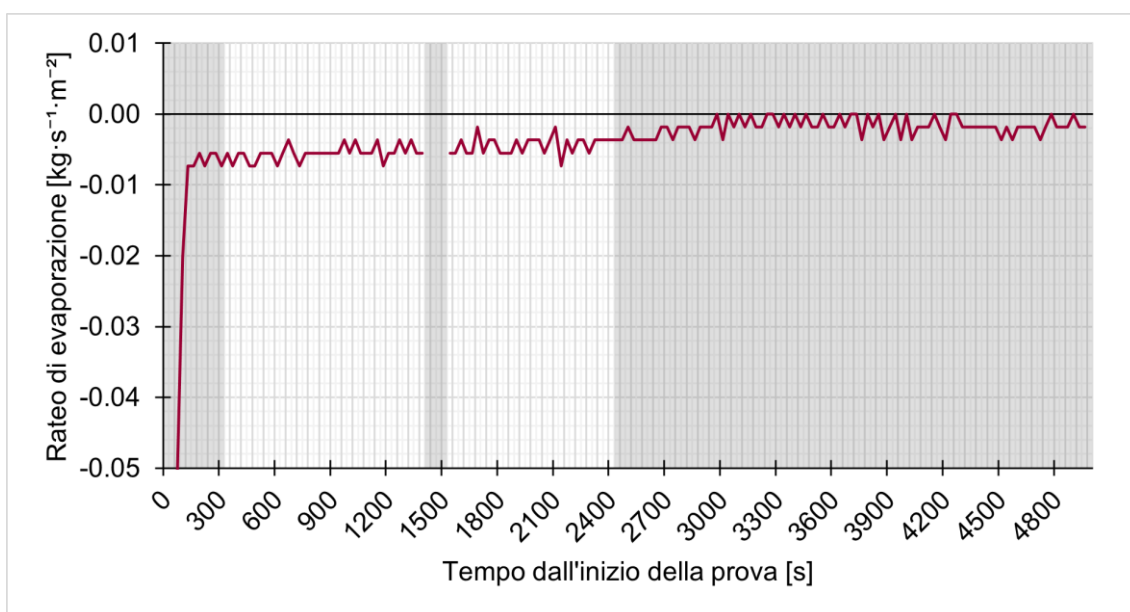


Figura III.14. Rateo di evaporazione istantaneo durante il Test 10. Con campitura grigia sono indicati gli intervalli temporali non presi in considerazione nel calcolo.

A causa della variazione delle condizioni atmosferiche durante la prova, l'andamento della massa di liquido all'interno del box presenta un chiaro punto di flesso, visibile in Figura III.13. Pertanto, per uniformità con i casi precedenti, si è ritenuto di considerare ai fini del calcolo solo l'andamento precedente al cambio di pendenza della curva. Sono stati esclusi anche i drastici sussulti dovuti all'approntamento e allo smantellamento del set up

sperimentale. In Figura III.14 è invece rappresentata l'evoluzione del rateo d'evaporazione istantaneo.

La media dei valori restituisce il rateo di evaporazione specifico $R = 0.0050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.2 Incendio di una pozza di GNL

Durante la campagna sperimentale sono stati effettuati esperimenti relativi anche al fenomeno della combustione di una pozza di GNL, data la peculiarità del liquido criogenico e la pericolosità del fenomeno.

3.2.1 Test 09

Pur non essendo lo scopo primario di questo lavoro di tesi, si è ritenuto di inserire l'analisi di questo test, in quanto progettato specificatamente in modo da poter effettuare un primo confronto speditivo tra il rateo di evaporazione e il rateo di combustione. Le condizioni di svolgimento del presente test sono le stesse del Test 10, descritto al §3.1.6.

Le condizioni atmosferiche si considerano inalterate, in quanto il test è svolto immediatamente prima; si è inoltre utilizzato il medesimo contenitore. La quantità di GNL combusta è 7.64 kg. Il valore è lievemente inferiore a quello utilizzato successivamente nel Test 10 a causa delle difficoltà logistiche nel maneggiare e distribuire il liquido criogenico nel contesto in cui si sono svolte le prove.



Figura III.15. *Un momento delle prove di combustione.*

Dall'analisi dei filmati, si evince che la fase di combustione è durata per 8:45 minuti. Si ottiene dunque un rateo di combustione pari a $0.0400 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Capitolo IV - Discussione

4.1 Evaporazione da pozza di GNL

Gli esperimenti condotti sull'evaporazione del GNL hanno restituito valori di rateo di evaporazione caratterizzati da notevoli differenze tra loro. I vari risultati sono riassunti in Tabella IV.1.

Tabella IV.1. *Riepilogo dei risultati ottenuti*

| Esperimento | Contenitore | Rateo evap. [kg·s ⁻¹ ·m ⁻²] |
|-------------|-------------|---|
| Test 01 | Box03 | 0.0112 |
| Test 02 | Ghiotta2 | 0.0023 |
| Test 03 | Ghiotta2 | 0.0024 |
| Test 04 | Box11 | 0.0051 |
| Test 05 | Box04 | 0.0100 |
| Test 10 | Ghiotta1 | 0.0050 |

Analizzando i dati ottenuti, emerge una prima correlazione con le caratteristiche geometriche del contenitore utilizzato per la prova. Poiché il fenomeno è principalmente governato dal flusso di calore proveniente dalla superficie d'appoggio (Nguyen, Kim e Chung 2020), particolare importanza è rivestita dall'estensione della pozza, rappresentata dal suo diametro equivalente.

Il diametro equivalente dei contenitori utilizzati è riportato in Tabella IV.2, calcolato sulla base delle caratteristiche elencate nella

Tabella II.2, qui riportate.

Tabella IV.2. *Diametro equivalente dei contenitori usati negli esperimenti.*

| Contenitore | Lato 1 [m] | Lato 2 [m] | Area [m ²] | Perimetro [m] | Diametro equivalente [m] |
|-------------|------------|------------|------------------------|------------------|-----------------------------|
| Box03 | 0.100 | 0.100 | 0.0100 | 0.400 | 0.100 |
| Box04 | 0.240 | 0.290 | 0.0696 | 1.060 | 0.263 |
| Box11 | 0.295 | 0.195 | 0.0575 | 0.980 | 0.235 |
| Ghiotta1 | 0.750 | 0.485 | 0.3638 | 2.470 | 0.589 |
| Ghiotta2 | 0.695 | 0.695 | 0.4830 | 2.780 | 0.695 |

Rappresentando il rateo di evaporazione in funzione del diametro equivalente si ottiene il grafico riportato in Figura IV.1. Fatto salvo il punto corrispondente ad un rateo di 0.0051

$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e un diametro di 0.235 m, relativo al Box11, i punti si dispongono in prima approssimazione secondo un modello di dipendenza lineare.

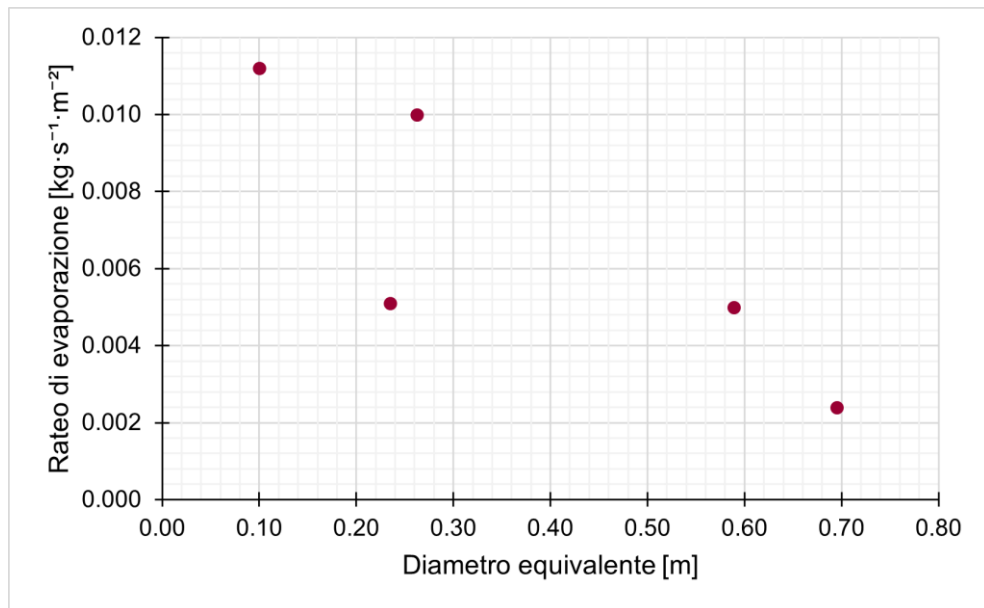


Figura IV.1. Rateo di evaporazione in funzione del diametro equivalente.

Omettendo il dato relativo al Box11, probabilmente inficiato da condizioni sperimentali non ideali, si ottiene la regressione lineare mostrata in **Figura IV.2**.

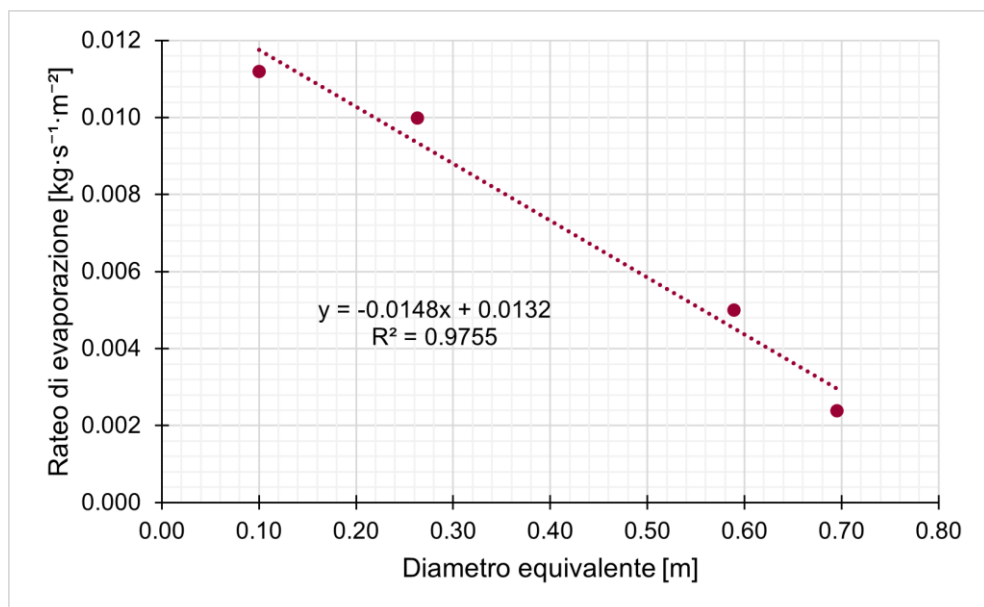


Figura IV.2. Indicazione della relazione lineare tra rateo di evaporazione e diametro equivalente.

Lo spessore della pozza risulta invece ininfluenza nella velocità di evaporazione (Nguyen, Kim e Chung 2020).

La dipendenza dal diametro della pozza è riferita al valore di rateo evaporazione medio valutato sulla durata della prova; è inoltre emersa una seconda possibile correlazione legata al valore istantaneo del rateo e al suo andamento nel tempo. Si riscontra infatti che il valore puntuale del rateo di evaporazione potrebbe dipendere dal tempo trascorso dall'inizio dello scenario, nella forma $R = F \cdot t^{-0.5}$ ove con t si indica il tempo dalla formazione della pozza e con F [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] un parametro caratteristico della superficie su cui insiste la pozza (Reid e Wang 1978).

In maniera più generale, si può ipotizzare un andamento dipendente da una potenza del tempo t trascorso dall'inizio della prova, nella forma $R = F \cdot t^\beta$ con F [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] parametro caratteristico del materiale d'appoggio e β esponente tale che $-1 < \beta < 0$.

A titolo di esempio si riportano in Figura IV.3 l'andamento del rateo di evaporazione durante il Test 01 e il confronto con una funzione del tempo nella forma $R = F \cdot t^{-0.5}$ con $F = 0.5$.

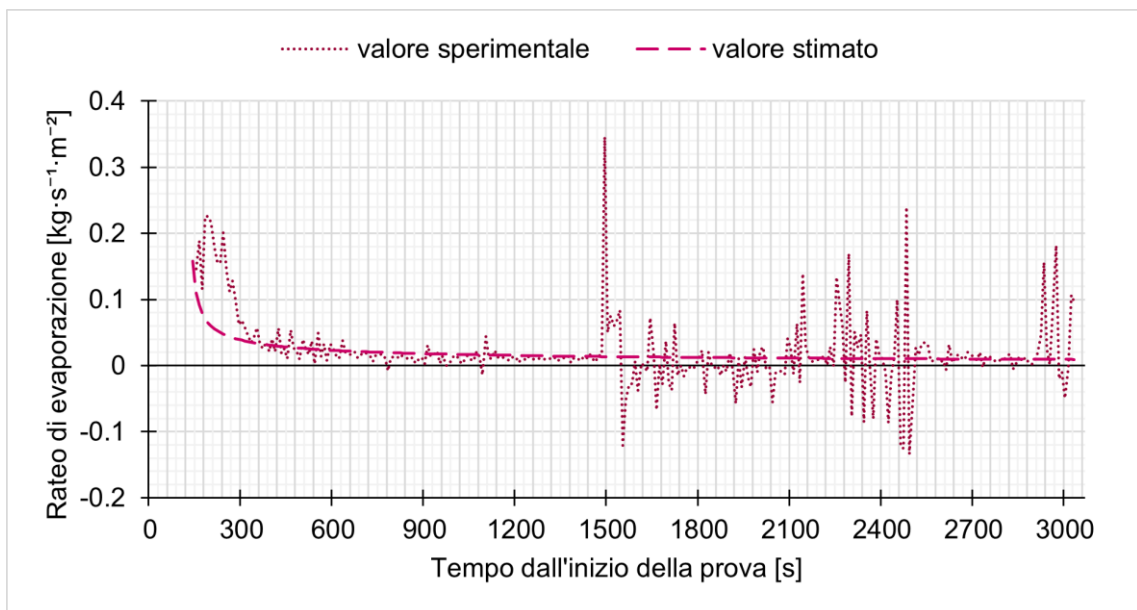


Figura IV.3. Confronto tra valore sperimentale e valore stimato del rateo di evaporazione.

Come accennato, la possibile spiegazione di questi fenomeni è da ricercarsi nel flusso di calore che dalla superficie d'appoggio si trasferisce al liquido criogenico.

Per quanto concerne la dipendenza dal tempo, essa è facilmente spiegata tramite i principi della termodinamica, per cui due corpi posti a contatto tenderanno ad assumere la stessa temperatura. Raffreddandosi il suolo, diminuisce anche la differenza di temperatura, e

pertanto diminuisce il flusso di calore che dalla base si trasmette alla pozza di GNL. Questa diminuzione comporta un rallentamento nella velocità di evaporazione.

La dipendenza dal diametro equivalente invece rappresenta un fenomeno più complesso. In letteratura ci sono diversi approfondimenti su questa relazione nel caso di pozze non confinate e in espansione, come quelle tipiche di uno sversamento sulla superficie del mare. In tali scenari le corone più esterne dell'area della pozza vengono raggiunte progressivamente, mano a mano che lo sversamento si espande sulla superficie d'appoggio: il GNL si trova dunque a posizionarsi costantemente su nuove parti di terreno, ancora a temperatura ambiente.

Nel caso in esame invece la pozza è confinata, pertanto da un punto di vista termico la situazione è differente. Una possibile ipotesi prende in considerazione il ruolo del rapporto tra l'area occupata dalla pozza e il suo perimetro, definizione stessa di diametro equivalente. Nel caso di scenario "a regime", cioè terminata la fase transitoria di riempimento della pozza alla massima estensione consentita dal suo confinamento, l'intera area sottostante il liquido si trova a basse temperature e può fornire un determinato apporto termico. La zona perimetrale invece potrebbe ricevere energia sia verticalmente dal suolo immediatamente sottostante, sia in direzione obliqua dal suolo ricompreso in una fascia immediatamente esterna al perimetro della pozza, influenzata in maniera meno immediata dalle basse temperature del liquido. In tal senso, il diametro equivalente è un'espressione della prevalenza di un apporto piuttosto che dell'altro: per diametri elevati, il contributo perimetrale non riesce a fornire sufficiente energia al centro della pozza, portando a una minore velocità di evaporazione. In caso di diametri ridotti, invece, il supposto contributo perimetrale è preponderante, fornendo al liquido maggiore calore e determinando una evaporazione più rapida.

Il fenomeno ipotizzato richiede una complessa trattazione analitica o numerica, non potendo prescindere da una modellazione quantomeno bidimensionale.

Inoltre, diversi altri fattori influenzano il bilancio termico della pozza di liquido criogenico. In prima battuta, sono presenti flussi di calore attraverso le pareti laterali della pozza, se confinata; si manifesta inoltre un apporto d'energia dato dall'irraggiamento solare. In aggiunta a ciò, l'eventuale presenza di vento introduce fenomeni di scambio

convettivo. Si stima che trascurando questi contributi secondari la stima possa discostarsi anche del 20% dal valore reale (Kim, Chang, et al. 2020).

Lo stesso fenomeno dell'ebollizione in sé non è descritto da un solo meccanismo, bensì si distinguono tre diversi regimi che si possono manifestare sia succedendosi nel tempo sia in contemporanea, a seconda delle caratteristiche della pozza (Liu, Olewski e Véchet 2015).

Esempio dei complessi meccanismi in gioco è un fenomeno osservabile tramite il grafico delle temperature registrate dalle termocoppie durante il Test 05, visibile nella Figura IV.4.

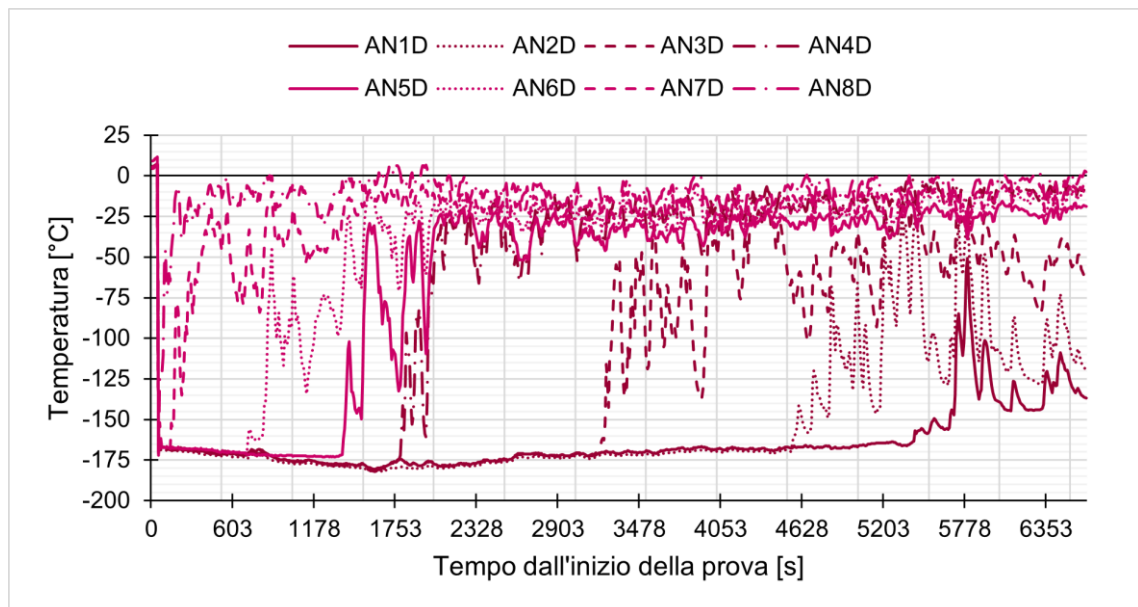


Figura IV.4. *Profili di temperatura all'interno del GNL durante il Test 05.*

È infatti possibile apprezzare una progressiva diminuzione della temperatura del GNL, fino a raggiungere i -180 °C , nonostante il liquido criogenico si trovasse ad una temperatura iniziale ricompresa tra -160 °C e -170 °C . Tale fenomeno è conosciuto in letteratura; il raffreddamento è causato dalla sottrazione di calore operata dalla quota di liquido che evapora, nel caso in cui questa sottrazione sia maggiore rispetto all'apporto di energia per convezione e per conduzione diretta (Nawaz, Olewski e Véchet 2021).

Un'ulteriore osservazione compiuta durante la campagna di esperimenti consiste nel rilevare che le basse temperature causano il brinamento dell'umidità atmosferica sulle superfici del contenitore, nonché l'accumulo di ghiaccio d'acqua nella pozza. In Figura IV.5 sono visibili esempi dei residui rinvenuti al termine delle prove.

Nel caso di sversamenti di grande scala su superfici d'acqua, la formazione di ghiaccio altera i processi di evaporazione (Vesovic 2007); alla scala degli esperimenti descritti potrebbe comunque avere un'influenza sui profili di massa e sul normale processo evaporativo del liquido criogenico.



Figura IV.5. *Residui di ghiaccio al termine di alcuni esperimenti.*

In considerazione di quanto esposto, emerge la necessità di condurre ulteriori studi prima di poter giungere a comprendere in maniera efficace le interazioni tra i meccanismi in gioco.

Conclusione

Il lavoro qui presentato si inserisce in un ambito di ricerca molto attuale e in fase evolutiva. I risultati ottenuti si collocano in armonia con quanto teorizzato e riscontrato da altri gruppi di ricerca, contribuendo al consolidamento delle conoscenze sul tema.

Cionondimeno, considerate le profonde influenze che molteplici fattori possono avere sul complesso fenomeno dell'evaporazione da una pozza di liquido criogenico, saranno sicuramente necessari ulteriori e approfonditi studi per giungere ad una trattazione più completa dell'argomento. In tal senso, un prezioso contributo può essere dato dall'applicazione dei modelli di fluidodinamica computazionale, per quanto necessitano anch'essi di essere validati tramite esperimenti reali ben progettati.

Parallelamente alla ricerca scientifica, procede anche l'applicazione operativa degli studi. Nel 2018 è stato costituito all'interno del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco un gruppo di studio con il compito di approfondire i rischi legati all'utilizzo del GNL, per giungere a definire le tecniche di intervento più valide nei vari scenari operativi. Il gruppo di studio è giunto nel 2021 alla redazione e diffusione tra il personale di un manuale operativo per la gestione degli scenari con GNL (Corpo nazionale dei Vigili del fuoco 2021).

I risultati ottenuti da questa serie di esperimenti possono costituire, opportunamente integrati, una valida base di partenza per poter meglio approfondire e studiare gli scenari incidentali più probabili, nell'ottica di garantire la sicurezza degli operatori e della popolazione durante gli interventi.

Bibliografia

- Corpo nazionale dei Vigili del fuoco. 2021. «Manuale ad uso del personale del C.N.VV.F. per LNG TRANSPORT EMERGENCY.»
- Hissong, D. W. 2007. «Keys to modeling LNG spills on water.» *Journal of Hazardous Materials* 140 (3): 465-477.
- ISO 16903. 2015. «Petroleum and natural gas industries — Characteristics of LNG, influencing the design, and material selection.»
- Jung, Byungchan, Kiheum Park, Younghoon Sohn, Juyoung Oh, Joon Chae Lee, Hae Won Jung, Yutaek Seo, e Youngsub Lim. 2022. «Prediction model of LNG weathering using net mass and heat transfer.» *Energy* 247: 123325.
- Kim, Myungbae, Duy Nguyen, e Byungil Choi. 2016. «Experimental study of the evaporation of spreading liquid nitrogen.» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 39: 68-73.
- Kim, Myungbae, Kyungyul Chang, Le-Duy Nguyen, Byungil Choi, e Taehoon Kim. 2020. «New measurement method for vaporization velocity for spreading cryogenic liquid.» *Process Safety and Environmental Protection* 133: 97-103.
- Liu, Yi, Tomasz Olewski, e Luc N. Véchet. 2015. «Modeling of a cryogenic liquid pool boiling by CFD simulation.» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 35: 125-134.
- Mishra, Saumitra, e Kirti Bhushan Mishra. 2021. «Numerical study of large-scale LNG vapour cloud explosion in an unconfined space.» *Process Safety and Environmental Protection* 149: 967-976.
- Mokhatab, Saeid, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, e David A. Wood. 2014. «Chapter 1 - LNG Fundamentals.» In *Handbook of Liquefied Natural Gas*, 1-106. Gulf Professional Publishing.
- Nawaz, Waqas, Tomasz Olewski, e Luc Véchet. 2021. «Assessment and validation of evaporation models for cryogenic liquids.» *Process Safety and Environmental Protection* 121: 50-61.

- Nguyen, Le-Duy, Myungbae Kim, e Kyungyul Chung. 2020. «Vaporization of the non-spreading cryogenic-liquid pool on the concrete ground.» *International Journal of Heat and Mass Transfer* 163: 120464.
- Osorio-Tejada, Jose Luis, Eva Llera-Sastresa, e Sabina Scarpellini. 2017. «Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU?» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 785-795.
- Planas-Cuchi, Eulàlia, Nuria Gasulla, Albert Ventosa, e Joaquim Casal. 2004. «Explosion of a road tanker containing liquified natural gas.» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17 (4): 315-321.
- Raj, Phani K. 2007. «LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges.» *Journal of Hazardous Materials* 140: 444-464.
- Reid, R. C., e R. Wang. 1978. «The boiling rates of LNG on typical dike floor materials.» *Cryogenics* 18 (7): 401-404.
- Sotoodeh, Karan. 2022. «Chapter Two - LNG technology.» In *Cryogenic Valves for Liquefied Natural Gas Plants*, 57-109. Gulf Professional Publishing.
- Vesovic, Velisa. 2007. «The influence of ice formation on vaporization of LNG on water surfaces.» *Journal of Hazardous Materials* 140 (3): 518-526.

Ringraziamenti

Non è compito facile esprimere in queste poche righe la gratitudine che provo nei confronti delle moltissime persone che mi hanno dato il loro sostegno in questi anni. È finalmente giunta la conclusione di un percorso faticoso, ricco però di profonde soddisfazioni sul piano umano.

Prima di tutto, un sentito ringraziamento va alla professoressa Chiara Vianello, che con la sua paziente disponibilità mi ha incoraggiato e guidato nella creazione di questo elaborato. Un grazie anche a Paolo Mocellin e a Mattia Carboni, che hanno contribuito alle fasi iniziali del lavoro.

Non sarei però giunto a questo traguardo senza il supporto della mia famiglia. Un grazie di cuore a mamma Cristina, a papà Marco e a Sofia, la mia sorellina: nonostante le difficoltà, la vostra fiducia incondizionata mi ha sostenuto durante i tortuosi anni di studi. Grazie anche a te, Nicola: sei sì parte della famiglia, ma anche e soprattutto un amico.

Negli anni che costituiscono questa cospicua parte della mia vita ho potuto conoscere diverse persone senza le quali sarebbe stato tutto molto più freddo e pesante.

Senza un ordine particolare, vorrei ringraziare dunque Alberto, Alessandra, Francesco, Giovanna, e gli altri ragazzi con cui ho condiviso il percorso a Trento. Del periodo padovano porto invece nel cuore i nomi di Davide, Francesca e Nicola. Ovviamente non posso dimenticare Alessandro, Giacomo e Giulia, uniti addirittura dai tempi del liceo. Il sostegno corale di tutti voi è sempre stato presente e sentito.

Un pensiero speciale lo rivolgo a Michela, amica comprensiva e sincera, rifugio saldo e accogliente: la tua presenza si è rivelata insostituibile. Grazie.

Lo spazio sta giungendo al termine, e sarebbero ancora molte le persone da citare con cui ho condiviso leggere risate e sfoghi liberatori; prima di chiudere vorrei almeno ringraziare i matti da legare del gruppo dei LEGO; gli amici che ho trovato nei pompieri, con quel legame tutto particolare; i *merenderos* del CAI con cui ho condiviso escursioni, nodi e spritz.

Un abbraccio a ognuno di voi!