

## **Analisi delle dimensioni dei fori di alleggerimento delle travi dei ponti di uno scafo**

*Giada Bianchi – Università degli Studi di Genova*

*Martina Aguiari – Università degli Studi di Genova*

*Francesca Oppicini – Fincantieri S.p.A.*

*Cesare Mario Rizzo – Università degli Studi di Genova*

### **Abstract**

Il lavoro proposto descrive una procedura per il dimensionamento degli elementi strutturali primari nella fase iniziale della progettazione navale, con l'obiettivo di determinare le dimensioni massime delle forature di alleggerimento presenti usualmente nelle anime delle travi, necessarie anche al passaggio dei componenti impiantistici. L'obiettivo è semplificare il processo per un risultato più efficace e integrato sin dalle prime fasi della progettazione. In particolare, il dimensionamento dello scafo di una nave, pur essendo un problema complesso, è spesso governato da poche variabili indipendenti con campi di variazione spesso limitati. La scelta ottimale si ottiene quindi analizzando e confrontando sistematicamente le soluzioni realmente realizzabili in pratica. L'analisi sistematica fornirà ai progettisti dati razionali per scegliere il dimensionamento delle travi, nell'ottica di trovare la soluzione migliore in termini di peso-resistenza e dimensione massima delle forature di alleggerimento. Lo studio combina metodi analitici e numerici con l'esperienza progettuale, integrando i risultati nel processo di progettazione mediante un codice VBA.

## 1 Introduzione

La progettazione preliminare delle strutture dello scafo di una nave implica non solo il soddisfacimento di verifiche di stato limite in accordo ai principi della scienza delle costruzioni, implementando opportunamente metodologie analitiche quali la teoria della trave e della lastra e numeriche come il metodo degli elementi finiti, ma anche la selezione di componenti per la costruzione che siano conformi ad un'ampia serie di vincoli di fabbricazione, di esigenze operative e commerciali, di buone pratiche industriali, ecc.

In questo lavoro viene descritta una procedura per la scelta delle travi primarie dei ponti di una costruzione navale finalizzata ad ottenere le dimensioni massime possibili delle forature di alleggerimento usualmente praticate nelle anime delle travi stesse. Al fine di facilitare il progettista nella scelta delle travi, lo studio si propone di individuare la combinazione ottima fra altezza della trave e dimensioni del foro in funzione dell'intensità di carico agente sul ponte da cui dipendono le verifiche di stato limite rispettando i vincoli costruttivi, operativi, commerciali ecc. oltre a quelli della robustezza strutturale.

L'obiettivo è quello di fornire linee guida pratiche per la scelta delle forature di alleggerimento delle travi primarie durante la fase iniziale della progettazione, quando il lay-out delle strutture è soggetto a numerose modifiche richieste da vari requisiti ed esigenze progettuali che inevitabilmente emergono poco alla volta nella progettazione preliminare.

Le forature delle travi primarie dei ponti, oltre che per alleggerire lo scafo, vengono realizzate per consentire il passaggio del complesso di tubi, per il trasporto di fluidi di impianti, di condotte d'aria per il condizionamento e di strade cavi, per i sistemi elettrici e di comunicazione, che richiedono l'attraversamento delle strutture. In particolare, le travi trasversali dei ponti, ovvero i bagli, saranno le travi su cui si focalizzerà l'attenzione, poiché presentano forature ulteriori per il passaggio delle strutture secondarie (rinforzi comuni), ovvero i correnti longitudinali; una volta individuata la configurazione dei fori per i bagli, si riproporrà la medesima configurazione anche sulle travi longitudinali, ovvero le anguille. Per migliore chiarezza, si può osservare in Figura 1 la configurazione strutturale tipica del naviglio militare, oggetto dello studio.

La combinazione di diversi fattori, che verranno analizzati meglio nel capitolo successivo, ha determinato la necessità di definire in anticipo la dimensione dei fori di alleggerimento richiesta per il passaggio degli impianti (in gergo di cantiere, "il coordinato"), in modo da evitare la necessità di dover apportare modifiche successive nel corso della costruzione, cosa che comporterebbe un dispendio di tempo e risorse non necessario, ottenendo invece un risultato più efficiente e integrato fin dall'inizio della progettazione.

Lo studio, sviluppato nel corso di una tesi di laurea in collaborazione con l'azienda Fincantieri, è stato condotto per il caso particolare del naviglio militare adottando metodologie di progettazione analitiche e numeriche (FEM) e sfruttando l'esperienza dei progettisti, le conoscenze tecniche e le buone pratiche di precedenti costruzioni navali caratterizzate da soddisfacenti prestazioni della struttura. Evidentemente, il medesimo approccio può essere riproposto anche per differenti tipologie di navi mercantili.

Partendo dalla ricerca delle altezze delle travi maggiormente utilizzate nella costruzione navale per ciascun tipo di carico a ponte, l'analisi esaminerà come la massimizzazione delle dimensioni dei fori di alleggerimento influenzi la robustezza del grigliato di travi primarie per ognuna delle altezze di anima individuate, dimostrando che le uniche variabili indipendenti che effettivamente governano il problema sono l'altezza complessiva della trave e l'altezza del foro poiché tutte le altre variabili (inclusa la larghezza del foro) sono in qualche modo dipendenti da esse.

Quindi, considerando razionalmente le variabili del problema generale del dimensionamento di una nave e tutte le verifiche ed i vincoli che necessariamente occorre implementare, si può ben comprendere come, in pratica, si abbia un problema governato da pochissime variabili con campi di variazione estremamente limitati. La scelta quindi della miglior soluzione si può ottenere con l'analisi sistematica delle relativamente poche soluzioni realmente possibili del problema e la comparazione di esse.

Al fine di contenere i tempi di progettazione, anche sfruttando le conoscenze sviluppate negli anni in vari progetti di ricerca collaborativi finanziati dalla Divisione Navi Militari di Fincantieri ([1], [2], [3]), è stato prodotto un codice di calcolo in linguaggio VBA (Visual Basic for Application) in modo da poter integrare questi risultati nella pratica progettuale aziendale che già da tempo è finalizzata alla riduzione del peso scafo, ovviamente senza inficiare le prestazioni e la sicurezza della costruzione ma anzi migliorandone le prestazioni e facilitando e velocizzando il processo progettuale e costruttivo.

I risultati dell'analisi sistematica consentono di fornire ai progettisti dati razionali sui quali basare la scelta del dimensionamento delle travi, nell'ottica di trovare la soluzione migliore in termini di peso-resistenza e dimensione massima possibile per il passaggio degli elementi degli impianti all'interno del grigliato di travi primarie del ponte di una nave.

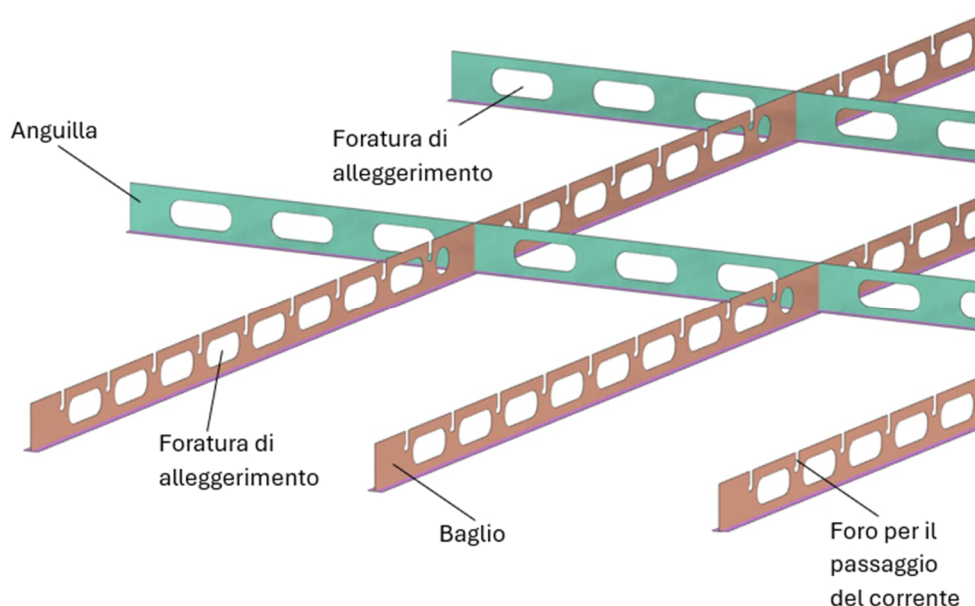


Figura 1 – Esempio grigliato travi primarie del ponte di una nave

## 2 Stato dell'arte e motivazioni

### 2.1 Contesto e finalità

Nella progettazione delle navi militari, la presenza dei fori di alleggerimento sulle travi primarie e la loro massimizzazione in termini di dimensioni diventa sempre più necessaria a causa dell'evoluzione e della contemporaneità di diversi vincoli progettuali che possono essere sintetizzati come segue:

- L'aumento dell'altezza libera contrattuale per gli interponti: tale altezza è diventata un requisito vincolante e non derogabile al fine di migliorare le condizioni di vita e quindi le prestazioni dell'equipaggio nella conduzione della nave;
- Di contro, rimane la necessità progettuale di mantenere bassa l'altezza degli interponti, per motivi legati a stabilità, peso e costi produttivi: infatti, con bassi interponti si riduce il profilo radar e visivo, si abbassa il baricentro dello scafo, e quindi si hanno migliori performance della carena in mare;
- La crescente densità di attraversamenti di cavi, tubolature ed altre parti di impianti che costituiscono gli attraversamenti impiantistici e caratterizzano le navi moderne richiede passaggi nelle strutture dello scafo di dimensioni sempre maggiori. In particolare, con il tempo, è aumentata la quantità di cavi elettrici, i quali peraltro richiedono un buon isolamento per limitare la segnatura magnetica e quindi necessitano di maggiori spazi di passaggio;
- La necessità di comprimere i tempi di progettazione e di produzione, che implica necessariamente la scelta di configurazioni strutturali convenzionali e già ben note e sperimentate e determina limitazioni delle modifiche in produzione per soddisfare eventuali esigenze emerse in fase avanzata del progetto.

La combinazione di questi fattori mette in luce l'importanza di permettere il passaggio del sistema di tubi-condotte e strade cavi attraverso i fori di alleggerimento delle travi primarie, che di conseguenza devono avere le massime dimensioni possibili, non solo ai fini della riduzione del peso scafo.

In particolare, è bene sottolineare che attualmente, sulle navi militari, vengono impiegate diverse altezze di travi e le dimensioni dei fori di alleggerimento si basano principalmente sull'esperienza del progettista. Inoltre, l'altezza della trave non è libera, ma dipende dai seguenti fattori:

- altezza dell'interponete;
- altezza libera richiesta;
- spazio necessario per la coibentazione dei ferri;
- spazio per il rivestimento del ponte.

Lo spazio rimanente corrisponde all'altezza massima che la trave può avere. Si faccia riferimento alla Figura 2 che definisce il requisito funzionale dell'altezza libera di interponete ed i vincoli ad essa associati, tra i quali l'altezza delle travi di rinforzo del ponte.

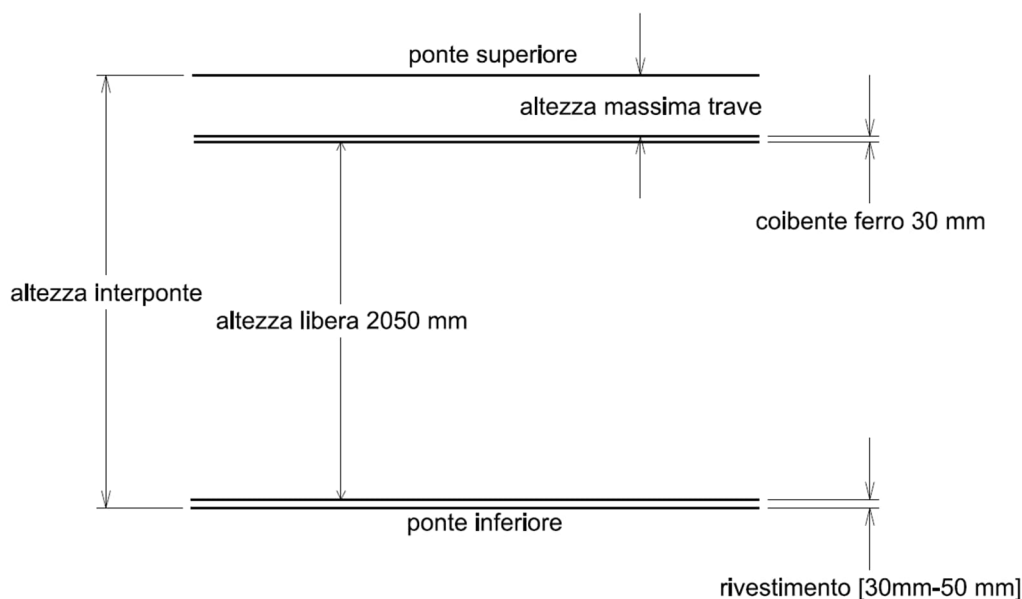


Figura 2 – Distribuzione spazio nell'interponte

Nel mondo mercantile, per esigenze di mercato e riduzione dei costi di produzione, la dimensione di bagli e anguille è nella maggior parte dei casi standardizzata, sia in termini di altezza trave che di grandezza dei fori di alleggerimento. Al contrario, in ambito militare, l'utilizzo di configurazioni standard non è il primo obiettivo in quanto si hanno requisiti di peso molto stringenti e le navi sono spesso molto diverse le une dalle altre e, quindi, viene lasciata maggiore scelta al progettista per individuare la soluzione migliore senza vincolarlo eccessivamente.

Per analizzare lo stato dell'arte, è stato creato un database che analizza diverse tipologie di navi militari recentemente costruite, tra cui una nave oceanografica, una portaerei, un pattugliatore veloce e un'unità anfibia. Sono state catalogate, per ogni carico a ponte regolamentare, le diverse tipologie di travi rinforzate utilizzate.

Si riportano nelle immagini successive i diagrammi ottenuti per i carichi considerati in questo studio, ovvero un carico relativamente leggero ( $3 \text{ kN/m}^2$ ) e un carico relativamente pesante ( $10 \text{ kN/m}^2$ ), che costituiscono l'estrema sintesi dello stato dell'arte. Si può notare come le altezze delle travi adottate siano relativamente disperse su un intervallo di variazione abbastanza ampio, nonostante debbano sopportare il medesimo carico.

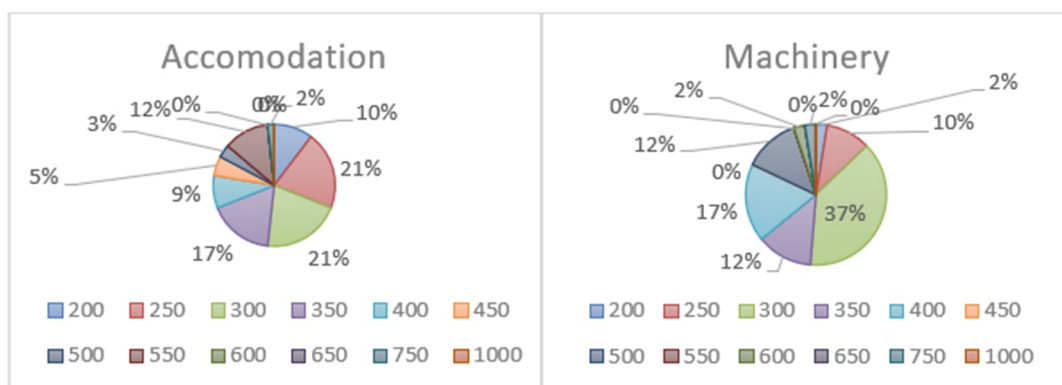


Figura 3 – Analisi altezza travi su navi militari di varie tipologie e dimensioni (a sinistra carico leggero negli alloggi, a destra carico pesante in locali macchina)

## 2.2 Stati limite regolamentari e modi di cedimento

L'approccio agli stati limite nella progettazione delle strutture navali, come esplicitato nelle Common Structural Rules (CSR) [4] e recepito dai più moderni regolamenti delle società di classificazione ([5], [7], [8], [9]), si basa sull'identificazione delle condizioni critiche o dei limiti operativi che una struttura può raggiungere durante la sua vita utile [10]. In particolare, ogni elemento strutturale è verificato in relazione alle possibili modalità di

cedimento collegate ai diversi stati limite definiti per la costruzione, come riportato nelle seguenti Tabella 1 e Tabella 2.

Nella Tabella 1 – Modalità di cedimento in relazione agli stati limite [4] si riportano gli stati limite per i quali è richiesta in generale la verifica di robustezza dai principali regolamenti per la costruzione delle navi ed i corrispondenti modi di cedimento. Come si può notare, non tutti i componenti strutturali sono soggetti alle stesse verifiche e quindi, al variare dell'elemento strutturale considerato, cambia lo stato limite che deve essere verificato [6]; come peraltro si evince dalla Tabella 2 che presenta, per i diversi componenti strutturali dello scafo, le verifiche di stato limite usualmente richieste al progettista.

Come menzionato precedentemente, l'attenzione in questo lavoro è rivolta ai rinforzi primari, in particolare del ponte tipico di una nave militare. Le travi primarie devono soddisfare lo stato limite di servizio, assumendo come modalità di cedimento lo snervamento del materiale, lo stato limite ultimo, l'instabilità elastica (buckling), e infine lo stato limite di fatica, essendo lo scafo soggetto a carichi ciclici. Si noti che la verifica di stato limite ultimo dei singoli componenti strutturali viene poi integrata in una verifica globale del collasso dello scafo che tiene conto dell'interazione tra i vari componenti e della ridondanza della struttura.

Modalità di cedimento	Stati limite <sup>(1)</sup>			
	SLS (Servizio)	ULS (Ultimo)	FLS (Fatica)	ALS (Accidentale)
Snervamento	Y	Y	-	Y
Collasso plastico	-	Y	-	Y
Buckling	Y	Y	-	Y
Rottura	-	Y	-	Y
Frattura a fatica	-	-	Y	-
Frattura fragile <sup>(2)</sup>	-	-	-	-

(1) Y indica la verifica strutturale da realizzare  
 (2) È controllata dai requisiti sul materiale in funzione del grado dell'acciaio

Tabella 1 – Modalità di cedimento in relazione agli stati limite [4]

Elementi strutturali <sup>(1)</sup>		Snervamento	Instabilità	Collasso ultimo	Fatica
Strutture locali	Rinforzi secondari	Y	Y	Y <sup>(2)</sup>	Y
	Fasciame	Y	Y	Y <sup>(3)</sup>	-
Rinforzi primari		Y	Y	Y <sup>(2)</sup>	Y
Trave scafo		Y	Y <sup>(4)</sup>	Y	-

(1) "Y" indica che la verifica strutturale deve essere effettuata  
 (2) Verifica ultima inclusa nella verifica a buckling  
 (3) Verifica ultima inclusa nella verifica a snervamento  
 (4) La verifica a buckling di rinforzi comuni e fasciame appartenenti alla robustezza della trave nave è realizzata usando come tensioni quelle ottenute da momento flettente e sforzo di taglio della trave nave

Tabella 2 – Verifiche strutturali in relazione agli elementi [4]

È bene sottolineare che nella fase preliminare del progetto strutturale di una costruzione navale, quella cui questa memoria è dedicata, la verifica a fatica non viene usualmente eseguita al fine di contenere tempi e costi di progettazione. Infatti, questa fase del progetto ricerca le caratteristiche principali della struttura mentre la verifica a fatica richiede informazioni di dettaglio non ancora pienamente disponibili e che andrebbero ipotizzate dal progettista con ampio margine di incertezza.

D'altra parte, le verifiche a fatica sono richieste per i dettagli di collegamento tra i componenti strutturali e per i bordi liberi delle lamiere, nelle zone di concentrazione delle tensioni. Come si vedrà in seguito, solo questi ultimi sono di interesse per gli scopi di questo lavoro ed eventuali verifiche a fatica potranno facilmente essere implementate in fasi successive del progetto, se sarà ritenuto necessario.

Inoltre, la verifica a buckling delle anime delle travi dei ponti non è normalmente realizzata in quanto i carichi agenti e la ridotta altezza dell'anima non provocano instabilità significative. Tale verifica è invece implementata anche in progettazione preliminare per le travi di grande altezza, come quelle del fondo. Si assume in questo studio di effettuare in un secondo momento la verifica a fatica e considerare una valutazione approssimata per quella a buckling. Le travi forate generate dall'elaborato saranno quindi verificate per stato limite di servizio con modo di cedimento a snervamento.

In funzione della normativa di riferimento adottata, vengono fornite le linee guida per garantire il soddisfacimento delle verifiche atte ad assicurare sicurezza ed efficienza delle strutture.

## 2.3 Criteri normativi per la foratura di travi primarie

I regolamenti per la costruzione delle navi delle società di classificazione considerano l'inserimento di forature in elementi quali i rinforzi primari un fattore critico in quanto può influenzare la resistenza e la stabilità dell'intera struttura. In generale, la presenza di fori modifica la distribuzione delle tensioni e può portare a concentrazioni di sforzi, soprattutto attorno ai bordi del foro, non accettabili dal punto di vista della robustezza.

Per questo motivo, le normative forniscono indicazioni su come gestire le forature al fine di garantire l'integrità strutturale anche in presenza di esse. È interesse del presente studio comprendere quanto la presenza del foro alteri lo stato tensionale e di conseguenza quanto questo possa essere allargato senza inficiare le prestazioni richieste alla struttura.

Dopo aver analizzato approfonditamente lo scenario normativo ([4], [5], [7], [9]), focalizzando l'attenzione sulle anime forate delle travi utilizzate nel naviglio militare, è emerso che i fori che rispettano i criteri regolamentari per non compromettere la capacità strutturale dell'elemento hanno dimensioni molto limitate e dunque praticamente inutili se pensati per gli scopi funzionali per i quali vengono oggi praticati.

È quindi necessario trovare un metodo per massimizzare le dimensioni delle forature anche derogando i requisiti regolamentari, mantenendo al contempo l'integrità strutturale e quindi il soddisfacimento della verifica di snervamento sulla base del principio di equivalenza che tutti i regolamenti per la costruzione navale ammettono. D'altra parte, le dimensioni delle forature di alleggerimento attualmente adottate sul naviglio militare, che si basano sull'esperienza dell'ingegnere progettista e su configurazioni dimostrate soddisfacenti in esercizio, vengono normalmente approvate dalle società di classificazione navale.

Le dimensioni attualmente adottate sono superiori a quelle previste dai regolamenti, in quanto le Società di classifica consentono di derogare i criteri purché venga dimostrato che gli stati limite regolamentari sono verificati. Per dimostrare alle Società di Classifica che le verifiche sono comunque soddisfatte è richiesta la presentazione di studi e calcoli, tipicamente sono adottati modelli agli elementi finiti che permettono di studiare la configurazione specifica caso per caso.

Per tale ragione, è stata realizzata una serie di modelli numerici agli elementi finiti di grigliati attualmente costruiti per valutare l'influenza dell'aumento delle dimensioni del foro sullo stato tensionale in modo sistematico e ottenere un'analisi di sensibilità del problema ad ampio spettro.

Come prevede la normativa di riferimento, ovvero il regolamento RINA [5] utilizzato per la progettazione di navi militari, sono stati generati modelli tridimensionali agli elementi finiti, il cui campo tensionale è stato confrontato con i valori ammissibili di deformazione e di tensione legati allo snervamento del materiale della costruzione. Se ne mostra un esempio in Figura 4.

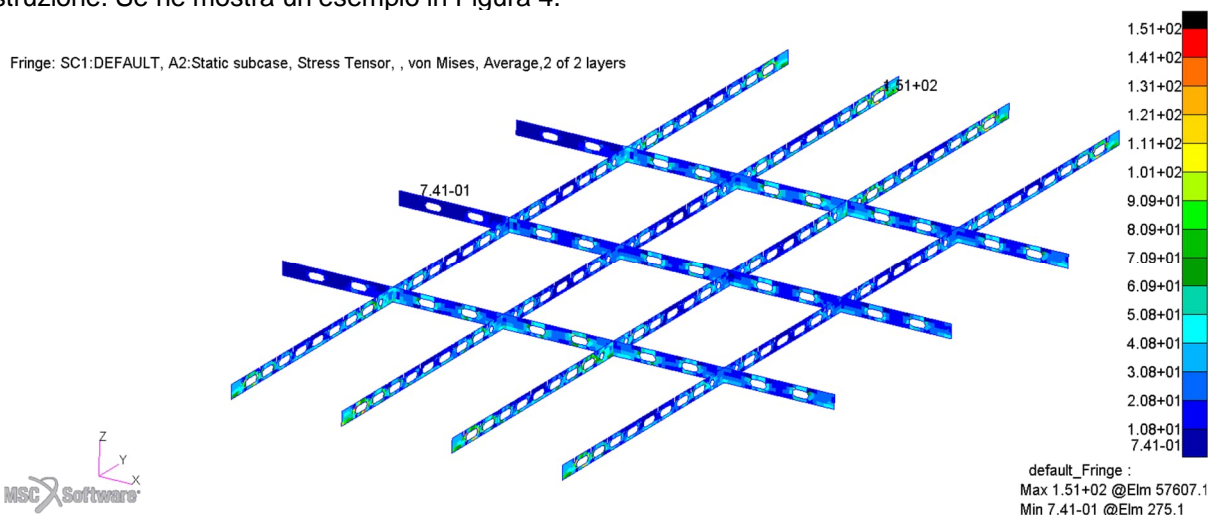


Figura 4 – Esempio modello FEM per trave di altezza 300mm e foro standard

I grigliati di travi sono stati generati in un primo momento con le forature di alleggerimento standard, già approvate dall'ente di classifica ed utilizzate come configurazioni tipiche nella costruzione, per poi massimizzare nelle fasi successive la dimensione dei fori e verificarne l'effetto.

I carichi applicati sono quelli regolamentari ed i due selezionati citati in precedenza per l'analisi dello stato dell'arte (carico relativamente leggero  $q_L = 3 \text{ kN/m}^2$  e un carico relativamente pesante  $q_P = 10 \text{ kN/m}^2$ ) rappresentano la quasi totalità dei casi usuali.

I modelli sono stati fatti variare in termini di altezza della trave, ma conservando:

- gli spessori dell'anima,
- le dimensioni della piattabanda

- nonché lo spessore del fasciame del ponte, e sono stati considerati due ponti di una nave realmente esistente, uno soggetto al carico leggero e uno al carico pesante.

Le altezze di trave utilizzate sono state selezionate realizzando l'analisi statistica menzionata in precedenza che ha consentito di selezionare le travi più comunemente utilizzate in funzione del carico.

I risultati ottenuti dai modelli agli elementi finiti sono stati rappresentati graficamente e riportati nella seguente Figura 5. Per avere un confronto più efficace dell'incremento della tensione, è stato riportato sull'asse delle ascisse il rapporto tra l'area del foro e l'area dell'anima della trave rinforzata compresa tra due correnti longitudinali (travi secondarie) e priva del foro, mentre sull'asse delle ordinate il rapporto tra la tensione ottenuta dai modelli tridimensionali e quella di riferimento corrispondente al caso senza foro. Le tensioni di riferimento sono state ricavate realizzando modelli di trave per ogni grigliato considerato.

Quest'analisi non solo ha permesso di visualizzare l'effetto della massimizzazione del foro, ma è stata utilizzata anche per valutare il fattore di concentrazione delle tensioni sul bordo del foro. Questo fattore è fondamentale, poiché consente di determinare la lunghezza massima del foro che garantisce il superamento della verifica di snervamento come meglio descritto nei capitoli successivi di questo lavoro.

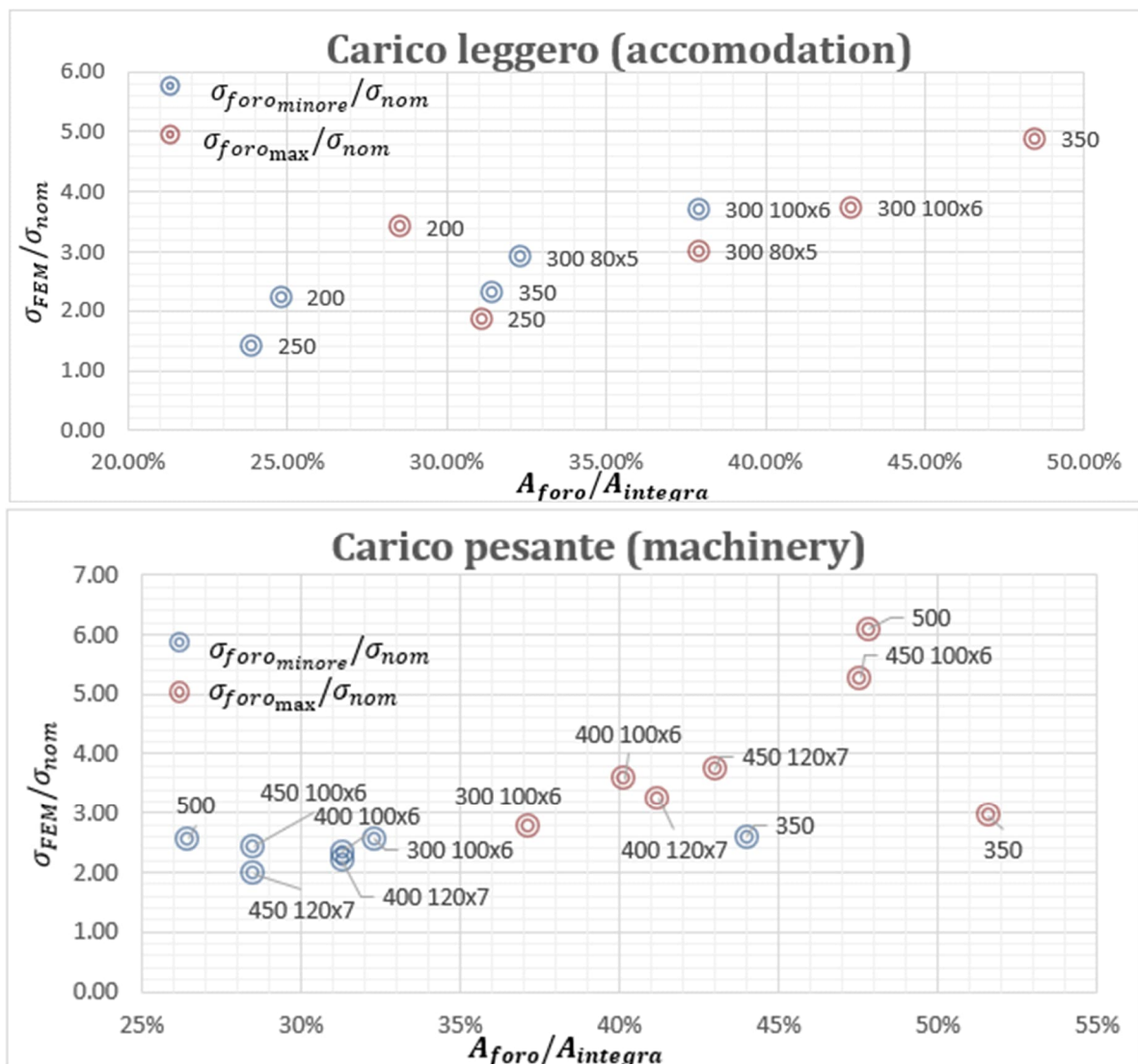


Figura 5 - Risultati in forma grafica dello stato tensionale ottenuto dai modelli FEM

## 3 Approccio metodologico

Il metodo di lavoro adottato si basa sull'identificazione delle variabili che definiscono le forature di alleggerimento ed il dimensionamento delle travi: definendo chiaramente le relazioni tra le grandezze che ne definiscono la geometria e la robustezza, si può dimostrare che è possibile individuare i fori con le dimensioni massime in funzione dell'altezza dell'anima della trave già in fase di progettazione di base.

Per ciascuna variabile sono state identificate le grandezze da cui questa è dipendente e il range di valori che può assumere, considerando sia i limiti definiti dalle normative, sia quelli derivanti da valori generalmente utilizzati e legati a vincoli ed esigenze di fabbricazione o da considerazioni meramente legate al buon senso ingegneristico. Alcune variabili possono assumere qualsiasi valore all'interno del loro range di definizione, mentre altre sono limitate a valori discreti. In alcuni casi tali valori discreti sono relativamente pochi.

Analizzando tutti i parametri in gioco e la loro reciproca dipendenza, sono state identificate le variabili effettivamente indipendenti del problema ed è stato quindi creato un codice in linguaggio VBA (Visual Basic for Application, normalmente implementato in MS Excel), per esplorare l'intero intervallo di dimensioni dei fori e le posizioni ammissibili, permettendo così di determinare le forature massime per ogni trave, nel rispetto dei limiti derivanti dalle specifiche progettuali e dai regolamenti per la costruzione.

### 3.1 Analisi delle variabili del problema

I parametri individuati per la definizione delle forature sono stati suddivisi in due categorie principali:

- i dati di input del problema, che sono le grandezze relative al dimensionamento strutturale coerenti con le scelte del progettista per la costruzione, e
- le variabili, suddivise a loro volta in variabili dipendenti e variabili indipendenti, che identificano le grandezze derivate per le verifiche di stato limite ed il soddisfacimento dei vincoli costruttivi.

Le variabili dipendenti, legate alle dimensioni principali del foro, vengono calcolate in funzione delle variabili indipendenti individuate dopo un'attenta analisi dei vincoli del problema.

Modificando quindi le variabili indipendenti, è possibile generare fori con dimensioni e posizioni variabili nello spazio delle configurazioni possibili, mantenendo fissi i dati di input. In questo modo, il codice consente di esplorare le configurazioni per il dimensionamento del foro, rispettando le condizioni imposte dal progetto, e di scegliere quello di dimensioni massime.

Per variabili di input si intendono quelle variabili ottenute dal dimensionamento preliminare, come ad esempio l'intervallo di ossatura, le campate delle travi, le dimensioni delle travi, ecc. Esse possono variare nel corso progetto preliminare e lo studio presentato in questo lavoro si propone appunto di fornire al progettista uno strumento agile per la definizione delle dimensioni e della posizione dei fori. Incidentalmente, si noti che anche la progettazione preliminare viene svolta adottando metodologie e strumenti basati sui principi della progettazione per obiettivi [1], [2], [3]. Questo studio costituisce quindi un'evoluzione delle metodologie già impiegate nella pratica progettuale aziendale.

Una variabile di input estremamente importante è il fattore di concentrazione delle tensioni sul bordo del foro nella zona in cui si hanno le massime tensioni agenti sulla struttura. Quest'ultimo è stato ottenuto dai modelli tridimensionali precedentemente introdotti e consente di inserire la stima delle tensioni agenti nella procedura di progettazione proposta all'interno della valutazione delle dimensioni massime del foro e quindi di implementare esplicitamente la verifica di stato limite richiesta senza necessariamente dover eseguire calcoli numerici complessi e onerosi in termini non solo di costo computazionale ma soprattutto di tempi di modellazione.

Infatti, i vari modelli agli elementi finiti usati per l'analisi dello stato dell'arte hanno altresì permesso di cogliere la concentrazione delle tensioni al variare delle dimensioni della foratura. Usando tale coefficiente è possibile definire quale sia la lunghezza massima del foro affinché i criteri di stato limite (snervamento) siano soddisfatti. Si noti che, ai fini della definizione del problema, la verifica di stato limite sullo snervamento costituisce uno dei vincoli da soddisfare e contribuisce quindi a ridurre significativamente lo spazio delle configurazioni possibili ed effettivamente realizzabili. Anche alla luce di tale osservazione, appare ragionevole rimandare la verifica di stati limite diversi a successive fasi del progetto.

Le variabili geometriche del foro, ad eccezione dell'altezza della foratura e della posizione verticale, sono variabili dipendenti e vengono riportate nella Figura 6. A queste si aggiungono le variabili che dipendono dal carico applicato sulla trave (taglio e momento flettente) e le caratteristiche di resistenza della sezione.

Le variabili indipendenti sono quelle che il codice realizzato modifica direttamente per generare le diverse configurazioni del foro. Le altre variabili si ottengono in funzione di esse. Si riporta nella Tabella 3 l'elenco completo delle variabili analizzate, con i relativi range di variazione.

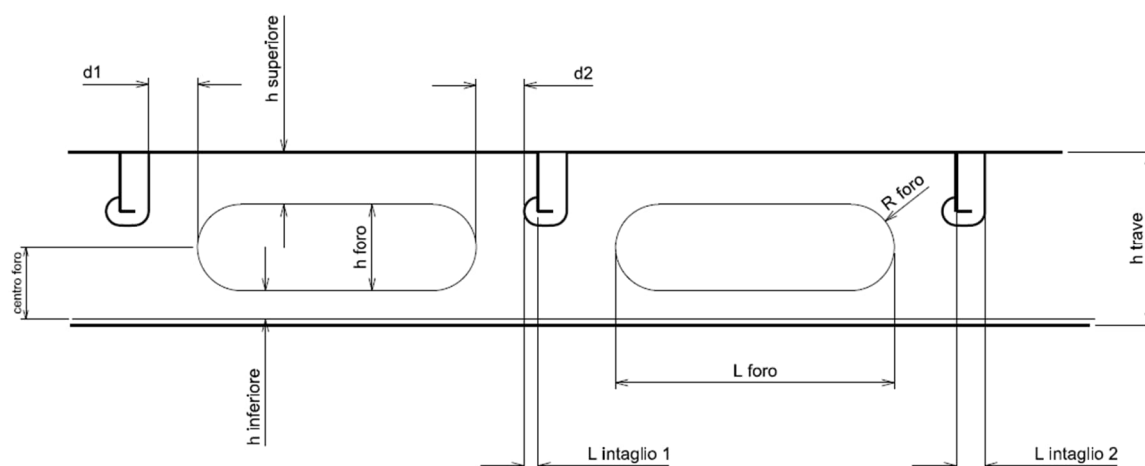


Figura 6 – Caratteristiche geometriche foro

Nomenclatura	Definizione	Tipologia	Valori	
			minimo	massimo
s	Intervallo di ossatura	input	300	600
S	Intervallo travi primarie	input	1200	2600
Interponte	Altezza interponte	input	2500	3000
Rinforzo comune	$h_{bulbo}$	input	60	320
	$t_{bulbo}$		5	14
$L_{baglio}$	Campata baglio	input	2500	5800
$h_{trave}$	Altezza trave primaria	input	$\max(h_{intaglio} * 2 + 10; 10 * t_{fsaciamе} + h_{intaglio}; 10 * t_{pb} + h_{intaglio})$	$interponte - rivestimento - h_{libera} - coibente$
Anima	$h_{web}$	input	$h_{trave} - t_{pb}$	
	$t_{web}$		$3.7 + 8.1 * k^{\frac{1}{2}}$ $L < 120 m$	$\min(2 * t_f; 16 mm)$
Fasciame	$b_f$	input	3	15
	$t_f$		$\min(20\%L_{beam}, S)$	
Piattabanda	$b_{pb}$	input	80	$\min(\frac{A_{striscia associata}}{t_{pb}}; S; h_{web})$
	$t_{pb}$		$t_{web}$	$t_{web} + c$
$Kt_{\sigma}$	Fattore di concentrazione delle tensioni di Von Mises	input	Simulazioni numeriche	
$Kt_{\tau}$	Fattore di concentrazione delle tensioni di taglio	input	Simulazioni numeriche	
$\sigma_{massima sopra foro}$	Tensione di Von Mises massima ammissibile sopra il foro	input	/	$\frac{\sigma_{ammissibile}}{Kt_{\sigma}}$
$\tau_{massima sopra foro}$	Tensione di taglio massima ammissibile sopra il foro	input	/	$\frac{\tau_{ammissibile}}{Kt_{\tau}}$
Carico	Carico applicato	input	Costante in funzione del ponte considerato	

Nomenclatura	Definizione	Tipologia	Valori	
			minimo	massimo
$h_{sup-inf\ minima}$	Distanza minima tra lembo del foro e striscia associata/piattabanda	input	50	
$c_{foro\ minimo/massimo}$	Posizione centro del foro minimo/massimo	input	$h_{web} - (h_{sup\ min} + \frac{h_{foro}}{2})$	$h_{inf\ min} + \frac{h_{foro}}{2}$
$h_{foro\ minimo/massimo}$	Altezza del foro minima/massima	input	50% $h_{trave}$ oppure input	$h_{web} - 2 * h_{sup-inf\ minima}$
step $c_{foro}$	Step incremento centro foro	input	5	
step $h_{foro}$	Step incremento altezza foro	input	10	
$h_{superiore}$	Altezza anima sopra il foro	Variabile dipendente	$h_{anima} - (centro_{foro} + \frac{h_{foro}}{2})$	
$h_{inferiore}$	Altezza anima sotto il foro	Variabile dipendente	$c_{foro} - \frac{h_{foro}}{2}$	
$d_{intaglio-fofo}$	Distanza intaglio-fofo	Variabile dipendente	$\min\left(\frac{h_{superiore}}{K_{t\sigma}}, \frac{h_{superiore}}{K_{t\tau}}\right)$	
$d_{fofo}$	Distanza tra due fori adiacenti	Variabile dipendente	$s - l_{fofo}$	
$r_{fofo}$	Raggio foro	Variabile dipendente	$h_{foro}/2$	
$A_{fofo}$	Area del foro	Variabile dipendente	$(l_{fofo} - h_{fofo}) * h_{fofo} + \pi * \left(\frac{h_{fofo}}{2}\right)^2$	
Intaglio	$h_{intaglio}$	Variabile dipendente	$h_{corrente} + 10$	
	$b_{intaglio}$		Indicati nei disegni dei particolari tipici in funzione del tipo di rinforzo adottato	
$L_{fofo}$	Lunghezza foro	Variabile dipendente	/	$s - (2 * 20\ mm + b_{intaglio\ totale})$
	Lunghezza foro massima		$s - (2 * d_{min\ foro-intaglio} + b_{intaglio\ totale})$	
T	Taglio massimo	Variabile dipendente	$q * \left(\frac{L}{2} - x\right)$	
M	Momento massimo	Variabile dipendente	$M = \frac{q}{12} * (6Lx - 6x^2 - L^2)$	
$\sigma_{VM\ calcolato}$	Tensioni di Von Mises	Variabile dipendente	$\sqrt{\left(\frac{M}{W_{calcolato}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{F}{A_{sh\ calcolato}}\right)^2}$	
$\tau_{calcolato}$	Tensioni di taglio	Variabile dipendente	$T/A_{sh\ calcolata}$	
$A_{sh}$	Area a taglio minima	Variabile dipendente	$\tau_{massima\ sopra\ foro}/T$	
	Area a taglio calcolata		$A_{sh\ calcolata} = h_{web} * t_{web} - (h_{opening} * t_{web})$	
w	Modulo di resistenza minimo	Variabile dipendente	$\frac{M}{\sqrt{\sigma_{massima\ sopra\ foro} - 3 * \tau_{calcolato}}}$	/
	Modulo di resistenza calcolato		$\frac{I_{pb} + I_{pb\ trasporto} + I_{sup} + I_{sup\ trasporto} + I_{inf} + I_{inf\ trasporto} + I_f + I_{f\ trasporto}}{y_n}$	

Nomenclatura	Definizione	Tipologia	Valori	
			minimo	massimo
N	Numero passi di incremento del centro del foro	Variabile dipendente	$\frac{c_{foro\ massimo} - c_{foro\ minimo}}{step_{c_{foro}}}$	
M	Numero passi di incremento dell'altezza del foro	Variabile dipendente	$\frac{h_{foro\ massimo} - h_{foro\ minimo}}{step_{h_{foro}}}$	
$h_{foro}$	Altezza del foro	Variabile indipendente	Incrementata dal codice dal minimo al massimo	
$c_{foro}$	Posizione verticale del centro del foro	Variabile indipendente	Incrementata dal codice dal minimo al massimo	

Tabella 3 – Elenco variabili

Tutti questi parametri sono modificati sistematicamente per esplorare l'intero intervallo di dimensioni e posizioni ammissibili del foro. Le variabili indipendenti sono risultate essere l'altezza del foro, la quale ha sicuramente un vincolo superiore per garantire un'altezza massima in funzione dell'altezza della trave scelta, e la posizione del centro del foro, in quanto questa è legata alla distribuzione di tubature, condotte e cavi elettrici.

Si noti come tutto il problema della definizione dei fori, governato apparentemente da un numero elevato di variabili, dipende in realtà da due sole variabili indipendenti con campo di variazione identificato chiaramente in Tabella 3. La definizione del dimensionamento strutturale (parametri di input) possono anch'essi essere variati sistematicamente e di fatto lo sono nell'ambito della progettazione strutturale usualmente adottata in azienda sfruttando metodi e strumenti sviluppati in precedenza [1], [2].

### 3.2 Implementazione dell'approccio in linguaggio VBA

L'analisi sistematica delle variabili coinvolte nella definizione delle dimensioni del foro, nei limiti degli intervalli di variazione definiti per ognuna, è stata supportata dalla creazione di un codice, generato in ambiente VBA, che modifica sistematicamente le variabili per generare una serie di fori ognuno definito coerentemente da opportune condizioni di vincolo, intese sia come limiti alla possibilità di variazione delle variabili come condizioni da rispettare, in primis quelle relative alla robustezza della struttura ma anche relative ad esigenze costruttive, funzionali ed operative della nave.

Nell'analisi realizzata, si è deciso di non far cercare automaticamente alla procedura il foro "ottimo", come sarebbe pure possibile implementando algoritmi di ottimizzazione numerica, ma di lasciare la scelta finale al progettista, proponendo un ventaglio di forature, ognuna con caratteristiche che possono essere selezionate in base alle specifiche esigenze. Infatti, l'ottimo non può essere determinato a priori, poiché dipende da aspetti legati a esigenze funzionali e al layout circostante non facilmente implementabili in una procedura automatica e spesso anche da esigenze gestionali e commerciali che variano da caso a caso.

Qualora l'intento del progettista fosse quello di valutare quale altezza di trave mettere su un ponte nave in funzione delle dimensioni del massimo foro possibile per ciascuna di queste, il codice permette quindi di avere una panoramica di tutte le possibilità. Tale approccio è stato considerato vantaggioso in considerazione del fatto che le soluzioni possibili sono relativamente poche e che, tra esse, solo un numero ancora più limitato è effettivamente presentato all'utente del codice VBA, selezionate tuttavia sulla base di alcune scelte iniziali.

All'interno del codice, in una prima fase, le grandezze vengono verificate per accertarne la compatibilità con il range di definizione (vincoli esterni del problema). Successivamente, generato ogni possibile foro, vengono eseguite le verifiche che garantiscono che le tensioni di flessione e a taglio siano inferiori a quelle ammissibili (vincoli di robustezza strutturale). Altri vincoli (costruttivi, funzionali, operativi) sono verificati imponendo limiti alle variazioni sistematiche (es. riducendo il campo di variazione di alcune variabili).

Il codice è caratterizzato da due cicli di iterazione annidati, quello più esterno che incrementa l'altezza del foro e quello più interno che, fissata l'altezza, ne sposta la posizione del centro. In Figura 10, è riportato un diagramma di flusso che sintetizza il codice sviluppato.

L'utente inserisce nel file di input, realizzato in MS Excel, i dati derivanti dall'analisi strutturale del grigliato di travi prive di fori ottenuti da precedenti analisi progettuali ([1], [2]), le distanze minime desiderate tra piattabanda e fasciame; successivamente definisce il passo per l'incremento di altezza e spostamento foro. Inoltre, l'utente definisce se desidera che il foro abbia un'altezza minima, in pratica riducendo il campo di variazione preimpostato.

A seguito di un'analisi sistematica vengono restituiti solo i fori di massime dimensioni che soddisfano le seguenti verifiche:

- l'area a taglio deve risultare superiore a quella minima richiesta dalle verifiche di stato limite a snervamento;
- il modulo di resistenza della sezione resistente della trave deve risultare superiore a quello minimo richiesto dalle verifiche di stato limite a snervamento;
- la lunghezza deve essere inferiore a quella massima costruibile.

La verifica sull'area a taglio garantisce che le tensioni di taglio che si generano siano inferiori a quelle ammissibili e la verifica sul modulo di resistenza garantisce che le tensioni di Von Mises, in presenza del foro, non superino quelle ammissibili previste da normativa, includendo quindi nella verifica anche le tensioni di flessione della trave. Le tensioni di taglio e di flessione massime sopra al foro sono state ottenute affinché in corrispondenza del bordo del foro, nella zona di massima sollecitazione, fossero pari al massimo a quelle ammissibili regolamentari imponendo così la verifica di stato limite richiesta. Sebbene si potesse optare per una verifica complessiva che considerasse insieme sia le tensioni di taglio che quelle di flessione, si è preferito mantenere separate ed esplicite le due verifiche per permettere al progettista di valutare con maggiore sensibilità i risultati ottenuti ed eventualmente di modificare la configurazione ottenuta in modo più consapevole.

Come menzionato in precedenza, infatti, il codice sviluppato consente di determinare un set di possibili soluzioni lasciando al progettista la scelta finale in funzione delle esigenze. In questo modo, si evita di escludere a priori alcune scelte che dipendono invece da esigenze non codificabili in modo automatico. Qualora i risultati ottenuti non siano soddisfacenti per le esigenze richieste, sarà sufficiente incrementare o ridurre l'altezza della trave per trovare la soluzione adeguata. Tale variazione potrebbe facilmente essere implementata in modo automatico ma è lasciata all'utente proprio per consentire un'efficace implementazione ed interazione progettuale.

I risultati sono organizzati razionalmente all'interno di un foglio di calcolo, dove vengono riportate le principali caratteristiche geometriche dei fori, le proprietà della sezione indebolita da essi e i valori di tensione, derivanti dalla teoria della trave in campo lontano e quelle massime legate alla concentrazione degli sforzi.

Una volta che il progettista, con l'ausilio di questo codice, avrà ottenuto il ventaglio di combinazioni di travi e fori massimi, potrà scegliere il foro migliore dal punto di vista progettuale.

Si riportano nelle figure successive alcune immagini dell'interfaccia in ambiente Excel, nelle quali l'utente inserisce i dati di input, Figura 7, e ottiene l'elenco dei fori generati dal codice, Figura 9.

Dati di input			Dati di input			LEGENDA	
Nome	Valore	u.d.m	Nome	Valore	u.d.m	SE LA CELLA DI COLORE	NON MODIFICARE VALORE
Intervallo di ossatura	600	mm	Tensione di Von Mises ammissibile	266.66	[-]	SE LA CELLA DI COLORE	INSERIRE VALORE
intervallo travi primarie	2400	mm	Tensione di taglio ammissibile	133.33	N/mm <sup>2</sup>	LA CELLA DI COLORE	VIENE INCREMENTATA DAL CODICE
Altezza interponte	2700	mm	Fattore di concentrazione Kt_sigma	1.33	[-]	LA CELLA DI COLORE	DA RIMODIFICARE SE NECESSARIO
Tipo di rinforzo	HP100X6	mm	Fattore di concentrazione Kt_tao	1.20	[-]	LA CELLA DI COLORE	DA MODIFICARE SE KT è RICALIBRATO
Altezza rinforzo	100.00	mm	Tensione Von Mises massima sopra il foro	200.24	N/mm <sup>2</sup>		
Spessore rinforzo	6.00	mm	Tensioni di taglio massimo sopra il foro	111.04	N/mm <sup>2</sup>		
Campata baglio	4200.00	mm	Carico applicato	-20.00	N/mm		
Altezza anima	334.00	mm					
Altezza trave primaria	350.00	mm					
Spessore anima	14.00	mm	Step centro foro	10.00	mm		
Spessore fasciame	7.00	mm	Step altezza foro	20.00	mm		
Larghezza striscia associata	840.00	mm					
Spessore piattabanda	16.00	mm					
Larghezza piattabanda	150.00	mm	kt_tao accomodation	1.275	[-]		
Area totale sezione trasversale	12956.00	mm <sup>2</sup>	kt_tao machinery	1.201	[-]		
Baricentro anima	183.00	mm	kt_sigma accomodation	1.359	[-]		
Baricentro piattabanda	8.00	mm	kt_sigma machinery	1.332	[-]		
Baricentro fasciame	353.50	mm					
Momento statico sezione trasversale	2953488.00	mm <sup>3</sup>					
Z_asseneutro	227.96	mm					
Modulo di resistenza baglio	1.15E+06	mm <sup>3</sup>					
Tensione di snervamento	326.39	N/mm <sup>2</sup>					
Material factor	0.72	[-]					
Gamma_r	1.02	N/mm <sup>2</sup>					
Gamma_m	1.20	[-]					
Centro foro (pb esclusa) minimo	274.00	mm					
Centro foro (pb esclusa) massimo	60.00	mm					
Altezza foro min	200.00	mm					
Altezza foro minimo da progettista	200.00	mm					
Trave minima valida	316.00	mm					
Altezza foro max	234.00	mm					
Distanza minima foro fasciame/pb	50.00	mm					
Limite costruttivo per Lmax	150	mm					

Figura 7 – Foglio di calcolo: dati di input

Variabili dip e ind			Variabili dip e ind			LEGENDA	
Nome	Valore	u.d.m	Nome	Valore	u.d.m	SE LA CELLA DI COLORE	NON MODIFICARE VALORE
Lunghezza foro	259.15	mm	Taglio massimo	-39000	N	SE LA CELLA DI COLORE	INSERIRE VALORE
Altezza foro	20.00	mm	Momento flettente massimo	23325000	N*mm	LA CELLA DI COLORE	VIENE INCREMENTATA DAL CODICE
Altezza foro di passaggio rinforzo	110.00	mm	Tensione di taglio_calcolato	8.8717015	N/mm <sup>2</sup>	LA CELLA DI COLORE	DA RIMODIFICARE SE NECESSARIO
Larghezza intaglio "bugna"	20.00	mm	Tensione di Von Mises_calcolata	25.562562	N/mm <sup>2</sup>	LA CELLA DI COLORE	DA MODIFICARE SE KT è RICALIBRATO
Larghezza intaglio "liscia"	43.00	mm					
Centro foro (pb esclusa)	139.00	mm					
Altezza anima sopra foro	185.00	mm	Area a taglio minima	351.24	mm <sup>2</sup>		
Altezza anima sotto foro	129.00	mm	Modulo di resistenza minimo	1.17E+05	mm <sup>3</sup>		
Distanza foro e intaglio bulbo	138.92	mm					
Distanza tra i fori	340.85	mm	Lunghezza massima foro reg	360	mm		
Raggio foro	10.00	mm	Lunghezza massima	497.00	mm		
Area a taglio superiore al foro	25.90	cm <sup>2</sup>					
area a taglio inferiore al foro	18.06	cm <sup>2</sup>	Numero di passi centro foro N	21	[-]		
Inerzia anima sopra foro (si fasciame)	15346.54	cm <sup>3</sup>	Numero passi altezza foro M	2	[-]		
Inerzia anima sotto foro (si pb)	6824.38	cm <sup>3</sup>					
Baricentro area superiore	257.50	mm					
Baricentro area inferiore	80.50	mm					
Distanza tra baricentro superiore e ass	29.54	mm					
Distanza tra baricentro inferiore e asse	147.46	mm					
area foro/area tot	4861.64	mm <sup>2</sup>					
Area foro/area tot	2%	[-]					
Area a taglio netta regolamentare	3051.859	mm <sup>2</sup>					
Area a taglio netta calcolata	4396.00	mm <sup>2</sup>					
Modulo di resistenza baglio con foro	1.14E+06	mm <sup>3</sup>					

Figura 8 – Foglio di calcolo: variabili dipendenti e indipendenti

n. FORI	Lunghezza foro	Altezza foro	centro_foro (no pb)	h sup	h inf	d foro e intaglio	d fori	R_f	A foro	%foro/anima
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	
1	462	200	184.00	50	84	37.5	138.1	100	60235.33	30%
2	447	200	174.00	60	74	45.1	153.1	100	57231.60	29%
3	432	200	164.00	70	64	52.6	168.1	100	54227.87	27%
4	417	200	154.00	80	54	60.1	183.1	100	51224.14	26%
5	462	220	174.00	50	64	37.5	138.1	110	62722.80	31%
6	447	220	164.00	60	54	45.1	153.1	110	59418.70	30%
A_sh calcolata	A_sh minima	A_sh regolamentare	w_senza foro	w_con foro	w_minimo	sigma calcolata	sigma massima	tao calcolata	tao massima	
mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1876.00	351.24	494.81	1.15E+06	1.10E+06	1.18E+05	41.81	200.24	20.79	111.04	
1876.00	351.24	469.91	1.15E+06	1.09E+06	1.18E+05	41.89	200.24	20.79	111.04	
1876.00	351.24	468.55	1.15E+06	1.08E+06	1.18E+05	42.00	200.24	20.79	111.04	
1876.00	351.24	491.79	1.15E+06	1.07E+06	1.18E+05	42.13	200.24	20.79	111.04	
1596.00	351.24	331.99	1.15E+06	1.07E+06	1.19E+05	47.57	200.24	24.44	111.04	
1596.00	351.24	325.97	1.15E+06	1.06E+06	1.19E+05	47.68	200.24	24.44	111.04	

Figura 9 – Foglio di calcolo: output dei fori

Per poter validare ulteriormente il risultato ottenuto con la procedura appena descritta, ed eventualmente verificare la possibilità di massimizzare ulteriormente i fori, sarà necessario comunque sviluppare la verifica del grigliato completo tramite un modello agli elementi finiti. Inoltre, è bene sottolineare che il modello FEM è necessario per ottenere l'approvazione da parte della società di classifica. Tuttavia, l'analisi numerica potrà essere implementata solo per un caso ed eventualmente in fasi avanzate del progetto, avendo ottenuto una configurazione di riferimento con dimensioni dei fori massimizzate.

Il codice VBA si rivela dunque un valido strumento per il progettista, facilitando l'individuazione delle configurazioni di foro possibili e rendendo più efficiente l'iter di massimizzazione che non richiede l'implementazione di numerosi modelli di calcolo numerico per investigare possibili soluzioni che, in buona parte, non sono, sufficientemente robuste dal punto di vista strutturale, realizzabili praticamente dal cantiere di costruzione, funzionali per la vita operativa della nave o più semplicemente non sono convenienti e possono essere scartate a priori con il solo buon senso ingegneristico.

Si noti tuttavia che l'analisi sistematica delle configurazioni effettivamente possibili permette di analizzare anche quelle soluzioni che apparentemente sembrano poco praticabili ma che ad una più attenta analisi si rivelano invece efficaci, supportando in questo modo il progettista che non sempre ha la possibilità di considerare l'intero dominio di configurazioni ammissibili.

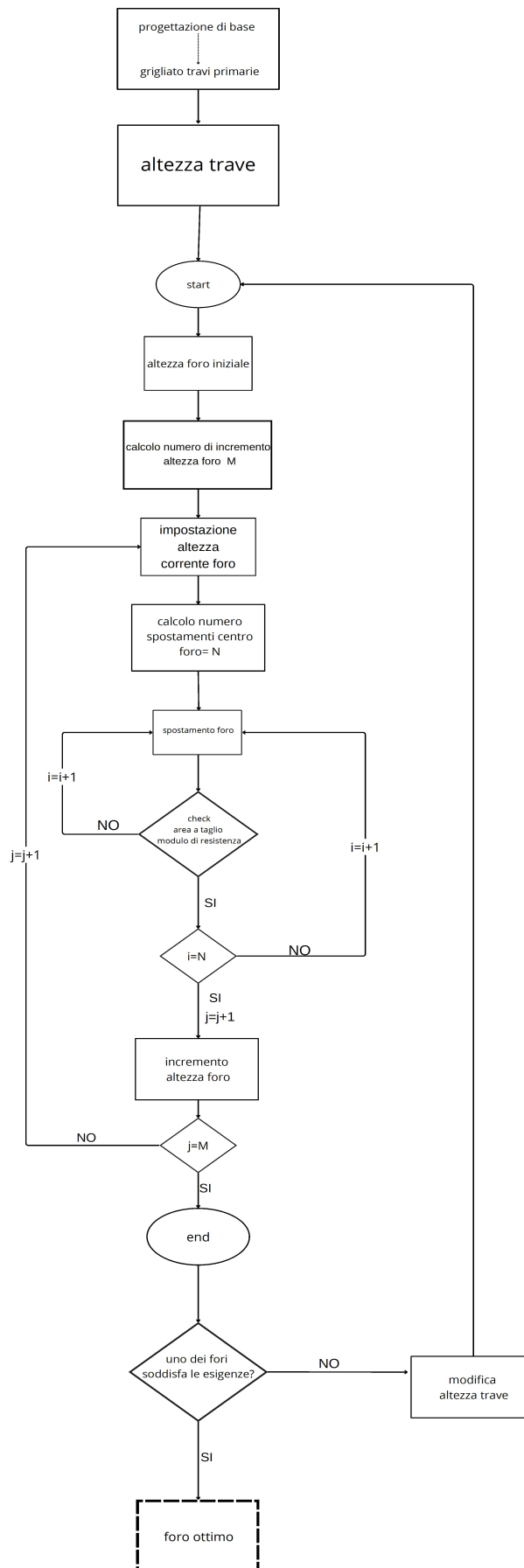


Figura 10 – Diagramma di flusso del processo di generazione dei fori massimizzati

## 4 Conclusioni

L'obiettivo principale di questo studio è stato sviluppare un metodo per massimizzare le dimensioni dei fori e migliorare la selezione delle travi primarie in fase di progettazione di base di una costruzione navale. È importante ricordare che l'esperienza del progettista continua a giocare un ruolo fondamentale nonostante la disponibilità di algoritmi di calcolo e tecnologie digitali impensabili anche fino a pochi anni fa poiché, a seconda della situazione, si deve poter scegliere la soluzione migliore considerando non solo i vincoli imposti dalla sicurezza e dalla robustezza della costruzione ma anche aspetti di produttività e convenienza, di facilità costruttiva, di effettiva disponibilità dei materiali e dei componenti, ecc.

Per questo motivo, l'idea non è quella di determinare una soluzione ottima univoca ma di identificare un numero (limitato) di possibili soluzioni in funzione delle diverse esigenze progettuali. In questo modo, l'esperienza del progettista viene affiancata da un metodo razionale per la scelta delle dimensioni delle forature e la definizione del dimensionamento delle travi.

Le forature proposte sono il risultato di un'analisi integrata dei requisiti regolamentari, di un'attenta analisi e selezione delle variabili che caratterizzano il problema, di simulazioni agli elementi finiti e di valutazioni teoriche e numeriche che trovano la loro sintesi in un semplice applicativo che permette l'esecuzione di calcoli sistematici per determinare un certo numero di soluzioni progettuali, inizialmente comparate tra loro in modo automatico per selezionare quelle più promettenti lasciando al progettista la scelta finale.

Questo lavoro fornisce strumenti pratici e linee guida che possono essere utilizzati dai progettisti per facilitare la scelta dei fori, senza compromettere la sicurezza strutturale in modo rapido ed efficace. Le soluzioni proposte hanno effetti sulla riduzione dei tempi di progetto, rispondono alle esigenze di una progettazione navale sempre più complessa e integrata e supportano il progettista strutturale al quale sempre più è richiesta flessibilità nel variare la soluzione strutturale in funzione dell'evoluzione del progetto sin dalle sue fasi iniziali.

Lo studio che è stato sviluppato ha definito una metodologia per trovare la soluzione ottima desiderata fra altezza trave e foratura massima possibile. Tuttavia, il lavoro può essere ampliato e migliorato al fine di ottenere uno strumento più accurato e risultati più attendibili.

Il primo sviluppo futuro riguarda la calibrazione del fattore di concentrazione delle tensioni nella zona di interesse in prossimità dei fori sulle anime delle travi. Una calibrazione più precisa richiederebbe un numero maggiore di modelli FEM. L'incremento delle simulazioni permetterebbe di analizzare una gamma più ampia di configurazioni strutturali e condizioni di carico, fornendo dati più dettagliati sul comportamento delle tensioni intorno ai fori. Questo approfondimento porterebbe a una calibrazione più accurata, riducendo l'incertezza nei risultati. Un'altra possibilità per la calibrazione del fattore di concentrazione delle tensioni potrebbe essere l'utilizzo di mesh ancora più fitte nei modelli agli elementi finiti, come le "very fine mesh" previste dai regolamenti delle società di classificazione navale. Allo stato attuale sono state utilizzate mesh di calcolo usuali della pratica progettuale.

In aggiunta, si può prevedere l'adozione di un approccio analitico basato sull'equilibrio delle forze e dei momenti nei diversi componenti della trave e nelle zone sopra e sotto il foro di alleggerimento in analogia a quanto suggerito nel regolamento RINAMIL [5] per le verifiche delle concentrazioni di tensione delle aperture, che potrebbe essere implementato nell'applicativo sviluppato a supporto della metodologia proposta, evitando così la complicazione dei modelli di calcolo numerico. Questo approccio alternativo, più teorico rispetto alle simulazioni FEM, permetterebbe di ottenere stime accurate del comportamento strutturale delle travi forate, permettendo di effettuare valutazioni rapide e affidabili già nelle primissime fasi progettuali, ancor più di quanto non sia possibile con la procedura e lo strumento di calcolo messo a punto in questo studio. L'analisi diretta potrebbe comunque essere impiegata per derivare formule approssimate o regressioni che tengano conto delle principali variabili geometriche e di carico validando ulteriormente lo studio analitico.

Inoltre, sarebbe opportuno condurre un'analisi più approfondita per confermare con maggiore certezza che la verifica al buckling possa effettivamente essere omessa, come comunemente avviene nella progettazione di base, anche nel caso di travi con fori di dimensioni superiori a quelle considerate nelle presenti applicazioni.

Per riassumere, in futuro ci si potrebbe concentrare su un'analisi più dettagliata e integrata del comportamento delle travi forate, ponendo maggiore attenzione allo stato tensionale. Questo permetterebbe di migliorare non solo l'affidabilità delle analisi, ma anche la flessibilità delle soluzioni proposte: nello studio sono state analizzate un numero limitato di travi soggette a due sole condizioni di carico, ma se si riuscisse a definire un approccio analitico, supportato da analisi sperimentali realizzate in laboratorio e/o attraverso i modelli agli elementi finiti, e valido per ogni condizione, si potrebbe ottenere una metodologia generalizzata e applicabile a una vasta gamma di scenari progettuali, eventualmente, non limitandosi all'ambito delle costruzioni navali militari.

## 5 Riferimenti bibliografici

- [1] Aguiari M., Gaiotti M., Rizzo C.M. (2021): A design approach to reduce hull weight of naval ships. Ship Technology Research. <https://doi.org/10.1080/09377255.2021.1947666>.
- [2] Aguiari M., Gaiotti M., Rizzo C.M. (2022): Ship weight reduction by parametric design of hull scantling. Ocean Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112370>.
- [3] Gaiotti M., Aguiari M., Vergassola G., Rizzo C.M. (2024): A rational approach for the scantling design of GRG pleasure crafts. Ocean Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117866>.
- [4] IACS (2018): Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. Adopted by IACS International Association of Classification Societies effective from July 2018. [www.iacs.org.uk](http://www.iacs.org.uk).
- [5] RINA (2017): Rules for the Classification of Naval Ships RINAMIL; Genova, Italy.
- [6] Rizzo C.M. (2004): A critical comparison of the scantling rules for shipbuilding issued by classification societies, PhD Dissertation, University of Genova.
- [7] Lloyd's Register (2018): Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships.
- [8] Bureau Veritas (2017): Rules for the Classification of Naval Ships, Paris, France
- [9] DNV GL rules for classification (2016): Naval vessels (RU-NAVAL), Hovik, Norway
- [10] Hughes O.F., Paik J.K., Béghin D., Caldwell J.B., Payer H.G., Schellin T.S. (2010): Ship Structural Analysis and Design. Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [11] Bianchi G. (2025): Analisi delle dimensioni dei fori di alleggerimento delle travi primarie su navi militari ai fini del coordinamento, Tesi di laurea magistrale in ingegneria navale, Università di Genova.
- [12] Aguiari M. (2024): A new strategy for the structural weight reduction of naval vessels consistent with the latest developments in the applicable rules, Tesi di Dottorato in Scienze e Tecnologie per il Mare, Curriculum Ingegneria Navale, Nautica – Tecnologie Marine