

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea:

Progetto di un sistema gas-gun per modifica della Barra di Hopkinson

Project of a gas-gun system for modification of the Hopkinson Bar

Relatore: Chiar.mo

Prof. Marco Sasso

Tesi di Laurea di: Alessandro Tronelli

A.A. 2019/2020



...Alla mia famiglia, ai veri amici e a Nicoletta...



- SOMMARIO:

	1.	Intro	duzione5		
	2. Barra di Hopkinson		di Hopkinson6		
		2.1	Cenni storici		
		2.2	Utilizzo12		
	3. La Split Hopkinson Pressure Bar				
		3.1	Componenti16		
		3.2	Funzionamento19		
		3.3	Configurazioni		
4 Progetto		ogetto			
		4.1	Introduzione		
		4.2	Richieste Progetto24		
		4.3	Studio e Raccolta dei dati25		
		4.4	Ricerca degli elementi da inserire nella struttura37		
		4.5	Soluzioni per la realizzazione44		
-					
Conclusioni					
In	Indice delle figure				
Bibliografia					
Ringraziamenti					





1. Introduzione:

Questo elaborato è incentrato sullo studio e sulla progettazione di una modifica per la Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) presente nel laboratorio DIISM dell'Università Politecnica delle Marche, in particolare descriverà e analizzerà la Barra di Hopkinson in tutti i suoi aspetti, dalla più semplice spiegazione di funzionamento, allo studio e alle modifiche fatte nel corso degli anni sulla macchina, fino ad arrivare alle diverse tipologie e configurazioni della macchina che oggi sono maggiormente utilizzate per effettuare i test dinamici sui materiali.

Successivamente si entrerà nel vivo del progetto andando a seguire l'iter con il quale è stato svolto il lavoro nelle differenti fasi programmate, partendo dallo studio del funzionamento dell'apparato, dai calcoli e dalla loro analisi, per poi passare alla realizzazione del CAD dell'intero sistema.

Nello specifico l'obiettivo del progetto era quello di trovare delle soluzioni per modificare l'attuale configurazione della SHPB, costituita da un complesso sistema di generazione delle onde di pressione funzionante con un impianto di pretensionamento, in un sistema di generazione di onde più semplice che sfruttasse un apparato ad aria compressa.



2. Barra di Hopkinson:

La Barra di Hopkinson è un dispositivo che permette di effettuare un metodo di prova dei materiali verificato e collaudato, che a differenza delle macchine di prova quasi statiche, consente di determinare le proprietà, le costanti e le caratteristiche dei materiali in condizioni dinamiche. Con l'utilizzo della barra di Hopkinson è possibile ricavare ed analizzare le proprietà dei materiali durante deformazioni ad elevati Strain Rate (velocità di deformazione); in particolare, impiegando una strumentazione adeguata, si possono ricavare le curve di sforzo-deformazione a velocità di deformazione tali che sarebbero impossibili da ottenere con l'utilizzo delle tradizionali macchine idrauliche o elettromeccaniche per le prove statiche o quasistatiche. Tale apparato sperimentale consente di caratterizzare la risposta meccanica di materiali sottoposti a velocità di deformazione comprese nell'intervallo 10²-10⁴ (s⁻¹).



Figura 1: Esempio di Barra di Hopkinson



2.1. Cenni Storici:

La barra di Hopkinson deve il proprio nome al suo ideatore, l'ingegnere elettrico inglese Bertram Hopkinson che nel 1914 ne propose la prima versione. Hopkinson sviluppò una nuova tecnica per la determinazione della massima tensione che si poteva ottenere in un provino durante un impatto o un evento esplosivo ed individuò le relazioni che legavano tale tensione al tempo. Il dispositivo da lui ideato era originariamente costituito da una lunga barra d'acciaio sospesa da fili e da un piccolo provino, anch'esso d'acciaio. Su una estremità della barra veniva realizzato l'impatto che faceva insorgere un'onda elastica piana longitudinale di compressione di durata finita. Il provino si trovava all'estremità opposta della barra ed il contatto era garantito da un sottile strato di grasso interposto tra le due facce. L'onda di compressione attraversava l'intera barra, la giunzione di grasso ed il provino e, una volta giunta all'estremità libera, veniva riflessa in un'onda di trazione; in seguito al passaggio dell'onda di trazione, il provino volava via con una ben definita quantità di moto calcolata con l'utilizzo di un pendolo balistico. Hopkinson misurò il tempo impiegato dall'onda a percorrere il provino nella corsa di andata e di ritorno potendone così calcolare la velocità di propagazione. Inoltre la misura dello spostamento del pendolo balistico gli conferì una misura indiretta della tensione sviluppatasi nel provino in seguito all'impatto. Eseguendo una serie di esperimenti della stessa



intensità ma su provini di differente lunghezza, Hopkinson riuscì a tracciare delle curve tensione-tempo che descrivevano l'impatto; tali curve erano però abbastanza imprecise mancando, all'epoca, metodi affidabili di acquisizione ed elaborazione dei dati. Ipotizzando inoltre la permanenza del materiale della barra all'interno del campo elastico, Hopkinson intuì che gli spostamenti della barra erano legati alle tensioni nel provino e che la lunghezza dell'onda nella barra era in relazione con la durata dell'impatto.

Agli studi di Hopkinson non seguirono significativi aggiornamenti fino agli inizi del 1940, quando numerosi studiosi iniziarono ad interessarsi ai fenomeni di propagazione ondosa nelle strutture solide. Tuttavia i primi risultati importanti giunsero soltanto diversi anni dopo, quando i calcolatori elettronici poterono offrire un sostanzioso contributo nell'elaborazione dei dati.

Nel 1948 Davies introdusse una nuova tecnica per la misura delle deformazioni della barra presente nella versione originale della barra di Hopkinson. Il dispositivo si avvaleva di condensatori che generavano un segnale elettrico proporzionale agli spostamenti (deformazioni) che insorgevano nella barra. Nel limite di elasticità del materiale, tali spostamenti erano direttamente proporzionali alle tensioni stesse che si generavano e così Davies poté definitivamente eliminare il pendolo balistico introdotto da Hopkinson e migliorare quindi di molto la precisione dei dati ottenuti.



Poiché Davies aveva intuito che la giunzione di grasso comprometteva la finezza dello strumento, la sua innovazione ne permise l'eliminazione, riducendo sensibilmente l'attitudine dello strumento a perturbare la grandezza oggetto della misura (errore di inserzione).

La più grande novità sulla barra di Hopkinson avvenne però nel 1949 quando Kolsky pensò di aggiungere un'altra barra alla configurazione originaria in modo che il provino venisse collocato tra due barre coassiali dette "input" ed "output". Kolsky dimostrò di poter calcolare la tensione, la deformazione e la velocità di deformazione all'interno del provino misurando gli spostamenti (deformazioni) in entrambe le barre. Per tali misurazioni si avvalse di condensatori simili a quelli introdotti da Davies. Inoltre, frapponendo il provino tra le due barre coassiali, riuscì ad ottenere più facilmente una deformazione omogenea. Grazie alla maggiore robustezza, sensibilità, precisione, finezza e semplicità di utilizzo la nuova versione della barra di Hopkinson introdotta da Kolsky divenne rapidamente il più diffuso strumento per la misura delle proprietà dei materiali ad alta velocità di deformazione.

A causa di tanta notorietà, oggi nella letteratura scientifica la barra di Hopkinson è spesso riportata anche come barra di Kolsky.



Nel 1954 Krafft insieme ad altri ricercatori apportò un importante aggiornamento alla configurazione di Kolsky della barra di Hopkinson; egli utilizzò per primo degli estensimetri elettrici a resistenza (estensimetri a griglia) che venivano posizionati sulle due barre coassiali che schiacciavano il provino, alla medesima distanza da quest'ultimo. Tali dispositivi erano in grado di misurare gli spostamenti (deformazioni) superficiali delle due barre dello strumento di Hopkinson grazie alla variazione di resistenza elettrica di conduttori resi solidali alle barre stesse. Le deformazioni inducevano cambiamenti di lunghezza e di sezione di tali conduttori e, di conseguenza, variava la resistenza elettrica di quest'ultimi; il tutto veniva tradotto in opportuni segnali elettrici. Successivamente altri studiosi perfezionarono l'utilizzo di tali estensimetri facendo sì che la barra di Hopkinson guadagnasse miglioramenti significativi in termini di sensibilità e precisione di misura.

Alla fine degli anni sessanta per la prima volta la barra di Hopkinson fu configurata prima per prove di torsione, poi anche per quelle di trazione, quando fino ad allora lo strumento era stato utilizzato solo per prove di compressione.

Da questo breve excursus storico si evince che la configurazione introdotta da Kolsky per le prove di compressione fu quella maggiormente utilizzata negli anni, e ad oggi è ancora la versione più diffusa.



In definitiva, un secolo di studi, esperimenti ed aggiornamenti, unito ai recenti sviluppi in termini di strumentazioni e tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati, ha reso la barra di Hopkinson uno dei principali dispositivi sperimentali per la determinazione delle proprietà meccaniche dinamiche dei materiali sottoposti ad alta velocità di deformazione.



Figura 2: 1962- Primo apparato in grado di generare direttamente una curva sforzo-deformazione dinamica completa (alta velocità) in un singolo esperimento



2.2. Utilizzo:

Oggi la barra di Hopkinson è principalmente utilizzata per prove di compressione, di trazione e di torsione con velocità di deformazione compresa tra 10²-10⁴ (s⁻¹). L'attenzione degli studiosi è tutta rivolta alla determinazione di nuovi modelli matematici, procedure numeriche e software specifici per la correzione dei segnali ottenuti sperimentalmente; in particolare vengono testati metodi ottici di misura per implementare l'impiego della barra di Hopkinson anche per materiali non metallici. Infatti tutte le esperienze svolte fino a qualche tempo fa riguardavano la caratterizzazione dei soli materiali metallici; attualmente invece vengono testati materiali di altra natura come schiume, gomme, adesivi, materiali viscoelastici e conglomerati cementizi.

Ma perché è importante effettuare prove e test di materiali utilizzando la Hopkinson Bar e quindi sottoporre i materiali a condizioni di carico dinamico?

Generalmente le proprietà dei materiali come la tensione di snervamento o la tensione di rottura, riportate nei manuali, sono ottenute in condizioni di carico quasi-statico utilizzando macchine di trazione convenzionali e seguendo procedure di prova standard. Tuttavia per assicurare il corretto funzionamento in servizio di prodotti sottoposti a condizioni di impatto, la risposta meccanica



dei materiali sotto tali tipologie di carico deve essere caratterizzata accuratamente.

È fondamentale quindi conoscere: l'ampiezza, la durata e la forma dell'impulso di pressione agente sui materiali, la risposta dinamica dei materiali che vengono attraversati dall'impulso fino al collasso degli stessi e quindi la curva completa sforzo-deformazione.

Molteplici problemi ingegneristici prevedono velocità di deformazione comprese nell' intervallo di lavoro della Barra di Hopkinson, come ad esempio nella sicurezza passiva dei veicoli, nelle applicazioni balistiche, nella verifica delle strutture soggette ad impatto, ad esplosione, fino alle operazioni legate allo scavo sotterraneo, alla ricerca sismica e alla progettazione di strutture di protezione, ecc.

Quindi effettuare test di materiali utilizzando la Barra di Hopkinson è di elevata importanza per dare una completa descrizione del comportamento del materiale in condizioni più prossime a quelle che sono le reali condizioni di utilizzo dello stesso e di conseguenza caratterizzare in maniera più precisa il materiale dando informazioni più dettagliate a chi successivamente dovrà scegliere se utilizzare quel materiale in un determinato ambiente di lavoro.





Figura 3: Confronto tra i diversi metodi di prova dei materiali in relazione alla velocità di deformazione



3. La Split-Hopkinson Pressure Bar:

Principalmente esistono due tipologie di configurazioni della macchina: la barra di Davies (Single pressure bar) e la SHPB (Split-Hopkinson Pressure Bar). La versione più comunemente utilizzata è quella denominata Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB), ovvero la versione più aggiornata del modello introdotto da Kolsky che tiene in considerazione le diverse modifiche effettuate negli anni come l'utilizzo degli estensimetri; questa attualmente rappresenta la configurazione base con la quale è possibile eseguire diverse tipologie di prove dinamiche. Nello specifico in base al tipo di struttura e di dispositivi che si adottano nella SHPB è possibile effettuare test di trazione, compressione, torsione, flessione e taglio/cricca.









Figura 5: La SHPB (Split-Hopkinson Pressure Bar)

3.1. Componenti:

Anche se non esiste un design universale per i dispositivi SHPB, la maggior parte presenta una serie di elementi comuni:

• Due barre lunghe e simmetriche con una sezione trasversale uniforme, generalmente costituite dallo stesso materiale metallico, in cui le due estremità sono realizzate ortogonalmente all'asse per poter assicurare un contatto ottimale tra il provino e le barre o tra le barre stesse. Queste sono sorrette e allineate tramite dei supporti che si inseriscono su una struttura che funge da base. Le barre sono collocate una di seguito all'altra in modo tale il provino si posizioni perfettamente tra le loro due estremità. La prima barra prende il nome di Input Bar o traversa mobile, visto che in questa passerà per primo l'impulso di pressione generando l'accelerazione della



barra che, essendo mobile, andrà successivamente a deformare il provino; la seconda invece viene detta Output Bar o traversa fissa perché è la barra posizionata subito dopo il provino, è l'ultima attraversata dall'impulso e generalmente è seguita da un supporto di sicurezza che le impedisce di muoversi.

- Un sistema di generazione dell'impulso che utilizza un attuatore, costituto generalmente da una terza barra, (detta Striker Bar nella "versione classica" della SHPB o barra pretensionata nella "versione diretta"), realizzata con lo stesso materiale delle barre precedentemente descritte, posizionata di solito prima della Input Bar. Il generatore d'onda può essere di diverse tipologie in base al tipo di prova che si vuole effettuare.
- Estensimetri incollati su entrambe le barre per misurare la propagazione dell'onda di tensione nelle barre stesse, posizionati generalmente sulla superficie laterale della Input Bar e della Output bar.
- Una strumentazione associata ed un sistema di acquisizione dati per controllare, registrare e analizzare i dati dell'onda di tensione nelle barre.
- Il provino è solitamente cilindrico e viene posizionato tra la barra di Input e quella di Output, con differenti metodi d'aggancio che dipendono dal tipo



di prova da effettuare e dalla forma del provino stesso. Tra questi l'aggancio può essere fatto: tramite filettatura, tramite incollaggio diretto, con un sistema costituito da pinze meccaniche o tramite una Gabbia di inversione. Ad esempio, per effettuare una prova a trazione indiretta si utilizza il sistema con gabbia di inversione mentre nei casi più semplici viene impiegato l'aggancio tramite filettatura per eseguire delle prove di trazione e compressione diretta. Un caso particolare di sistema di posizionamento del provino consiste nell'appoggiarlo tra le due barre cilindriche, con l'utilizzo di un grasso per garantire la corretta tenuta statica.



Figura 6: Rappresentazione completa di tutti gli elementi presenti in una SHPB (esempio di versione classica); confronto tra due diverse tipologie di provino



3.2. Funzionamento:

Il principio di funzionamento si basa sulla generazione di un'onda di tensionedeformazione e la sua propagazione attraverso i componenti dell'apparato. L'impulso, che si propaga lungo i diversi elementi che costituiscono la struttura della barra di Hopkinson, viaggiando a velocità elevatissima, si trasmette al provino che subisce deformazioni plastiche, spesso fino a rottura. In particolare questo impulso d'urto corre lungo la prima barra e quando raggiunge l'interfaccia Input Bar-Provino una parte dell'impulso viene riflesso dall'estremità della barra; l'altra parte attraversa il campione di materiale e la barra di Output. Dallo studio della propagazione delle onde nelle barre si risale al comportamento del materiale del provino e con gli estensimetri installati sulle superfici della Input Bar e della Output Bar si misurano le deformazioni provocate dall'impulso d'urto.



Figura 7: Funzionamento della SHPB. Propagazione delle onde di pressione



3.3. Configurazioni:

Per quanto concerne l'attuatore esistono principalmente due macro sistemi meccanici per innescare l'onda di pressione nella Input Bar, che differiscono fra loro non solo per il diverso funzionamento ma anche per il tipo di utilizzo, ovvero il tipo di test che si dovrà realizzare sul provino di materiale.

Il primo sistema impiega, come metodo per la generazione di onde di pressione, un sistema meccanico di precarico; la barra di Hopkinson che presenta questo sistema viene detta VERSIONE DIRETTA. In questa tipologia di prova dinamica le onde sono generate pretensionando la porzione iniziale della barra (input bar) in trazione o in compressione, a seconda del tipo di prova che si vuole effettuare. Il rilascio improvviso dell'incastro, generato dal sistema di bloccaggio/sgancio, produce un impulso della durata temporale pari al doppio del tempo necessario ad un'onda di tensione a percorrere una distanza pari alla porzione di barra precaricata.

I principali vantaggi di questo metodo sono la possibilità di avere una lunghezza delle onde di tensione facilmente regolabile, una distribuzione più uniforme degli sforzi attraverso la sezione retta e la possibilità di effettuare diversi tipi di prove con una struttura piuttosto compatta.



Lo svantaggio consiste nell'utilizzo di un sistema relativamente complesso, composto da un sistema ad incastro meccanico.



Figura 8: Versione diretta della SHPB con sistema di precarico

La seconda configurazione consiste nell'utilizzare un dispositivo per lanciare una barra (proiettile) di una certa lunghezza tramite un sistema ad aria compressa. In letteratura questo dispositivo viene chiamato cannone a gas. La barra di Hopkinson che presenta questo sistema viene detta VERSIONE CLASSICA. Esiste inoltre una variante di questo sistema che consiste nell'utilizzare come proiettile una barra tubolare che andrà ad impattare contro una flangia collegata direttamente con la barra d'input, innescando così l'onda di pressione. Questo metodo serve principalmente per eseguire una prova dinamica a trazione del provino.



Figura 9: Versione classica della SHPB con sistema gas gun



4. PROGETTO:

4.1. Introduzione:

Dopo aver presentato a grandi linee tutto ciò che riguarda la barra di Hopkinson, ora verrà descritto il progetto che è stato ideato. In particolare, il lavoro si colloca proprio nella differenza di sistemi di generazione dell'onda di pressione che possiamo ritrovare nella configurazione della SHPB, in quanto l'obiettivo del progetto era quello di trovare delle soluzioni per modificare il sistema a pretensionamento (attualmente presente nella Barra di Hopkinson nel laboratorio di Ingegneria) in un sistema che sfruttasse il "cannone" a gas come generatore dell'impulso.

Il lavoro è stato svolto dividendo in fasi il suo svolgimento, partendo dall'analisi delle richieste del progetto, si è passati alla verifica e al calcolo di tutti i dati necessari per poter selezionare e scegliere gli elementi più adatti da inserire nella struttura; infine si è passati alla ricerca delle possibili soluzioni realizzative del sistema andandole a rappresentare tramite un disegno CAD che rispettasse tutte le condizioni precedentemente analizzate.



4.2. Richieste progetto:

Nella realizzazione del progetto è stato necessario prestare attenzione a diverse richieste, nello specifico gli aspetti da tenere in considerazione sono stati relativi principalmente alla struttura attualmente presente nel laboratorio. Questa, essendo costituita da 3 barre lunghe rispettivamente 3 m, 7.5 m e 4.5 m, occupa interamente la sala in cui trova, quindi la modifica progettata non avrebbe dovuto superare complessivamente i 4 metri di lunghezza per poter entrare nello spazio a disposizione; un altro aspetto molto importante che ha complicato la progettazione è stata l'impossibilità di rimuovere completamente l'attuale struttura della versione diretta della barra, per motivi di impedimento e di difficoltà di rimozione. L'elemento che rimarrà presente nella struttura della nuova configurazione è il martinetto elettromeccanico, il dispositivo che serve a pretensionare la barra nella versione diretta.

Per quanto riguarda il funzionamento, si è dovuto considerare che le deformazioni della Striker Bar e della Imput bar, a seguito dell'urto, rimanessero in campo elastico e che quindi le barre non si deformassero permanentemente durante l'impatto tra le due.

Parlando del "proiettile", ovvero della Striker Bar, le richieste sono state relative alla lunghezza e al materiale costituente la barra, nello specifico, durante lo



svolgimento del progetto, sono stati considerati due tipi di attuatori, entrambi lunghi 2 metri ma di differenti materiali: uno in acciaio e uno in titanio.

Come ultima richiesta, ma non meno importante, il costo del progetto sarebbe dovuto essere più contenuto possibile.

4.3. Studio e Raccolta dati:

Nella prima fase del progetto, dopo aver analizzato le richieste, sono stati verificati e ricavati tutti i dati utili per poter, in seguito, dimensionare e scegliere gli elementi da utilizzare per la realizzazione del sistema gas gun.

Sono state ricavate le massime velocità ammissibili alla Stiker Bar senza che questa, insieme alla Input Bar, si deformassero a seguito dell'urto. Per far questo è stata utilizzata la seguente relazione che consente di calcolare il valore di tensione generato da un impatto tra due barre cilindriche che urtano a velocità *v*:

$$\sigma = \rho_0 \cdot c \cdot U_P = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot c \cdot v \tag{1}$$

Supponendo che l'urto avvenga tra una Striker Bar (indicata con il pedice *st*) e una Input Bar (indicata con il pedice *in*) si ha che:



$$\sigma_{in} = \rho_0 \cdot c \cdot U_p = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot c \cdot v_{st} \tag{2}$$

- *ρ*0 rappresenta la densità del materiale di cui sono fatte le barre (stesso materiale sia per Striker che per Input);
- *c* è la velocità del suono nello specifico materiale delle barre;
- Vst è la velocità a cui viaggia la Striker bar prima di impattare la Input bar

Introducendo nella formula differenti valori di velocità della Striker Bar si ottengono diversi valori di tensione generata nell'urto. Confrontando questi valori con quello di tensione allo snervamento del materiale che costituisce le barre, è possibile capire se le velocità introdotte inducono deformazioni elastiche o plastiche nelle barre; nel primo caso il valore di tensione d'urto è minore di quello di snervamento, mentre nel secondo caso è maggiore.

Dai calcoli effettuati risulta che le massime velocità ammissibili da una Striker bar in acciaio (generico), con una densità di $\rho st=7800 \ kg/m^3$ e con una velocità di propagazione del suono nell'acciaio di 5900 m/s sono di 30-35m/s. Mentre per la barra in titanio (generico) con densità di $\rho st=4500 \ kg/m^3$ e velocità di propagazione del suono nel materiale di 6000 m/s si è visto che le velocità limite erano ben superiori, con un massimo di 60 m/s.



Una volta ricavate le velocità limite raggiungibili dall'attuatore, si è dovuta calcolare la pressione necessaria da applicare all'estremo della Striker Bar per far sì che la barra accelerasse in uno spazio molto limitato raggiungendo le velocità sopra citate. Per far questo si è utilizzato il Teorema dell'Energia Cinetica, uguagliando la variazione di Energia Cinetica al lavoro svolto per accelerare la barra. Questo lavoro viene effettuato dall'aria compressa, che a seguito dell'apertura dell'elettrovalvola, espanderà fino ad arrivare all'estremo della Striker Bar con la pressione necessaria a spingerla.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_f^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 \tag{3}$$

$$L = F \cdot s = (P \cdot A) \cdot s = \Delta E_c \tag{4}$$

$$P = \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_f^2\right)}{s \cdot A} \tag{5}$$

- m è massa della Striker Bar che risulta essere approssimativamente di 4 Kg per l'acciaio e di 2,3 Kg per il titanio (Barre di diametro d=0,018m e lunghezza di 2m).
- A è la sezione delle barre, circa pari a 2,55x10⁻⁴ m²



- s è il tratto percorso dalla barra all'interno del tubo nel quale è posizionata.
 Spazio molto limitato in quanto tutta la struttura deve essere contenuta in 4 metri, e sapendo che le sole barre sono lunghe la metà, lo spazio a disposizione risulta piccolo (1-1,5 m)
- vf è la velocità limite delle Barre
- F e P rispettivamente la forza e la pressione esercitata sulle barre, legate dalla relazione: F = P · A = m · a (6) (a è l'accelerazione della Striker Bar).

Le pressioni ricavate sono risultate elevate, in particolare per far raggiungere una velocità di 30 m/s alla barra di acciaio è necessario applicare una pressione di 46,8 bar sulla superficie, mentre per farle raggiugere una velocità di 40 m/s (oltre il limite ammissibile per un acciaio comune) una pressione di 83,2 bar. Per quanto riguarda la barra in titanio per farle raggiungere una velocità di 60 m/s risulta necessaria una pressione di ben oltre i 100 bar, precisamente di 108 bar.

Questi risultati sono stati ottenuti ipotizzando uno spazio di accelerazione della barra di 1,5 m, il massimo che si riesce a ricavare nei 4 metri a disposizione, anche per il fatto che il martinetto presente nell'attuale struttura, che non può essere rimosso, occupa parte dello spazio. Considerando invece, 1 m di tratto percorso



dalla barra, le pressioni ottenute sono notevolmente superiori rispetto a quelle precedentemente elencate.

Nell'analisi delle pressioni si è cercato di studiare e di ricavare principalmente le condizioni limite di funzionamento della struttura in modo tale da conoscerne il range di utilizzo. In questo modo è possibile inoltre dimensionare e scegliere i componenti da inserire nel sistema basandosi su questi valori limite, per poter lavorare in sicurezza.

Oltre alle pressioni sono stati successivamente ricavati anche gli altri dati relativi al moto dell'attuatore, quali accelerazione e tempo di accelerazione.

$$a = \frac{(P \cdot A)}{m} \tag{7}$$

$$t = \frac{v_f}{a} \tag{8}$$

Bisogna però specificare che l'analisi del moto della Striker Bar è stato effettuato considerandolo e ipotizzandolo come un moto ideale, perché senza fare dei test più approfonditi e reali del moto, non è possibile stabilire a priori se la barra subisca eventuali rallentamenti dovuti all'attrito nel contatto con il tubo nel quale è inserita, o per il fatto che essendoci una fuga tra la sezione della Striker Bar e



del tubo, l'aria compressa potrebbe non esercitare completamente la sua pressione di spinta sull'estremità della barra, ma potrebbe fuoriuscire senza compiere lavoro o addirittura rallentare il moto generando una resistenza.

Terminato lo studio del moto della barra è stata effettuata un'analisi relativa all'aria compressa. Sapendo quale fosse la pressione finale che l'aria doveva avere nel contatto con la barra, si è svolto a ritroso il percorso dell'aria attraverso i tubi di collegamento, l'elettrovalvola fino ad arrivare nella bombola nella quale è contenuta, per poter ricavare le pressioni nei diversi punti della struttura. Le pressioni a livello della bombola, come ci si aspetterebbe, sono risultate superiori rispetto a quella nell'interfaccia con l'attuatore, per il fatto che con l'espansione del gas e con le varie perdite di carico, sia localizzate che distribuite, la pressione lungo il percorso verso l'attuatore va via via diminuendo. Infatti, se si vuole avere una pressione finale tale da spingere la barra, necessariamente la pressione iniziale a livello della bombola deve essere superiore per compensare le diverse perdite di carico presenti nel percorso.

Per calcolare l'espansione che l'aria effettua all'apertura delle valvole del sistema, da dentro la bombola fino al contatto con la Striker Bar, si utilizza la relazione che descrive l'espansione politropica di un gas. Si tratta di una relazione specifica, ricavata da quella generale, che descrive quattro trasformazioni quasistatiche fondamentali:



$$P \cdot V^n = cost \tag{9}$$

- n = esponente caratteristico (o anche numero caratteristico) della politropica, in questo caso costante, rappresenta il rapporto dei calori specifici del gas, che per l'aria ha il valore di 1,408.
- P e V rispettivamente pressione e volume

$$P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n \tag{10}$$

Conoscendo la pressione in 2, il volume in 1(volume interno della bombola) e il volume in 2 (quello della bombola sommato a quello degli elementi della struttura) è stata ricavata la pressione all'interno della bombola. (pedice 1: bombola, pedice 2: estremo attuatore)

Le pressioni nelle bombole, considerando la sola espansione dell'aria, sono risultate superiori in media di 1 bar rispetto alla pressione calcolata sull'estremità della Striker Bar, nei vari test effettuati con differenti materiali e diverse velocità dell'attuatore.

Alla pressione trovata vanno sommate le perdite di carico, ovvero i cali di pressione dovuti agli attriti interni che si hanno nel momento in cui l'aria esce



dalla bombola, attraversa i diversi tubi di collegamento e passa attraverso l'elettrovalvola. Queste perdite si dividono in due categorie differenti: distribuite e concentrate. Le prime sono dovute agli attriti che inevitabilmente si generano a causa dello scorrere del fluido nel tubo, perciò sono presenti ovunque nelle tubazioni (distribuite); le perdite concentrate, al contrario, sono localizzate in un ben preciso punto del percorso e sono dovute ad ostacoli presenti nel tragitto del fluido quali per esempio un rubinetto, una diramazione, un restringimento o un allargamento del condotto, un gomito ecc.

Lo scopo è quello di riuscire a calcolarle, anche se in maniera approssimata. È importante osservare che le leggi che regolano il moto di un fluido non sono, purtroppo, universalmente valide: il modo stesso con cui questo si muove varia in funzione della sua velocità, della viscosità e della densità che lo caratterizzano, e del diametro del tubo entro cui esso fluisce. Per questo si è soliti ricorrere a due modelli per descrivere un fluido in moto: il regime laminare e quello turbolento. Il primo prevede che il fluido sia suddivisibile in tante lamelle che scorrono (non senza attrito) una sull'altra e parallelamente al tubo; il secondo, invece, si basa sull'idea che le varie molecole si muovano in modo caotico, formando vortici. Si deduce uno o l'altro modello a seconda del valore di un parametro, il numero di Reynolds, definito da:



$$R_e = \frac{D \cdot v_m}{\nu} \tag{11}$$

dove D è il diametro del tubo, Vm la velocità media del fluido, e v la viscosità cinematica del fluido. A seconda del valore di tale parametro, dunque, si ottiene indicativamente un modello piuttosto che l'altro, sapendo così se il fluido si muove di:

- Regime laminare se Re<2.000
- Regime turbolento se Re>4.000

Nel progetto in questione il regime del fluido è turbolento, pertanto le relazioni per ricavare le diverse perdite sono:

- Perdite distribuite: $r = F_a \cdot \frac{1}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$ (12)
- Perdite concentrate: $z = \beta \cdot \rho \cdot \left(\frac{\nu^2}{2}\right)$ (13)

Dove:

• Fa è il fattore d'attrito calcolato con la relazione di Altshul-Tsal:

$$F_a = 0.11 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{68}{\text{Re}}\right)^{0.25} \tag{14}$$



dove ϵ è la rugosità assoluta, che assume un valore di 0,09 mm per i canali lisci di acciaio; D è il dimetro del tubo e Re è il numero di Reynolds precedentemente calcolato.

(Questa relazione è più semplice rispetto a quella di Colebrook per il calcolo del fattore d'attrito; il valore ottenuto coincide approssimativamente con quello ottenuto nel diagramma di Moody)

• ρ è la densità dell'aria approssimata utilizzando la relazione dei gas perfetti:

$$\rho = \frac{P \cdot MM}{R \cdot T} \tag{15}$$

dove MM è la massa molare dell'aria= 28,96 (g/mol); R è la costante universale dei gas 0,0821 (L*atm/mol*K); T è la temperatura in K (273,15+25°C)

- v è la velocità media del fluido
- β è la sommatoria dei coefficienti di perdita localizzata;
 β= Σς con ς coefficiente di perdita localizzata: ς elettrovalvola = 6; ς gomito standard 90°= 0,6; ς riduzione brusca 0,3; ς riduzione graduale= 0,05; ς allargamento brusco= 0,2; ς allargamento graduale= 0,2...

Una volta trovati i valori di entrambe le perdite (distribuite e concentrate), sommati tra loro forniscono il valore approssimato delle perdite di pressione complessive dell'aria nel suo percorso. Questo valore "R" sommato alla pressione



dell'aria all'interno della bombola precedentemente calcolato ci indica l'effettiva pressione che bisognerebbe avere inizialmente, affinché il sistema di lancio del "proiettile" funzioni nella maniera corretta.

Il medesimo procedimento è stato svolto per calcolare la pressione dell'aria compressa nel passaggio all'interno dell'elettrovalvola, per poter dimensionare e successivamente scegliere la valvola corretta.

Le perdite ottenute nelle varie prove risultano pur sempre delle approssimazioni e nelle reali condizioni operative del sistema potrebbero essere anche notevolmente differenti in quanto, sia i dati utilizzati presi dalle tabelle, sia le relazioni con le quali sono stati ricavati i valori delle perdite, potrebbero non descrivere correttamente la realtà. In generale le perdite registrate variano in un intervallo che va da 1 a 3 bar nelle diverse prove analizzate.

In definitiva, all'interno delle bombole, sono state riscontrate pressioni pari a 86 bar e 48,5 bar per lanciare la barra d'acciaio rispettivamente a 40 m/s e a 30 m/s; mentre è risultata una pressione di circa 112 bar per accelerare la Striker Bar in titanio a 60 m/s.

Inoltre si è calcolata anche la velocità raggiunta dal gas nei vari punti della struttura utilizzando il Teorema di Bernulli:



$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = cost \tag{16}$$

per far questo si è ipotizzato che l'aria all'interno della bombola prima dell'apertura della valvola si trovi in una condizione di quiete e quindi con velocità nulla, inoltre la pressione all'interno della bombola si è considerata pari a quella ricavata precedentemente, mentre il termine relativo all'energia potenziale del fluido è stato trascurato in quanto tutto il sistema si trova alla stessa quota.

Tra i diversi risultati ottenuti si può notare come l'aria compressa raggiunga una velocità di circa 76,3 m/s quando arriva a contatto con l'estremo della Striker Bar sfruttando una pressione iniziale interna alla bombola di circa 86 bar.

Avendo ricavato la velocità nei vari punti della struttura è stato possibile quindi valutare una portata del sistema, che ovviamente risulta diversa in base alle sezioni del condotto che si prendono in considerazione e alle pressioni in gioco che modificano la velocità del fluido. Per calcolare la portata massima si è considerata la portata del fluido nel punto più veloce ottenendo un valore di 0.011 m³/s corrispondente a 11 litri a secondo. In questo modo è stato possibile scegliere la capienza con la quale la bombola doveva essere costituita.



4.4. Ricerca degli elementi da inserire nella struttura:

Dopo aver ricavato tutti i dati utili per la completa descrizione del funzionamento del sistema, come le pressioni in gioco, le velocità della Striker Bar e del fluido all'interno del sistema, si è passati alla scelta dei dispositivi che andranno inseriti all'interno del sistema gas gun.

Il sistema gas gun è principalmente costituito da 3 elementi fondamentali che andavano scelti in base ai dati ricavati:

- Un contenitore nel quale l'aria compressa potesse essere contenuta ad elevate pressioni
- Un'elettrovalvola utile all'azionamento del sistema di lancio
- Un compressore capace di ricaricare la bombola ad alte pressioni di esercizio

Oltre a questi sono stati scelti altri componenti presenti nella struttura, tra cui: tubi di collegamento per convogliare l'aria dalla bombola fino all'attuatore, un tubo nel quale inserire la Striker Bar con i relativi supporti per sorreggerlo e altri elementi di supporto per poter disporre nelle diverse soluzioni trovate tutti gli elementi presenti.



Per il contenitore d'aria si era inizialmente ipotizzato di partire da un comune serbatoio d'aria utilizzato negli impianti idraulici, ma durante la ricerca nei diversi cataloghi si è visto che i serbatoi elencati non erano adatti per le alte pressioni che si generano nel sistema in quanto, essendo generalmente utilizzati negli impianti industriali dove la pressione dell'aria compressa è limitata per legge, sono tarati per quel tipo di pressione (standard). Si è quindi passati alla ricerca di una bombola capace di resistere almeno a 100 bar di pressione dato che nel caso di prove con barra di Acciaio le pressioni massime raggiungibili sono teoricamente di 86 bar e per quanto riguarda test con la barra di titanio non verranno utilizzare le velocità limite precedentemente calcolate ma si rimarrà nell'intorno dei 30-40 m/s, quindi pressioni al di sotto dei 100 bar. Pertanto per lavorare in sicurezza tra le possibili soluzioni è stata presa in considerazione una bombola utilizzata per ricaricare i serbatoi delle armi ad aria compressa, omologata per 230 bar di pressione. Questa bombola è compatibile con tutte le armi ad aria compressa, ha una pressione di esercizio massima di 200 bar ed è stata collaudata ad una pressione di 300 bar. Fra le possibili scelte di capienza si è scelto di utilizzare la bombola da 14 litri, la più capiente. A questa sarà poi collegato un rubinetto per la regolazione, l'apertura e la chiusura del flusso e un manometro per controllare i livelli di pressione.





Figura 10: Modello bombola-BLAUOPTIK Bombola per carabine PCP

Successivamente, dopo aver scelto la bombola si è passati alla ricerca di un'elettrovalvola che fosse in grado di resistere ad una pressione di esercizio di almeno 100 bar, per gli stessi motivi precedentemente descritti.

Non molte sono risultate le valvole in grado di lavorare a così elevate pressioni, quindi la scelta è stata limitata. Tra quelle disponibili si è optato per un'elettrovalvola ad azione indiretta, adatta all'intercettazione dei fluidi quali: aria, acqua, fluidi antincendio, Co2, aria compressa, ecc; attraversabile da fluidi con temperature comprese tra i -10° e i 95° e capace di resistere ad una pressione massima di esercizio di 100 bar.





Figura 11: Modello elettrovalvola-Elettrovalvola ODE 4966K0Q120

Infine la ricerca dei tre elementi fondamentali per la realizzazione della struttura si è focalizzata sulla scelta di un compressore che potesse riempire la bombola con aria ad alta pressione ogni qualvolta quest'ultima si scaricasse. Come anche per gli altri elementi si è cercato di scegliere dei dispositivi che rispettassero la richiesta di limitare i costi del progetto e che quindi avessero il giusto compromesso tra caratteristiche e prezzo.

Si è optato quindi per un compressore d'aria elettrico portatile HP (High Pressure), di piccole dimensioni, con volume d'aria di 40-50 L/min e una pressione di esercizio di 100-300 bar (1500-4500 psi), sufficiente per poter riempire la bombola.





Figura 11: Modello compressore-SFEOMI Compressore d'aria elettrico ad alta pressione

Come collegamento tra i vari elementi sono stati utilizzati dei raccordi Nipples con innesto conico, molto usati negli impianti idraulici per ottenere il miglior serraggio tra i diversi dispositivi; le filettature di questi raccordi vengono generalmente avvolte da un nastro isolante di PTFE (comunemente detto Teflon) utile per sigillarle completamente ed avere la miglior tenuta possibile.



Figura 12: Raccordi Nipples con innesto conico



Inseriti in questi raccordi sono presenti due tubi di collegamento che convogliano il gas rispettivamente dalla bombola all'elettrovalvola e da quest'ultima al raccordo che indirizza l'aria contro l'estremità della Striker Bar. Per motivi di spazio ridotto purtroppo il primo tubo di collegamento, come si vede dalle rappresentazioni CAD, presenta un angolo di 90 gradi che dai calcoli effettuati risulta generare una perdita di pressione localizzata. Questi tubi possono essere scelti in diversi materiali, in base al budget che si ha a disposizione e tra le possibili soluzioni, generalmente nei sistemi idraulici ad alta pressione si utilizzano tubi in acciaio o in rame.



Figura 13: Sezione primo tubo di collegamento con angolo di 90°; sezione secondo tubo di collegamento rettilineo

Il tubo nel quale verrà poi posizionato l'attuatore sarà lungo 3,5 metri, per fare in modo che lo spazio di accelerazione sia di almeno 1,5 metri, avrà un diametro interno di 0,019 m e sarà costituito d'acciaio rettificato. Nel caso in cui non si riesca a collocare la struttura nei 4 metri previsti, per problemi di realizzazione si può sempre utilizzare un tubo di 3 metri e aumentare le pressioni del sistema. Questo



tubo sarà sorretto da supporti ancorati alla struttura basale che mantiene l'intera Barra di Hopkinson (trave a doppio T), costituiti anch'essi d'acciaio e per fare in modo che tutto il sistema gas gun si trovi alla stessa quota, anche l'elettrovalvola sarà sorretta da un supporto fissato al basamento.



Figura 14: Sezione parziale del tubo nel quale è inserita la Striker Bar; supporto per il tubo



4.5. Soluzioni per la realizzazione:

Dopo aver selezionato gli elementi più idonei da inserire nel sistema si è passati alla rappresentazione grafica tramite CAD delle possibili soluzioni in cui poter disporre il sistema gas gun cercando di rispettare tutte le richieste del progetto.

La differenza tra le diverse soluzioni trovate riguarda la disposizione della bombola nella quale è contenuta l'aria compressa, che avrebbe potuto essere posizionata sia in verticale che in orizzontale. Essendo il più ingombrante tra gli elementi fondamentali del sistema gas gun il suo posizionamento doveva necessariamente essere il primo.

Nella prima soluzione la bombola è stata posizionata verticalmente, serrata tramite un distanziale e una staffa ad "U" alla trave a doppio T e appoggiata su di un piedistallo, per fare in modo che questa durante l'utilizzo resti immobile. Questa è sicuramente la soluzione che implica un costo inferiore, un minor impegno e anche un minor dispendio di tempo e lavoro per la realizzazione.





Figura 15: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista laterale



Figura 16: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista ravvicinata e vista dall'alto

Nella seconda soluzione, come si vede dalle rappresentazioni, la bombola è posizionata orizzontalmente, parallela alla base della struttura ed è appoggiata su un supporto con un incavo ad U ed ancorata a questo tramite due staffe anch'esse ad U; il supporto è serrato ad una piccola trave a doppio T esterna a quella principale, che permette di mantenere il peso di tutto l'apparato. Questa è la soluzione che prevede un costo maggiore in quanto il supporto sul quale è



appoggiata la bombola richiederà diverse lavorazioni per essere realizzato e di conseguenza risulterà anche la più complessa da realizzare.



Figura 17: Rappresentazione CAD soluzione con bombola orizzontale, vista laterale



Figura 18: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista ravvicinata e vista dall'alto

Come si vede dalle immagini la disposizione della bombola nelle due soluzioni è stata rappresentata una volta sinistra e una volta a destra della trave a doppio T, per far intendere che il sistema può essere realizzato in entrambi le posizioni, in base allo spazio disponibile nell'area circostante e alla comodità di utilizzo.



Conclusioni:

La scelta finale tra le due possibili modifiche spetterà a chi ha richiesto il progetto e sarà fatta in base alle esigenze costruttive e realizzative del sistema, tenendo conto di tutte le problematiche relative al budget a disposizione, allo spazio ridotto per la collocazione del sistema e al tempo per la realizzazione.



Figura 19: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista complessiva



Figura 20: Rappresentazione CAD soluzione con bombola orizzontale, vista complessiva



Indice delle Figure:

Figura 1: Esempio di Barra di Hopkinson6				
Figura 2: 1962-Primo apparato in grado di generare direttamente una curva sforzo-				
deformazione dinamica completa (alta velocità) in un singolo esperimento11				
Figura 3: Confronto tra i diversi metodi di prova dei materiali in relazione alla velocità di				
deformazione14				
Figura 4: La barra di Davies (Single pressure bar)15				
Figura 5: La SHPB (Split-Hopkinson Pressure Bar)16				
Figura 6: Rappresentazione completa di tutti gli elementi presenti in una SHPB (esempio di				
versione classica) confronto tra due diverse tipologie di provino				
Figura 7: Funzionamento della SHPB. Propagazione delle onde di pressione20				
Figura 8: Versione diretta della SHPB con sistema di precarico21				
Figura 9: Versione classica della SHPB con sistema gas gun22				
Figura 10: Modello bombola-BLAUOPTIK Bombola per carabine PCP				
Figura 11: Modello elettrovalvola-Elettrovalvola ODE 4966K0Q12040				
Figura 11: Modello compressore-SFEOMI Compressore d'aria elettrico ad alta pressione41				
Figura 12: Raccordi Nipples con innesto conico41				
Figura 13: Sezione primo tubo di collegamento con angolo di 90°; sezione secondo tubo di				
collegamento rettilineo				



Figura 14: Sezione parziale del tubo nel quale è inserita la Striker Bar; supporto per il tubo43
Figura 15: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista laterale45
Figura 16: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista ravvicinata e vista
dall'alto45
Figura 17: Rappresentazione CAD soluzione con bombola orizzontale, vista laterale46
Figura 18: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista ravvicinata e vista
dall'alto46
Figura 19: Rappresentazione CAD soluzione con bombola verticale, vista complessiva47
Figura 20: Rappresentazione CAD soluzione con bombola orizzontale, vista complessiva47



Bibliografia:

 Caleffi, M. (1991). "Le perdite di carico negli impianti", Idraulica, Poligrafica Moderna S.p.A. Novara.

URL:

https://www.caleffi.com/sites/default/files/certification_contracts/idraulica_28_it.p df

Cardew G.V. & Cardew G.M. & Elsom E.R. (1976), "The Air Gun from Trigger to Muzzle", traduzione italiana

URL:

http://www.phoenixft.it/wp-

content/files/The_Air_Guns_from_Trigger_to_Muzzle_traduzione_italiana.pdf

- Cesini G.& Latini G. & Polonara F., (2017). "Trasformazioni Politropiche", Fisica Tecnica, CittàStudi,
- > DIISM Univpm, URL: https://www.diism.univpm.it/laboratori/Barra-Hopkinson
- Girelli L. (2016), "Progetto e costruzione di una Split-Hopkinson pressure bar operante a strain rate molto elevati"
- Glaser R. & Haines J. & Knight C. (2007) "Design and characteristics of a Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus", University Of Maine
- Mancini, E. (2015). "La barra di Hopkinson, costruzione di macchine e progettazione agli elementi finiti", Seminario SHTCBar, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale.

URL:

http://dma.ing.uniroma1.it/users/broggiato/cdm/roma/no/CdmFemRm/dispense /SeminarioSHTCBar.pdf



Ringraziamenti:

Desidero ringraziare innanzitutto il relatore di questa tesi, il Professor Marco Sasso, per la disponibilità, per l'attenzione e per aver accettato di sostenere il mio tirocinio a distanza, con tutte le difficoltà, nel pieno del lockdown.

Ringrazio poi la mia grande famiglia per il sostegno e per il supporto.

Un grazie sincero ai miei amici, vicini e lontani, che mi hanno tenuto compagnia in questo percorso burrascoso, riuscendo a strapparmi ogni volta un sorriso, anche quando non ero dell'umore giusto.

Un ringraziamento doveroso va ai miei compagni di corso, con i quali ho trascorso splendide giornate, e in particolare a Marco, con il quale, lavorando insieme in quest'ultimo periodo, sono riuscito ad ottenere i migliori risultati.

Ma il ringraziamento più grande spetta alla mia ragazza, Nicoletta, che è stata la persona che più di chiunque altra mi ha motivato, aiutato, supportato e sopportato in questo difficile percorso, con la quale ho scambiato i momenti più veri e sinceri, che non scorderò mai. La sua presenza e il suo affetto sono stati per me indispensabili, per il raggiungimento di questo traguardo. Grazie di cuore!

Alessandro