



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in:

Sistemi Industriali e dell'Informazione

Sistemi antincendio navali: analisi tecnico-normativa e dimensionamento applicativo

Naval Fire Protection Systems: Technical, Regulatory
Analysis and Applied Design

Relatore:

Ing. Fabio Serpilli

Tesi di Laurea di:

Raimondi Riccardo

A.A. 2025/2026

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

In primis vorrei ringraziare la mia tenacia e i miei sacrifici che mi hanno permesso di arrivare fin qui, soprattutto nei momenti in cui la strada sembrava più incerta e la motivazione veniva meno.

Alla mia famiglia, siete il mio punto fermo di questo percorso, il luogo in cui ho sempre trovato sostegno, fiducia e la serenità necessaria per affrontare ogni difficoltà.

Grazie per aver creduto in me anche quando ero il primo a dubitare delle mie capacità.

Grazie per i vostri consigli e la libertà di inseguire i miei obiettivi, grazie per il vostro esempio e i vostri sacrifici.

Ai miei nonni, un ringraziamento speciale per l'affetto sincero e incondizionato, per le parole semplici ma sempre piene di saggezza e per aver rappresentato un punto di riferimento costante e rassicurante lungo tutto il mio percorso.

Ai miei amici, ad ognuno di voi devo i più sentiti ringraziamenti, senza il vostro sostegno, la vostra presenza soprattutto nei momenti più difficili, questo percorso non sarebbe stato lo stesso.

Porterò con me per sempre ogni ricordo costruito insieme, con la certezza che, il valore di questi anni è stato dato soprattutto dalle persone con cui li ho vissuti.

A Sofia, grazie per aver condiviso con me questo percorso con pazienza, comprensione e amore: sei il mio punto di equilibrio in questi anni.

Nei momenti in cui lo studio sembrava non finire mai e le difficoltà prendevano il sopravvento, sei sempre riuscita a farmi ritrovare la tranquillità e la motivazione per andare avanti.

Hai sopportato le mie preoccupazioni, le giornate storte e i periodi in cui il tempo da dedicarti era poco, senza mai smettere di sostenermi. Ogni tuo gesto, anche il più semplice, mi ha ricordato quanto sia importante avere accanto una persona che crede in te.

Per tutto questo, e per tutto ciò che non può essere racchiuso in poche righe, grazie.

Questo traguardo è anche un po' tuo.

INDICE

Introduzione.....	4
Capitolo 1 – Sicurezza antincendio in ambito navale	5
Capitolo 2 – Normative di sicurezza e salvaguardia.....	10
Capitolo 3 – Sistemi antincendio navali.....	16
Capitolo 4 – Caso di studio: Petroliera “Oil tank”	26
Capitolo 5 – Dimensionamento impianto a schiuma.....	30
Capitolo 6 – Conclusioni.....	45
Capitolo 7 – Bibliografia e sitografia.....	47

INTRODUZIONE

La tesi intende fornire un quadro organico che colleghi i principi tecnici di progettazione degli impianti navali e della prevenzione incendi con il quadro normativo di riferimento per il settore. Il tutto è stato approfondito in un caso di studio relativo al dimensionamento dell'impianto a schiuma su una nave petroliera.

Il lavoro prende origine dall'esperienza maturata durante il periodo di tirocinio presso una realtà del capoluogo marchigiano operante nel settore navalmeccanico ispettivo internazionale. Tale esperienza ha consentito di osservare da vicino come i requisiti normativi vengano tradotti in verifiche operative e come la prevenzione incendi sia parte integrante del più ampio sistema di sicurezza nave.

La presente tesi è articolata in sei capitoli principali. Nel primo capitolo vengono introdotti e approfonditi i fondamenti della sicurezza antincendio in ambito navale, con particolare attenzione ai principi generali di prevenzione e protezione.

Il secondo capitolo è dedicato all'analisi della normativa di riferimento, sia a livello internazionale che nazionale, evidenziando i principali requisiti applicabili al settore marittimo.

Il terzo capitolo descrive in modo sistematico le principali tipologie di impianti antincendio installati a bordo delle navi, illustrandone il funzionamento e i campi di applicazione.

Il quarto capitolo presenta un caso studio relativo a una nave petroliera, con un'analisi dei principali rischi di incendio ed esplosione e una descrizione dei sistemi di protezione adottati.

Il quinto capitolo è dedicato allo sviluppo del dimensionamento di un impianto a schiuma, con riferimento ai criteri progettuali e alle metodologie di calcolo impiegate.

Infine, il sesto capitolo riporta le conclusioni del lavoro, sintetizzando i risultati ottenuti e le considerazioni finali.

1 SICUREZZA ANTINCENDIO IN AMBITO NAVALE

La comprensione dei fenomeni alla base della combustione rappresenta il punto di partenza per l'analisi della sicurezza antincendio in ambito navale. L'incendio è il risultato di una reazione di combustione non controllata tra un combustibile e un comburente, generalmente l'ossigeno presente nell'aria, in presenza di una sorgente di innesco e di adeguate condizioni termiche. Si tratta di una reazione chimica esotermica che comporta il rilascio di energia sotto forma di calore e radiazione, con conseguente aumento della temperatura e possibile propagazione del fenomeno.

La rappresentazione più semplice di tale processo è il cosiddetto triangolo del fuoco, costituito da tre elementi fondamentali: combustibile, comburente e calore. Tuttavia, una descrizione più completa è fornita dal tetraedro del fuoco, che include anche la reazione chimica a catena, responsabile del mantenimento della combustione una volta avviata. La conoscenza di questi elementi è essenziale per comprendere i principi su cui si basano le strategie di prevenzione e spegnimento degli incendi.

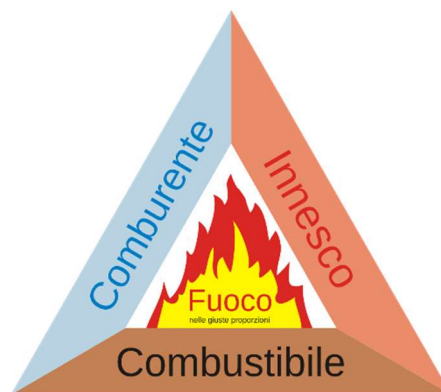


Figura 1.1 -Triangolo del fuoco

In ambito navale, i combustibili sono molteplici e distribuiti in diverse aree della nave. Tra questi si annoverano carburanti (fuel oil e diesel), oli lubrificanti, fluidi idraulici, carichi pericolosi, vernici, materiali isolanti, rivestimenti interni, cablaggi elettrici, materiali plastici e compositi, nonché rifiuti e residui di lavorazione. Parallelamente, anche le sorgenti di innesco risultano numerose e comprendono superfici ad alta temperatura, guasti elettrici, archi elettrici, attriti meccanici, fiamme libere, lavorazioni a caldo, scariche elettrostatiche e malfunzionamenti dei macchinari. La coesistenza di tali fattori, spesso in spazi confinati, contribuisce ad aumentare la complessità e la pericolosità del rischio incendio a bordo.

Il rischio incendio in ambito navale presenta infatti caratteristiche peculiari rispetto agli ambienti terrestri. La nave costituisce un sistema chiuso e altamente compartimentato, nel quale la propagazione del fuoco e dei fumi può avvenire rapidamente attraverso condotte, sistemi di ventilazione e aperture strutturali. Inoltre, la presenza simultanea di fonti di energia, fluidi infiammabili e impianti complessi crea condizioni favorevoli all'innesco e allo sviluppo dell'incendio.

Un ulteriore elemento di criticità è rappresentato dalla gestione dell'emergenza: la prima risposta è affidata esclusivamente all'equipaggio, che deve intervenire in condizioni difficili, caratterizzate da scarsa visibilità, alte temperature e situazioni di stress operativo. Contestualmente, deve essere garantita la sicurezza complessiva della nave, mantenendo il controllo dei sistemi essenziali e della navigazione.

Le conseguenze di un incendio a bordo possono essere estremamente gravi e includono la perdita di vite umane, danni agli impianti di propulsione e governo, compromissione dei sistemi elettrici, danni strutturali, inquinamento ambientale, perdita del carico e, nei casi più estremi, l'abbandono della nave. Per tali ragioni, la sicurezza antincendio si basa su un approccio multilivello che comprende la prevenzione dell'innesco, la limitazione della propagazione tramite compartimentazione, la rilevazione precoce, lo spegnimento rapido e la protezione delle vie di fuga.

Un aspetto fondamentale nella gestione degli incendi è la loro classificazione, che avviene in base alla natura del combustibile coinvolto. Gli incendi di classe A riguardano materiali solidi combustibili, quelli di classe B liquidi infiammabili, la classe C gas infiammabili, la classe D metalli combustibili e la classe F oli e grassi da cucina. Tale classificazione è essenziale per la scelta del mezzo estinguente più appropriato: l'acqua risulta efficace per materiali solidi, mentre schiume e polveri sono più adatte per liquidi infiammabili; nei locali con (classe E) apparecchiature elettriche in tensione si utilizzano invece agenti come CO₂ o gas inerti.



Figura 1.2 – Classificazione fuochi

All'interno della nave esistono inoltre aree particolarmente critiche dal punto di vista del rischio incendio, caratterizzate da condizioni operative, presenza di combustibili e sorgenti di innesco che rendono tali spazi maggiormente vulnerabili rispetto ad altri.

Tra queste, la sala macchine rappresenta senza dubbio una delle zone a più elevato rischio. In essa sono concentrati motori principali e ausiliari, linee di alimentazione del combustibile, sistemi di lubrificazione, impianti di scarico ad alta temperatura, turbine, generatori, separatori e quadri elettrici. La compresenza di fluidi infiammabili e superfici calde crea condizioni favorevoli all'innesco. Le cause più frequenti di incendio sono riconducibili a perdite di olio o combustibile nebulizzato che entrano in contatto con superfici surriscaldate, guasti agli impianti elettrici, difetti nei sistemi di isolamento termico e carenze nelle attività di manutenzione. A ciò si aggiunge la complessità degli impianti e la difficoltà di accesso ad alcune aree, che può ritardare l'individuazione precoce del focolaio. Per tali motivi, la sala macchine è generalmente protetta da sistemi automatici di rilevazione e da impianti fissi di spegnimento, come sistemi a CO₂ o water mist, integrati da procedure di emergenza e dispositivi di arresto remoto degli impianti.

I ponti di carico delle petroliere costituiscono un'altra area ad alto rischio incendio, in quanto direttamente coinvolti nelle operazioni di movimentazione di sostanze infiammabili. In queste zone sono presenti linee di carico, valvole, manifold, pompe e attrezzature di trasferimento che possono generare emissioni di vapori infiammabili, specialmente durante le operazioni di carico, scarico o travaso. La presenza di tali vapori, unita a possibili sorgenti di innesco, rende il ponte di carico un ambiente particolarmente critico sotto il profilo della sicurezza. In questo contesto, la protezione antincendio si basa principalmente su impianti a schiuma, progettati per intervenire rapidamente in caso di incendio di liquidi infiammabili, garantendo la copertura uniforme delle superfici e la soppressione dei vapori.

I serbatoi di carico rappresentano infine ambienti particolarmente delicati e complessi, in quanto destinati a contenere grandi quantità di prodotti con bassa temperatura di infiammabilità, capaci di generare atmosfere potenzialmente esplosive. In tali spazi, il rischio principale non è solo l'incendio, ma anche l'esplosione, che può verificarsi in presenza di una miscela aria-combustibile all'interno dei limiti di infiammabilità, per prevenire tali condizioni viene impiegato il sistema a gas inerte, che consente di ridurre la concentrazione di ossigeno nei serbatoi al di sotto dei valori necessari per sostenere la combustione. Questo sistema rappresenta una misura di prevenzione fondamentale e opera in modo continuo durante le operazioni della nave. Tuttavia, la sua efficacia dipende strettamente dal corretto funzionamento degli impianti, dalla tenuta delle linee e dal costante monitoraggio dei parametri operativi.

A ciò si aggiungono i sistemi di ventilazione, controllo della pressione e strumentazione per il rilevamento dei gas, che contribuiscono a garantire condizioni di sicurezza all'interno dei serbatoi. Eventuali malfunzionamenti o errori operativi possono determinare un rapido incremento del rischio, rendendo essenziale una gestione attenta e continua di tali sistemi.

Nel complesso, la gestione del rischio incendio a bordo di una nave richiede un approccio integrato e multidisciplinare, che combini conoscenze teoriche, progettazione impiantistica, applicazione rigorosa delle normative internazionali e una corretta gestione operativa. Non è sufficiente disporre di impianti tecnicamente avanzati se questi non sono adeguatamente mantenuti, verificati e utilizzati da personale formato. La sicurezza antincendio è infatti il risultato dell'interazione tra sistemi tecnici, fattore umano e organizzazione operativa. Solo attraverso una visione sistemica e coordinata è possibile garantire un elevato livello di protezione, ridurre in modo significativo la probabilità di insorgenza di un incendio e limitarne le conseguenze nel caso in cui esso si verifichi.

A tali sistemi si affiancano dispositivi di monitoraggio continuo, sistemi di messa a terra per la prevenzione delle scariche elettrostatiche e apparecchiature certificate per ambienti a rischio di esplosione, comunemente definite ATEX (Atmosphères Explosibles), oltre a rigorose procedure operative finalizzate alla minimizzazione del rischio durante le operazioni.

I dispositivi ATEX sono progettati per garantire un funzionamento sicuro in presenza di atmosfere potenzialmente esplosive, che possono generarsi a causa della presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili miscelati con l'aria. Tali condizioni si riscontrano tipicamente nei ponti di carico, nei manifold, nei locali pompe e per esempio in tutte le aree classificate dove possono svilupparsi vapori di idrocarburi.



Figura 1.3 – Marcatura Ex

Le apparecchiature impiegate in questi contesti comprendono motori elettrici, quadri di comando, sensori, sistemi di illuminazione, ventilatori e dispositivi di comunicazione, tutti progettati in modo tale da non costituire una sorgente di innesco, ciò è reso possibile attraverso specifiche soluzioni costruttive, identificate da sigle normalizzate (Ex), che indicano le diverse modalità di protezione adottate per garantire il funzionamento sicuro in presenza di atmosfere esplosive.

Sigla	Tipo di protezione	Principio di funzionamento	Obiettivo di sicurezza
Ex d	Involucro antideflagrante	L'involucro è progettato per resistere a un'esplosione interna e impedirne la propagazione verso l'esterno	Contenimento dell'esplosione ed eliminazione del rischio di innesco esterno
Ex i	Sicurezza intrinseca	Limitazione dell'energia elettrica e termica al di sotto dei valori minimi necessari all'innesco	Prevenzione della generazione di scintille o effetti termici pericolosi
Ex p	Pressurizzazione	Mantenimento di una sovrappressione interna mediante gas protettivo per impedire l'ingresso di atmosfera esplosiva	Isolamento dell'ambiente interno da quello esterno pericoloso
Ex e	Sicurezza aumentata	Adozione di soluzioni costruttive volte a prevenire archi, scintille e surriscaldamenti	Riduzione della probabilità di guasto e di innesco

Tabella 1.1 – Tipologie di protezione

Queste impediscono la propagazione di eventuali esplosioni o limitano l'energia disponibile al di sotto della soglia di accensione delle miscele infiammabili.

In base alla normativa europea di riferimento, in particolare la Direttiva ATEX 1999/92/CE per la classificazione delle aree e la Direttiva ATEX 2014/34/UE per le apparecchiature, le zone in cui può formarsi un'atmosfera esplosiva vengono suddivise in funzione della probabilità e della durata della sua presenza, al fine di definire il livello di protezione richiesto per i dispositivi installati.

Un aspetto fondamentale è rappresentato dalla classificazione delle atmosfere esplosive in funzione della probabilità e della durata della loro presenza. In particolare, per le atmosfere a base di gas si distinguono le zone 0, 1 e 2, caratterizzate rispettivamente da una presenza continua o per lunghi periodi, da una presenza probabile durante il normale esercizio e da una presenza poco probabile e di breve durata. A ciascuna di queste zone corrisponde una specifica categoria di apparecchiature ATEX, identificate con le sigle 1G, 2G e 3G, che definiscono il livello di protezione richiesto in relazione al rischio presente nell'ambiente operativo.

Categoria	Zona	Livello di rischio	Presenza atmosfera esplosiva
1G	Zona 0	Molto elevato	Presenza continua o per lunghi periodi
2G	Zona 1	Elevato	Presenza probabile durante normale esercizio
3G	Zona 2	Basso	Presenza poco probabile e di breve durata

Tabella 1.2 – Classificazione Atmosfere esplosive

Questa classificazione consente di selezionare apparecchiature con un adeguato livello di protezione, garantendo un corretto compromesso tra sicurezza e funzionalità operativa.

È importante sottolineare che esiste una classificazione analoga anche per atmosfere esplosive dovute alla presenza di polveri combustibili, sebbene nel contesto navale risultino generalmente meno rilevanti rispetto ai gas e ai vapori infiammabili.

L'impiego di dispositivi certificati secondo la Direttiva ATEX 2014/34/UE deve essere accompagnato da una corretta installazione, manutenzione e verifica periodica, in quanto eventuali deterioramenti o modifiche non autorizzate potrebbero comprometterne l'efficacia.

La presenza di tali dispositivi, integrata con sistemi di controllo e procedure operative rigorose, contribuisce in maniera determinante alla riduzione del rischio di innesco in ambienti ad elevata pericolosità. La gestione del rischio richiede pertanto un'attenta integrazione tra soluzioni impiantistiche, conformità normativa e disciplina operativa, al fine di garantire elevati standard di sicurezza durante tutte le fasi di esercizio della nave.

2 NORMATIVE DI SICUREZZA E SALVAGUARDIA

Prima di entrare nel vivo della trattazione, è necessario soffermarsi sul tema della sicurezza in mare e sugli enti o istituzioni, internazionali e nazionali, che se ne prendono carico, elaborando le necessarie normative e imponendo la loro precisa applicazione.

Premesso che il problema della sicurezza è andato assumendo crescente importanza negli ultimi decenni, osserviamo che gli enti o istituzioni cui è demandato il compito di stabilire le norme riguardanti la costruzione della nave, la scelta e la lavorazione dei materiali, l'installazione degli impianti e delle apparecchiature di bordo, la sistemazione delle attrezzature, la carica delle merci, la condotta della navigazione, la prevenzione dell'inquinamento marino, l'organizzazione del lavoro e dei servizi di sicurezza, l'igiene e l'abitabilità ecc., possono essere sia pubblici sia privati

Tra le istituzioni pubbliche che operano in campo internazionale è importante citare la Organizzazione Marittima Internazionale (IMO – International Maritime Organization), la Organizzazione Internazionale del Lavoro (ILO – International Labour Organization) e la Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO – World Health Organization).

Questi enti, singolarmente o congiuntamente, elaborano normative di sicurezza e salvaguardia che gli Stati ad esse aderenti (fra i quali c'è anche l'Italia) accolgono nelle rispettive legislazioni nazionali.

Per quanto riguarda il territorio nazionale, il Ministero della Marina Mercantile (Min. M.M.) promuove l'approvazione di leggi, decreti e regolamenti atti a dare piena attuazione alle normative internazionali e svolge una sistematica azione di verifica giovando dell'operato delle Capitanerie di Porto. Un ente privato è invece il RINA, il quale ha il dovere di classificare le navi, ossia di esprimere un giudizio sulla loro idoneità a svolgere un determinato servizio e svolge la funzione di Ente Tecnico del Min. M.M.

L'Organizzazione Marittima Internazionale, in acronimo IMO, è un istituto specializzato delle Nazioni Unite con sede a Londra e fondato nel 1948 durante una conferenza internazionale a Ginevra con il fine di:



Figura 2.1 – Logo International Maritime Organization

- Fornire un valido strumento per la cooperazione intergovernativa nel settore delle normative riguardanti questioni tecniche;
- Incoraggiare e facilitare l'adozione di sistemi atti a garantire la sicurezza marittima, l'efficienza della navigazione, la prevenzione e il controllo dell'inquinamento marino da parte delle navi;
- Incoraggiare le singole autorità governative ad abbandonare misure discriminatorie e restrizioni non indispensabili che ostacolano la navigazione commerciale internazionale.

Per raggiungere questi obiettivi, l'Organizzazione marittima internazionale prevede la redazione di convenzioni, accordi o altri strumenti adeguati. L'organizzazione non solo si è assunta la responsabilità di supervisionare l'applicazione e il rinnovo della convenzione originale, ma ha anche formulato una serie di nuove leggi internazionali, esprimendo l'evoluzione logica del trasporto marittimo, della costruzione navale, delle rotte e della tecnologia della seconda metà del XXI secolo. Attualmente aderiscono all'IMO 172 Paesi membri ed è articolata in una Assemblea che si riunisce a cadenza biennale, un Segretariato (composto da circa 300 unità), un Consiglio Esecutivo (40 stati membri), cinque Comitati principali e nove sottocomitati.

L'Italia, in tema di navigazione marittima, è considerata tra le dieci nazioni maggiormente evolute e capaci di dare maggior stimolo allo sviluppo del trasporto marittimo e contribuisce all'esercizio dell'IMO con una quota del 2% circa del bilancio dell'organizzazione.

Tra i diversi Comitati tecnici dell'IMO è particolarmente importante il Comitato per la Sicurezza Marittima (MSC – Maritime Safety Committee) ossia quello che si interessa della sicurezza delle navi, della navigazione e della vita umana in mare. Dal lavoro dei comitati tecnici discendono le normative IMO attualmente in vigore e che sono state approvate con numerose Convenzioni, fra le quali meritano particolare menzione:

- a) Convenzione internazionale del 1974 per la salvaguardia della vita umana in mare (SOLAS 74 – International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974);
- b) Convenzione internazionale del 1973 sulla prevenzione dell'inquinamento causato da navi (MARPOL 73 – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973).

La sicurezza antincendio in ambito navale è regolata dalla convenzione internazionale per la salvaguardia della vita umana in mare, SOLAS acronimo di “Safety Of Life At Sea” rappresenta il riferimento principale.

La sicurezza antincendio su navi è regolata dalla convenzione internazionale per la salvaguardia della vita umana in mare, SOLAS, che rappresenta il riferimento principale. L'obiettivo principale della convenzione SOLAS è specificare le norme minime per la costruzione, l'equipaggiamento e il funzionamento delle navi, compatibili con la loro sicurezza.

Gli Stati di bandiera hanno la responsabilità di garantire che le navi sotto la loro bandiera rispettino tali requisiti, e un insieme di certificati è prescritto dalla Convenzione come prova della conformità. Le disposizioni di controllo consentono inoltre ai Governi contraenti di ispezionare navi di altri Stati qualora vi siano fondati motivi per ritenere che la nave e le sue attrezzature non siano sostanzialmente conformi ai requisiti stabiliti.

In tale contesto, il Capitolo II-2 della SOLAS (“Construction – Fire protection, fire detection and fire extinction”) assume un ruolo centrale, in quanto disciplina in maniera organica la prevenzione, la rilevazione e l'estinzione degli incendi a bordo. L'impostazione adottata è di tipo prestazionale (*goal-based approach*), ovvero basata sulla definizione degli obiettivi di sicurezza e delle prestazioni che i sistemi devono garantire, piuttosto che sull'imposizione di soluzioni tecniche rigide e predeterminate, questo approccio consente ai progettisti di adottare

soluzioni diverse e anche innovative, purché siano in grado di dimostrare il raggiungimento dei livelli di sicurezza richiesti.

In particolare, le principali Regole del Capitolo II-2 rilevanti ai fini della sicurezza antincendio sono:

- **Regola 2** – *Definisce gli obiettivi generali e i requisiti funzionali della protezione antincendio.*
- **Regola 4** – *Stabilisce le misure per ridurre la probabilità di innesco dell'incendio.*
- **Regola 5** – *Riguarda il controllo dello sviluppo dell'incendio nei locali di origine.*
- **Regola 7** – *Disciplina i sistemi di rilevazione e allarme incendio.*
- **Regola 8** – *Definisce le misure per il controllo della propagazione dei fumi.*
- **Regola 9** – *Regola la compartimentazione e la resistenza al fuoco delle strutture.*
- **Regola 10** – *Stabilisce i requisiti relativi ai sistemi e ai mezzi di estinzione.*
- **Regola 13** – *Definisce i requisiti per le vie di fuga e l'evacuazione.*
- **Regola 19** – *Introduce prescrizioni aggiuntive per navi che trasportano carichi pericolosi.*

Tali disposizioni perseguono l'obiettivo di garantire un approccio integrato alla sicurezza antincendio, attraverso la combinazione di misure passive, quali la resistenza al fuoco delle strutture e la compartimentazione, e misure attive, tra cui sistemi di rilevazione, allarme e spegnimento automatico.

A completamento della Convenzione SOLAS, il Fire Safety Systems Code (FSS Code) fornisce le specifiche tecniche dettagliate relative ai sistemi antincendio installati a bordo. Il codice traduce i principi generali della SOLAS in criteri progettuali e prestazionali concreti, definendo requisiti in termini di prestazioni minime, modalità di installazione, condizioni di prova e caratteristiche dei componenti. In particolare, il FSS Code è strutturato in capitoli tematici che trattano i diversi sistemi, tra cui:

- **Capitolo 1** – *Definisce campo di applicazione, principi generali e requisiti comuni ai sistemi antincendio.*
- **Capitolo 2** – *Specifica requisiti per impianti di rilevazione automatica e sistemi di segnalazione.*
- **Capitolo 3** – *Riguarda sistemi di controllo e gestione dei fumi.*
- **Capitolo 4** – *Definisce caratteristiche e prestazioni dei sistemi sprinkler.*
- **Capitolo 5** – *Sistemi fissi a gas per l'estinzione incendi. Include sistemi a CO₂ e altri gas estinguenti.*
- **Capitolo 6** – *Riguarda impianti a schiuma ad alta, media o bassa espansione.*
- **Capitolo 7** – *Specifica requisiti per impianti a polvere chimica.*
- **Capitolo 8** – *Include sistemi a nebulizzazione e spruzzo d'acqua (water mist).*
- **Capitolo 9** – *Rete antincendio di bordo, pompe e idranti (fire main).*
- **Capitolo 10** – *Definisce tipologie, capacità e requisiti degli estintori.*

- **Capitolo 11** – *Include dispositivi di protezione individuale e autorespiratori.*
- **Capitolo 12** – *Requisiti per la ventilazione in relazione alla sicurezza antincendio.*
- **Capitolo 13** – *Specifica illuminazione, segnaletica e requisiti delle vie di esodo.*
- **Capitolo 14** – *Sistemi per la gestione delle comunicazioni durante emergenze incendio.*
- **Capitolo 15** – *Riguarda il controllo centralizzato dei sistemi antincendio.*

Dal punto di vista ingegneristico, il FSS Code rappresenta uno strumento essenziale per la progettazione e la verifica degli impianti, in quanto garantisce che i sistemi siano in grado di operare efficacemente nelle condizioni previste e in conformità ai requisiti internazionali.

Negli ultimi anni, la normativa relativa agli agenti schiumogeni per impianti antincendio in ambito navale ha subito un'evoluzione significativa, principalmente a seguito della progressiva eliminazione delle sostanze per-fluoroalchiliche (PFOS) e poli-fluoroalchiliche (PFAS), impiegate tradizionalmente nelle schiume antincendio per incendi di liquidi infiammabili. Tale processo è stato promosso in ambito internazionale dall'International Maritime Organization, attraverso aggiornamenti alla Convenzione SOLAS e ai relativi codici applicativi.

In particolare, le modifiche più recenti al Capitolo II-2 della SOLAS e al Fire Safety Systems Code prevedono il progressivo abbandono degli agenti schiumogeni contenenti sostanze fluorurate, imponendo la loro sostituzione con formulazioni prive di fluoro (Fluorine-Free Foam, FFF o SFF). Tali prescrizioni si applicano sia alle nuove costruzioni, per le quali la conformità è richiesta sin dalla fase di progettazione alla consegna, sia alle navi esistenti, che devono adeguarsi entro le successive visite ispettive previste dal regime di certificazione.

Parallelamente, gli agenti schiumogeni utilizzati a bordo devono soddisfare specifici requisiti prestazionali stabiliti dalle linee guida IMO, che ne verificano l'efficacia nello spegnimento di incendi di idrocarburi, anche in condizioni operative rappresentative dell'ambiente marino, come l'utilizzo con acqua di mare. Tali requisiti risultano particolarmente rilevanti per applicazioni quali la protezione del ponte di carico delle petroliere, dove la rapidità di intervento e la capacità di soppressione dei vapori sono elementi determinanti.

La transizione verso schiumogeni fluorine-free comporta inoltre implicazioni tecniche non trascurabili per gli impianti di bordo. In particolare, non è sufficiente la semplice sostituzione del concentrato schiumogeno, ma è necessaria una completa bonifica dei sistemi esistenti, comprensiva di serbatoi, miscelatori e linee di distribuzione, al fine di evitare contaminazioni residue che possano compromettere le prestazioni del nuovo agente. Tale processo richiede verifiche aggiuntive in fase ispettiva e può incidere anche sulla validazione delle prestazioni idrauliche e funzionali del sistema.

Nel complesso, l'evoluzione normativa in ambito navale evidenzia una crescente attenzione non solo alla sicurezza antincendio, ma anche alla compatibilità ambientale degli impianti, introducendo nuovi vincoli progettuali e gestionali che devono essere considerati fin dalle fasi iniziali di progettazione e lungo l'intero ciclo di vita della nave.

I Registri di Classificazione sono istituiti a struttura privatistica i cui compiti, inizialmente limitati alla classificazione delle navi nell'interesse di costruttori, assicuratori, armatori e noleggiatori, si sono progressivamente ampliati in relazione alla crescente attenzione delle autorità statali verso la sicurezza della navigazione e la salvaguardia della vita umana in mare. Oggi tali enti operano in stretta connessione con gli Stati di bandiera, verificando che le navi siano conformi alle normative nazionali e internazionali applicabili. Il primo registro di classificazione fu il Lloyd's Register, fondato nel 1760, seguito da altri importanti organismi come Bureau Veritas (1828) e il Registro Italiano Navale (1861).

In particolare, il Registro Italiano Navale svolge un duplice ruolo: da un lato opera come società di classificazione, dall'altro agisce come ente tecnico per conto dell'amministrazione marittima nazionale. La classificazione rappresenta uno strumento essenziale per attestare l'efficienza e l'idoneità della nave al servizio previsto. In ambito nazionale, una nave con stazza lorda superiore a determinate soglie deve essere dotata di certificati di navigabilità rilasciati dalle autorità competenti sulla base delle verifiche tecniche effettuate proprio dal RINA.



Figura 2.2 – Logo RINA

Accanto alla normativa internazionale emanata dall'International Maritime Organization, le principali società di classificazione RINA, Bureau Veritas, DNV e Lloyd's Register sviluppano regole tecniche dettagliate per la progettazione, costruzione e manutenzione delle navi. Tali regole recepiscono i requisiti internazionali e li integrano con criteri applicativi più specifici, fornendo indicazioni pratiche riguardanti materiali, installazione e gestione degli impianti.

È tuttavia opportuno evidenziare come l'applicazione concreta dei requisiti normativi presenti alcuni limiti applicativi, in quanto strettamente connessa all'attività degli enti di classificazione, i quali, pur operando nel rispetto delle convenzioni internazionali, possono adottare criteri applicativi e interpretazioni tecniche leggermente differenti, in particolare per quanto riguarda le modalità di verifica, i margini progettuali e le procedure di accettazione degli impianti. Di conseguenza, in fase progettuale e realizzativa, l'armatore e il progettista sono chiamati a confrontarsi con le specifiche prescrizioni dell'ente di classifica prescelto, valutando gli aspetti tecnici ed economici connessi al processo di certificazione. Questo non modifica i requisiti fondamentali imposti dalla normativa internazionale, ma può influenzare le soluzioni progettuali adottate e le modalità di implementazione degli impianti antincendio a bordo.

Il contributo degli enti di classifica è fondamentale anche nel processo di approvazione documentale, che comprende l'analisi dei disegni tecnici, dei calcoli di progetto e della documentazione dei componenti, nonché nello svolgimento di ispezioni periodiche a bordo, finalizzate a verificare il mantenimento nel tempo dei requisiti di sicurezza.

Un ruolo altrettanto rilevante è svolto dal processo di certificazione degli impianti antincendio, che costituisce un percorso continuo volto a garantire la conformità dei sistemi ai requisiti

normativi e la loro idoneità all'impiego in ambiente marino. Tale processo ha inizio con le procedure di type approval, attraverso le quali viene verificata la conformità dei componenti agli standard tecnici internazionali, e prosegue durante le fasi di costruzione e installazione mediante verifiche ispettive. La documentazione tecnica associata agli impianti riveste un'importanza fondamentale e comprende certificati di omologazione, rapporti di prova, disegni approvati, specifiche tecniche, certificati di taratura, registri di manutenzione e verbali delle prove funzionali.

Nel corso della vita operativa della nave, la certificazione viene mantenuta attraverso controlli periodici e attività di manutenzione programmata, come previsto anche dai requisiti di survey delle società di classificazione e dalle prescrizioni SOLAS (Capitolo I – Survey and Certification). La disponibilità e l'aggiornamento della documentazione consentono di monitorare lo stato di efficienza del sistema e di verificarne le prestazioni nel tempo. In questo contesto, la certificazione non rappresenta un mero adempimento formale, ma costituisce uno strumento essenziale per garantire l'effettiva affidabilità degli impianti antincendio e, di conseguenza, la sicurezza complessiva della nave.

3 SISTEMI ANTINCENDIO NAVALI

La sicurezza antincendio a bordo delle navi si basa su un approccio sistemico e multilivello, nel quale diverse tipologie di misure e impianti operano in modo integrato al fine di prevenire l'innescò, garantire una rapida rilevazione, contenere lo sviluppo e assicurare un efficace controllo dell'incendio. In ambito navale, tale sistema risulta particolarmente complesso a causa della presenza di spazi confinati, della varietà di materiali impiegati e della necessità di garantire la sicurezza sia dell'equipaggio sia dell'unità navale stessa in condizioni operative spesso variabili e potenzialmente critiche.

In questo contesto, i sistemi antincendio navali possono essere distinti in misure di protezione passive e misure di protezione attive, entrambe indispensabili e strettamente complementari. La loro efficacia, infatti, non dipende unicamente dalla qualità dei singoli elementi, ma soprattutto dalla corretta integrazione progettuale e funzionale all'interno dell'architettura della nave. È proprio questa integrazione a rappresentare uno degli aspetti più rilevanti dal punto di vista ingegneristico, in quanto sistemi anche molto performanti, se non adeguatamente coordinati, possono risultare inefficaci in condizioni reali di emergenza.

Le misure passive comprendono tutte quelle soluzioni progettuali e costruttive che non richiedono un'azione diretta o un'attivazione per svolgere la loro funzione di protezione e che costituiscono la prima barriera contro la propagazione del fuoco. Esse sono finalizzate a limitare lo sviluppo e l'estensione dell'incendio attraverso la compartimentazione strutturale della nave mediante paratie e ponti resistenti al fuoco, la suddivisione degli ambienti in zone a diverso livello di rischio e l'impiego di materiali con caratteristiche di bassa infiammabilità e ridotta propagazione di fiamma. A queste si aggiunge l'isolamento termico delle superfici esposte a fonti di calore, come motori, condotte e apparecchiature elettriche, insieme all'installazione di porte e serrande tagliafuoco progettate per mantenere l'integrità dei compartimenti anche in condizioni di incendio.

Un ulteriore elemento fondamentale riguarda la progettazione delle vie di fuga, che devono essere protette, chiaramente identificabili e sempre accessibili, in modo da garantire l'evacuazione in sicurezza anche in presenza di fumo o ridotta visibilità. In questo senso, le misure passive svolgono un ruolo essenziale nel garantire il tempo necessario per l'intervento delle squadre di emergenza e per la gestione dell'evacuazione. Tuttavia, è importante evidenziare come tali soluzioni, pur essendo fondamentali, presentino il limite di non intervenire direttamente sull'incendio, rendendo quindi indispensabile il supporto dei sistemi attivi.

Le misure attive comprendono invece tutti quei sistemi progettati per rilevare, segnalare e contrastare direttamente l'incendio attraverso un'azione tempestiva e mirata, con l'obiettivo di ridurre il più possibile i danni e limitare la propagazione del fenomeno. Tra questi rientrano i sistemi di rilevazione automatica di fumo, calore o fiamma, collegati a impianti di allarme acustico e visivo che consentono una rapida identificazione dell'evento e una immediata comunicazione all'equipaggio. A tali sistemi si affiancano i mezzi portatili di primo intervento, le reti idranti e gli impianti fissi di spegnimento, che utilizzano differenti agenti estinguenti quali acqua, schiuma, gas inerti o polveri chimiche, selezionati in funzione della classe di incendio e delle caratteristiche dell'ambiente protetto.

In tale ambito, i sistemi di rilevazione incendio rappresentano il primo livello di difesa attiva, in quanto permettono di individuare precocemente l'insorgere di un evento potenzialmente pericoloso. Il loro funzionamento si basa sul monitoraggio continuo di parametri fisici e chimici associati alla combustione, come la presenza di fumo, l'aumento della temperatura, la velocità di crescita termica e la radiazione emessa dalla fiamma. Dal punto di vista progettuale, la scelta della tipologia di rivelatore non può essere standardizzata, ma deve essere effettuata in funzione delle condizioni ambientali specifiche. Ad esempio, nei locali macchina l'impiego di rivelatori di fumo può risultare poco affidabile a causa della presenza di vapori e particolato, rendendo preferibile l'utilizzo di rivelatori termici o sistemi combinati.

I rivelatori possono essere classificati in diverse tipologie, tra cui rivelatori di fumo (ottici o a ionizzazione), rivelatori termici (a soglia fissa o a gradiente), rivelatori di fiamma (UV/IR) e sistemi combinati. La scelta della tipologia più idonea dipende dalle caratteristiche del locale e dalle condizioni ambientali.

Tipologia di rivelatore	Sottotipi	Funzionamento	Applicazioni tipiche
Rivelatori di fumo	Ottici	Rilevano la presenza di fumo tramite variazioni di un fascio luminoso	Locali alloggio, aree comuni
Rivelatori di fumo	A ionizzazione	Rilevano la variazione della corrente ionica causata dal fumo	Ambienti interni generici
Rivelatori termici	A soglia fissa	Si attivano al raggiungimento di una temperatura prestabilita	Locali tecnici, cucine
Rivelatori termici	A gradiente	Si attivano in base all'aumento rapido della temperatura	Locali macchina
Rivelatori di fiamma	UV / IR	Rilevano la radiazione emessa dalla fiamma	Aree a rischio elevato
Sistemi combinati	Multi-sensore	Rilevano più parametri (fumo, calore, fiamma)	Ambienti complessi

Tabella 3.1 – Tipologie di rivelatori

A bordo delle navi, i sistemi di rilevazione sono installati in funzione della destinazione d'uso degli ambienti e del livello di rischio associato. Nei locali alloggio e nelle aree comuni si privilegiano rivelatori di fumo, in grado di individuare rapidamente la presenza di combustione lenta. Nei locali macchina, invece, si utilizzano rivelatori di temperatura o sistemi combinati, più adatti a condizioni caratterizzate da presenza di vapori, polveri, aerosol oleosi e temperature elevate che potrebbero compromettere il funzionamento dei sensori tradizionali.

Un ulteriore aspetto riguarda la distribuzione dei rivelatori all'interno degli ambienti, che deve garantire una copertura uniforme ed efficace. La disposizione viene studiata in base alla geometria dei locali, alla presenza di ostacoli strutturali e ai flussi di ventilazione, così da evitare zone non controllate o ritardi nella rilevazione dei prodotti della combustione.

Un aspetto fondamentale riguarda l'integrazione dei sistemi di rilevazione con le centrali di allarme e i sistemi di controllo nave. In caso di segnalazione, vengono attivate procedure automatiche quali la chiusura delle serrande di ventilazione, l'arresto o la regolazione dei sistemi di ventilazione forzata, l'attivazione degli allarmi acustici e visivi e la notifica immediata all'equipaggio attraverso pannelli di controllo e sistemi di comunicazione interna. In alcune configurazioni, il sistema può interfacciarsi con gli impianti antincendio, predisponendo l'attivazione di misure di spegnimento.

L'importanza dei sistemi di rilevazione è strategica all'interno della sicurezza navale, poiché una segnalazione tempestiva consente di intervenire nelle primissime fasi dell'incendio, quando il fenomeno è ancora limitato e controllabile. Questo permette di ridurre in modo significativo i danni strutturali, economici e soprattutto i rischi per il personale di bordo, che in ambiente marittimo opera in condizioni di evacuazione più complesse rispetto agli ambienti terrestri.

Dal punto di vista tecnico, i sistemi moderni sono progettati per garantire elevata affidabilità e riduzione dei falsi allarmi. A tal fine vengono utilizzate logiche di analisi del segnale che combinano più parametri contemporaneamente, come fumo, temperatura e variazione nel tempo, in modo da confermare la reale presenza di un principio di incendio prima dell'attivazione delle procedure di emergenza.

Nei casi in cui gli ambienti presentino condizioni particolarmente difficili, come grandi volumi o ventilazione complessa, possono essere impiegati sistemi di aspirazione. Questi sistemi prelevano continuamente campioni d'aria attraverso una rete di tubazioni e li analizzano in un'unità centrale ad alta sensibilità, consentendo di rilevare anche minime tracce di combustione con elevato anticipo rispetto ai rivelatori puntuali.

Dal punto di vista della manutenzione, è necessario eseguire controlli periodici per garantire l'efficienza del sistema. Le operazioni includono la verifica del funzionamento dei sensori, la pulizia degli elementi ottici, il controllo delle alimentazioni elettriche e delle linee di comunicazione, nonché test funzionali che simulano condizioni di allarme per verificare la risposta della centrale e dei dispositivi collegati.

Un ulteriore elemento riguarda la gestione operativa da parte dell'equipaggio, che rappresenta una componente essenziale dell'intero sistema di sicurezza antincendio navale. Il personale di bordo deve essere adeguatamente formato non solo sull'utilizzo delle attrezzature e dei dispositivi antincendio, ma anche sulla corretta interpretazione dei segnali provenienti dalla centrale di rilevazione e allarme, in modo da poter distinguere tempestivamente la natura e la gravità dell'evento segnalato. Tale capacità interpretativa risulta determinante per attivare in modo appropriato le procedure previste dal piano di emergenza, che stabilisce in maniera dettagliata le azioni da intraprendere in funzione della zona interessata e del tipo di incendio rilevato.

La gestione efficace dell'emergenza richiede inoltre la capacità di operare in condizioni di stress e visibilità ridotta, mantenendo un elevato livello di coordinamento e comunicazione interna. La corretta interpretazione degli allarmi, unita alla rapidità decisionale e conoscenza delle procedure operative, rappresenta quindi un fattore determinante per l'efficacia complessiva del sistema di sicurezza antincendio, in quanto consente di ridurre i tempi di intervento, limitare la propagazione dell'incendio e garantire una risposta organizzata e coerente alle situazioni di emergenza a bordo. A supporto di tali aspetti, la normativa

internazionale prevede inoltre un sistema strutturato di registrazione e verifica delle competenze del personale, attraverso strumenti come il Training Record Book e i registri previsti dal Safety Management System (SMS), nei quali vengono documentate le attività formative, le esercitazioni e le prove di emergenza svolte a bordo. Tali documenti consentono di tracciare nel tempo il livello di addestramento dell'equipaggio e di verificarne la conformità ai requisiti richiesti dalle convenzioni internazionali (SOLAS) garantendo che il personale mantenga un adeguato livello di preparazione operativa.

L'acqua rappresenta uno degli agenti estinguenti più diffusi in ambito navale, grazie alla sua disponibilità praticamente illimitata, al basso costo e alla notevole capacità di assorbire calore. Il principale meccanismo di estinzione è il raffreddamento, che consente di ridurre la temperatura del combustibile al di sotto del punto di accensione e, in determinate condizioni, contribuisce anche a un effetto di soffocamento parziale dovuto alla produzione di vapore acqueo che può ridurre localmente la concentrazione di ossigeno.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'impiego dell'acqua deve essere attentamente valutato in relazione al contesto applicativo, in quanto può comportare effetti indesiderati significativi. Tra questi si annoverano la possibile dispersione di liquidi infiammabili, che può amplificare la superficie coinvolta dall'incendio, il rischio di danni a componenti elettriche ed elettroniche non adeguatamente protette e, soprattutto, problematiche legate alla stabilità della nave. L'accumulo di grandi quantità di acqua nei compartimenti, infatti, può generare fenomeni di sbandamento o perdita di stabilità, rendendo necessario un controllo attento del drenaggio e della gestione dei volumi utilizzati durante le operazioni di spegnimento.

Il fire main system costituisce la rete antincendio principale di bordo ed è uno degli impianti fondamentali per la sicurezza operativa della nave. Esso è alimentato da una o più pompe, generalmente costituite da pompe principali e pompe di emergenza, e distribuisce l'acqua attraverso una rete capillare di tubazioni, valvole, idranti e manichette dislocate strategicamente lungo tutta l'unità navale. Il sistema deve essere progettato per garantire una portata e una pressione adeguate anche nelle condizioni più sfavorevoli, incluse situazioni di danneggiamento o perdita di compartimenti, e rappresenta il primo mezzo di intervento immediato dell'equipaggio in caso di incendio. La sua affidabilità dipende in modo diretto dalla corretta manutenzione delle pompe, dall'efficienza della pompa di emergenza, nonché dallo stato di conservazione delle linee di distribuzione e dei dispositivi terminali, che devono essere costantemente verificati attraverso ispezioni e prove periodiche.

I sistemi sprinkler sono impianti automatici di spegnimento utilizzati prevalentemente nei locali alloggio, nei corridoi e negli spazi chiusi destinati al personale. Il loro funzionamento si basa su singole testine sensibili al calore, progettate per attivarsi autonomamente al raggiungimento di una determinata temperatura. Tale caratteristica consente un intervento localizzato e immediato, senza necessità di azione manuale, permettendo di contenere l'incendio nelle fasi iniziali e ridurre significativamente la propagazione. In questo modo si limita anche il coinvolgimento di aree adiacenti, riducendo i danni complessivi e aumentando le probabilità di controllo dell'evento prima del suo sviluppo su larga scala.

I sistemi water mist rappresentano invece una tecnologia più avanzata rispetto agli impianti tradizionali ad acqua, basata sull'impiego di gocce di dimensioni estremamente ridotte. Questa caratteristica consente di aumentare notevolmente la superficie di scambio termico, migliorando l'efficacia del raffreddamento e favorendo, in alcuni casi, anche una riduzione locale della concentrazione di ossigeno mediante evaporazione rapida. Tali sistemi trovano

applicazione soprattutto nei locali macchina, nelle aree tecniche e in altri ambienti ad alto rischio, dove è richiesta un'elevata capacità estinguente con limitati danni collaterali a impianti e apparecchiature. I principali vantaggi includono la riduzione del consumo di acqua rispetto ai sistemi tradizionali e una minore invasività sull'equipaggiamento di bordo, sebbene la loro efficacia dipenda da una progettazione estremamente accurata, da studi fluidodinamici specifici e da prove di prestazione conformi alle normative internazionali, necessarie per garantirne l'affidabilità in condizioni reali di incendio.



Figura 3.1 – Gruppo di pompaggio sistema Water Mist

I sistemi fissi a gas rappresentano una soluzione particolarmente efficace per la protezione antincendio di compartimenti chiusi, nei quali è possibile controllare in modo relativamente stabile le condizioni dell'atmosfera interna, e trovano ampia applicazione in ambito navale soprattutto in quegli spazi in cui l'impiego dell'acqua o di altri agenti estinguenti potrebbe risultare inefficace o dannoso per le apparecchiature presenti. Tra questi, i sistemi a CO₂ sono tra i più diffusi, in particolare nei locali macchina e in ambienti ad elevato rischio di incendio, e il loro funzionamento si basa sul principio della riduzione della concentrazione di ossigeno al di sotto del livello minimo necessario per sostenere la combustione, interrompendo così il processo di ossidazione alla base dell'incendio. Tuttavia, l'utilizzo della CO₂ comporta rischi significativi per il personale, trattandosi di un gas asfissiante che può risultare letale anche in tempi brevi, motivo per cui tali sistemi sono progettati con specifiche misure di sicurezza, tra cui sistemi di preallarme acustico e visivo, ritardi temporali nell'attivazione e procedure operative rigorose che prevedono l'evacuazione completa del compartimento prima della scarica del gas, oltre a dispositivi di attivazione controllata sia locale sia remota.

Accanto ai sistemi a CO₂, assumono particolare rilevanza i sistemi a gas inerte, impiegati principalmente nelle petroliere e in altre unità adibite al trasporto di carichi liquidi infiammabili, dove svolgono prevalentemente una funzione preventiva piuttosto che estinguente. Il loro obiettivo è quello di mantenere all'interno dei serbatoi di carico

un'atmosfera caratterizzata da un basso contenuto di ossigeno, tale da impedire la formazione di miscele infiammabili o esplosive, riducendo in modo significativo il rischio di incendio o esplosione. Il sistema è generalmente costituito da generatori di gas inerte, spesso basati sui gas di scarico opportunamente trattati, scrubber per la rimozione di particolati e sostanze nocive, ventilatori per la distribuzione, sistemi di monitoraggio continuo della composizione dei gas e una rete di tubazioni che consente l'immissione controllata nei serbatoi.

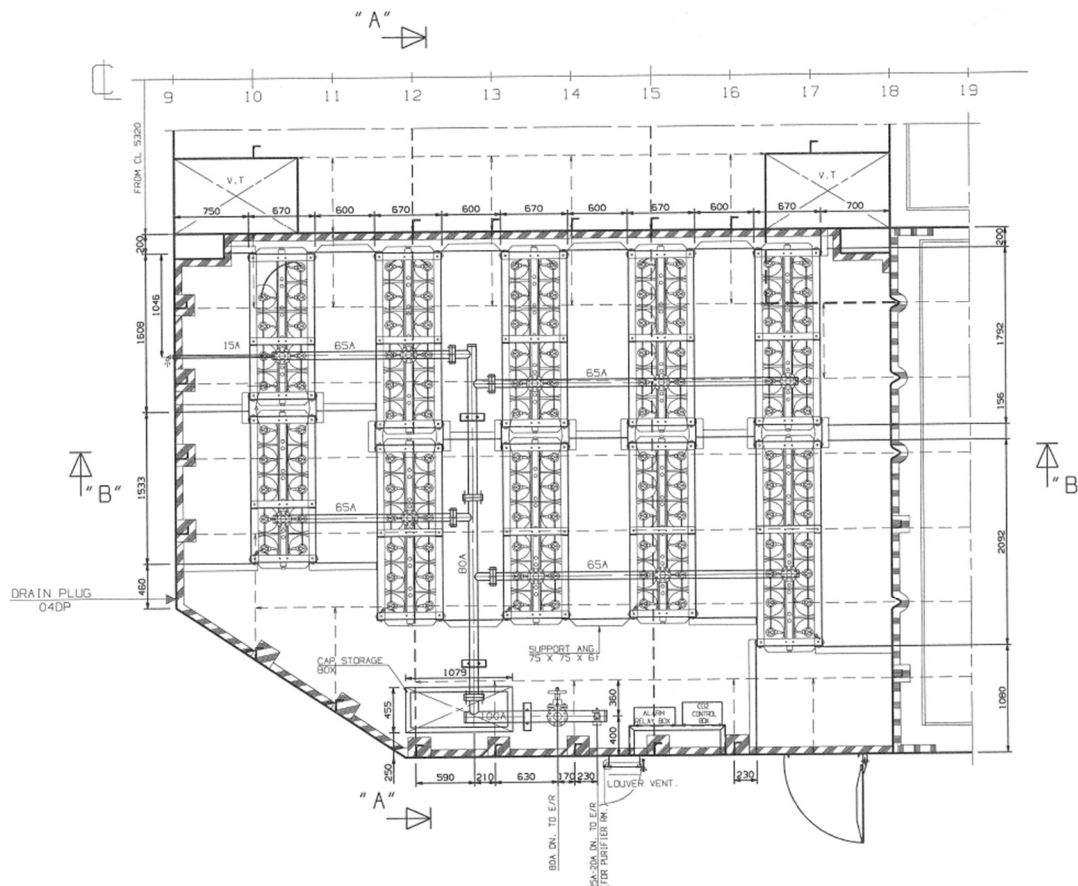


Figura 3.2 – CO2 room drawing

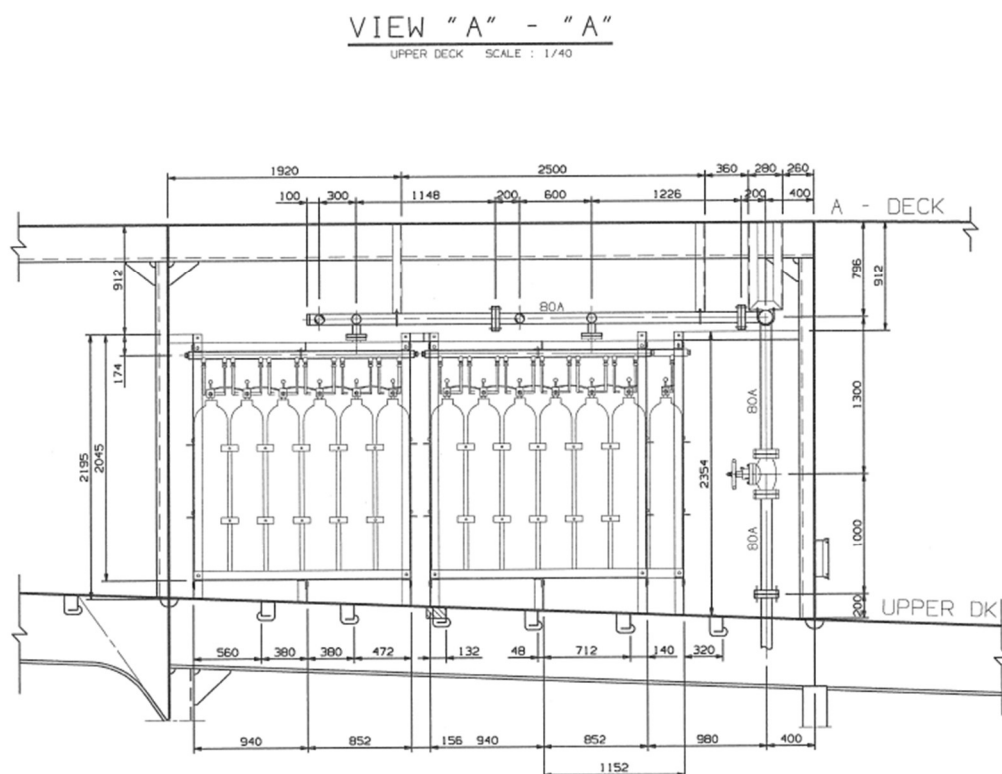


Figura 3.3 – CO2 room drawing view A

L'efficacia di tali sistemi dipende in larga misura dalla continuità del loro funzionamento e dalla capacità di mantenere condizioni operative stabili nel tempo, in particolare per quanto riguarda la qualità del gas prodotto, il contenuto di ossigeno e la corretta gestione delle pressioni all'interno dei serbatoi, che devono essere mantenute entro limiti ben definiti per evitare ingressi d'aria indesiderati. In questo senso, i sistemi a gas inerte rappresentano un elemento fondamentale nella strategia di prevenzione degli incendi e delle esplosioni in ambito navale, contribuendo in modo significativo alla sicurezza complessiva della nave e delle operazioni di carico e trasporto.

I sistemi a polvere estinguente rappresentano una soluzione efficace per il controllo di incendi caratterizzati da una rapida propagazione della fiamma, in particolare quelli che coinvolgono liquidi infiammabili e gas, nei quali è fondamentale intervenire con tempestività per interrompere il processo di combustione. Il loro meccanismo di azione si basa principalmente sull'inibizione della reazione chimica a catena che sostiene la combustione, ottenuta mediante l'interferenza delle particelle di polvere con i radicali liberi presenti nella fiamma, a cui si aggiunge un effetto secondario di isolamento del combustibile dall'ossigeno atmosferico. Questa combinazione consente un rapido abbattimento della fiamma, rendendo tali sistemi particolarmente adatti per interventi immediati nelle fasi iniziali dell'incendio.

In ambito navale, i sistemi a polvere trovano applicazione soprattutto in aree specifiche caratterizzate da un elevato rischio di incendio di classe B o C, come le zone di trasferimento dei combustibili, le aree di bunkeraggio o in prossimità di apparecchiature che trattano gas infiammabili. Essi sono impiegati sia sotto forma di sistemi fissi, installati per la protezione localizzata di determinati impianti, sia come mezzi portatili di primo intervento, quali estintori

facilmente accessibili all'equipaggio, che consentono una risposta rapida e mirata in caso di principio di incendio. La loro efficacia risulta particolarmente elevata quando l'intervento avviene nelle prime fasi dell'evento, prima che il fuoco si estenda o coinvolga materiali differenti.

Tuttavia, l'impiego della polvere estinguente presenta alcuni limiti operativi che ne condizionano l'utilizzo. Tra questi si evidenziano la significativa riduzione della visibilità durante l'erogazione, che può ostacolare le operazioni dell'equipaggio in ambienti confinati, la tendenza alla dispersione dell'agente, che ne riduce l'efficacia in presenza di ventilazione o correnti d'aria, e la necessità di interventi di pulizia successivi, spesso complessi, a causa dei residui che possono depositarsi su macchinari e superfici, con possibili effetti dannosi su apparecchiature sensibili. Inoltre, tali sistemi risultano generalmente meno efficaci nel caso di incendi che coinvolgono materiali solidi profondamente radicati, nei quali è richiesto un effetto di raffreddamento più marcato. Per queste ragioni, i sistemi a polvere estinguente vengono generalmente impiegati come soluzione complementare ad altri sistemi di protezione antincendio, contribuendo in modo specifico alla gestione di particolari scenari di rischio ma non costituendo, nella maggior parte dei casi, l'unico mezzo di protezione disponibile a bordo.

I sistemi a schiuma rappresentano uno dei principali mezzi di protezione contro gli incendi di liquidi infiammabili, particolarmente rilevanti in ambito navale e, in modo specifico, sulle petroliere. La loro diffusione è legata alla capacità di intervenire efficacemente su incendi di pozza (pool fires) e sversamenti di idrocarburi, situazioni tipiche delle operazioni di carico e scarico. La schiuma è costituita da una miscela di acqua, concentrato schiumogeno e aria, che, attraverso appositi dispositivi, genera un manto stabile sulla superficie del combustibile.

Il principio di funzionamento si basa su una combinazione di effetti fisici e chimici: la schiuma crea una barriera tra il combustibile e l'ossigeno dell'aria, impedendo la combustione; contemporaneamente sopprime l'emissione di vapori infiammabili e contribuisce al raffreddamento della superficie. In questo modo, il processo di combustione viene interrotto e si riduce il rischio di riaccensione. L'efficacia del sistema dipende da diversi fattori, tra cui il rapporto di espansione della schiuma, la stabilità e la coesione del manto, la resistenza al calore irradiato e la compatibilità chimica con il prodotto combustibile trattato.

In ambito navale si distinguono generalmente schiume a bassa, media e alta espansione, utilizzate in funzione delle specifiche applicazioni. Nei ponti di carico delle petroliere si impiegano prevalentemente sistemi a bassa espansione, in quanto garantiscono una maggiore gittata e una migliore capacità di copertura su ampie superfici. Tali sistemi sono costituiti da monitori, applicatori manuali o fissi e linee integrate nel cosiddetto deck foam system, progettato per proteggere le aree maggiormente esposte al rischio di incendio.

Dal punto di vista della composizione chimica, le schiume possono inoltre essere distinte in schiume proteiche e schiume sintetiche. Le schiume proteiche sono ottenute da idrolizzati di origine animale o vegetale e presentano una buona stabilità e resistenza al calore, risultando efficaci nella formazione di un manto compatto e duraturo. Le schiume sintetiche, invece, sono

basate su tensioattivi chimici e offrono una maggiore versatilità operativa. Tra queste si annoverano le schiume AFFF (Aqueous Film Forming Foam), in grado di formare un sottile film acquoso sulla superficie del combustibile, con un'elevata capacità di soppressione dei vapori infiammabili e un rapido effetto estinguente, particolarmente efficace su idrocarburi leggeri.

Tipologia di schiuma
Schiume proteiche
Schiume fluoroproteiche (FP)
Schiume AFFF
Schiume AR-AFFF
Schiume sintetiche
Schiume a bassa espansione
Schiume a media espansione
Schiume ad alta espansione

Tabella 3.2 – Tipologie di schiume

L'impianto a schiuma è dunque un sistema antincendio navale progettato per garantire un intervento rapido ed efficace, soprattutto in presenza di incendi che coinvolgono liquidi infiammabili. Il suo funzionamento si basa sulla produzione della schiuma estinguente ottenuta mediante la miscelazione controllata di acqua e liquido schiumogeno all'interno di un proporzionatore, che assicura il corretto rapporto tra i componenti. Il liquido schiumogeno è stoccato in un serbatoio dedicato e viene dosato automaticamente durante il funzionamento del sistema.

La soluzione così ottenuta viene convogliata attraverso una rete di tubazioni che la distribuisce ai diversi dispositivi di erogazione installati a bordo. Successivamente, la miscela viene trasformata in schiuma tramite sistemi di espansione che incorporano aria, generando un manto estinguente stabile e aderente alle superfici.

All'interno dell'impianto sono presenti diversi dispositivi, ciascuno con una funzione specifica. Il monitor è uno degli elementi principali: si tratta di un sistema fisso ad alta portata in grado di proiettare grandi quantità di schiuma a notevole distanza, risultando particolarmente efficace in incendi di vasta estensione. La lancia schiuma, invece, è un dispositivo più maneggevole utilizzato per interventi localizzati, permettendo agli operatori di agire con maggiore precisione su focolai circoscritti o in aree difficilmente raggiungibili.

Sono inoltre presenti le teste di espansione, che hanno la funzione di aerare la soluzione schiumogena trasformandola in schiuma vera e propria. In particolare, la schiuma ad alta espansione (A.E.) è caratterizzata da un elevato rapporto di espansione, che permette di generare grandi volumi di schiuma a partire da quantità relativamente ridotte di soluzione consente di riempire rapidamente ambienti chiusi come locali tecnici o stive.

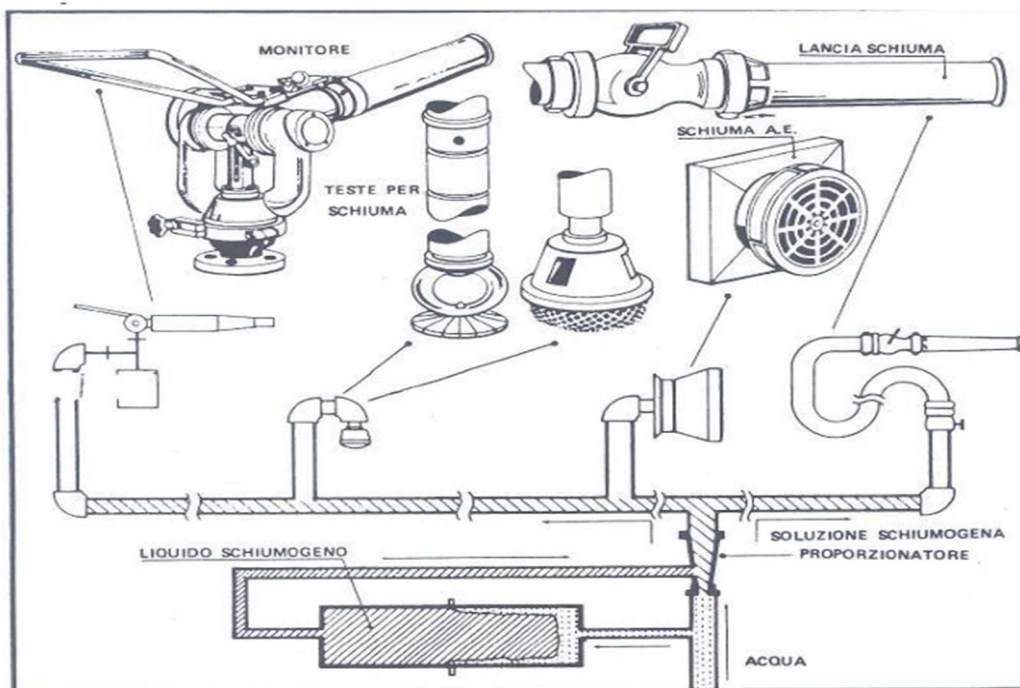


Figura 3.4 – Funzionamento Impianto a schiuma

Un impianto a schiuma tipico comprende un serbatoio di stoccaggio del concentrato, un sistema di proporzionamento, una rete di distribuzione, i dispositivi terminali quali monitori e lance, nonché i collegamenti con il fire main o con una sorgente dedicata. La progettazione dell'impianto deve tenere conto dell'estensione delle aree da proteggere, della configurazione degli spazi, degli ostacoli presenti e dell'irraggiamento termico previsto, al fine di garantire una distribuzione uniforme e continua della schiuma per il tempo richiesto dalle normative.

Dal punto di vista operativo, la manutenzione e il controllo periodico del sistema rivestono un ruolo fondamentale per garantirne l'efficienza nel tempo. Devono essere verificate la qualità del concentrato schiumogeno, la corretta taratura dei sistemi di dosaggio, l'integrità delle tubazioni e dei componenti, nonché il corretto funzionamento dei dispositivi di erogazione. Le prove funzionali periodiche e l'aggiornamento della documentazione tecnica permettono di assicurare la piena affidabilità del sistema in caso di emergenza. Un aspetto particolarmente critico, spesso sottovalutato in fase teorica, riguarda la gestione dei falsi allarmi. In condizioni operative reali, un numero elevato di segnalazioni non giustificate può ridurre la prontezza dell'equipaggio e compromettere l'efficacia complessiva del sistema. Per questo motivo, i sistemi più moderni adottano logiche multi-sensore e algoritmi di analisi avanzati, in grado di distinguere eventi reali da condizioni anomale non pericolose, migliorando l'affidabilità complessiva.

4 CASO STUDIO: NAVE PETROLIERA

Per applicare in modo concreto le considerazioni sviluppate nei capitoli precedenti, si considera come caso di studio una nave petroliera di L.O.A. x B: 119.98 x 19 m, Gross Tonnage 6052 capacità impiegata nel trasporto di greggio o prodotti petroliferi raffinati.



Figura 4.1 – “Sanc Swan” IMO 9813058

Tale tipologia di unità è caratterizzata da un ampio ponte di carico, da una serie di serbatoi centrali e laterali, da sistemi di collettamento (manifold), da impianti di pompaggio cargo e da apparati specifici per la gestione e il controllo dei vapori infiammabili. Dal punto di vista progettuale, una petroliera presenta una netta separazione tra la zona cargo e la zona macchine/alloggi, elemento fondamentale per limitare la propagazione dei rischi e consentire l'adozione di sistemi di protezione differenziati, con particolare attenzione alle aree classificate e ai requisiti antideflagranti.

Una breve analisi dei rischi specifici associati a questa tipologia di nave deriva principalmente dalla presenza di grandi quantità di liquidi infiammabili, dalla possibile formazione di atmosfere esplosive nei serbatoi e nelle linee, dalle operazioni di carico e scarico, nonché dalla possibilità di sversamenti sul ponte di carico. A questi si aggiungono i rischi connessi alla presenza di apparecchiature elettriche e meccaniche in ambienti severi. Gli scenari incidentali più critici includono incendi di pozza sul ponte di carico, incendi in prossimità dei manifold, incendi nei locali pompe cargo, esplosioni nei serbatoi dovute a perdita o inefficienza del sistema di inertizzazione, incendi in sala macchine e fenomeni di propagazione dei vapori infiammabili verso aree non adeguatamente segregate o ventilate.

Per quanto riguarda le principali criticità operative, è possibile evidenziare diversi aspetti rilevanti: in primo luogo, le condizioni ambientali, ed in particolare l'azione del vento, possono influenzare significativamente l'efficacia dei monitori, alterando la traiettoria del getto e riducendo la capacità di copertura uniforme delle superfici da proteggere. Tale aspetto risulta particolarmente critico nelle aree di ponte delle petroliere, dove i sistemi a schiuma devono garantire prestazioni adeguate anche in condizioni operative non ideali, in conformità ai requisiti prestazionali previsti dalla Convenzione SOLAS e dal Fire Safety Systems (FSS) Code.

Un'ulteriore criticità riguarda le prove di funzionamento dell'impianto a schiuma. Tali test non possono essere eseguiti utilizzando il liquido schiumogeno, al fine di evitarne il consumo e garantirne la disponibilità in caso di reale emergenza, come richiesto dai principi di efficienza e disponibilità dei sistemi antincendio previsti dalla normativa internazionale. D'altra parte, anche l'impiego diretto di acqua di mare, prelevata dalla presa a mare, può risultare problematico nel lungo periodo, in quanto può favorire fenomeni di corrosione e

deterioramento delle tubazioni e dei componenti dell'impianto, compromettendone l'affidabilità operativa.

A tal proposito, una possibile soluzione migliorativa potrebbe consistere nella predisposizione di un collegamento dedicato ad acqua dolce, da utilizzare per l'esecuzione delle prove funzionali, in linea con le buone pratiche di manutenzione e con i requisiti di verifica periodica degli impianti previsti dal Capitolo II-2 della Convenzione SOLAS e dalle linee guida del FSS Code. Tale configurazione consentirebbe non solo di effettuare i test senza impattare sulle riserve di schiumogeno, ma anche di contribuire al lavaggio e alla manutenzione interna delle linee, migliorando l'efficienza e la durabilità complessiva del sistema.

In tale contesto, il layout degli impianti antincendio assume un ruolo fondamentale e comprende tipicamente una rete fire main con idranti distribuiti, sistemi a schiuma per la protezione del ponte di carico (deck foam system), impianti fissi a CO₂ per la sala macchine e altri compartimenti chiusi, sistemi di rilevazione e allarme, mezzi portatili e carrellati, sistemi di chiusura remota dei combustibili e della ventilazione, oltre alla protezione delle vie di fuga. La logica di progettazione non è esclusivamente distributiva, ma funzionale, in quanto ciascun sistema deve essere in grado di intervenire sul rischio dominante della specifica area. In particolare, sul ponte di carico il sistema a schiuma rappresenta il mezzo di spegnimento più efficace per incendi di liquidi infiammabili, grazie alla sua capacità di coprire ampie superfici e sopprimere i vapori; tuttavia, esso non opera in modo isolato, ma in combinazione con altri sistemi, come il controllo dell'atmosfera e la gestione delle sorgenti di innesco. Nei locali macchina prevalgono invece sistemi di rilevazione rapida, impianti fissi a gas e mezzi idrici di supporto, mentre nei locali alloggio è essenziale l'integrazione tra rilevazione, allarme e sistemi sprinkler.

Un elemento di primaria importanza nella sicurezza delle petroliere è rappresentato dal sistema a gas inerte, il cui scopo è mantenere l'atmosfera nei serbatoi di carico al di fuori del campo di infiammabilità, riducendo la concentrazione di ossigeno e prevenendo l'innesco. Il sistema è generalmente composto da una sorgente di gas, unità di lavaggio e raffreddamento, ventilatori, linee di distribuzione, dispositivi di non ritorno e strumenti di monitoraggio. La sua efficacia dipende dalla corretta gestione operativa, dalla tenuta del sistema e dal continuo controllo dei parametri. Un malfunzionamento del sistema di inertizzazione può determinare un significativo aumento del rischio, in particolare durante operazioni critiche come carico, scarico o gas freeing.

Dal punto di vista tecnico-ispettivo, la valutazione richiede un approccio integrato che comprenda sia la verifica dello stato degli impianti sia il confronto con la documentazione approvata e l'analisi delle procedure operative. In particolare, è necessario accertare la funzionalità dei monitori a schiuma, lo stato e la qualità del concentrato, la coerenza tra le capacità installate e i calcoli di progetto, l'integrità delle linee, la corretta disposizione dei mezzi portatili, la taratura degli strumenti del sistema gas inerte e la disponibilità dei dispositivi di chiusura remota. Deve inoltre essere verificato l'aggiornamento dei registri di prova e la corretta esecuzione delle attività manutentive.

Nel complesso, il caso studio evidenzia come la sicurezza antincendio su una petroliera non possa essere affidata a un singolo sistema, seppur altamente efficace come quello a schiuma per il ponte di carico, ma debba essere il risultato di un insieme coordinato di soluzioni tecniche, procedure operative e attività ispettive. Solo attraverso l'integrazione di tali elementi è

possibile garantire un adeguato livello di sicurezza e una reale capacità di prevenire e gestire eventi incendio in condizioni operative complesse.

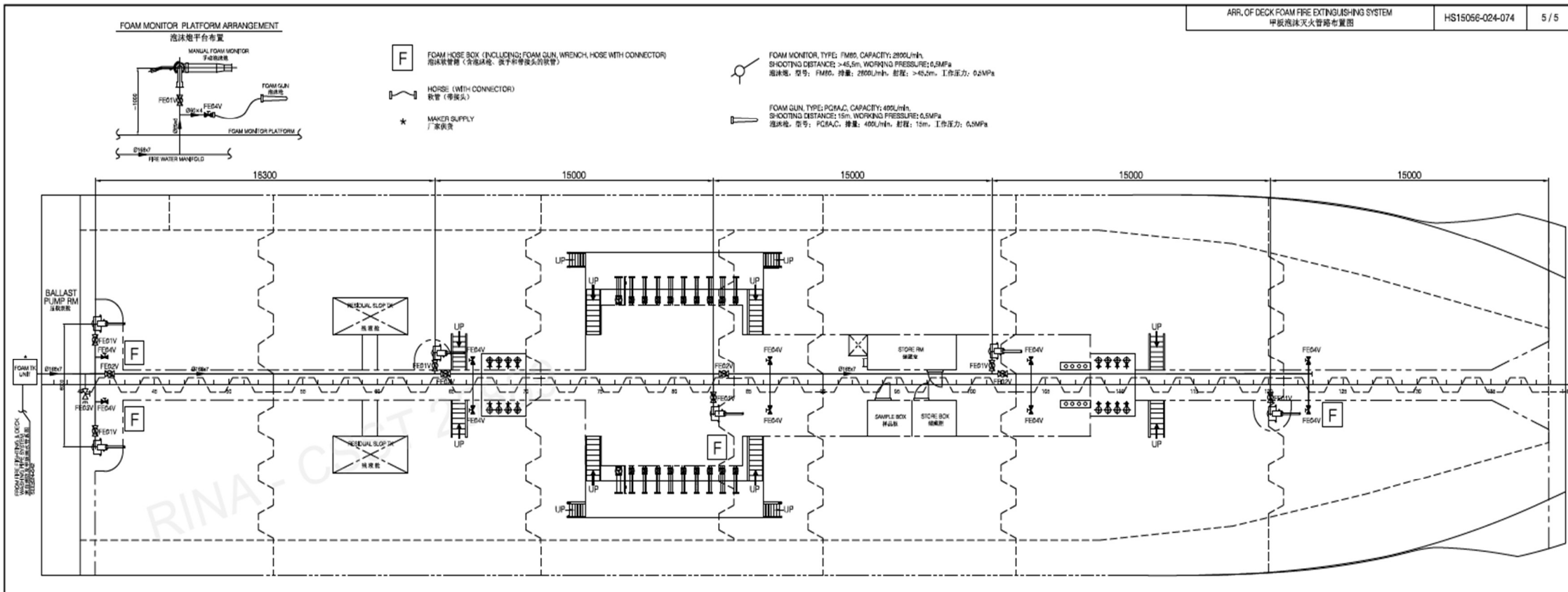


Figura 4.2 – Layout Foam System

5 DIMENSIONAMENTO IMPIANTO A SCHIUMA

Nel presente capitolo viene sviluppato un esempio di dimensionamento di un impianto a schiuma destinato alla protezione del ponte di carico di una nave petroliera. Il procedimento ha finalità didattica, è impostato con un approccio ingegneristico coerente con le metodologie adottate in ambito progettuale e con le indicazioni della normativa internazionale (SOLAS e FSS Code).

Il dimensionamento di un sistema a schiuma non si limita alla sola determinazione dei volumi di agente estinguente, ma richiede una valutazione integrata dei parametri operativi, delle prestazioni idrauliche e della configurazione dei dispositivi di erogazione, al fine di garantire un'efficace copertura delle superfici esposte al rischio incendio.

Il procedimento si articola nelle seguenti fasi:

- individuazione dell'area da proteggere;
- scelta dell'intensità di applicazione;
- definizione del tempo di erogazione;
- calcolo della portata di soluzione schiumogena;
- determinazione del fabbisogno di concentrato.

Si consideri la petroliera presa in esame con L.O.A. x B = 119.98 x 19 m, con un'area di ponte di carico da proteggere pari a:

$$A = 2.300 \text{ m}^2$$

Si assumono i seguenti parametri di progetto:

- Intensità di applicazione: $i = 6,5 \text{ L/min} \cdot \text{m}^2$
- Tempo di erogazione: $t = 20 \text{ min}$
- Concentrazione del liquido schiumogeno: 3%

Inoltre, il sistema di proporzionamento è considerato in grado di garantire il corretto rapporto di miscelazione nelle condizioni operative di progetto.

- Definizione dell'area da proteggere:

L'area da proteggere comprende tutte le superfici del ponte di carico esposte al rischio di incendio dovuto a sversamenti o rilasci di liquidi infiammabili, vengono considerate:

- le zone di collettamento (manifold);
- le linee di carico e scarico;
- le valvole e i punti di connessione;
- le aree operative interessate dalle operazioni di trasferimento del carico.

La corretta individuazione dell'area rappresenta un passaggio fondamentale, in quanto la portata richiesta dal sistema risulta direttamente proporzionale alla superficie da proteggere.

Il dimensionamento dell'impianto si basa su specifici parametri di progetto, che definiscono le condizioni operative necessarie per garantire l'efficacia del sistema antincendio.

L'intensità di applicazione rappresenta la quantità di soluzione schiumogena da erogare per unità di superficie e per unità di tempo. Essa dipende da diversi fattori, tra cui:

- la tipologia di combustibile;
- il livello di rischio associato;
- il tipo di schiuma utilizzata;
- i requisiti normativi applicabili.

Nel caso in esame si assume un valore pari a $6,5 \text{ L/min} \cdot \text{m}^2$, coerente con applicazioni su ponti di carico di petroliere.

Il tempo di erogazione rappresenta invece la durata per la quale il sistema deve garantire la fornitura continua di soluzione schiumogena alle condizioni di progetto. Questo parametro incide direttamente sul dimensionamento delle riserve di acqua e concentrato, influenzando quindi la capacità complessiva del sistema. Nel caso considerato si assume un tempo di erogazione pari a:

$$t = 20 \text{ minuti}$$

Tale valore è coerente con le indicazioni del FSS Code (Capitolo 14 – Fixed deck foam systems for tankers) e con la pratica progettuale adottata per impianti a schiuma su petroliere, che prevede tempi di intervento tipicamente compresi tra 20 e 30 minuti in funzione delle caratteristiche della nave e del sistema installato.

La determinazione della portata di soluzione schiumogena rappresenta uno dei passaggi fondamentali del dimensionamento, in quanto definisce la capacità che l'impianto deve garantire nelle condizioni di esercizio più gravose.

La portata totale di soluzione schiumogena è determinata mediante la relazione:

$$Q = A \times i$$

Formula 5.1 – Portata totale soluzione schiumogena

in cui:

- Q è la portata in L/min;
- A è l'area da proteggere in m²;
- i è l'intensità di applicazione in L/min·m².

Sostituendo i valori assunti:

$$Q = 2.300 \times 6,5 = 14.950 \text{ L/min}$$

$$Q = 14.950 \text{ L/min} \times (1 \text{ min} / 60 \text{ s}) = 250 \text{ L/s}$$

$$Q = 250 \text{ L/s}$$

La rete antincendio a schiuma dovrà quindi essere in grado di garantire tale portata nelle condizioni più gravose.

La determinazione del volume totale di soluzione schiumogena consente di definire la capacità che il sistema deve garantire per tutta la durata dell'intervento.

Il volume totale di soluzione schiumogena richiesto per l'intera durata di intervento è dato da:

$$V = Q \times t$$

Formula 5.2 – volume totale soluzione schiumogena

Dove:

- V è il volume di soluzione espresso in litri;
- Q è la portata in L/min;
- t rappresenta il tempo di erogazione in minuti.

Nel caso in esame:

$$V = 14.900 \times 20 = 299.000 \text{ L}$$

ovvero:

$$V = 299 \text{ m}^3$$

Il sistema deve quindi essere in grado di fornire tale volume in modo continuo durante l'intervallo di progetto.

Il dimensionamento dell'impianto si basa sulla determinazione del fabbisogno di concentrato schiumogeno e sulla verifica delle condizioni idrauliche della rete di distribuzione, al fine di garantire un'erogazione corretta, uniforme e adeguata alle prestazioni richieste dal sistema.

Essendo il concentrato al 3%, il volume teorico di liquido schiumogeno richiesto è:

$$V_c = 0,03 \times 299.000 = 8.970 \text{ L}$$

Tuttavia, ai fini progettuali, è necessario introdurre opportuni margini operativi; il volume effettivamente utilizzabile risulta infatti inferiore al volume geometrico del serbatoio a causa della presenza di volumi non aspirabili. Tali volumi sono generalmente legati alla configurazione del sistema di pescaggio, che può risultare rialzato rispetto al fondo del serbatoio determinando un volume residuo non utilizzabile, comunemente definito volume morto. A questo si aggiungono ulteriori fattori quali tolleranze costruttive, presenza di sedimenti e condizioni dinamiche della nave quali rollio o beccheggio, che possono influenzare la continuità dell'aspirazione.

Per tali motivi, il volume di stoccaggio viene incrementato fino a:

$$V_c \approx 10.000/10.500 \text{ L}$$

La portata totale calcolata deve essere ripartita tra i dispositivi installati sul ponte.

A titolo esemplificativo:

- 4 monitori principali da 3.400 L/min

- 4 linee ausiliarie da 290 L/min

Totale:

$$4 \times 3.400 + 4 \times 290 = 15.050 \text{ L/min}$$

La distribuzione consente di garantire una copertura uniforme dell'area protetta, assicurando al contempo flessibilità operativa e possibilità di intervento localizzato

Al fine di garantire il corretto funzionamento del sistema, è necessario verificare le condizioni idrauliche della rete.

Dimensionamento della linea principale si considera una portata:

$$Q = 250 \text{ L/s} = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

e una velocità ammissibile:

$$v = 3 \text{ m/s}$$

Il diametro interno richiesto risulta:

$$D = \sqrt[4]{(4Q / \pi v)} \approx 0,325 \text{ m}$$

Si adotta quindi una tubazione con diametro interno pari a circa: $D \approx 350 \text{ mm}$

Il calcolo delle perdite di carico viene effettuato considerando un tratto equivalente di rete pari a:

$$L = 100 \text{ m}$$

Velocità reale:

$$v \approx 2,7 \text{ m/s}$$

Per la stima della perdita di pressione lungo la tubazione si applica la relazione di Darcy-Weisbach, che consente di valutare le perdite distribuite in funzione delle caratteristiche del flusso e della condotta:

$$\Delta p = f \cdot (L/D) \cdot (\rho v^2/2)$$

Formula 5.3 – relazione di Darcy-Weisbach

Assumendo:

- $f = 0,02$ (coefficiente di attrito)

(Il coefficiente di attrito è una stima semplificata valida per flusso turbolento in tubazioni relativamente lisce o mediamente usate)

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (densità del fluido)

si ottiene una perdita di pressione distribuita pari a:

$$\Delta p \approx 0,2 \text{ bar}$$

A tale valore devono essere aggiunte le perdite di carico localizzate, dovute alla presenza di curve, valvole e derivazioni lungo la rete, che sono stimate complessivamente in:

$$\Delta p_{\text{loc}} \approx 0,5 \text{ bar}$$

La verifica della pressione ai terminali viene effettuata considerando la pressione operativa richiesta dai monitori, pari a:

$$P \approx 8 \text{ bar}$$

A tale valore devono essere sommate le perdite di carico distribuite lungo la rete e le perdite localizzate, precedentemente calcolate, pari rispettivamente a:

$$\Delta p \approx 0,2 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{\text{loc}} \approx 0,5 \text{ bar}$$

La pressione totale che deve essere garantita dalla pompa risulta quindi:

$$P_{\text{tot}} \approx 0,2 + 0,5 + 8 = 8,7 \text{ bar}$$

Ai fini progettuali si adotta un opportuno margine di sicurezza, assumendo come valore di riferimento una pressione di progetto pari a:

$$P \approx 10 \text{ bar}$$

La verifica della pompa consente di accertare la capacità del sistema di garantire contemporaneamente le prestazioni di portata e pressione richieste.

In particolare, la pompa deve essere in grado di assicurare:

$$\text{Portata} \geq 250 \text{ L/s}$$

$$\text{Pressione} \geq 10 \text{ bar}$$

Il dimensionamento dell'impianto evidenzia come le prestazioni complessive del sistema siano fortemente influenzate da diversi parametri tra loro interconnessi, tra cui i diametri delle tubazioni, le perdite di carico lungo la rete, la pressione disponibile e la configurazione dei dispositivi di erogazione.

La scelta dei diametri incide direttamente sulle velocità del fluido e quindi sulle perdite di carico, mentre la pressione disponibile deve essere tale da garantire il corretto funzionamento dei monitori e degli altri terminali anche nelle condizioni più gravose.

Accanto agli aspetti strettamente idraulici, il dimensionamento dell'impianto a schiuma deve tenere conto di numerosi fattori di natura geometrica e operativa che influenzano in modo

diretto l'efficacia del sistema. Gli angoli di tiro dei monitori devono essere definiti in modo tale da garantire una copertura uniforme dell'area protetta, evitando la formazione di zone d'ombra o sovrapposizioni inefficaci del getto. Analogamente, la presenza di ostacoli strutturali sul ponte, quali tubazioni, paratie, apparecchiature e linee di carico, può condizionare significativamente la distribuzione della schiuma.

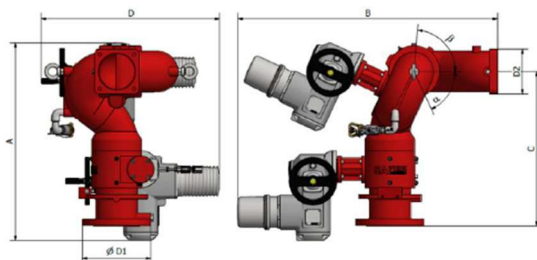
Devono inoltre essere considerate le reali condizioni operative della nave, incluse le variazioni di assetto, le condizioni ambientali e l'interazione con gli altri sistemi di bordo. La compatibilità dei materiali con l'ambiente marino rappresenta un ulteriore aspetto progettuale rilevante.

Il processo progettuale prosegue con la selezione dei componenti reali dell'impianto, sulla base dei parametri determinati. Tale fase rappresenta il passaggio dalla modellazione teorica alla definizione concreta del sistema.

- Monitori antincendio:

Per quanto riguarda i dispositivi di erogazione, i monitori antincendio idoneo per installazione in zona classificata a rischio di esplosione ATEX zona 1 G, devono essere scelti in funzione della portata assegnata, della pressione disponibile e della gittata necessaria a garantire la copertura dell'intera area protetta.

La selezione viene effettuata mediante analisi delle curve caratteristiche fornite dai costruttori, verificando la corrispondenza tra il punto di lavoro richiesto e le prestazioni del dispositivo.



Ø Corpo Body	Ø D1	D2	A mm (inch)	B mm (inch)	C mm (inch)	D mm (inch)	$\alpha^{(4)}$	$\beta^{(4)}$	Portata Massima Max. Flow rate lpm (gpm)	Peso Weight kg (lb) ⁽³⁾
3"	3"	FQ125	610 (24)	807 (31.8)	456 (18)	584 (23)	- 65°	+ 85°	4000 (1000)	103 (226.6)
	4"	SF125								105 (231)
4"	4"	FQ150	660 (26)	870 (34.3)	516 (20.3)	593 (23.3)			6500 (1600)	128 (281.6)
	6"	SF150							8500 (2250)	131 (288.2)
6"	6"	ANSI	814 (32)	1082 (42.6)	643 (25.3)	740 (29.1)			15000 (3900)	238 (523.6)
	8"	150							20000 (5200)	245 (539)

Figura 5.1 – Monitore elettrico -Niagara

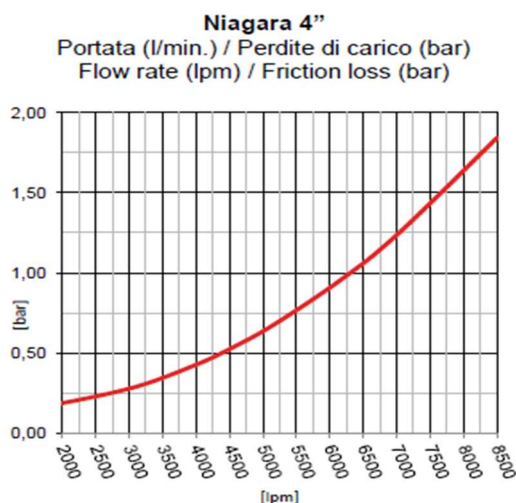
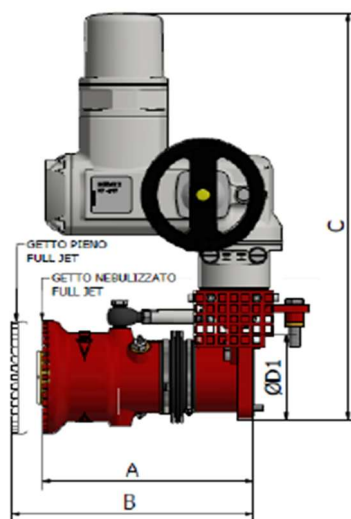


Grafico 5.1 – Prestazioni Idrauliche

A completamento della selezione del monitore antincendio, è stato preso in considerazione anche il tipo di ugello installato, in quanto le prestazioni idrauliche del sistema risultano strettamente influenzate dalla geometria e dalla configurazione dell'organo di erogazione. In particolare, la scelta del incide direttamente sulla portata effettiva, sulla pressione di esercizio e sulla gittata del getto, elementi fondamentali per garantire la copertura dell'area protetta.

Nel presente progetto è stato quindi individuato il modello di ugello più idoneo in funzione delle condizioni operative richieste e delle caratteristiche del monitore selezionato.



T01

Figura 5.2 – Ugello elettrico a portata regolabile

TYPE	Ø D1	A mm (inch)	B mm (inch)	C mm (inch)	Portata Massima l/min. (gpm) a 7 bar (100 psi) Max. Flow rate lpm (gpm) at 7 bar (100 psi)														Peso Weight kg (lb)
					1300 (350)	1500 (500)	2000 (600)	2500 (700)	3000 (750)	4000 (1000)	4500 (1100)	5000 (1250)	5500 (1350)	6000 (1500)	6500 (1600)	7000 (1750)	7500 (2000)	8000 (2100)	
T01	F.BSP 2.1/2"	280 (11)	420 (16,5)	575 (22,6)															48 (105,6)
	FQ125 SF125	274 (10,8)	414 (16,3)	575 (22,6)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	44 (96,8)
	FQ150 SF150	274 (10,8)	414 (16,3)	605 (23,8)															48 (105,6)

Tabella 5.1 – Scheda ugello elettrico a portata regolabile

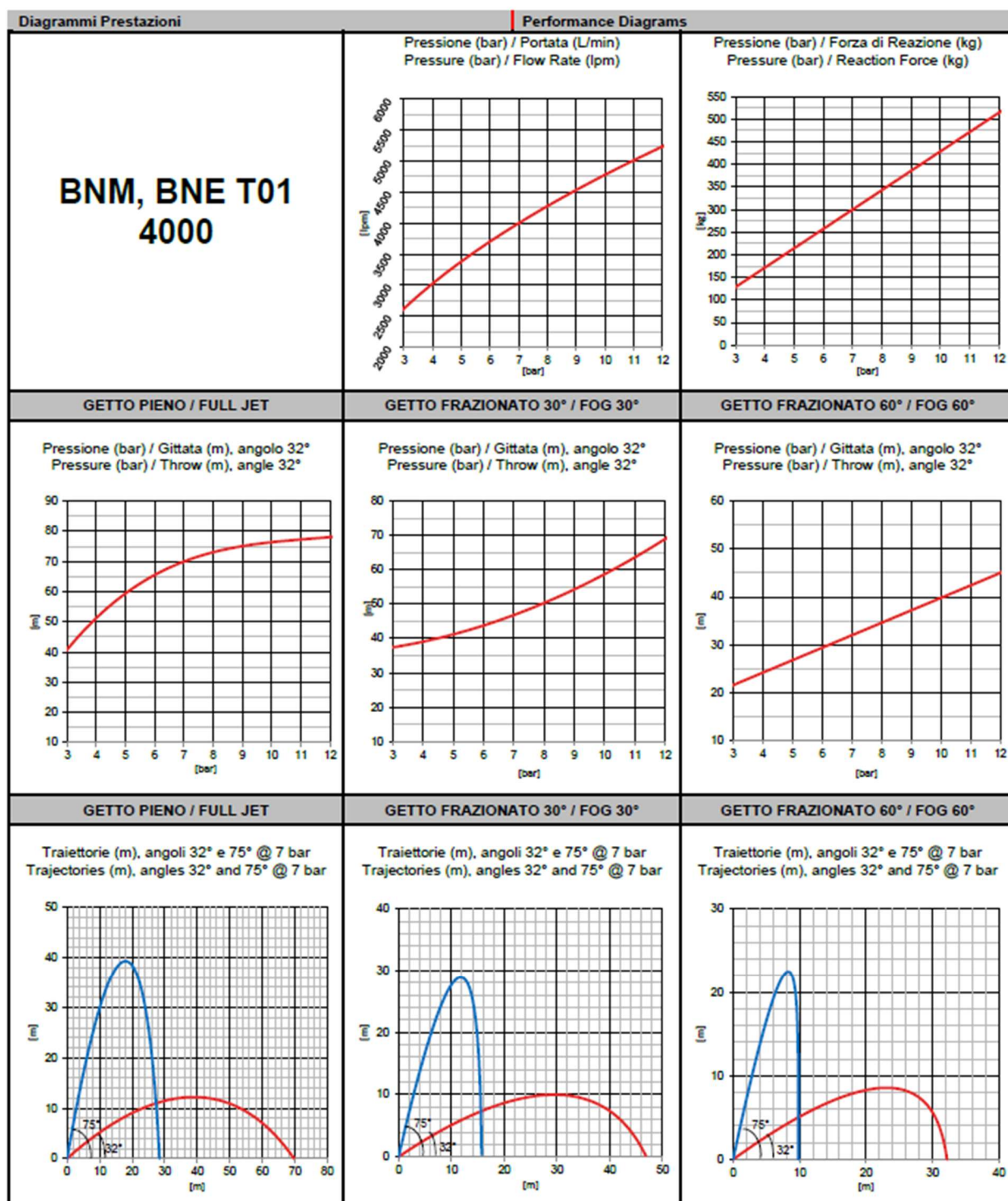


Grafico 5.2 – Prestazioni Idrauliche

- Serbatoio:

Lo stoccaggio del concentrato schiumogeno è affidato a un serbatoio dimensionato sulla base del fabbisogno complessivo del sistema e dei relativi margini operativi, definiti in funzione dell'autonomia richiesta e delle condizioni di impiego previste. La soluzione adottata è quella del serbatoio a membrana (bladder tank), scelta per la sua elevata affidabilità operativa, la semplicità costruttiva e la capacità di garantire una separazione netta tra concentrato e fluido.

Il sistema è costituito da un serbatoio rigido pressurizzato al cui interno è installata una membrana flessibile ed elastica, che contiene il concentrato schiumogeno isolandolo completamente dall'acqua di alimentazione, durante le operazioni l'acqua in pressione esercita un'azione esterna sulla membrana, determinando la progressiva espulsione del concentrato verso il sistema di proporzionamento.

Il dimensionamento del serbatoio deve essere effettuato considerando non soltanto il volume geometrico totale, ma soprattutto il volume effettivamente disponibile per il concentrato. Inoltre, risulta necessario tenere conto del volume morto, associato alla geometria della membrana e alle condizioni di svuotamento non completo, nonché delle variazioni di pressione che possono influenzare l'effettiva estrazione del fluido. Una corretta valutazione dei precedenti aspetti consente di garantire l'autonomia richiesta dal sistema nelle condizioni operative più gravose.

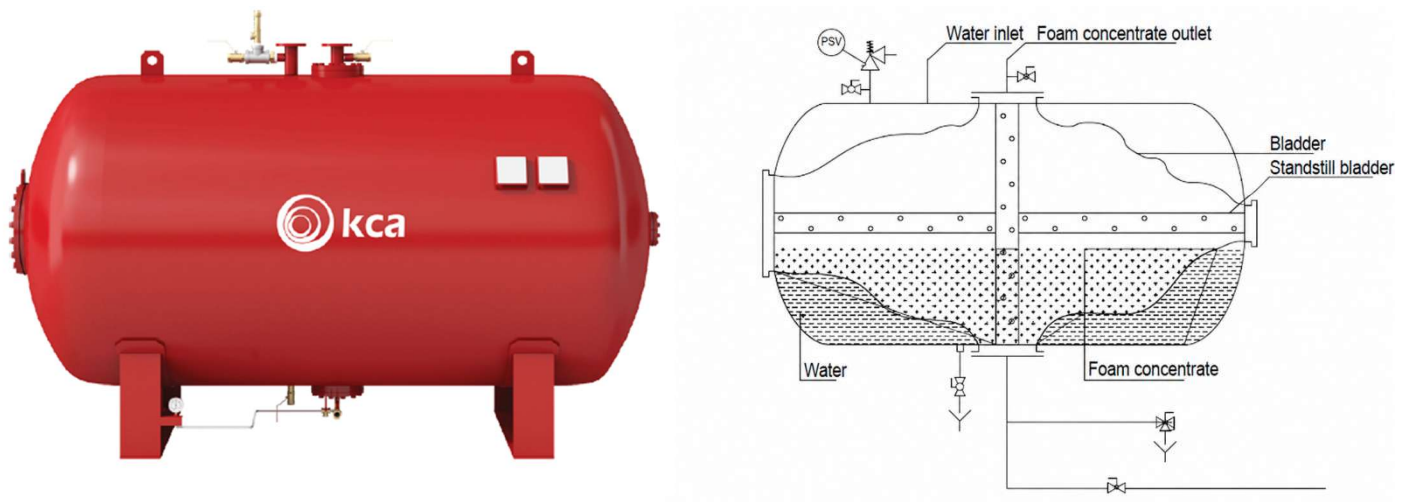


Figura 5.3 – Horizontal Foam Storage KCA

Bladder Tank : ASME Sec VIII Design Code		Capacity		Weight		A	B	C	ØD	ØG	H	ØL	M	N	O	P	Q	R
175 psi / 12.1 bar	232 psi / 16.0 bar	USG	Litres	lbs	kg	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm	inch mm
MXCH2800U	MXCH2800U-16	2,800	10,599	7,870	3,565	22.3 566	114.2 2,900	23.1 586	78.7 2,000	3 80	159.5 4,052	3 80	94.5 2,400	0.4 10	5.9 150	59.1 1,500	53.1 1,350	100.4 2,550

Tabella 5.2 – Scheda tecnica Horizontal Foam Storage KCA

- Sistema di Proporzionamento:

Il sistema di proporzionamento ha la funzione di garantire il corretto dosaggio del concentrato schiumogeno nella corrente d'acqua, assicurando il mantenimento di una concentrazione nominale pari al 3% sull'intero campo di portata operativo.

Il principio di funzionamento si basa sull'impiego del serbatoio a membrana, che costituisce l'elemento di alimentazione del concentrato verso il sistema di proporzionamento. Durante le operazioni, la pressione dell'acqua di mandata agisce sulla membrana elastica, determinando la compressione del volume interno e la conseguente espulsione del concentrato in maniera continua e proporzionale alla domanda del sistema.

Il dosaggio del concentrato avviene in modo passivo, senza l'utilizzo di pompe dedicate o sistemi di regolazione attiva della portata, con conseguente riduzione della complessità impiantistica e incremento dell'affidabilità complessiva.

Inoltre, la regolazione del rapporto di miscelazione è garantita dal principio di bilanciamento idraulico tra le pressioni in gioco e dalle caratteristiche del proporzionatore installato a valle del bladder tank.

Il sistema è progettato per assicurare la stabilità della concentrazione anche in presenza di variazioni significative della portata idrica, tipiche delle diverse condizioni operative dell'impianto. Tale configurazione consente di ottenere un'erogazione uniforme della soluzione acqua-concentrato, con limitate oscillazioni del titolo percentuale.

- Pompa:

La pompa riveste un ruolo fondamentale in quanto garantisce il corretto dosaggio del concentrato schiumogeno all'interno del flusso d'acqua antincendio, assicurando la formazione della soluzione estinguente nelle percentuali richieste.

La verifica è condotta confrontando la portata di progetto con il campo di funzionamento dell'apparecchiatura, al fine di accertarne l'idoneità alle condizioni operative previste, è stata analizzata la curva caratteristica fornita dal costruttore, verificando che il punto di funzionamento ricadesse all'interno dell'intervallo di utilizzo raccomandato.

Tale controllo rappresenta un passaggio essenziale del processo progettuale, poiché consente di confermare la corretta corrispondenza tra i risultati del dimensionamento teorico e le prestazioni effettivamente ottenibili dall'impianto. Le relative caratteristiche tecniche e la curva prestazionale sono riportate nelle figure seguenti.

Type		FD4000/0,5-S	FD4000/1-S	FD4000/3-S	FD4000/3/3-S
Proportioning rate		0.5 %	1 %	3 %	3% + 3% = 6%
Approvals	FM ²⁾	–	 FM Approval PR452158	–	–
	VdS ²⁾	–	–	 G422015	–
Flow directions of water motor		Horizontal: “left → right” or “right → left”			
		Vertical: “top → bottom” or “bottom → top”			
Min. water flow rate ¹⁾		250 l/min	250 l/min	280 l/min	380 l/min
Min. water flow rate FM		–	400 l/min	440 l/min	–
Max. water flow rate		4000 l/min			
Operating temperature ³⁾		5° C – 50° C (standard version)			
		5° C – 80° C (High-Temp version) ⁴⁾			
Storage temperature		-20 °C – 80 °C			
Operating pressure		5 – 16 bar			
Weight ⁴⁾					
Freshwater version		104 kg	111 kg	168 kg	222 kg
Seawater version ⁴⁾		181 kg	188 kg	245 kg	299 kg
ATEX classification ⁴⁾ for +5 °C ≤ T _a ≤ +60 °C		 II 2G Ex h IIC T4 Gb  II 2D Ex h IIC T130 °C Gb			

Tabella 5.3 – Scheda tecnica FD4000 GEN III

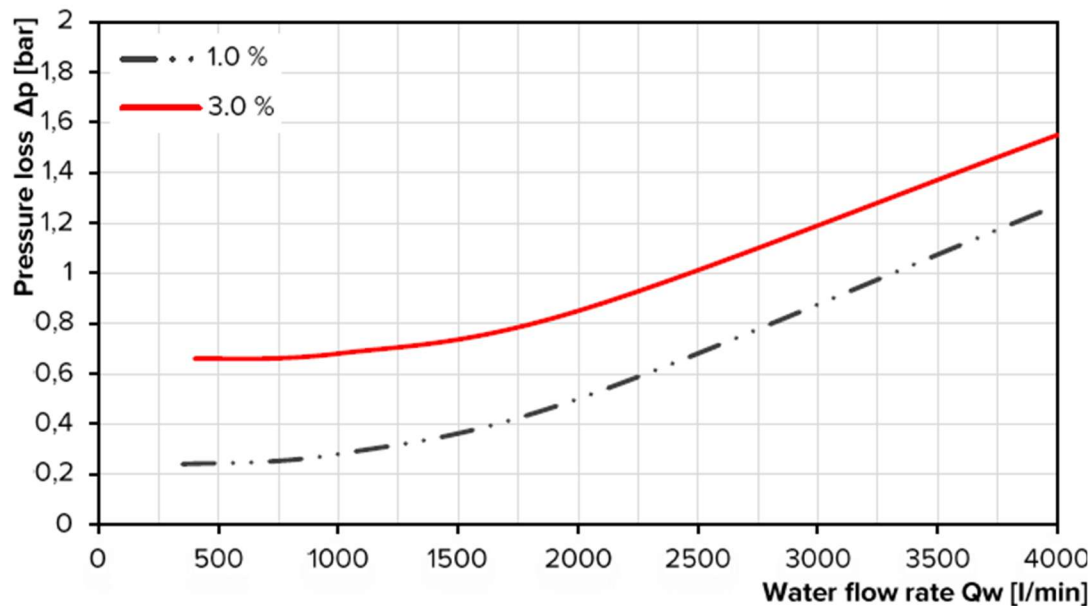


Grafico 5.3 – Curva perdite di carico

- Rete:

La rete di distribuzione viene completata mediante la selezione di tubazioni, valvole di intercettazione, valvole di non ritorno e componenti accessori, scegliendo materiali idonei all'ambiente marino e garantendo la coerenza con le perdite di carico considerate in fase di dimensionamento.

A valle della selezione dei componenti, il modello idraulico viene aggiornato sulla base delle caratteristiche reali delle apparecchiature scelte, al fine di verificare il comportamento del sistema nelle effettive condizioni di esercizio. Le simulazioni consentono di valutare con maggiore accuratezza la distribuzione delle portate, le perdite di carico e le pressioni ai terminali, tenendo conto delle curve caratteristiche dei dispositivi installati e delle condizioni di funzionamento simultaneo delle utenze.

Successivamente, il progetto viene verificato mediante software di calcolo idraulico, che consente di analizzare con maggiore dettaglio la distribuzione delle portate, le perdite di carico concentrate e distribuite e le pressioni disponibili ai terminali dell'impianto, considerando anche la presenza di valvole servocomandate, curve e dislivelli tipici della configurazione navale. Tale analisi permette inoltre di valutare condizioni di funzionamento simultaneo di più utenze, garantendo il rispetto dei requisiti prestazionali anche negli scenari più gravosi.

Infine, il modello numerico viene integrato da verifiche sperimentali, che costituiscono il riferimento conclusivo per la validazione del sistema in conformità alle normative internazionali applicabili.

Solo attraverso un approccio integrato, che comprende dimensionamento teorico, selezione dei componenti, modellazione idraulica e validazione sperimentale, è possibile garantire che l'impianto a schiuma risulti adeguato alle condizioni operative reali e affidabile nelle situazioni di emergenza per le quali è stato progettato.

Requisiti Normativi:

Il dimensionamento dell'impianto deve essere accompagnato dalla verifica di conformità ai requisiti della normativa internazionale applicabile, con particolare riferimento alla Convenzione SOLAS e al FSS Code - Capitolo 14 (relativo ai sistemi fissi a schiuma). Tali prescrizioni definiscono i requisiti minimi prestazionali in termini di intensità di applicazione, tempo di intervento, concentrazione della soluzione schiumogena e copertura dell'area protetta.

Il sistema deve inoltre risultare conforme alla Convenzione MARPOL 73/78, con particolare riferimento ai principi di prevenzione dell'inquinamento marino derivante da sostanze pericolose e potenzialmente inquinanti. Lo stoccaggio e l'impiego del concentrato schiumogeno devono essere gestiti in modo da evitare rilasci accidentali in mare durante le normali operazioni di esercizio, test e manutenzione, nonché garantire la corretta gestione dei residui e delle operazioni di drenaggio secondo procedure controllate.

È richiesta la verifica della compatibilità del concentrato schiumogeno con la tipologia di carico trasportato, al fine di evitare riduzioni di efficacia estinguente o interazioni indesiderate con i liquidi infiammabili presenti a bordo.

Mentre dal punto di vista impiantistico, deve essere garantita l'adeguatezza della sorgente di alimentazione idrica, assicurando la disponibilità simultanea di portata e pressione richieste dal sistema nelle condizioni di massimo carico operativo. Il sistema di proporzionamento deve assicurare il corretto rapporto di miscelazione sull'intero campo di funzionamento, mantenendo stabilità prestazionale anche in presenza di variazioni significative della portata.

In fase ispettiva e manutentiva devono essere verificati l'integrità dei serbatoi e degli indicatori di livello, la funzionalità delle valvole e delle linee di distribuzione, nonché la corretta identificazione dei circuiti e dei dispositivi terminali, inclusi monitori e ugelli. Particolare attenzione deve essere posta all'esecuzione delle prove periodiche previste dalle normative applicabili e dalle procedure operative di bordo.

6 Conclusioni

La presente trattazione ha permesso di delineare un quadro organico della sicurezza antincendio in ambito navale, confermando come la protezione di un'unità complessa non possa scaturire da singoli apparati isolati, ma debba derivare da una progettazione sistemica e integrata. L'analisi condotta ha evidenziato che l'efficacia della risposta a un incendio è il risultato della sinergia tra misure passive, quali la compartimentazione strutturale, e misure attive di rilevazione e spegnimento, il tutto inquadrato nel rigoroso rispetto del quadro normativo internazionale definito dalle Convenzioni SOLAS e MARPOL.

In questo contesto, il dimensionamento applicativo dell'impianto a schiuma per la petroliera presa come caso studio ha rappresentato la naturale applicazione pratica dei principi analizzati, costituendo il momento di sintesi tra i requisiti prestazionali del Fire Safety Systems Code (FSS Code) e la pratica ingegneristica. Attraverso il calcolo analitico, è stata determinata una portata totale di soluzione schiumogena pari a 250 L/s, necessaria per garantire una copertura uniforme su un'area di ponte di 2.300 m² con un'intensità di applicazione di 6,5 L/min·m². Tale esercizio ha inoltre evidenziato l'importanza di considerare parametri operativi reali che spesso superano la modellazione teorica, come la gestione delle perdite di carico lungo la rete, stimate in circa 0,7 bar totali, e la necessità di garantire una pressione di progetto di 10 bar ai terminali. Analogamente, l'analisi dei volumi di stoccaggio ha confermato che il calcolo del serbatoio non può prescindere dalla valutazione dei volumi morti e dei necessari margini di sicurezza legati alle condizioni dinamiche della nave.

Le considerazioni progettuali emerse dal caso studio si inseriscono inoltre in un contesto normativo e tecnologico in continua evoluzione. Dalla ricerca emerge infatti la centralità della sfida ambientale legata alla transizione verso agenti estinguenti Fluorine-Free (FFF). Il passaggio a queste nuove formulazioni impone una revisione dei processi di manutenzione e bonifica degli impianti esistenti, segnando un punto di incontro imprescindibile tra sicurezza operativa e sostenibilità ambientale. Parallelamente, si è ribadito che per le unità cisterna la prevenzione primaria rimane affidata al sistema a gas inerte, l'unico in grado di agire alla radice del rischio di esplosione mantenendo l'atmosfera dei serbatoi fuori dai limiti di infiammabilità.

Accanto agli aspetti tecnologici e normativi, l'esperienza maturata durante il tirocinio ha confermato che l'efficacia di qualsiasi sistema antincendio è strettamente subordinata al fattore umano, la prontezza dell'equipaggio, supportata da una formazione continua e documentata, rappresenta infatti l'ultimo e più importante livello di difesa.

In tale ottica, l'adozione di soluzioni migliorative volte a preservare l'affidabilità degli impianti nel tempo, come la proposta di circuiti dedicati all'acqua dolce per i test funzionali, costituisce un esempio concreto di come l'ottimizzazione manutentiva possa ridurre l'usura dei componenti in ambiente marino e contribuire al mantenimento delle prestazioni progettuali.

In conclusione, la sicurezza antincendio navale moderna richiede un equilibrio costante tra rigore progettuale, conformità normativa e disciplina operativa. Solo attraverso questo approccio integrato, che parte dalla corretta interpretazione delle regole internazionali per giungere a soluzioni tecniche affidabili e sostenibili, è possibile garantire la salvaguardia della vita umana in mare e la tutela del patrimonio navale e ambientale.

7 Bibliografia e sitografia

- International Maritime Organization (IMO), International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, <https://www.imo.org>
 - International Maritime Organization (IMO), International Code for Fire Safety Systems (FSS Code), <https://www.imo.org>
 - Registro Italiano Navale (RINA), <https://www.rina.org/en/sectors/maritime>
 - Bureau Veritas (BV), <https://group.bureauveritas.com/industries/marine-offshore/marine>
 - Lloyd's Register (LR), <https://www.lr.org/en/expertise/segments/tanker/>
 - American Bureau of Shipping (ABS), <https://www.eagle.org>
 - K.C. Antincendio (KCA), soluzioni di stoccaggio della schiuma (foam storage) <https://kcantincendi.com/>
 - SA Fire protection, <https://www.safireprotection.com/>
 - FireDos, <https://www.firedos.com/>
 - Manuali tecnici e documentazione di bordo relativi a fire control plan, sistemi a schiuma, sistemi CO₂, water mist e sistemi gas inerte.
 - Manuali tecnici di bordo visionati durante le ispezioni di tirocinio.
- (Nota: i manuali visionati durante il tirocinio sono considerati documentazione confidenziale e non sono disponibili online).