

Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DISTART

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque,
del Rilevamento e del Territorio

Corso di Laurea in Ingegneria Civile – Indirizzo Strutture

Insegnamento: Metodi numerici per l'ingegneria civile LS

EFFETTO DI UNA ESPLOSIONE SU UNA PIASTRA IN ACCIAIO: ANALISI E SIMULAZIONE NUMERICA

Tesi di Laurea di:

Relatore:

**FABRIZIO PITZALIS
UBERTINI**

Chiar.mo Prof. Ing. FRANCESCO

Correlatore:

Chiar.mo Dott. Ing. ALESSANDRO MARZANI

Sessione III

Anno Accademico 2008 - 2009

Abstract

Questo documento presenta i risultati di un'analisi dinamica eseguita su una piastra d'acciaio sottoposta a carichi d'esplosione.

Si pone come primo obiettivo la realizzazione di un modello capace di prevedere e valutare la risposta dinamica della piastra sottostante il veicolo VLTM (Veicolo Tattico Leggero Multiruolo) denominato "Lince" in dotazione all'Esercito Italiano, sottoposta a carichi d'esplosione derivanti dalla detonazione di un ordigno Anti Carro.

In secondo luogo si descrive il confronto derivante da simulazioni analitiche eseguite con elementi FEM (Finite Element Models) con valori derivanti da simulazioni sperimentali.

Indice

INTRODUZIONE

Pag.1

1. CARATTERISTICHE TECNICHE DEL “VTLM” LINCE

1.1. VTLM (Veicolo Tattico Leggero Multiruolo) “LINCE” Pag.4

1.2. Descrizione del mezzo Pag.7

1.2.1 *Caratteristiche tecniche* Pag.8

1.2.2 *Sistemi di protezione* Pag.11

2. CARATTERIZZAZIONE DI UNA ESPLOSIONE

2.1 Introduzione materiali esplosivi Pag.13

2.2 Detonazioni e deflagrazioni Pag.14

2.3 Classificazione dei materiali esplosivi Pag.18

2.4 Caratteristiche degli ordigni esplosivi Pag.22

2.4.1 *Inneschi* Pag.24

2.4.2 *Dispositivi esplosivi* Pag.24

2.4.3 *Materiali esplosivi semplici e composti* Pag.26

2.5 Mine terrestri Pag.30

2.5.1 *Cenni storici* Pag.30

2.5.2 *Definizione “mina terrestre”* Pag.31

2.5.3 *Dati tecnici delle mine terrestri* Pag.32

2.6 Tolleranze umana Pag.40

2.6.1 *Tolleranza umana alle pressioni generate dallo scoppio* Pag.40

2.6.2 *Tolleranza umana ai frammenti* Pag.41

2.7 Curve di pressione di una onda d’urto Pag.44

2.7.1 *Esplosione al suolo* Pag.46

2.7.2 *Esplosione in aria* Pag.49

3. ESPLOSIONE SU UNA PIASTRA IN ACCIAIO E TARATURE DELLE CURVE DI PRESSIONE	
3.1 Prova sperimentale	Pag.57
3.1.1 <i>Introduzione</i>	Pag.58
3.1.2 <i>Dati sperimentazione</i>	Pag.59
3.1.3 <i>Strumentazione</i>	Pag.60
3.1.4 <i>Risultati e discussione</i>	Pag.61
3.1.5 <i>Conclusioni sperimentazione</i>	Pag.63
3.2 Taratura delle curve di pressione	Pag.64
3.3 Validazione delle curve di pressione mediante modello in ABAQUS	Pag.70
3.3.1 <i>Analisi elastica lineare</i>	Pag.71
4. EFFETTO DI UNA ESPLOSIONE SULLA PIASTRA DI BASE DEL VEICOLO LINCE: MODELLAZIONE NUMERICA	
4.1 Modellazione numerica delle curve di pressione	Pag.77
4.1.1 <i>Coefficiente d'equivalenza</i>	Pag.79
4.1.2 <i>Distanza ridotta</i>	Pag.80
4.1.3 <i>Picco di pressione</i>	Pag.81
4.1.4 <i>Durata della fase positiva</i>	Pag.82
4.1.5 <i>Coefficiente sperimentale</i>	Pag.82
4.1.6 <i>Curva di pressione</i>	Pag.83
4.2 Modellazione numerica con Abaqus	Pag.88
4.2.1 <i>Parts</i>	Pag.91
4.2.2 <i>Property</i>	Pag.91
4.2.3 <i>Assembly</i>	Pag.92
4.2.4 <i>Step</i>	Pag.93
4.2.5 <i>Load</i>	Pag.94
4.2.6 <i>Mesh</i>	Pag.94
4.2.7 <i>Job</i>	Pag.96
4.3 <i>Risultati</i>	Pag.98
4.3.1 <i>Analisi elastica lineare</i>	Pag.98
4.3.2 <i>Analisi elasto-plastica</i>	Pag. 105
4.3.3 <i>Interpretazioni fisica dei risultati</i>	Pag. 116
4.4 <i>Discussione</i>	Pag.118

5. CONCLUSIONI

Pag.119

Bibilografia

Pag.121

Introduzione

Nel campo dell'Ingegneria si assiste a un crescente interesse nei confronti delle azioni dinamiche prodotte da esplosioni applicate sia a opere civili che strategiche.

Infatti, i recenti attacchi terroristici portati al cuore del mondo occidentale negli ultimi anni, hanno fatto sì che si alzassero i livelli di guardia dei paesi maggiormente colpiti e interessati. La crescente preoccupazione dei paesi occidentali, ha quindi focalizzato l'attenzione sull'argomento della protezione sia delle strutture sia dei mezzi, i quali per caratteristiche strategiche o sociali, rientrano tra i probabili obiettivi terroristici.

Lo stesso ambito scientifico si è adoperato per caratterizzare il comportamento di veicoli speciali adoperati in determinate zone ad alto rischio, i quali devono garantire una buona protezione se sottoposti a carichi dinamici d'elevata intensità e breve durata, come le sollecitazioni prodotte dalle esplosioni.

Ci occuperemo nello specifico di analizzare il mezzo Iveco VTLM (Veicolo Tattico Leggero Multiruolo) comunemente chiamato "Lince" utilizzato dall'Esercito Italiano in tutte le PSO (Peace Support Operation) utilizzato sia come mezzo esplorativo (con compiti di pattugliamento e difesa) che per compiti sociali strategici (come trasporto feriti e materiali).

In dettaglio valuteremo le azioni e il comportamento della piastra disposta sotto il pianale il quale costituisce uno degli elementi fondamentali della blindatura del veicolo.

Il problema si presenta al quanto complesso, e si può articolare in diversi aspetti fondamentali. Come prima cosa valuteremo il fenomeno di un'esplosione il quale risulta di difficile studio a causa dei numerosi parametri che possono influenzare la quantità di energia trasferita al mezzo dall'onda d'urto generata dalla detonazione, come l'elevate temperature e i frammenti vaganti.

Nel presente lavoro si adopera un modello numerico di mina terrestre realizzato con il codice Matlab, valutando i carichi dinamici prodotti dall'esplosione.

Inseguito, studieremo la risposta dinamica dell'elemento soggetto ai carichi d'esplosione valutandone gli spostamenti e le tensioni ipotizzando che la detonazione avvenga nel centro della piastra in analisi.

A questo scopo si è utilizzato il codice agli elementi finiti FEM (Finite Element Models) Abaqus.

In seguito si sono confrontati i valori ottenuti dalla simulazione analitica con i valori ottenuti da prove sperimentali per garantire la validità del modello.

L'esigenza di intraprendere la strada della simulazione numerica nel campo dei fenomeni esplosivi nasce negli ultimi anni, nei quali la simulazione numerica ha assunto un ruolo crescente se confrontata con l'analisi attraverso test sperimentali. Questo è dovuto ai diversi vantaggi che grazie alle tecniche di simulazione si è riusciti a conseguire; a parità di significatività dei risultati otteniamo una minore pericolosità, maggiore possibilità di analisi di differenti scenari e di modifiche progettuali e non ultimo costi notevolmente inferiori.

CAPITOLO 1

➤ *Caratteristiche tecniche VTLM “Lince”*

1.1. VTLM (Veicolo Tattico Leggero Multiruolo) “LINCE”

I nuovi scenari che vedono l'impiego degli eserciti occidentali sono ormai caratterizzati dalla prevalenza di operazioni diverse da quelle teorizzate fino alla fine degli anni '80, le quali prevedevano l'impiego maggiore delle forze militari in battaglie dominate dalla componente meccanizzata e corazzata.

Le ultime operazioni militari hanno visto crescere sempre più la necessità di operare in ambienti ad alto rischio ma non sempre segnati dallo scontro armato in campo aperto e soprattutto la comparsa di minacce costituite da armi controcarro in possesso di piccoli gruppi di combattenti. Oltre ciò, anche nelle operazioni PSO (Peace Support Operation), diviene necessario utilizzare grandi quantità di veicoli che possano garantire la sicurezza del personale contro minacce costituite da armi di piccolo e medio calibro.

Finora molti di questi veicoli sono derivati da adattamenti di normali mezzi tattici oppure da veicoli protetti realizzati apposta per rispondere ai requisiti di protezione sopra citati. Nel primo caso si rischia di avere mezzi comunque non in grado di dare la necessaria protezione al personale a bordo, nel secondo caso di avere veicoli eccessivamente specializzati in un determinato ruolo, il cui impiego diventa necessariamente limitato.

Per tentare di risolvere questo problema sentito a livello internazionale, l'Iveco ha sviluppato un nuovo veicolo multi ruolo leggero idoneo a rispondere a requisiti ritenuti fondamentali per l'impiego nelle operazioni militari del nuovo secolo.



Fig. 1.1 Il Lince è facilmente trasportati sia via mare che via aerea.

Due requisiti fondamentali sono, un alto livello di protezione contro il rischio posto dalle mine, tecnica sempre più utilizzata nelle guerre odierne, e la necessità di avere un mezzo aerotrasportabile così da ridurre i tempi d'intervento.

Questo insieme di requisiti ha portato la tecnologia verso il Veicolo Tattico Leggero Multiruolo VTLM, internamente identificato dalla sigla M65E19WM, il nuovo veicolo presenta delle caratteristiche tecniche e prestazioni concretamente interessanti tanto che esso è stato adottato da numerose nazioni.

Il veicolo è stato impiegato operativamente, fuori dal territorio nazionale, per la prima volta in Libano con la livrea bianca dei veicoli ONU.



Fig. 1.2 VTML Lince cabina lunga

I primi veicoli consegnati all'Esercito Italiani sono stati subito impiegati nelle missioni internazionali del Libano e Afghanistan a fine 2006. In Afghanistan il veicolo è stato soggetto di più attentati con ordigni esplosivi, d'intensità varia, nei quali gli occupanti del veicolo sono usciti solamente feriti per i primi tre anni di utilizzo in teatro operativo. A inizio settembre 2007 un veicolo è stato distrutto ma l'equipaggio non ha riportato fortunatamente ferite gravi.



Fig 1.3 Lince danneggiato in un attacco in Afghanistan (2007) fortunatamente l'equipaggio.
non ha riportato ferite gravi

Nel 2008 lo schieramento dei mezzi Lince in Afghanistan si aggirava intorno a 135 unità ed è stato soggetto di vari attacchi (almeno 4) contro il contingente Italiano con IED (Improvised Explosive Device), RPG (Rocket Propelled Grenade, "lanciagranate") e altro. Nonostante tutto, gli equipaggi hanno subito solo ferite più o meno gravi, ma senza perdite di vita come capitato precedentemente in attacchi simili.

A fine 2008 la Spagna ha iniziato a schierare in Afghanistan i suoi Lince (LMV), seguiti da Norvegia (LMV Light Multirole Vehicle), Belgio (LMV), Repubblica Ceca (LMV), Gran Bretagna (Panther CLV Command and Liason Vehicle).

A inizio 2009 i Lince schierati in Afghanistan erano 243 e 33 quelli in Libano. Il 14 luglio 2009 si è registrata la prima vittima a bordo di un Lince, il militare stazionava sulla ralla ed è rimasto ucciso dal ribaltamento del mezzo mentre gli altri tre occupanti hanno riportato ferite non gravi.

Il 17 settembre 2009 alle 12:10 locali, a Kabul, in Afghanistan, sulla strada che porta dal centro cittadino all'aeroporto, due lince in servizio di scorta sono coinvolti in un attacco compiuto da due attentatori suicidi su un'auto-bomba, carica di circa 150 [kg] di esplosivo, questo brutale attacco a

causato la morte di sei paracadutisti italiani e il ferimento di altri quattro (del 186° Reggimento Paracadutisti Folgore).



Fig. 1.4 Immagine del secondo Lince distrutto a Kabul il 17 settembre 2009.

1.2 Descrizione del mezzo

Grazie alla sua versatilità costruttiva, il veicolo può essere a quattro porte-cabina lunga, o due porte-cabina corta, allestibile tra l'altro come posto comando e ambulanza protetta. La versione con cabina corta e passo lungo è destinata a uso posto-comando mentre quella a cabina lunga come veicolo da ricognizione e piattaforma per sistemi d'arma [1].

Le sospensioni indipendenti anteriori e posteriori consentono, unitamente ad un bilanciamento dei pesi e a un'ottimale ripartizione della coppia motrice, un'eccezionale mobilità in fuori strada.

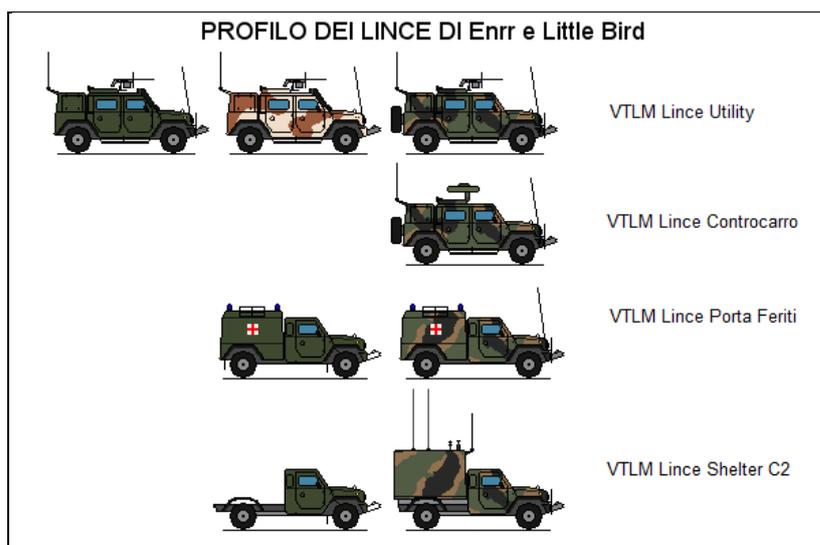


Fig. 1.5 Differenti profili del VLTM

IL Lince è un veicolo di mobilità e agilità estreme e può operare in ambienti radicalmente diversi per collocazione geografica, condizioni climatiche e caratteristiche del terreno. Può operare con temperature da +49° a -32 [°C].

Il VTLM è dotato di una rete CAN (Controller Area Network) che mette in comunicazione la centralina motore, cambio, ABS, ecc. in modo da rendere reperibili in tempo reale tutte le informazioni diagnostiche e di manutenzione necessarie.

Il VTLM è in grado di limitare la segnatura radar grazie a vernici radar-assorbenti e sempre grazie alla sua particolare disposizione delle parti meccaniche, quali motore e turbocompressore, è capace di limitare il calore provocato dalla combustione del carburante. Per ridurre ulteriormente la segnatura IR (infrarosso) il radiatore del veicolo si trova nella parte inferiore al disotto della scocca e le parti più calde sono state protette da altre strutture, il silenziatore è posto internamente al telaio e la turbina è installata sotto il motore.

Tra le versioni speciali esiste anche la versione ambulanza, alcuni esemplari sono già stati consegnati alla Protezione Civile, ed è previsto che alcune unità siano consegnate all'arma dei Carabinieri ma non è ancora noto alcun particolare di questa fornitura.

1.2.1 Caratteristiche tecniche

Caratteristiche generali:

- **Equipaggio:** varia in funzione dell'equipaggiamento (max 5 persone)
- **Lunghezza:** 4,79 [m]
- **Larghezza:** 2,20 [m]
- **Altezza:** 2,05 [m]
- **Altezza da terra:** 0,50 [m]
- **Peso:** 6.700 - 7,000 [kg]
- **Motore:** Diesel Iveco F1C 4 cilindri in linea common rail
- **Potenza:**190 [hp]
- **Sospensioni:** indipendenti - bracci multipli
- **Potenza/peso:** 4,7 [hp/ton]
- **Freni:** davanti/dietro disco, sistema ABS, frenatura pneumoidraulica
- **Sistema elettrico:** 24[V]
- **Velocità max:** 130 [km/h]
- **Prestazioni:** 0 – 100 [km/h] in 42 secondi,
- **Consumi:** 14 [Lt] / 100 [Km]
- **Autonomia:** 500 [km]
- **Massa rimorchiabile:** 3.900 - 4.200 [kg]
- **Ruote:** 325/85 R16, sistema centrale di gonfiaggio dei pneumatici a bordo (CTIS) che consente di adeguare la pressione dei pneumatici secondo le condizioni del terreno.
- **Guado:** 85 cm, 150 cm con l'impiego di un apposito kit



Fig. 1.6 L'elevata altezza da terra e il filtro dell'aria disposto in alto forniscono al mezzo una elevata mobilità e agilità estreme in tutti i tipi di percorsi

1.2.2 Sistemi di protezione

Il Lince è un mezzo massiccio che ricorre a determinate soluzioni mai adottate finora: ad esempio tutta la meccanica è sistemata solo davanti e dietro la cabina (anche l'albero di trasmissione non è al centro ma a lato), in modo da evitare che in caso di esplosione di ordigni bellici i pezzi meccanici del veicolo vadano a colpire l'interno dell'abitacolo.

E' molto alto da terra e il pianale è leggermente arrotondato in modo che l'esplosione vada a sfogarsi il più possibile all'esterno del pianale. La cabina di pilotaggio è costituita da unità autonoma dal resto del mezzo e protetta da parafiamma; il vano motore è incernierato al telaio, mentre il vano posteriore e il serbatoio sono stati assemblati in modo da staccarsi in caso di esplosione, per farsi che lo sfogo vada verso l'alto allontanando l'onda di pressione sfruttando lo stesso principio dei portelli " blow-off " dei carri armati, che in caso di colpo a segno il particolare salta via per sfogare l'esplosione verso l'esterno. Le ruote e il serbatoio separate dalla cabina.

Il kit di protezione LPK (Light Protection Kit) proposto dall'Iveco prevede l'inserimento di piastre in compositi in tutto l'abitacolo e la sostituzione dei finestrini con pannelli corazzati in blindovetro. Queste modifiche, portate a termine in poche ore direttamente presso le unità d'impiego, assicurano la protezione dell'equipaggio contro il munizionamento perforante da 7,62 [mm] e le mine antiuomo più pesanti.[1]

Un successivo kit HPK (Heavy Protection Kit) consente infine di garantire la sopravvivenza al fuoco delle mitragliatrici pesanti da 12,7 e 14,5 [mm], anche se al prezzo di un certo appesantimento del mezzo e di una notevole riduzione del carico utile residuo[1].

Anche i sedili sono progettati in modo particolare, sono di derivazione aeronautica e hanno un sistema di sospensione elastica per evitare di trasmettere accelerazioni troppo forti in caso di esplosione. Sono presenti roll-bar che in caso di un eventuale ribaltamento resistono ad accelerazioni equivalenti di oltre sette [g].



Fig. 1.7 Immagine dell'abitacolo e del sottofondo del VTLM



Fig.1.8 VTLM in armamento all'Esercito Italiano

CAPITOLO 2

➤ *Caratterizzazione di una esplosione*

2.1 Introduzione materiali esplosivi

L'esplosione è un fenomeno di trasformazione chimica o chimico-fisica che avviene in un tempo rapidissimo, accompagnata da sviluppo di energia per buona parte termica e, in genere, da uno sviluppo di gas. [2].

Qualsiasi sistema che per somministrazione di piccolissime quantità di energia termica o meccanica è capace di trasformarsi chimicamente, in un tempo brevissimo, con sviluppo di energia, di gas e di vapori, costituisce un sistema esplosivo.

Questo rilascio d'energia si attribuisce a una trasformazione dello stato di una massa gassosa, solida o liquida, impiegata per la costruzione della carica esplosiva. Un sistema esplosivo è omogeneo se costituito da una sola specie chimica, definita invece eterogeneo quando è costituito da più sostanze chimiche.

Gli esplosivi sono quindi sostanze ad alto contenuto energetico, che attraverso le esplosioni, si trasformano in sostanze stabili, con un contenuto energetico molto inferiore. Gli esplosivi solidi sono miscele o combinazioni solide suscettibili ad assumere il regime di detonazione; si riserva il nome di polveri agli esplosivi che assumono il regime di deflagrazione.

I gas prodotti dalla reazione, a causa delle altissime temperature raggiunte nell'esplosione, tendono a occupare volumi enormemente superiori a quelli corrispondenti alle sostanze di partenza. Nel caso in cui una certa quantità di materiale esplosivo esploda quando è racchiusa in un ambiente ristretto, i gas provocano sulle pareti una pressione istantanea ed elevatissima che, qualora la resistenza delle pareti non sia adeguata, ne provocherà la rottura; su questo principio è basato il funzionamento delle mine.

Il gas d'esplosione, a elevata temperatura e pressione, si propaga nell'ambiente circostante sotto forma di un'onda d'urto, che in assenza d'ostacoli si espande come una superficie sferica centrata nel centro dell'esplosione. Incontrando degli ostacoli esercita su di loro una forza tanto maggiore quanto la superficie investita, e quanto più vicina al centro dell'esplosione [2].

L'effetto distruttivo di un'esplosione dipende da vari fattori tra cui la velocità dell'esplosione, il calore e i gas da lei prodotti, e chiaramente dalle pressioni realizzabili. Di conseguenza gli effetti prodotti da esplosivi d'uso militare e civile sono chiaramente differenti, avendo caratteristiche diverse in particolar modo gli esplosivi militari tra cui quelli plastici, hanno un enorme potere distruttivo legato soprattutto alla loro elevata velocità di detonazione, all'effetto prodotto dall'onda di pressione sviluppata dall'esplosione, e in misura minore agli effetti prodotti dalle schegge.

Le esplosioni chimiche sono suddivise in deflagrazioni, nelle quali la propagazione della reazione chimica d'esplosione è una forma di combustione che procede nel materiale a velocità subsonica, e detonazioni, nelle quali la reazione chimica d'esplosione non è una combustione ma una decomposizione diretta della molecola d'esplosivo, innescata direttamente dall'onda d'urto; la reazione d'esplosione procede quindi alla velocità del suono in quella particolare sostanza attraverso tutto il materiale, e la pressione e temperatura finale dei prodotti di reazione sono quindi molto più elevati.

2.2 Detonazioni e Deflagrazioni

La combustione dei materiali esplosivi causa la liberazione di grandi quantità di energia che crea un'onda d'urto. La diffusione a grande velocità dell'enorme quantità di gas prodotta dalla reazione chimica si accompagna a una fiammata, al rumore causato dallo spostamento dell'onda d'urto e al fumo [3]. Le materie esplosive, secondo la loro composizione chimica e la disposizione fisica delle loro molecole, imprimono al gas, una velocità di propagazione più o meno elevata. Pertanto l'analisi dell'onda d'urto è un'indicazione preziosa sulla velocità dei gas proiettati dall'esplosione. Inoltre un altro fattore da tenere in considerazione è il confinamento dell'esplosivo, poiché secondo il grado di confinamento le sostanze esplosive possono bruciare o esplodere. Anche le reazioni chimiche si sviluppano con velocità differenti in conseguenza di vari fattori come la temperatura, concentrazione dei reattivi, presenza di catalizzatori.

Allora si parlerà di “velocità esplosive” quando l'esplosione si sviluppa in tempi brevissimi, inferiori a quelli necessari affinché il calore di reazione possa trasmettersi al mezzo circostante per conducibilità e irraggiamento e che quindi si accumula nei gas prodotti, allo stato di energia cinetica.

Le velocità esplosive sono sempre alte ma possono variare fra loro anche di molto.

Le esplosioni che avvengono a velocità basse sono chiamate *deflagrazioni* (dette anche esplosioni di primo grado), mentre quelle corrispondenti ad alte velocità sono definite *detonazioni* (o esplosioni di secondo).

Le velocità di deflagrazione sono in genere dell'ordine delle centinaia di metri al secondo, mentre le velocità di detonazione sono comprese fra 1000 e 9000 [m/s]. Tuttavia i limiti della velocità di deflagrazione non possono essere definiti con precisione, in quanto dipendono da vari fattori; infatti oltre alla granitura delle polveri hanno influenza l'entità dell'innesco, la densità della carica, il diametro della carica, ecc.

In funzione di alcuni fattori, primo fra tutti la violenza dell'urto iniziale, la deflagrazione può tramutarsi in detonazione e così un esplosivo normalmente deflagrante, com'è la polvere nera, può detonare quando è fortemente innescato; viceversa la dinamite (detonante) può deflagrare se stimolata con un innesco troppo debole.

La differenza fra deflagrazione e detonazione non risiede solo nella velocità con cui procede il fenomeno chimico ma è importante considerare i due sistemi di propagazione sostanzialmente diversi.



Fig. 2.1 Deflagrazione

La deflagrazione [3] (mostrata in Fig. 2.1) è un fenomeno esplosivo che si propaga per conduttività termica dalla superficie esterna alla massa all'interno. La durata della reazione è inferiore per polveri a granulature fini (che hanno maggior superficie per unità di peso) per cui alle diverse granulature corrispondono diverse velocità di deflagrazione. Queste velocità molto inferiori a quelle di detonazione determinano effetti distruttori meno importanti (naturalmente a parità di massa).

La detonazione [3] (mostrata in Fig 2.2) è un fenomeno così violento che non può essere spiegato solo con il meccanismo della combustione e, infatti, essa si propaga con il meccanismo "dell'onda esplosiva". Nella suddetta onda sono associati un fenomeno fisico (onda di pressione o onda d'urto) e un fenomeno chimico (reazione di combustione, detta anche onda di combustione); i due fenomeni si sostengono a vicenda per cui sul fronte dell'onda esplosiva coesistono sia l'onda d'urto che la reazione chimica.



Fig. 2.2 Detonazione

Per inciso si pone l'accento sul fatto che la detonazione non è necessariamente un fenomeno di combustione, infatti, alcuni elementi nella detonazione non subiscono fenomeni di ossidazione, bensì una reazione di decomposizione. Nell'esplosione di miscele gassose si definisce "periodo d'inizio o inizio della detonazione" l'intervallo di tempo compreso fra l'istante in cui la miscela si accende e l'istante in cui ha inizio l'onda esplosiva.

Durante questo periodo la velocità della fiamma cresce molto rapidamente fino a raggiungere la velocità dell'onda esplosiva; un periodo d'inizio analogo si presenta nella detonazione degli esplosivi solidi.

Occorre fare molta attenzione nel caso in cui un esplosivo deflagrante detoni, oppure nel caso in cui un esplosivo detonante deflagri, perché in questi frangenti possono verificarsi numerose anomalie. Questi inconvenienti accadono quando tutta la carica, o una sua parte, non raggiunge il regime di detonazione, ma si sviluppa in un regime di deflagrazione, bruciando con velocità relativamente lente.

[4]

Gli esplosivi deflagranti sono ad azione relativamente lenta, quelli detonanti sono ad azione più rapida. Ne discende che un esplosivo deflagrante sarà preferibile quando si vuole ottenere un effetto di

spinta e non di frantumazione. Viceversa occorrerà un esplosivo detonante quando si vogliono imprimere alla massa azioni violente.

Quanto detto può essere così riassunto:

DEFLAGRAZIONE	DETONAZIONE
Innesco da una debole sorgente	Innesco da una sorgente violenta o a seguito di una deflagrazione
Velocità della fiamma lenta	Velocità della fiamma molto veloce (superiore ai 1500 metri al secondo)
L'onda di pressione precede il fronte della fiamma	L'onda di pressione è molto vicina al fronte della fiamma
Interazione fra l'onda della pressione e il fronte della fiamma	Velocità di propagazione della fiamma costante
Influenza della geometria del sistema	Indipendente dalla geometria
Il movimento dei gas segue il senso della propagazione	Assenza di movimento dei gas in propagazione rapporto con l'onda di detonazione

Tab 2.1 Differenze tra deflagrazione e detonazione

2.3 Classificazione dei materiali esplosivi

Gli esplosivi sono suddivisi in due categorie:

- esplosivi primari o innescanti
- esplosivi secondari.

Esplosivi primari

I normali esplosivi non esplodono per effetto di normali sollecitazioni meccaniche o per effetto del calore, ma bruciano o, al massimo, deflagrano. Per innescare l'esplosione occorre che si impieghino degli esplosivi estremamente sensibili alle azioni esterne e che detonino per effetto del calore o della percussione; essi sono solitamente contenuti in modesta quantità in piccoli tubetti metallici (detonatori).

Tra questi esplosivi primari i più usati sono di solito miscelati fra loro o con altre sostanze (fulminato di mercurio, l'azotidrato di piombo o d'argento, lo stinonato di piombo, il tetrazene, ecc).

Esplosivi Secondari

Questi esplosivi sono tradizionalmente distinti in militari e civili in base a varie considerazioni (costo, maneggevolezza, possibilità di lavorarli o fonderli in forme prestabilite, conservabilità, ecc). Non si deve però dimenticare che molti esplosivi militari finiscono poi sul mercato civile come esplosivi di recupero e vengono mescolati fra di loro o miscelati con esplosivi civili.

Noti esplosivi militari sono il tritolo (TNT) l'acido picrico (o Melinite, Ekrasite), la pentrite (PETN), il tetrile (CE, Tetralite), l'esogeno (Hexogene, T4, Ciclonite, C6); essi sono usati da soli o mescolati tra di loro in vario modo o con altre sostanze (ad esempio polvere d'alluminio) che ne migliorano ulteriormente le prestazioni. [2]

Quando gli esplosivi sono mescolati con sostanze plastiche quali vaselina, cere o polimeri sintetici, si ottengono gli esplosivi plastici, i quali sono gelatinizzati in modo da ottenere le gelatine, di consistenza gommosa o pastosa. Proprio in questa categoria si riscontra uno degli esplosivi più potenti e cioè la gelatina esplosiva formata per oltre il 90% di nitroglicerina e per il resto da cotone collodio. Negli Stati Uniti sono noti gli esplosivi plastici a base di T4 e noti con il nome di (T4 e vaselina, olio minerale), C2 (T4 e nitrocellulosa), C3 (T4, nitrocellulosa, binitrotoluolo e tetrile), in cui la lettera C sta per "compound" o "composition".

In campo civile si impiegano esplosivi da mina a base di nitrato d'ammonio o di potassio (specie quali esplosivi di sicurezza per miniera) o gelatina gomma a base di nitroglicerina e cotone collodio, o dinamiti a base di nitroglicerina e sostanze inerti. Più raramente esplosivi a base di clorato di potassio (chedditi). Per lavori di poca importanza si usa ancora la polvere di mina formata da polvere nera in grossi grani. La polvere nera finemente granulata, viene usata ancora in armi ad avancarica e per usi pirotecnici [2]. Fra tutti gli esplosivi secondari, quelli che possono presentare pericoli nel maneggio e nel trasporto sono le gelatine e le dinamiti contenenti la nitroglicerina poiché questa può trasudare dal composto (specialmente per effetto del gelo) e quindi esplodere anche per urti modestissimi.

Caratteristiche generali dei più comuni materiali esplosivi

La prova più usata per determinare la potenza di un esplosivo consiste nel farlo esplodere entro un grosso blocco di piombo (blocco di Trauzl) e nel misurare poi il volume della cavità creatasi.

Generalmente in campo militare, e per opere di demolizione, si preferisce calcolare il coefficiente di equivalenza rispetto al tritolo, posto eguale ad 1.

Si avrà in questo caso:

Tritolo, acido picrico, miscele a base di dinamite, "gun-cotton"	1.0
Fulminato di mercurio	0.4
Tetrytol, tritolite,	0.9
Nitroammido, dinamite	1.2
C2 e C3, T4,	2.1
Polvere nera da mina	2.3
Gelatina esplosiva	2.6
Pentolite	4.3
Nitrogricelina	5.8

Tab 2.2 Coefficiente equivalenza TNT

I volumi di gas prodotto possono essere pari a 10.000 - 30.000 volte quelli iniziali con temperature fino a 3000 [°C] gradi e le pressioni raggiungibili arrivano normalmente attorno alle 20.000 [atm] con picchi di 150.000 [atm].

L'esplosione dà luogo a un'onda d'urto o onda di pressione, con effetti a breve e a lunga distanza, nel primo caso si crea un'onda di pressione dipendente dal mezzo circostante che si propaga creando una sovrappressione, seguita da una fase più lunga di depressione ("risucchio o retrograda") che naturalmente non può essere superiore alla pressione atmosferica di un [bar]. L'onda di pressione che incontra un oggetto produce delle lesioni che possono poi essere aggravate dall'onda di risucchio; ad esempio un muro può essere lesionato dall'onda esplosiva e poi fatto cadere dall'onda retrograda. L'onda di risucchio creata dall'aria che ritorna violentemente verso il centro dell'esplosione può dar luogo a una successiva onda rimbalzante all'indietro, ma di non rilevante potenzialità.

Quando l'esplosione avviene nel terreno, si creano in esso delle vibrazioni con onde d'urto simili a quelle di un terremoto, che possono cagionare lesioni soprattutto agli edifici o che possono creare danni a persone a contatto con la superficie investita; per questo motivo personale addestrato sa che nel caso in cui si dovesse trovare a breve distanza da un'esplosione deve stendersi a terra avendo però l'avvertenza di reggersi solo sulle punte dei piedi ed i gomiti, in tal modo evita sia lo spostamento d'aria, che l'ondata di calore e l'onda d'urto trasmessa dal terreno.

A breve distanza invece, l'esplosione agisce direttamente con onde d'urto pulsanti che attraversando l'oggetto vengono riflesse dalle sue superfici libere così che si creano in esso sovratensioni che ne provocano la rottura. Questo effetto è sfruttato particolarmente nelle granate anticarro in cui una carica di esplosivo è fatta esplodere contro la blindatura; ciò provoca il distacco di porzioni del lato interno ad essa con proiezione devastante di frammenti. All'esplosione segue normalmente una fiammata con possibile proiezione di corpi incandescenti che possono provocare incendi nonché una

irradiazione di calore che può essere la causa di ustioni da irradiazioni (ustioni da lampo) e di possibili incendi (può infiammare gli abiti di persone presenti in un certo raggio).

Nel caso di esplosivo caricato in contenitori metallici (mine, bombe, proiettili, ordigni esplosivi), o di bombe chiodate create legando grossi chiodi attorno ad un nucleo di esplosivo, vi è l'ulteriore effetto della proiezione dei frammenti metallici di varie dimensioni (schegge), ad una velocità che varia dai 1000 ai 1500 [m/s]; la distanza di proiezione varia naturalmente a seconda delle dimensioni della scheggia, del suo peso e della sua forma. Frammenti minuti ma aventi elevata velocità possono cagionare lesioni più ampie di quelle prevedibili.



Fig 2.3 Proiezione di frammenti Principali

2.4 Caratteristiche degli ordigni esplosivi

2.4.1 Inneschi

Gli inneschi possono essere realizzati con spolette, corde di detonazione, micce d'accensione o detonatori, in grado di provocare l'esplosione nei tempi e nei modi desiderati; molti di questi elementi sono sufficientemente piccoli da poter essere facilmente nascosti in un veicolo e quindi passare inosservati a un controllo.

In alcuni casi l'innescamento di un esplosivo può indurre a una reazione a catena, dovuta all'innescamento successivo d'altri esplosivi nelle vicinanze. Ciò non sempre avviene, giacché questo fenomeno è vincolato da una serie di fattori tra cui la distanza e la sensibilità degli esplosivi, la violenza dell'esplosione e il mezzo attraverso il quale si propaga.

La scelta del sistema d'innescamento dipende non solo dal tipo di danno che si vuole provocare ma anche dal tipo e dalla quantità d'esplosivo utilizzato.

Fatta eccezione per la polvere nera che può facilmente essere innescata mediante l'accensione di una miccia, tutti gli altri esplosivi hanno bisogno di un detonatore.

La detonazione è un fenomeno chimico-fisico costituito da un'esplosione che si propaga a una velocità supersonica costante, che genera un'onda d'urto il cui campo di velocità a valle può essere ancora supersonico (*detonazione forte*) oppure subsonico (*detonazione debole*). [6]

La velocità di detonazione è in funzione della densità del solido impiegato per la costruzione della carica esplosiva. Superato un certo limite di densità, la velocità di detonazione tende a diminuire a causa delle difficoltà con le quali si sviluppano le reazioni chimiche, che sono artefici della detonazione stessa.

I detonatori utilizzati per innescare gli esplosivi normali sono solitamente dei tubi sottili d'alluminio o di rame, contenenti vari tipi d'esplosivi primari e secondari presenti in piccole quantità, che li rendono molto sensibili alle azioni esterne tra cui percussioni, shock e calore, per tale motivo vanno maneggiati con cautela e mai trasportati insieme all'esplosivo.

Gli esplosivi primari sono molto sensibili agli urti, agli sfregamenti e al calore, proprio; queste caratteristiche sono sfruttate per creare detonatori i quali si utilizzano per innescare l'esplosivo secondario.

Gli esplosivi secondari, tranne qualche eccezione, non sono sensibili alle sollecitazioni meccaniche e termiche, e pertanto si possono definire stabili.

I detonatori possono essere innescati a loro volta tramite uno shock non elettrico, questi ultimi si ottengono mediante l'accensione di una miccia vincolata alla sua estremità o utilizzando un segmento di corda di detonazione, altresì da un detonatore elettrico costituito da un filamento imbevuto in una miscela incendiaria, che è resa incandescente al passaggio della corrente elettrica prodotta da una particolare batteria definita esploditore. [6]

Mentre i detonatori non elettrici sono istantanei, quelli elettrici possono essere dotati di un dispositivo a tempo basato su un segnale elettronico che agisce a distanza, prodotto ad esempio da un semplice telefono cellulare, o basato su un periodo d'innescamento prefissato.

Le spolette a tempo sono per lo più utilizzate per la detonazione d'ordigni militari (Bombe a Mano). Una gran varietà di detonatori è facilmente reperibile in commercio e con varie dimensioni, tra cui le corde di detonazione dette anche micce ordinarie a lenta combustione, utilizzate per l'innesco non elettrico dei detonatori stessi o d'altri esplosivi a debita distanza e con sufficiente ritardo di tempo. Queste sono realizzate con una polvere nera finissima che non emette odori identificabili, avvolta con un filo in una pellicola o in uno strato di plastica. Le stesse possono anche essere realizzate sostituendo alla polvere nera un esplosivo secondario ad alta velocità di detonazione, in questo caso si parla di "miccia detonante", usata soprattutto per la detonazione contemporanea di più cariche disposte distanti l'una dalle altre.



Fig. 2.4 Detonatori non elettrici a connettori ritardanti e detonatori elettrici

2.4.2 Dispositivi Esplosivi

E' possibile individuare diverse tipologie di esplosivi che si contraddistinguono per differenti meccanismi d'innescò, cariche esplosive e contenitori.

Secondo i loro impieghi, tali ordigni si distinguono in tre diverse categorie:

- Militari
- Commerciali o Civili
- "Improvvisati"

Gli *Esplosivi Militari*, come il trinitrotulene (TNT) o comunemente chiamato tritolo e i vari esplosivi plastici tra cui il C-4, possono essere usati singolarmente o mescolati tra loro o con altre sostanze, tra cui la polvere d'alluminio, per migliorarne le prestazioni. Lo stesso esplosivo plastico molto diffuso negli Stati Uniti si ottiene proprio mescolando esplosivi secondari con sostanze plastiche quali ad esempio i polimeri sintetici. Questi esplosivi sono caratterizzati da una densità simile a quella dell'acqua, sono tolleranti alle condizioni d'umidità e resistenti alle temperature estreme, si presentano sotto forme e colori diversi fortemente dipendenti dai plastificanti e i coloranti utilizzati durante il processo di produzione. Data la loro tolleranza agli ambienti umidi, possono essere facilmente nascosti in liquidi acquosi, facendo attenzione a evitare i solventi organici nei quali potrebbero dissolversi. L'innescò avviene singolarmente o tra più carichi esplosivi attraverso l'uso di uno o più "blasting cap" (cappuccio esplosivo il quale non è altro che una piccola carica di esplosivo utilizzato generalmente per innescare un dispositivo di maggiori dimensioni).[5]

E' stato provato che molti attacchi terroristici siano stati realizzati proprio avvalendosi d'ordigni militari, con la possibilità di nasconderli in solventi organici, (come il gasolio), a patto di isolare completamente l'esplosivo dal solvente stesso; il beneficio che se ne trae è quello di confondere l'odore dell'esplosivo rendendolo quindi meno intercettabile ai controlli di sicurezza tenuti dalle unità cinofile.

Gli *Esplosivi Commerciali* d'uso civile si distinguono per dimensione, colore e consistenza, tra solidi e gelatinosi, tra questi maggiormente impiegati sono gli esplosivi da mina a base di Nitrato di Potassio o d'Ammonio, e la gelatina esplosiva formata per oltre il 90% da Nitroglicerina e la restante parte da Cotone Collodio. Questi ultimi si dimostrano tra i più pericolosi, poiché i rischi sono connessi soprattutto al trasporto e alla lavorazione, essendo, infatti, la Nitroglicerina, un materiale esplosivo molto suscettibile agli urti [5].

Tali esplosivi hanno una densità molto variabile, usualmente simile a quella dell'acqua, ciò li rende tolleranti al contatto con l'acqua stessa, sebbene alcuni esplosivi commerciali non possano essere detonati in completa immersione in acqua o in altri solventi. La detonazione avviene con un singolo "blasting cap" poiché l'innescò di un solo contenitore di materiale esplosivo può provocare la detonazione di altri a lui adiacente (Reazione a Catena) [5].

Gli esplosivi commerciali non hanno una vita utile durativa, soprattutto se esposti per lunghi periodi a elevate temperature, le quali possono provocare la fuoriuscita d'oli esplosivi o d'altri elementi.

Gli *Esplosivi "Improvvisati"*, sono realizzati clandestinamente e artigianalmente, il loro potere distruttivo è funzione dei materiali impiegati e delle abilità tecniche degli stessi produttori. Tali ordigni presentano notevoli difficoltà, può infatti verificarsi una detonazione prematura o incompleta, oltre che la fuoriuscita di un forte vapore acido che può corrodere il contenitore metallico dell'esplosivo o decomporsi quando esposto al calore. I contenitori degli esplosivi maggiormente utilizzati sono tubi d'acciaio o di plastica con entrambe le estremità tappate, solitamente di grandi dimensioni e per tanto facili obiettivi delle tecniche d'ispezione, e per tale motivo sono usualmente nascosti negli scompartimenti di un veicolo [5].



Fig.2.5 Blasting cap

2.4.3 – Materiali Esplosivi Semplici e Composti

I materiali esplosivi, utilizzati per la fabbricazione di ordigni esplosivi sono di vario tipo. Questi possono essere distinti tra cariche concentrate e allungate a seconda che siano ammassate in modo globulare o disposte in tubi esplosivi. Possono essere interne o esterne a seconda che siano disposte in cavità realizzate nel corpo da far esplodere o semplicemente appoggiate su di essi. Si contraddistinguono in funzione delle loro caratteristiche chimiche, fisiche, del colore e dell'odore. Variano soprattutto da un luogo all'altro in funzione della loro reperibilità.

Le caratteristiche chimiche e fisiche dei materiali esplosivi incidono chiaramente sui loro vari impieghi, tra cui quelli militari e purtroppo anche quelli terroristici. Tali caratteristiche influenzano la scelta operata dai terroristi i quali cercano di adoperare materiali e miscele che rendano l'ordigno di difficile individuazione da parte degli organi addetti ai controlli di sicurezza. [7]

E' possibile distinguere diversi esplosivi utilizzati per la fabbricazione di ordigni, suddivisi in due grandi categorie:

- Esplosivi semplici
- Esplosivi composti

Esplosivi Semplici

- Il **TNT** (trinitrotulene) è il più comune tra gli esplosivi utilizzati per la produzione d'armi militari, si presenta sotto forma di polvere cristallina o a fiocchi, di colore variabile tra il giallo e il marrone acceso, se esposto all'ossigeno e ai raggi ultravioletti, può subire uno scolorimento e una riduzione di stabilità all'impatto, data la sua composizione può essere sciolto per fargli assumere altre forme, è assolutamente inodore e può essere utilizzato come componente per molti altri esplosivi.
- **NITROCELLULOSA** è un materiale altamente infiammabile costituito da cellulosa e acido nitrico. È più stabile e brucia più velocemente della polvere nera emettendo gas molto caldi. Esplose quando innescata, ed è solitamente impiegata per la produzione di propellente o più semplicemente per il lancio di proiettili in armi leggere; se asciutta è molto sensibile agli impatti, all'attrito e alle scintille.
- **NITROGLICERINA** è un esplosivo molto potente tra i maggiori elementi utilizzati per la produzione d'ordigni. Allo stato puro si presenta come un liquido pesante di colore chiaro con la stessa consistenza di un olio; può essere assorbita dal corpo mediante inalazione o a contatto con la pelle inducendo stordimento e forte emicrania, oltre ad emettere fumi molto tossici durante la sua combustione.

- **RDX**, conosciuto anche come (cyclonite, esogeno o T4). È una nitroammina, ed è un materiale esplosivo ampiamente usato dai militari, si presenta come un solido cristallino di colore bianco. E' usato solitamente in miscele con altri esplosivi e plastificanti, oppure desensibilizzanti. È un esplosivo stabile e si può conservare per lungo tempo se si mantengono temperature e umidità ottimali per la conservazione. E' prodotto facendo reagire l'acido nitrico concentrato sull'esammina, nitrato d'ammonio, acido acetico, e anidride acetica. Comincia a decomporsi a circa 170 [°C], brucia piuttosto che esplodere, per farlo esplodere richiede un detonatore, ed è molto sensibile quando cristallizzato a temperature inferiore ai -4 [°C]. [7]

Esplosivi Composti

- **DINAMITE** è un esplosivo commerciale a differenza dei primi tre, che sono invece d'uso militare, realizzata con materiale poroso imbevuto con Nitroglicerina e avvolto in un foglio di cera, in un cartone o in una pellicola di plastica di colore variabile secondo il produttore, solitamente confezionata come un tubo di diverso diametro. La Nitroglicerina impiegata per la sua realizzazione varia in percentuali comprese tra il 5% e il 90%, conferendogli un forte odore che può provocare immediati stordimenti; è solitamente innescata con una corda di detonazione o con un blasting cap.
- **POLVERE NERA** è un esplosivo chimico tra i più vecchi conosciuti. Si realizza mediante una miscela di polveri tra cui Nitrato di Potassio o Nitrato di Sodio, Carbone di Legna e Zolfo. Il suo colore varia tra il nero e il marrone e appare sottoforma di polvere sottile o granulare. E' solitamente arricchita con della grafite che ha il compito di ridurre l'attrito tra i singoli granuli che potrebbe anche provocarne l'innescò accidentale, poichè questo materiale risulta molto sensibile all'attrito oltre che al calore, all'impatto e alle scintille, ciò fa di questo materiale esplosivo uno dei più pericolosi da maneggiare. Inoltre, essendo sensibile all'elettricità, pertanto deve essere lavorato con attrezzi di legno o di plastica a bassa conducibilità elettrica. Deve essere conservata asciutta data la sua sensibilità all'acqua e all'umidità che ne possono compromettere il corretto innescò.
- **PENTOLITE**. Esplosivo tra i più potenti (8.400 m/s circa), ma molto sensibile agli urti, si presenta di colore bianco chiaro. Viene utilizzato nelle miccie detonanti e nella preparazione del C4 e della Pentrinite, una miscela molto dirompente di Pentrite e Nitroglicerina. E' utilizzato spesso nella creazione di munizioni e armamenti pesanti.
- **C-4** noto anche come esplosivo al plastico per la sua composizione e modalità d'applicazione, è anch'esso un esplosivo usato per scopi militari, in particolar modo come carico per le demolizioni. E' costituito da un materiale esplosivo (RDX) arricchito con degli additivi che lo rendono simile a uno stucco facile da modellare. La peculiarità di quest'esplosivo è chiaramente la sua flessibilità che lo rende facile da modellare e da applicare su superfici irregolari, oltre che a un'elevata velocità di detonazione.
- **SEMTEX** è un esplosivo plastico al pari del C-4 prodotto originariamente nell'Europa dell'Est, è costituito da due esplosivi il RDX e il PETN, arricchiti anch'essi con additivi che lo rendono flessibile e malleabile, è assolutamente inodore e caratterizzato da un colore che varia tra il giallo e il nero, preso singolarmente è un materiale relativamente innocuo che può facilmente essere

manipolato. Per la sua detonazione si usa solitamente un blasting cap o una corda di detonazione. La sua vita utile si aggira intorno ai dieci anni oltre i quali inizia a perdere la sua flessibilità diventando friabile.

- **ANFO** è composto di una miscela di Nitrato d'Ammonio e Oli Combustibili. Il Nitrato è solitamente di colore bianco, ha una forma simile a quella di un fertilizzante ed è spesso imballato in contenitori impermeabili che servono a evitare che possa perdere il suo potere e sensibilità all'aumentare dell'umidità. Alcune variazioni si possono ottenere mescolando il Nitrato d'Ammonio con Enitrometano o con lo Zolfo. Ha una densità pari a circa l'85% paragonato alla densità dell'acqua, non è sensibile alle temperature estreme e ciò nonostante deve essere tenuto asciutto e non può quindi essere nascosto in acqua [7].

Si riporta di seguito, una tabella illustrativa dei parametri d'alcuni esplosivi classici sopra elencati [6]:

Tab. 2.3 Parametri che caratterizzano alcuni materiali esplosivi.

Esplosivo	Volume specifico di esplosione V [l/Kg]	Calore specifico di esplosione Q [Kcal/Kg]	Temperatura di esplosione T [°C]	Velocità di detonazione D [m/s]
Nitroglicerina	717	5800	4110	8000
Esogeno	908	1500	3850	8300
TNT	728	1000	2950	6800
Fulminato di mercurio	304	368	4810	5400
Dinamite(62%)	634	1200	4040	6600

2.5 Mine terrestri

2.5.1 Cenni storici

Le mine terrestri sono state introdotte durante la prima guerra mondiale per contrastare una delle principali novità belliche dell'epoca, il carro armato. Le mine antiuomo furono sviluppate inizialmente come arma complementare agli ordigni anticarro, successivamente divennero vere e proprie armi difensive, utilizzate per ostacolare e ritardare la avanzata degli eserciti nemici. Gli sviluppi del settore degli armamenti negli anni 60 hanno reso possibile il lancio di mine anticarro e antiuomo tramite mortai, artiglierie e aerei, estendendone così l'effetto devastante ed offensivo e trasformandole in armi d' attacco.[8]

Fino alla seconda guerra mondiale la maggior parte delle mine terrestri aveva rivestimenti in metallo, ma dagli anni 50 in poi lo sviluppo di plastiche stabili e durevoli ha sostituito completamente il metallo come materiale di rivestimento, rendendo le mine in pratica invisibili ai rilevatori magnetici. Durante la seconda Guerra Mondiale e inseguito fino ai recenti conflitti, è stata escogitata una nuova tecnica di guerra definita anche "guerra d'arresto", consistente nell'impiego di un numero considerevole di mine sia anticarro e antiuomo, disposte in una determinata zona di terreno, la quale per ragioni tattiche si vuole difendere e interdire agli uomini e ai mezzi nemici.

Si creano così veri e propri campi minati di dimensioni e caratteristiche differenti in funzione delle diverse caratteristiche sia topografiche che strategico belliche. Una volta schierato il campo minato, questo deve essere segnalato mediante appositi segnali.

I campi minati durante la loro posa sono generalmente registrati accuratamente e topograficamente individuati, in maniera da consentire alle truppe amiche che operano in quel settore la conoscenza esatta dell'ubicazione, l'estensione e composizione del campo minato del settore stesso, nonché le posizioni e gli andamenti dei varchi, (porzioni di terreno non minati all'interno del campo minato) e, ove occorra, consentire la celere e sicura rimozione dei campi stessi.

Dal responsabile che mette in opera un campo minato, deve essere compilato uno schizzo nel quale vengono segnati, possibilmente in scala, la disposizione delle mine ed il loro tipo, nonché l'orientamento rispetto ai punti indicatori e segnali topografici.

È chiaro che queste procedure non sono sempre attivate ma succede spesso che ci siano campi minati senza che si sappia nulla sulla loro disposizione, grandezza e schieramenti degli ordigni.

2.5.2 Definizione “mina terrestre”

La mina terrestre è un ordigno esplosivo costruito per opporsi al movimento del nemico; deve possedere dei requisiti tali da soddisfare determinate caratteristiche: deve essere sicura, economica, di facile immagazzinamento e impiego, affidabile, efficace e resistente alle azioni sminanti.

Una mina è costituita da:

- parti essenziali: formate dal congegno di accensione e la carica esplosiva.
- parti accessorie: involucro, dispositivo di taratura, dispositivo di sicurezza, congegno anti maneggio.

Il congegno di accensione è costituito dall'insieme accenditore e detonatore; esso entra in funzione sotto l'azione dell'adatta causa esterna, provocando l'esplosione della mina. La carica esplosiva è la quantità di esplosivo contenuto nella mina.

L'involucro può essere in legno, ferro, resina sintetica etc. [8]

L'attivazione dell'ordigno è regolata da un dispositivo di taratura il quale determina il funzionamento della mina, solo quando l'intensità dell'adatta causa esterna raggiunge un valore minimo prestabilito. Il dispositivo di sicurezza è l'organo che, quando inserito, impedisce in ogni caso il funzionamento della mina.

Esistono due tipi di dispositivi antimaneggio:

- Congegno anti rimozione: provoca l'esplosione della mina qualora si tenti di rimuoverla (non è presente nelle mine anti uomo).
- Congegno anti disattivazione: provoca l'esplosione della mina quando si tenti di disattivarla.

2.5.3 Dati tecnici delle mine terrestri

Le mine terrestri si suddividono in due categorie in funzione della loro destinazione, dimensioni e quantità di esplosivo che vi è contenuto:

- le mine antiuomo AP (Anti-Personnel) sono di piccola taglia, contengono da 10 a 250 [g] di esplosivo e scoppiano a una pressione compresa tra 0,5 e 50 [kg]
- le mine anticarro AT (Anti-Tank) sono di dimensioni maggiori, contengono da 2 a 15 [kg] di esplosivo e scoppiano a una pressione compresa tra 100 e 300 [kg]

Elenchiamo in seguito una classificazione delle mine terrestri AP antiuomo:

- Mine a pressione

Peso: 50-500 [g]

Lunghezza-Diametro: 40-180[mm]

Peso dell'esplosivo: 30-200 [g]

Pressione operativa: 2-20 [kg]



Fig. 2.6 1 (A-200) 2 (GMMI-43) 3 (PDM-57) 4 (ARTISANAL)
5 (N°4) 6 (ARTISANAL/B) 7 (PMA-2) 8 (PPM1-NA1)

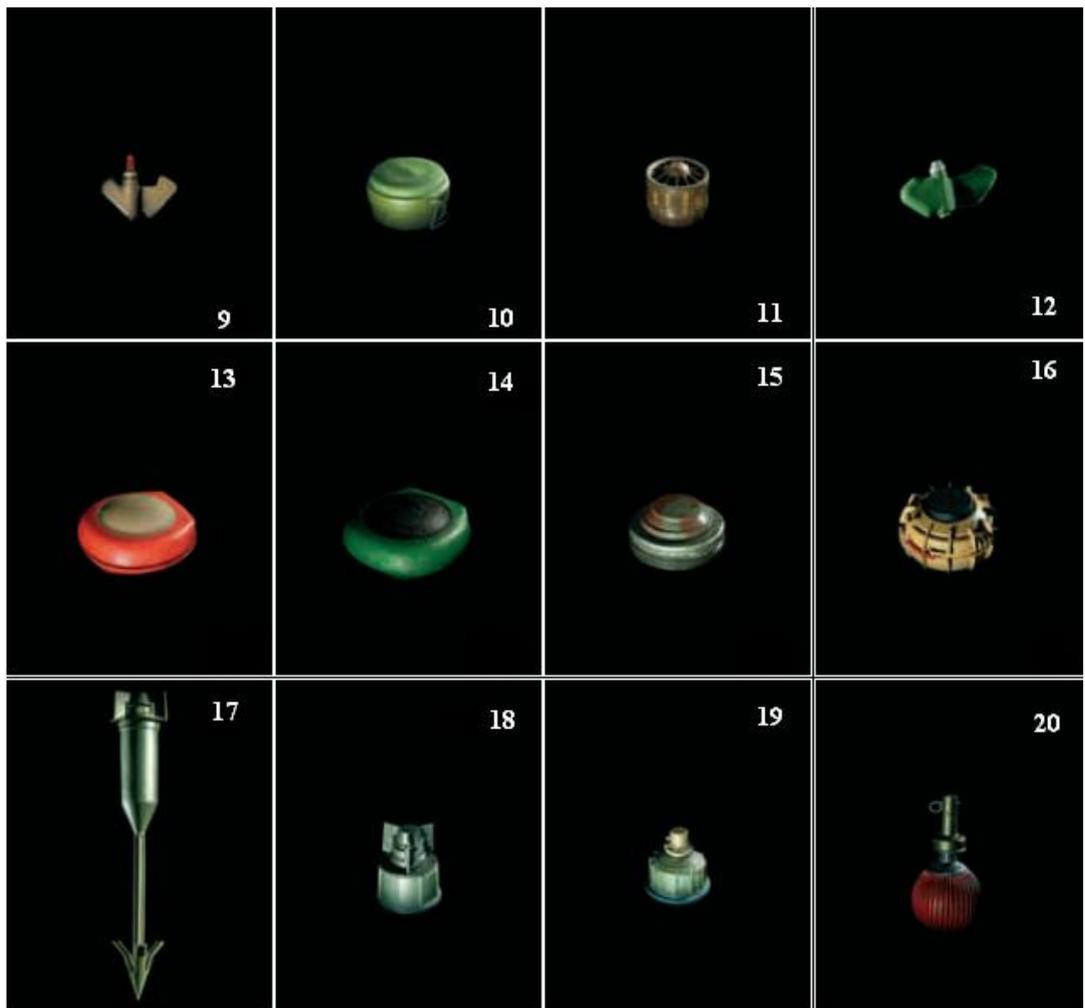


Fig. 2.7 9 (BLU44/B) 10(TYPE-72) 11 (R2-M2) 12(PFM-1) 13 (P-5) 14 (SB-33) 15 (MAUS-1)
1) 16 (PMA-2) 17 (PMA-2) 18 (PMA-2) 19 (PMA-2) 20 (PMA-2)

Il tipo più semplice di mina anti-uomo è progettato per detonare su pressione, e danneggiare o uccidere un uomo attraverso la semplice onda d'urto causata dall'esplosione. L'onda d'urto applica una forte pressione verso l'alto che creerà danni in modo più o meno grave (in funzione della potenza dell'esplosivo e del tipo di terreno in cui la mina è sepolta). A questo danno principale si aggiungeranno quelli secondari provocati dal terreno e dai sassi scagliati verso l'alto dall'esplosione. La mutilazione, con perdita del piede o addirittura di entrambi gli arti, è uno dei danni più frequenti generati da questo tipo di ordigno. Queste mine sono spesso impermeabili e realizzate in materiale plastico. Sono collocate sul terreno a poca profondità sotto la superficie di terreno.[8]

- Mine antipersona a frammentazione:

Peso: 1-5 [kg]

Diametro: 60-130 [mm]

Peso dell'esplosivo:100-500 [g]

Pressione operativa: 1-25 [kg]

Raggio letale: 10-30 [m]

Efficacia:20-100 [m]

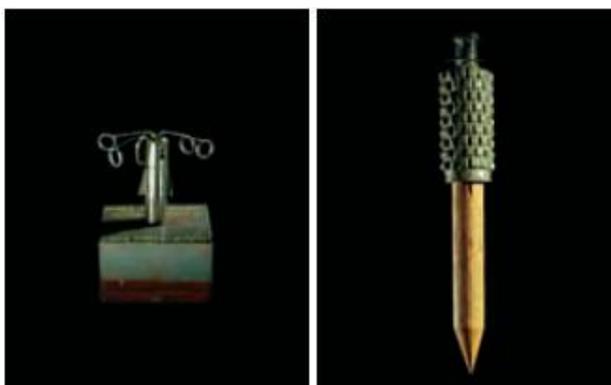


Fig. 2.8 Mine a frammentazione (MAUS-1MIAP-51)



Fig. 2.9 M-16 e v-69 Mine a frammentazione saltanti.

La maggior parte delle mine antipersona a frammentazione “saltanti” sono attivate da un filo a trappola e hanno due detonatori: uno per accendere il propellente che fa sollevare in aria un involucro interno (solitamente da 0,5 a 1,5 m al di sopra del terreno) e un altro per l’attivazione della carica principale durante il volo. I modelli più vecchi utilizzavano lo stesso involucro della mina per la produzione dei frammenti; i modelli più recenti presentano frammenti metallici preformati all’interno (spesso collocati nella resina). Poiché la maggior parte dei modelli deve essere interrata, gli ordigni sono solitamente impermeabili.

- Mine antipersona a frammentazione direzionali:

Peso: 1.5-25 [kg]

Lunghezza-Diametro:110-450 [mm]

Peso dell’esplosivo: 200 [g]-12 [kg]

Forza operativa:1-10 [kg]

Raggio letale: 10-100 [m]

Efficacia: 30-200 [m]



Fig. 2.10 M-18 mine a frammentazione direzionali

In generale, le mine antipersona a frammentazione direzionali sono attivate da un filo a trappola o a distanza tramite un sistema elettrico, il che le rende ideali per le imboscate. Ci sono due tipologie di questo genere di mine: i modelli rettangolari tipo Claymore e quelli rotondi a faccia concava. I frammenti preformati, solitamente cuscinetti a sfere o frammenti metallici, sono incorporati nell’involucro della mina. Entrambe le tipologie possono essere collegate insieme in formazione a “margherita” per ottenere la massima letalità.[8]

- Bombe a grappolo e sottocariche

La capacità distruttiva di una bomba a grappolo, nota anche come “cluster bomb”, dipende dalle sottocariche che contiene. Si tratta di piccoli ordigni (bomblet), i quali possono essere mine o granate riempiti di esplosivo che, secondo il modello, possono essere utilizzati come armi antipersona, anticarro, a doppia funzione, incendiarie o chimiche. Le sottocariche possono essere indirizzate sull’obiettivo da velivoli, missili, razzi o proiettili di artiglieria.

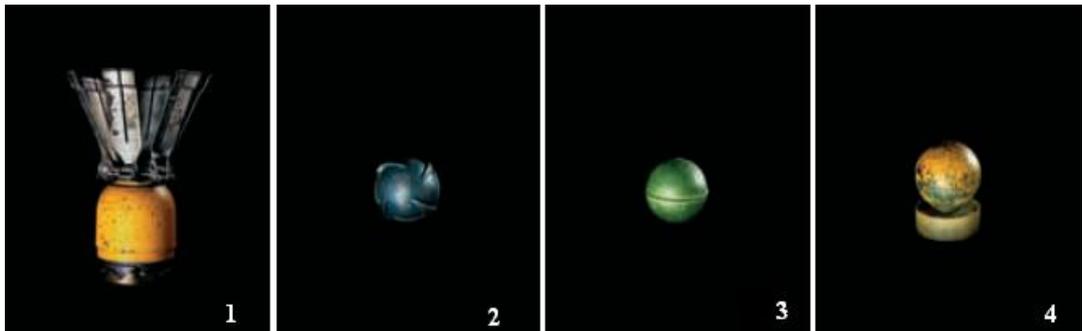


Fig. 2.11 1 (BLU-3/B) 2 (BLU-26/B) 3 (ZAB-500) 4 (BLU24/B)



Fig. 2.12 1 (F-1) 2 (BLU-97) 3 (A0-2.5 RTM) 4 (KB-1) 5 (BLU-77/B) 6 (M-39)

- Mine anticarro:

Le mine anticarro a differenza delle mine antiuomo richiedono che il mezzo sia a una distanza molto breve per garantire il massimo danno, da qui si sono studiate due diverse tipologie d’innesco; la prima si basa sulla pressione che il mezzo deve esercitare sulla mina, la seconda sfrutta effetti magnetici nel momento in cui i mezzi corazzati sovrastano l’ordino.

Considereremo le mine anticarro AT di fabbricazione italiana (vietata la produzione dal 1994 grazie al trattato di Ottawa) denominata VS-N la quale si differisce in tre modelli in funzione delle diverse caratteristiche:

La VS-2.2, VS-3.6 e SH-55 sono mine anticarro, presentano un involucro in plastica e hanno la particolarità di possedere una minima percentuale di contenuto metallico, che le rende invisibili al metal detector.

La VS-2.2 e la VS-3.6 possono anche essere lanciate dagli elicotteri. La VS-2.2 e la VS-3.6 sono essenzialmente simili, la VS-3.6 ha dimensioni maggiori, la SH-55 è ancor più grande ed ha una forma più arrotondata. Le mine sono di colore verde oliva o sabbia e di forma circolare. La VS-2.2 e la VS-3.6 consistono in un involucro principale definito a "costole", contenente la carica principale e contengono un detonatore circolare di tipo VS-N, dislocato alla sommità della carica. La SH-55 è più grande, l'involucro non presenta il motivo "a costole" e utilizza anche essa lo stesso tipo di detonatore il VS-N.

Il VS-N è un detonatore a pressione, nel momento in cui viene innescato esercita una pressione su di un diaframma, che a sua volta agisce su di un percussore, fino a che la sfera di rilascio è spinta in una cavità. Gli shocks da sovrappressione sono troppo rapidi per gonfiare il diaframma, questo richiede infatti una pressione graduale, fornendo una maggior resistenza agli urti. La potenza esplosiva di questi ordigni può creare un'onda d'urto capace di penetrare la corazza di veicoli blindati. Questa tipologia di mine è stata utilizzata sia in Iraq e Kuwait, Afghanistan.



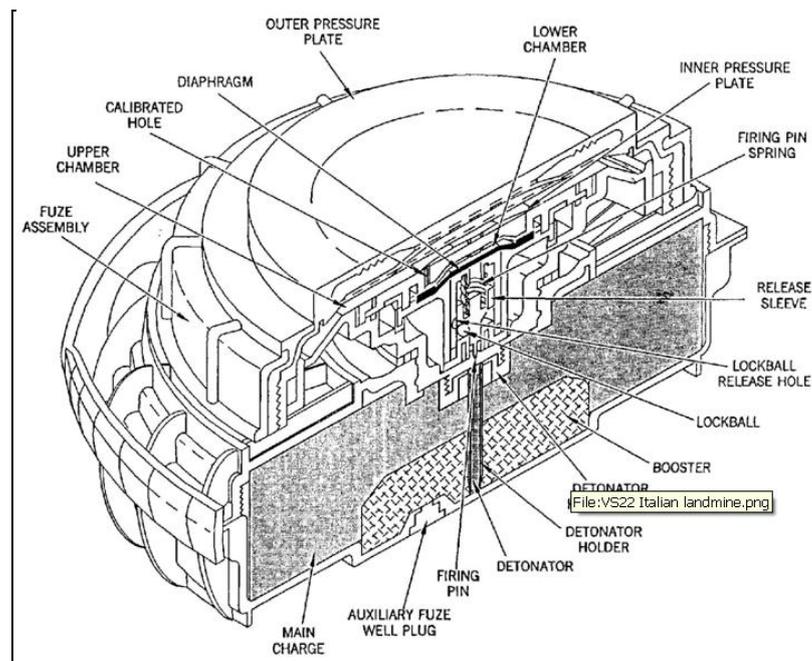
Fig. 2.13 Una mina VS-2.2 trovata in Iraq nel 2006.

Tab. 2.4

<i>Mine</i>	<i>VS-2.2</i>	<i>VS-3.6</i>	<i>SH-55</i>
<i>Peso</i>	3.5 [kg]	5 [kg]	7.3 [kg]
<i>Contenuto esplosivo</i>	[2.2] kg di Composizione B	[4] kg di Composizione B	5.5 [kg] di Composizione B
<i>Diametro</i>	230 mm	248 mm	280 mm
<i>Altezza</i>	115 mm		122 mm
<i>Pressione operativa</i>	180 a 220 kg		

Composizione B si tratta di una miscela in percentuali specifiche di Tritolo (TNT) e RDX. Il risultato ottenuto é un tipo di esplosivo plastico più potente del tradizionale tritolo e di costo comunque contenuto.

Sezione mina anticarro VS-2.2



2.6 Tolleranze umana

2.6.1 Tolleranza umana alle pressioni generate dallo scoppio

La resistenza di un essere umano all'onda d'urto generata dallo scoppio di un'esplosione è relativamente alta. Tuttavia, la posizione della persona (in piedi, seduta, disposta frontalmente o di spalle allo scoppio) come anche la forma della parte anteriore dell'onda (molto veloce, lenta o che aumenta passo dopo passo) sono fattori importanti per la valutazione delle ferite inferte dall'esplosione. Le prove di un'esplosione hanno indicato che la tolleranza umana all'impatto con un'onda d'urto varia con l'intensità e la durata della sovrappressione cioè, la tolleranza per i carichi generati da uno scoppio di breve durata è significativamente superiore a quella generata per carichi di lunga durata. [9]

Le prove hanno inoltre indicato che i tessuti che contengono "aria", come i polmoni, possono essere considerati come gli organi critici nelle lesioni legate all'iterazione corpo-onda d'urto. Questo perché la causa principale della morte di una persona è strettamente legata al rischio che si creino bolle d'aria all'interno del sistema vascolare dagli alveoli dei polmoni danneggiati dall'impatto. I livelli di pressione che definiscono la soglia minima e massima di un'emorragia ai polmoni è rispettivamente di 200-280 [KPa] la soglia minima, e 550 [KPa] la soglia massima mentre la soglia relativa alla morte per danni ai polmoni è all'incirca 650-850 [KPa].

Organi critici o eventi	Massima pressione effettiva
Rotture timpani	
Soglia di danno	30 [Kpa]
50 %	100 [Kpa]
Danno Medio	
Soglia	200-280 [Kpa]
50 %	550 [Kpa]
Danno letale	
Soglia	700-800 [Kpa]
50 %	900-1200 [Kpa]
99%	1300-1700 [Kpa]

Tabella 2.5 Livelli critici di pressione sopportabili da un essere umano.[9]

Inoltre le soglie dei livelli di pressione per emorragie interne sono molto più basse e arrivano a circa 20-30 [KPa] per carichi di lunga durata, e addirittura 60-100 [KPa] per carichi di breve durata.

Poiché la sopravvivenza dipende anche dalla massa dell'essere umano, l'indice di sopravvivenza sarà diverso a seconda che sia analizzato un uomo, una donna o un bambino.

Un'ulteriore relazione è stata ricavata anche per la pressione massima tollerabile dai timpani. Infatti, si è ricavato che per pressioni di 100 [KPa] generati da esplosioni che si propagano molto velocemente, il 50% dei timpani si rompe; la soglia minima di sopravvivenza del 99% dei timpani considerando sempre esplosioni che si propagano a elevate velocità, è di solo 30 [KPa].

La perdita temporanea dell'udito può generarsi anche a livelli di pressione inferiori a quelli necessari alla rottura del timpano e tale perdita è funzione della pressione e dell'impulso esercitati dall'onda d'urto normale che avanzando impatta sul timpano.

Le pressioni definite in precedenza sono, ovviamente, le massime pressioni efficaci che agiscono sull'oggetto considerato e saranno definite in funzione di:

- Massima pressione incidente
- Pressione incidente considerando anche quella dinamica.
- Pressione incidente più quella riflessa

La tipologia d'onda che imprime la massima pressione sul sistema dipende dall'orientamento e dalla posizione che l'individuo assume nei confronti dello scoppio, ma anche dalla disposizione delle superfici riflettenti disposte nelle immediate vicinanze dell'individuo, le quali possono creare riflessioni spaziali delle pressioni molto complesse e difficili da evitare, ma anche dalla formazione di eventuali getti supersonici dell'onda d'urto che si possono verificare in presenza di aperture improvvise (come l'impatto di un'onda d'urto su una finestra di un edificio). Tuttavia, i livelli di pressione descritti sopra, sono validi solo per le situazioni nelle quali l'impatto tra l'onda d'urto e l'individuo non comportino alcun cinematismo dell'individuo stesso. Infatti, qualora in seguito all'impatto con l'onda d'urto, l'individuo perda l'equilibrio, o addirittura sia spostato dall'impatto, urtando contro superfici dure o contundenti, le soglie di pressione si riducono notevolmente rispetto a quelle analizzate per le ferite ai polmoni o ai timpani. Una recente pubblicazione ha, infatti, imposto il livello limite delle pressioni a 16 [KPa] che rappresenta il limite inferiore della soglia della perdita di udito temporaneo. [9]

2.6.2 Tolleranza umana ai frammenti

Bisogna innanzitutto affermare che a differenza delle tolleranze analizzate per le pressioni, dove le soglie sono mediamente alte, quelle considerate nella tolleranza ai frammenti sono decisamente di un livello più basso.

I frammenti possono essere classificati in base alla loro forma, alla velocità, al materiale e alla sorgente da cui provengono. In particolare, come si è visto precedentemente, essi si dividono in due macrocategorie:

- I frammenti primari, caratterizzati da dimensioni molto piccole e velocità elevatissime, essi si formano in genere dalla disgregazione e rottura dell'intelaiatura che contiene l'esplosivo.
- I frammenti secondari, caratterizzati da dimensioni e velocità mediamente grandi, essi si formano dal disfacimento e frammentazioni di apparecchiature, veicoli o costruzioni poste nelle immediate vicinanze dell'esplosione che subiscono una forte sollecitazione causata dallo scoppio.

E' evidente che a causa delle differenze fisiche tra le due tipologie di frammento, la tolleranza di un essere umano nell'impatto con un frammento cambierà in funzione della tipologia del frammento stesso.

E' evidente che se si considera l'iterazione tra un impatto primario e un individuo, la tolleranza sarà molto bassa, in quanto essendo il frammento primario definito come un proiettile (in genere sono schegge di metallo a velocità elevatissime) riuscirà facilmente a penetrare all' interno del corpo.

Alcuni valori di penetrazione nell'impatto con esseri umani sono stati elaborati per frammenti con una massa non superiore a 15 grammi ed hanno indicato che, all'aumentare del rapporto tra area e peso del frammento, la velocità di quest'ultimo aumenta.

I frammenti secondari, a causa della loro massa relativamente grande, in genere causano ferite più gravi anche se si muovono a velocità comparativamente più basse rispetto ai frammenti primari.

Rapporto dei frammenti Area/Massa [m^2/Kg]	Rapporto dell'aria dei frammenti mediate sui grammi [m^2]	Velocità [m/s]	Soglia di energia [m Kg]
0.06	0.00092	30	0.70
0.21	0.0030	50	1.93
0.43	0.0061	75	4.41
0.64	0.0092	100	8.00
0.86	0.012	127	12.83

Tab 2.6 Valori di penetrazione dei frammenti in funzione della propria massa. [9]

La tabella 2.6 mostra i valori di velocità che apportano ferite serie nell'iterazione uomo-frammento. Bisogna ricordare che, come già detto in precedenza, un elemento di massa relativamente grande che si muove a una velocità di appena 3 [m/s] può apportare ferite serie a un essere umano.

Organi critici	Peso [Kg]	Velocità [m/s]	Energia [m Kg]
Torace	1.13	3.05	0.54
	0.045	24.3	1.35
	0.0045	122	0.34
Addome	2.72	3.05	1.2
	0.045	22.8	1.2
	0.0045	167	0.67
Testa	3.6	3.05	1.62
	0.45	30.5	2.16
	0.0045	131	0.40

Tab 2.7 Valori di velocità che apportano ferite serie a un individuo medio

2.7 Teoria della propagazione dell'onda d'urto (Shock Waves)

I gas ad alta temperatura e pressione, prodotti dall'esplosione, sono confinati dal mezzo circostante, e si propagano al suo interno sotto forma di un'onda di pressione. L'onda d'urto produce effetti devastanti sia a breve sia a lunga distanza. Gli effetti a lunga distanza sono funzione del mezzo attraverso il quale avviene la propagazione. Infatti, la massima pressione del gas d'esplosione, dipende dalle caratteristiche fisico-meccaniche del mezzo che circonda la carica esplosiva, che sia aria, acqua o suolo. In aria si avrà uno spostamento d'aria, in acqua uno scoppio subacqueo, se invece l'esplosione avviene nel terreno, l'onda d'urto si propaga allo stesso modo delle onde sismiche, arrecando quindi danni sia alle strutture sia ai mezzi adiacenti così come alle persone a contatto con la superficie investita dall'onda.

L'eventuale presenza di una superficie di separazione, tra il gas prodotto dall'esplosione, e il mezzo attraverso il quale si propaga, produce al tempo stesso una riflessione e una trasmissione dell'onda di pressione al mezzo circostante (aria o acqua). L'onda di riflessione, si muove in verso opposto all'onda di detonazione. Questa riflessione può essere di compressione o di rarefazione, a seconda che la densità del mezzo di propagazione è maggiore o minore di quella del gas d'esplosione [5].

Ad esempio, se la carica è applicata su una piastra infinitamente rigida, siccome la densità della piastra è molto maggiore rispetto a quella del gas prodotto dall'esplosione, l'onda di riflessione sarà di pressione, e interamente rivolta verso l'alto.

Allo stesso modo, l'intensità della pressione dell'onda trasmessa al mezzo circostante, è funzione della densità del mezzo. In ogni caso, all'aumentare della distanza dal centro d'esplosione, l'intensità di pressione tende a diminuire.

L'onda esplosiva genera inizialmente una sovrappressione e in seguito in tempi più lunghi una depressione nota come "risucchio", dovuta all'aria che torna violentemente verso il centro dell'esplosione.

Tutto ciò avviene in un periodo di tempo dell'ordine di grandezza di pochi millisecondi, tale da non far apprezzare l'effetto prodotto dalle due onde singolarmente. Gli effetti prodotti a breve distanza sono, come già annunciato in precedenza, da attribuire a onde d'urto pulsanti, le quali attraversano e si riflettono sulle superfici libere degli oggetti incontrati, provocando su di loro un incremento delle tensioni che ne determina la rottura. A questi si sommano gli effetti prodotti dalle fiammate, dai corpi incandescenti scagliati ad alte velocità, e dalla propagazione del calore che può essere causa d'incendi e d'ustioni gravi. In alcuni casi i danni prodotti a breve distanza possono essere aggravati dalla presenza all'interno dell'ordigno di chiodi o altri corpi contundenti (bomba sporca), quali schegge di vetro o acciaio di varie dimensioni, che l'esplosione scaglia ad alte velocità.

Vediamo ora in dettaglio le varie formulazioni empiriche che descrivono l'azione deflagrante di un'esplosione in funzione al mezzo di propagazione.

2.7.1 Esplosione al suolo

In seguito ad un'esplosione, dalle dimensioni radiali del cratere formatosi al suolo, e note le caratteristiche geotecniche dello stesso, sarà possibile risalire all'entità del carico esplosivo [W].

Noti, infatti, la tipologia del terreno, e le sue caratteristiche fisiche e meccaniche, attraverso delle relazioni empiriche, è possibile calcolare il raggio del cratere [R], attraverso la seguente espressione:

$$R = k \cdot W^n$$

Dove con [R] s'indica il raggio del cratere, [k] è un coefficiente numerico adimensionale, che assume valori diversi in funzione del tipo di terreno, [W] è il peso della carica esplosiva, e infine [n] è l'indice di potenza dell'esplosivo stesso [6].

Questa formulazione empirica, ricavata quindi dalle evidenze sperimentali, è in accordo con la seguente teoria. Si prenda in considerazione una carica esplosiva, applicata per semplice contatto sulla superficie del suolo. Indichiamo rispettivamente con [W] il suo peso, [E] la sua energia specifica di esplosione e [β] una variabile adimensionale, troviamo l'energia rilasciata dall'esplosione stessa.

$$K = W\beta E$$

L'energia specifica necessaria alla rottura di un volume [V] di terreno sarà:

$$E_r = V \cdot \sigma_r \cdot \varepsilon_r$$

Dove, σ_r e ε_r sono rispettivamente la tensione e la deformazione di rottura del materiale attraversato dall'esplosione.

L'energia specifica di rottura [E_s] del materiale sarà:

$$E_s = \sigma_r \cdot \varepsilon_r$$

Dall'uguaglianza di queste due espressioni, ricaviamo il volume di terreno asportato dall'esplosione, definito come segue:

$$V = \frac{E_r}{E_s} = \frac{W\beta E}{E_s}$$

Sappiamo che l'energia necessaria per provocare la rottura di un volume $[V]$ di terreno, è uguale all'energia trasferita dalla carica al suolo ($K=W\beta E$). Nell'ipotesi in cui la densità di massa del suolo è inferiore rispetto a quella del gas prodotto dall'esplosione, approssimativamente si può considerare un cratere di forma semisferica.

Per cui, sapendo che il volume della sfera si calcola come:

$$V = \frac{4\pi R^3}{3}$$

Sostituendo nella relazione precedente, ricaviamo l'espressione del raggio:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3E\beta}{4\pi E_s}} \sqrt[3]{W} = K \sqrt[3]{W}$$

Avendo posto:

$$K = \sqrt[3]{\frac{3E\beta}{4\pi E_s}}$$

espresso quindi in funzione delle caratteristiche meccaniche del suolo e dell'energia d'esplosione della carica [6].

2.7.2 Esplosione in Aria

Si vogliono descrivere gli effetti prodotti da un'esplosione la quale avviene in aria libera, ipotizzandola puntuale e istantanea, alla quale corrisponde il rilascio di una certa quantità d'energia $[E]$.

Ciò che interessa definire, è l'incremento di pressione del mezzo circostante la carica esplosiva, in un dato istante di tempo $[t]$, a una certa distanza radiale $[R(t)]$ dal centro d'esplosione, supponendo che sia di tipo sferico.

Rispetto alle condizioni imperturbate del mezzo, alle quali corrisponde una certa pressione $[p_1]$, in seguito al passaggio del fronte d'onda, si avrà una nuova pressione $[p_2]$ maggiore di quella iniziale.

L'ipotesi di base è che le trasformazioni di natura termodinamiche associate all'esplosione, siano adiabatiche, in altre parole queste trasformazioni comporteranno uno scambio di calore tra l'ambiente interno, in cui si ha l'esplosione, e quello esterno in cui si ha la propagazione della stessa.

Inoltre, l'aria attraverso la quale si propaga l'onda d'urto, è considerata come un gas politropico, per il quale è vera la seguente espressione:

$$pv^n = \text{cost}$$

Dove $[p]$ è la pressione, $[v]$ è il volume specifico per unità di massa, e $[n]$ è un coefficiente numerico adimensionale, che assume valori diversi a seconda che la trasformazione del gas sia isoterma o adiabatica, in questo caso essendo adiabatica $[n]$ vale 4,21 [6].

Per definire la **velocità**, la **pressione**, e la **densità di massa** del mezzo attraversato dal fronte d'onda a un generico istante di tempo $[t]$, sarà quindi necessario descrivere il moto del gas.

Tale moto è univocamente determinato, una volta noti la densità di massa indisturbata dell'aria $[\rho_1]$, l'energia sprigionata dall'esplosione $[E]$, e una volta fissati l'istante di tempo $[t]$ e la distanza radiale $[r]$ dal centro d'esplosione.

Dalla successiva relazione si ricava la posizione radiale del fronte d'onda a un generico istante di tempo $[t]$:

$$\lambda = r(\rho_1 E t^2)^{\frac{1}{2+k}}$$

Dove $[k]$ è un parametro adimensionale, che assume valore pari a $k=1, 2, 3$, a seconda che l'espansione del gas sia monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale [6].

Da cui, la posizione radiale dell'onda d'urto all'istante $[t]$ sarà:

$$R(t) = \beta \left(\frac{Et^2}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{2+k}}$$

Dove $[\beta]$ è una costante adimensionale, definita in funzione del rapporto politropico $[\gamma]$ tra il calore specifico del gas a pressione costante, e a volume costante dell'aria [6]. Attraverso la precedente relazione, si è quindi in grado di individuare in ogni istante, in seguito all'esplosione, la posizione del fronte d'onda. Noto $[R(t)]$, si può calcolare la velocità con la quale si propaga l'onda d'urto nel mezzo circostante, come:

$$U(t) = \frac{dR}{dt}$$

Nel caso in questione si avrà:

$$U(t) = \frac{2}{2+k} \beta^{\frac{4+k}{2}} \left(\frac{E}{\rho_1 R^k} \right)^{0.5}$$

Bisogna quindi risolvere un sistema di tre equazioni nelle incognite $[U_2]$ $[\rho_2]$ $[p_2]$, che indica rispettivamente **la velocità, la densità di massa, e la pressione** dell'aria in seguito al passaggio del fronte d'onda, ad una distanza radiale $[R(t)]$, e all'istante di tempo $[t]$. [6]

Le equazioni da scrivere per la risoluzione del problema, derivano dal principio di conservazione della massa, della quantità di moto, e dell'energia.

Le soluzioni del sistema d'equazioni saranno:

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \quad \gamma_2 = \rho_1 \frac{2U}{\gamma+1} \quad p_2 = \frac{2U^2}{\gamma+1} \rho_1$$

La sola densità di massa si esprime indipendentemente dalla velocità di propagazione dell'onda d'urto $[U]$. [6]

Nota l'espressione della velocità di propagazione del fronte d'onda $[U]$, sostituendola in quella della pressione $[p_2]$, si ottiene la pressione sul fronte d'onda:

$$p_2 = \beta^{4+k} \frac{8E}{(2+k)^2 (\gamma+1)} \frac{1}{R^k}$$

Questa sarà quindi espressa in funzione dell'energia specifica d'esplosione $[E]$, del tipo di propagazione espressa mediante $[k]$, del rapporto tra il calore specifico a pressione e a volume costante $[\gamma]$, e della posizione radiale $[R]$. [6]

La pressione del fronte d'onda è quindi una funzione inversamente proporzionale alla distanza $[R]$ dal centro d'esplosione. In particolar modo al variare della costante $[k]$, che come già detto assume valori diversi a seconda che la propagazione del fronte d'urto sia monodimensionale, bidimensionale, o tridimensionale, questa proporzionalità inversa sarà lineare, quadratica o cubica. Nel caso di propagazione tridimensionale, l'attenuazione della pressione sul fronte d'onda, sarà ancora più rapida all'aumentare della distanza radiale dal centro d'esplosione.

Il picco di pressione, in altre parole la massima pressione conseguita in un punto generico dello spazio, a distanza $[R]$ dal centro d'esplosione, si definisce come somma di quattro contributi:

$$\Delta p = \frac{A_1}{R} + \frac{A_2}{R^2} + \frac{A_3}{R^3} + A_4$$

Dove le quattro costanti, A_1, A_2, A_3, A_4 , sono determinate attraverso un'interpolazione lineare dei risultati numerici di prove sperimentali, che dipendono dal peso della carica esplosiva $[W]$, mediante la cosiddetta "distanza ridotta", a sua volta definita come:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$$

Il concetto di distanza ridotta, s'introduce per individuare la distanza dal centro d'esplosione, alla quale due cariche esplosive, con la stessa energia specifica d'esplosione, ma con peso differente, $[W_1]$ e $[W_2]$, generano lo stesso effetto in termini di pressione.

Analogamente, per due cariche esplosive con lo stesso peso $[W]$, ma con energie specifiche d'esplosione diverse, $[E_1]$ e $[E_2]$, s'individua la distanza alla quale le due cariche generano la medesima pressione [6].

Nelle applicazioni pratiche, per la valutazione della pressione in un generico punto dello spazio, individuato dalla distanza ridotta $[Z]$ dal centro d'esplosione, e in un generico istante di tempo $[t]$, sono impiegate formulazioni semi-empiriche come la seguente:

$$P(Z, t) = P_y^+ - P_0 = \Delta P(Z) \left(1 - \frac{t}{t^+} \right) e^{-\alpha \frac{t}{t^+}}$$

Dove $[p_y^+]$ è la massima pressione della fase positiva, $[p_0]$ è la pressione in condizioni indisturbate del mezzo di propagazione (pressione atmosferica nel caso dell'aria), $[t^+]$ è la durata della fase positiva di sovrappressione, $[\alpha]$ è un coefficiente di natura sperimentale definito in funzione della distanza ridotta $[Z]$, e $[\Delta p(Z)]$ è il picco di pressione alla distanza ridotta $[Z]$. [6]

La durata della fase positiva di sovrappressione, si può valutare come segue:

$$t^+ = B - 10^{-3} \left(\sqrt[6]{W} \sqrt{R} \right)$$

Dove, il tempo [t] è espresso in secondi, [B] è una costante che si assume nella pratica pari a [B=1,3] [6].

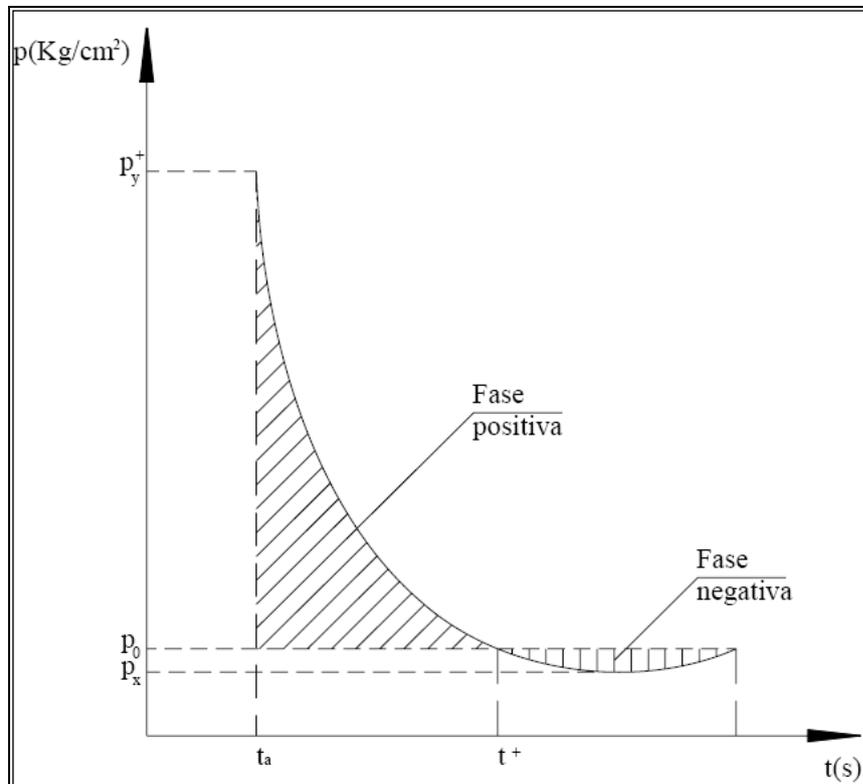


Fig 2.8 Andamento qualitativo della Curva di Pressione prodotta da un'esplosione.

Per il picco di pressione [Δp (Z)], è possibile utilizzare diverse formulazioni d'origini sperimentali, proposte da vari autori, e riferite al solo TNT (trinitrotoluene).

In ogni caso, tali formulazioni sono estendibili a qualsiasi tipologia d'esplosivo, mediante l'introduzione di un coefficiente d'equivalenza al TNT [q]. Questo coefficiente è calcolato come il rapporto tra il calore specifico dell'esplosivo in questione [Q], e quello del TNT, [Q_{TNT}]: [3]

$$q = \frac{Q}{Q_{TNT}}$$

Per ognuna di queste espressioni, è possibile definire un campo di validità in funzione della distanza ridotta [Z]. Nei rispettivi campi d'applicazione, tra le varie formulazioni sussistono delle differenze.

Di seguito si riportano le espressioni per il calcolo del picco di pressione, e i rispettivi campi di validità [6]:

- Brode H.C:

$$\Delta p(Z) = \left(\frac{6,7}{Z^3} + 1 \right) \quad \Delta p(Z) \geq 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta p(Z) = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,405}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 \quad 0,1 \leq \Delta p(Z) \leq 10 \text{ kg/cm}^2$$

- Petrowski G.I:

$$\Delta p(Z) = \left(\frac{10,7}{Z^3} - 1 \right) \quad Z \leq 1$$

- Sadowsky M.A:

$$\Delta p(Z) = \frac{0,75}{Z} + \frac{2,55}{Z^2} + \frac{6,5}{Z^3} \quad 1 \leq Z \leq 15$$

- Henrich J.:

$$\Delta p(Z) = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,5397}{Z^2} - \frac{0,3572}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4} \quad 0,05 \leq Z \leq 0,3$$

$$\Delta p(Z) = \frac{6,1938}{Z} - \frac{0,3262}{Z^2} + \frac{2,1324}{Z^3} \quad 0,3 \leq Z \leq 1$$

$$\Delta p(Z) = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \quad Z \geq 1$$

CAPITOLO 3

- *Esplosione su una piastra in acciaio e tarature delle curve di pressione*

Introduzione

Nella seguente sessione si è prefissata come primo obiettivo l'analisi della prova sperimentale eseguita dal Laboratorio di Ricerca della Marina e Aeronautica di Melbourne Australia, confrontando i picchi di pressione misurati nella prova con i picchi di pressione ottenuti dalle teorie elencate nel capitolo 2.7 precedente illustrato. [6]

In secondo luogo si esegue un modello copia della piastra adottata dal laboratorio di ricerca di Melbourne sfruttando il codice Abaqus in modo da poter valutare gli spostamenti della piastra impressi dalla dinamica dell'esplosione, e poter realizzare un confronto reale tra la simulazione analitica e il fenomeno reale.

3.1 Prova sperimentale

Riportiamo in breve la prova sperimentale:

Accelerazione di una piastra d'acciaio soggetto a carico esplosivo

*Published by
DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory
PO Box 4331
Melbourne Victoria 3001 Australia
Telephone: (03) 9626 7000
Fax: (03) 9626 7999
© Commonwealth of Australia 2000
AR-011-421
March 2000*

Abstarct

Questo documento presenta i risultati di uno studio per valutare il carico di pressione e lo spostamento di una piastra d'acciaio sottoposta a carico d'esplosione. Tale studio ha posto l'accento sulla necessità in caso si ricorra a modelli FEM che simulino questi tipi di fenomeni, a ricorrere ad accorgimenti che garantiscano le previsioni di valori precisi per una piastra quadrata completamente bloccata su tutti i quattro lati. Questo esperimento ha fornito i risultati che possono essere utilizzati per raffinare i modelli agli Elementi Finiti che simulano le esplosioni.

Questo rapporto descrive una serie di prove atte a misurare lo spostamento di una piastra d'acciaio soggetta a carico esplosivo, e riporta i risultati di queste misurazioni.

I risultati di questo esperimento saranno utilizzati per confutare gli elementi di un futuro modello finito di un ponte di una nave da guerra. Ciò comporterà in definitiva la capacità di prevedere attraverso modelli di simulazione esplosioni di ordigni o munizioni all'interno o in prossimità della struttura della nave.

3.1.1 Introduzione

Le accelerazioni causate dalla detonazione di un ordigno esplosivo situato sul ponte di una nave derivano dalla combinazione degli effetti dell'impatto dell'onda d'urto esplosiva, e dai danni causati dalla proiezione di frammenti di munizioni e di detriti prodotti dall'esplosione stessa, che oltre arrecare danneggiamenti della struttura possono creare danni anche mortali al personale a bordo.

L'esplosione provoca due accelerazioni distinte sulle strutture adiacenti e sul personale, la prima è caratterizzata da livelli di accelerazione molto elevata, accompagnata solo da piccoli spostamenti. La seconda è caratterizzata da un livello molto più basso di accelerazione con uno spostamento maggiore. Questo secondo regime di accelerazione è simile a quello sperimentato in un incidente d'auto, il quale negli anni è stata oggetto di estesi studi.

Quest'accelerazione può causare lesioni agli arti [12] che vanno dai danni ai nervi, alle lesioni ai tessuti molli con possibili insorgenze di emorragie interne. Tutti questi infortuni sono dovuti al passaggio di energia cinetica attraverso il corpo, a un livello superiore di quello assorbibile dal corpo umano.

I risultati di questo esperimento saranno utilizzati, in futuro, per la convalida dei modelli agli elementi finiti, fornendo parametri fondamentali per calibrare il modello in funzione sia dei parametri dei materiali, che in funzione della tipologia strutturale della nave.

Quando i dati diverranno disponibili sui criteri per le lesioni riportate agli arti inferiori, sarà possibile prevedere oltre alle sollecitazioni applicate alle strutture anche il tipo e la gravità delle lesioni riportate dall'equipaggio.

3.1.2 Dati sperimentazione

La piastra d'acciaio è quadrata e ha dimensioni 1200 [mm] per lato, ha uno spessore di 5 [mm].

E' vincolata con 24 bulloni ad alta tensione (coppia di bloccaggio 11.06 [Nm]) appoggiata su quattro blocchi di calcestruzzo. Si considera un'area centrale di circa 1.00 [m²] libera di muoversi sotto il carico.

Il Test consiste nel fare detonare un quantitativo di materiale esplosivo pari a 250 [g] di Pentolite fatta esplodere al centro della piastra a una distanza di 250 [mm].

Nella tabella sottostante sono riportate le caratteristiche meccaniche dei materiali in analisi.

Tab.3.1

Material Characteristics	
Young's Modulus E	203 [GPa]
Poissons Ratio ν	0.3
Yield Stress σ_0	320 [MPa]
Density ρ	7850 [Kg/mc]



Fig.3.1 Piastra d'acciaio utilizzata nella prova sperimentale

3.1.3 Strumentazione

La piastra è montata su di essa due accelerometri piezo elettrici (Endevco 7255A), due misuratori di pressione piezo elettrici (PCB Piezotronic 109A) e un calibro di spostamento (Novotechnik Ti50 LVDT).

I manometri misurano una pressione massima di 0-690 [MPa] e un tempo di salita di 1 [μ s]. [13]

I manometri sono stati montati su un supporto in nylon e poi inseriti in un adattatore d'acciaio saldato alla lastra. Questo sistema di montaggio è stato progettato per isolare il misuratore da forze parallele alla superficie della piastra. La parte superiore del manometro è stata imbrattata di grasso al silicone, successivamente è stato coperto con un sottile nastro riflettente per isolare la sagoma dalle radiazioni di calore provenienti dall'esplosione.

Il calibro di spostamento misura uno spostamento massimo di 150 [mm], (in questa sperimentazione è stato utilizzato come ± 75 [mm]) è stato montato su una struttura posizionata al centro della piastra.

La base della cornice è stata appoggiata su un blocco di legno posto sulla cima di un sacchetto di sabbia. Ciò ha garantito un semplice adeguamento del tracciato iniziale verticale della sagoma, e anche assicurato il non danneggiamento del misuratore da parte dell'esplosione stessa.

Gli accelerometri sono stati montati su un AMRL triangolare di alluminio e hanno un range di 0-50000 [g] e una risposta in frequenza di 0-10 [Khz].

Tutte le letture sono state eseguite utilizzando il registratore Digistar III. [13]

I misuratori sono stati disposti sulla piastra come illustrato in figura:

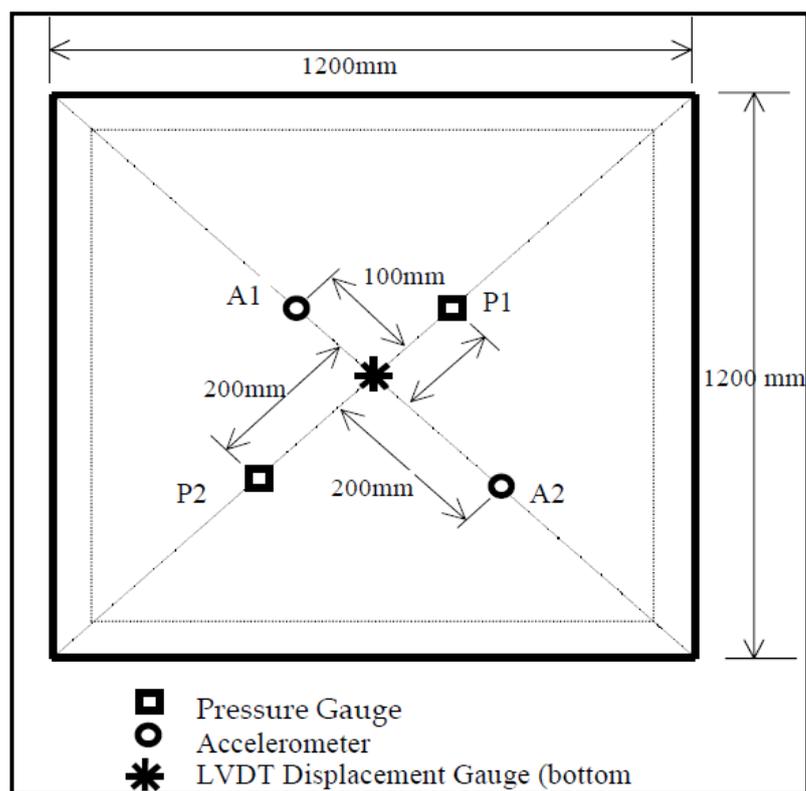


Fig. 3.2 Disposizione misuratori sulla piastra in analisi

3.1.4 Risultati e Discussione

Come è stato osservato in altri studi, è molto complicato portare a termine misurazioni precise di pressioni in fenomeni di esplosione soprattutto quando la detonazione avviene nelle vicinanze degli strumenti di misurazione. Le difficoltà maggiori si riscontrano nel misurare le accelerazioni trasmessa dal fenomeno di esplosione alla piastra d'acciaio.

Le misurazioni di accelerazione risultano poco attendibili in quanto i misuratori garantiscono una buona approssimazione dei risultati con frequenze dell'ordine di 10 [kHz], ampiamente superate in questi tipi di fenomeni.

Per quanto riguarda la registrazione dei picchi di pressione si è utilizzato il programma Datak per cercare di filtrare i dati rilevati dal misuratore, essi presentano grandi quantità di rumore, rendendo problematica la determinazione sia del tempo positivo (TOA) che del picco di pressione senza incorrere in approssimazioni dei risultati.

Grazie al programma Datak si è ricorsi alla procedura descritta da Slater [14] creando una linea retta sul fronte di salita dell'onda di pressione, e una curva esponenziale per la parte disturbata del segnale. Ciò consente una ragionevole approssimazione sia del picco di pressione sia della durata della fase positiva (TOA).

I valori approssimati sono indicati nella Tabella 3.2 seguente:

Tab. 3.2

Gauge	D2	D2				
Event	Peak Displ. (mm)	Peak Displ. (mm)				
E15	-33	+25				
Gauge		P1		P2		
Event	Approx Peak Overpressure (MPa)	Positive Impulse (kPa.s)	Approx TOA (μ s)	Approx Peak Overpressure (MPa)	Positive Impulse (kPa.s)	Approx TOA (μ s)
E15	9.4	0.38	239	8.0	0.33	237

Occorre tenere sempre presente che in queste tipologie di prove sperimentali non è possibile raggiungere alte precisioni dei risultati.

Questo fa insorgere il dubbio che accelerazioni ad alta frequenza non possano essere misurate con strumenti di questo genere.

Risultano molto utili le misurazioni di picchi di pressioni per valutare la compatibilità con teorie basate su simulazioni analitiche.

Giacché i modelli FEM si basano su stime caratteristiche, ciò può creare discrepanze nei risultati nonostante i tentavi di calibrare i modelli.

Risultati Prova E15 Distanza 500 [mm]

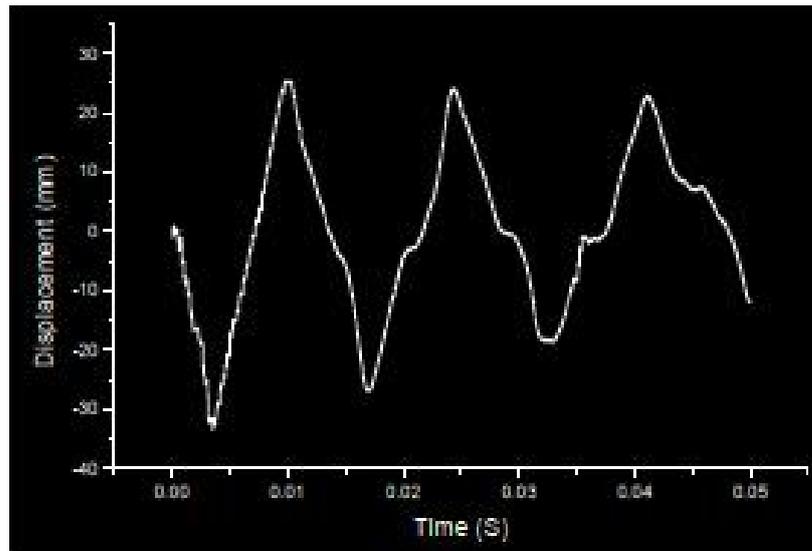


Fig. 3.3 Spostamenti misurati nel test sperimentale

3.1.5 Conclusioni Sperimentazione

Come detto in precedenza, l'intenzione è di utilizzare i dati raccolti in questo esperimento per convalidare i modelli FEM dei ponti di navi da guerra.

Tuttavia occorre sottolineare delle perplessità poiché il carico esplosivo incide solo su un'area centrale ridotta della piastra, mentre nel caso di attacco portato con ordigni anti-nave l'area e la potenza dell'esplosione influenzerebbero in modo drastico il comportamento osservato in questa sperimentazione.

La capacità di simulazione dei modelli FEM può essere migliorata ponendo maggiore attenzione alla conoscenza dei materiali in analisi e della dinamicità del fenomeno accompagnando la simulazione numerica con prove sperimentali tali da garantire una buona calibrazione del modello.

3.2 Taratura delle curve di pressione

Nella seguente sessione verificheremo la validità sia delle curve di pressioni calcolate con la teoria in precedenza illustrata (Cap. 2.7) sia la validità del modello creato con il codice Abaqus.

Confronteremo i risultati ottenuti con i valori derivanti della prova sperimentale sopra citata [11] in modo da assicurare la validità del modello creato in tutti i suoi aspetti.

Riportiamo un breve riassunto della prova sperimentale precedentemente descritta.

Nel Test sperimentale si è fatto detonare un quantitativo di materiale esplosivo pari a 250 [g] di Pentolite fatta esplodere a una distanza di 250 [mm] dal centro della piastra d'acciaio.

Nella tabella seguente riportiamo i risultati della prova sperimentale (Picco di pressione, Impulso positivo e Tempo d'arrivo dell'esplosione).

Tab.3.3

Gauge	P1			P2		
Event	Approx Peak Overpressure (MPa)	Positive Impulse (kPa.s)	Approx TOA (μ s)	Approx Peak Overpressure (MPa)	Positive Impulse (kPa.s)	Approx TOA (μ s)
E15	9.4	0.38	239	8.0	0.33	237

Nella tabella sottostante riportiamo i valori calcolati con la teoria utilizzata per prevedere le curve di pressione (Brode, Petrowski, Henrich) [6] confrontate con i valori ottenuti dalla prova sperimentale eseguite dal Laboratorio di Ricerca della Marina e dell'Aeronautica di Melbourne. [11]

Non sono stati paragonati valori ottenuti con la teoria di Petrowski [6] giacché il valore della distanza ridotta [Zi] non rientra nel campo di validità di quest'ultima.

TEST Pmax	Valori Test	Brode	Petrowski	Henrich
Test (E15) P1	9.4 (MPa)	5.67 (MPa)	8.79 (MPa)	6.32 (MPa)
Test (E15) P2	8.0 (MPa)	4.82 (MPa)	7.44 (MPa)	3.93 (MPa)

Tab.3.4 Valori registrati dai misuratori P1e P2 disposti a distanza rispettivamente 100 e 200 [mm] dal centro della piastra

Notiamo subito che la teoria che meglio approssima il picco di pressione registrato nella prova sperimentale è la teoria di Petrowski [6]; le restanti teorie tendono a sottostimare il picco di pressione.

La notevole differenza di valori tra le teorie è data dal numero elevato di variabile che descrivono tale fenomeno infatti, questo risultato, non comporta le esclusioni delle altre teorie che posso risultare

Tab.3.6 Teoria Petroswi

TEORIA	h (mm)	b (mm)	Zi (m)	α (adim)	Pmax (Mpa)	t+ (ms)
PETROSWI						
E15 P1	500	100	0.510	6.0	8.78	0.94
E15 P2	500	200	0.522	6.2	7.44	0.97

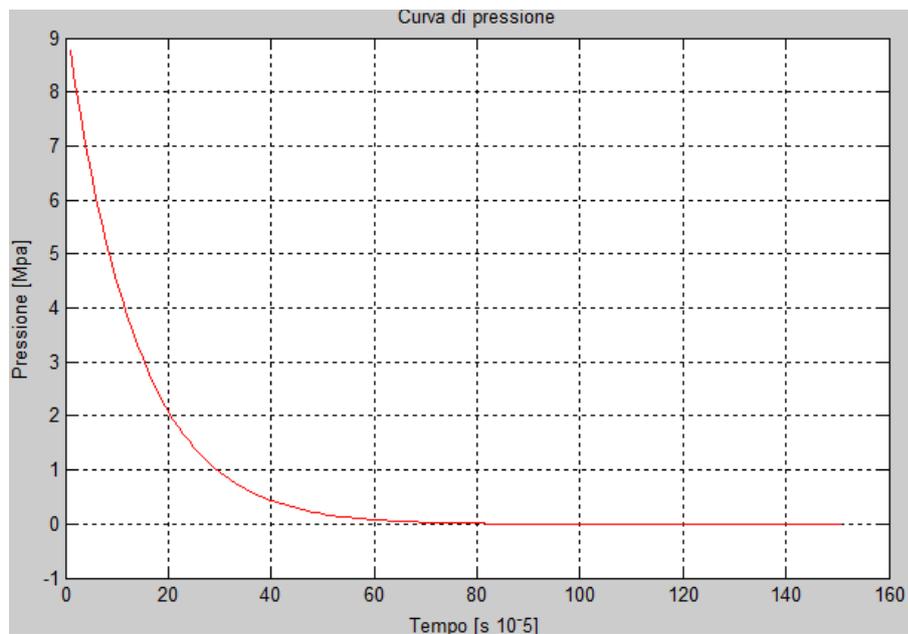


Fig.3.4 Curva di pressione prova E15 P1 teoria Petroswi

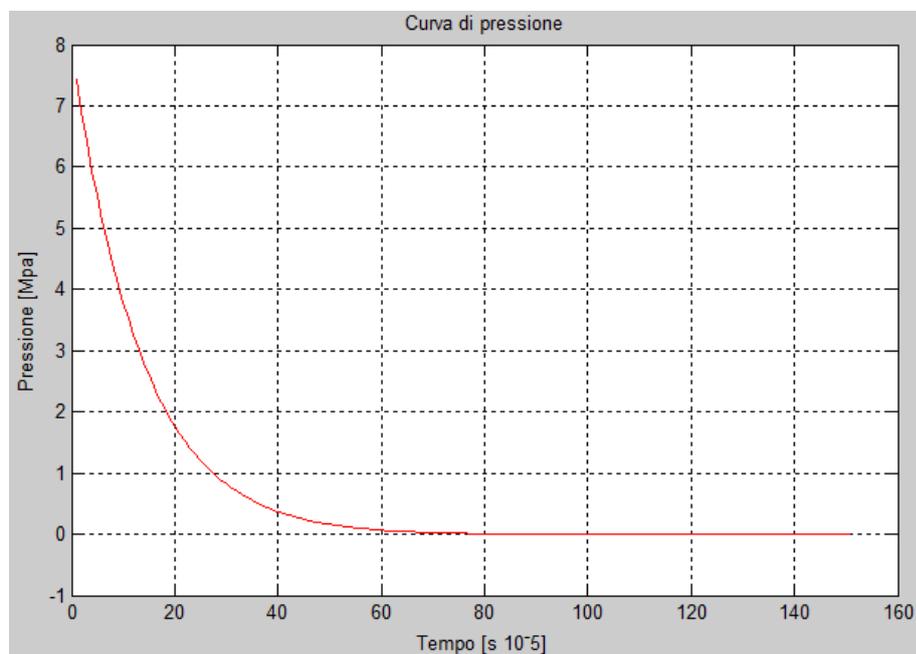


Fig.3.5 Curva di pressione prova E15 P2 teoria Petroswi

Ta3.7. Teoria Brode

TEORIA	h (mm)	b (mm)	Zi (m)	α (adim)	Pmax (Mpa)	t+ (ms)
BRODE						
E15 P1	500	100	0.510	6.0	5.67	0.94
E15 P2	500	200	0.522	6.2	4.82	0.97

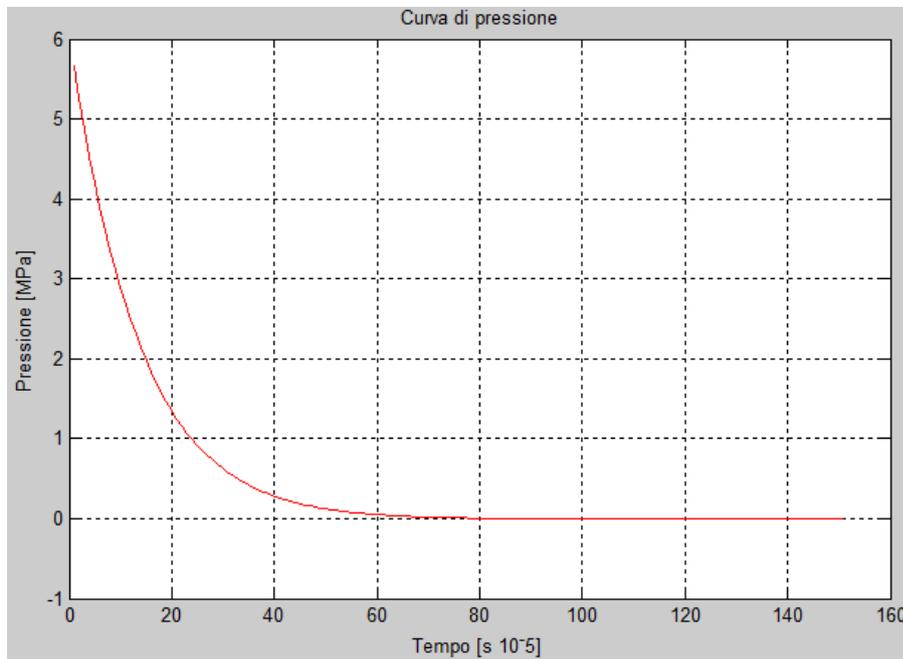


Fig.3.6 Curva di pressione prova E15 P1 teoria Brode

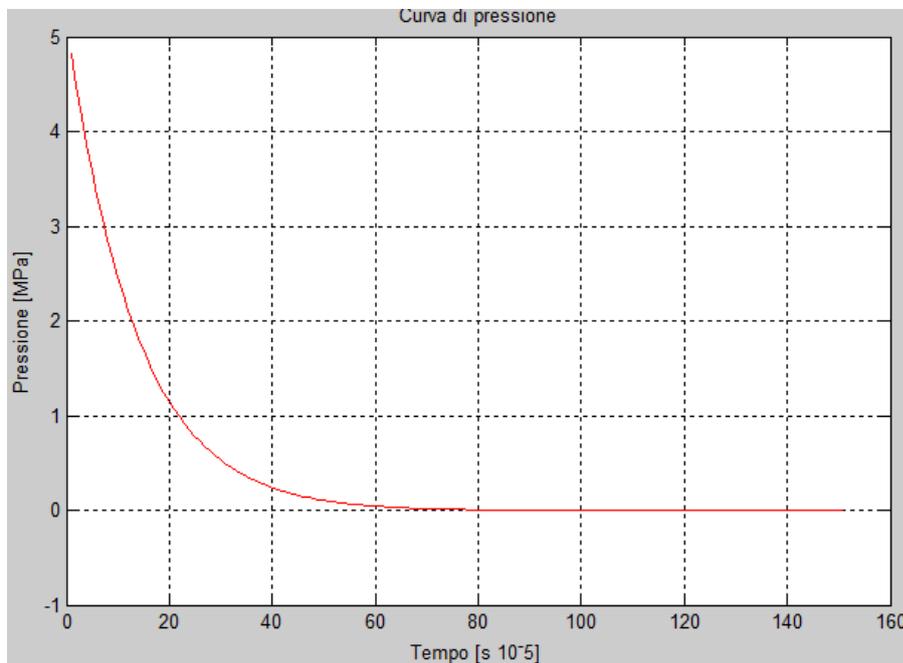


Fig.3.7 Curva di pressione prova E15 P2 teoria Brode

Tab.3.8 Teoria Henrich

TEORIA HENRICH	h (mm)	b (mm)	Zi (m)	α (adim)	Pmax (Mpa)	t+ (ms)
E15 P1	500	100	0.510	6.0	6.32	0.94
E15 P2	500	200	0.522	6.2	3.93	0.97

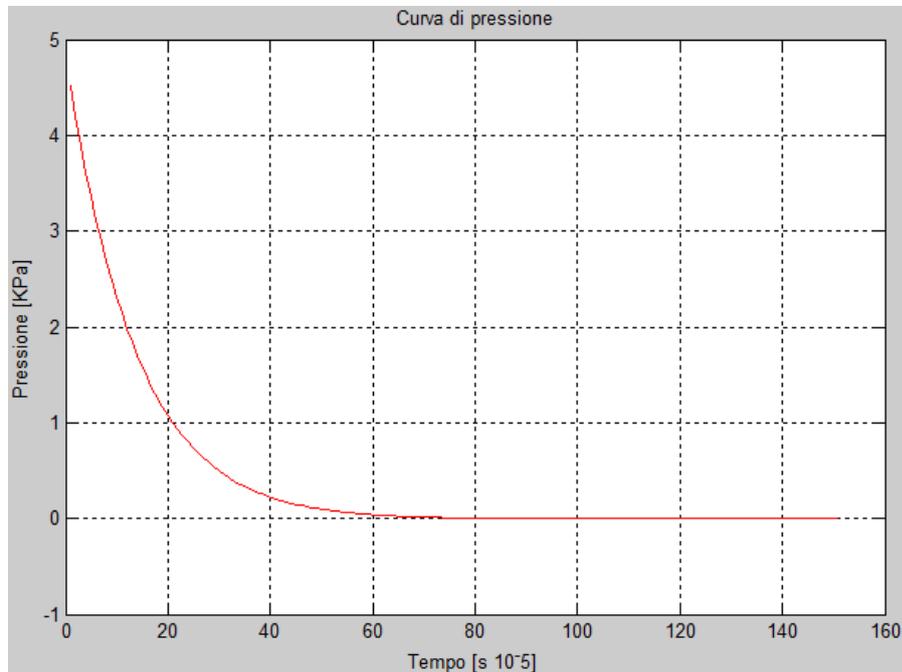


Fig.3.8 Curva di pressione prova E15 P1 teoria Henrich

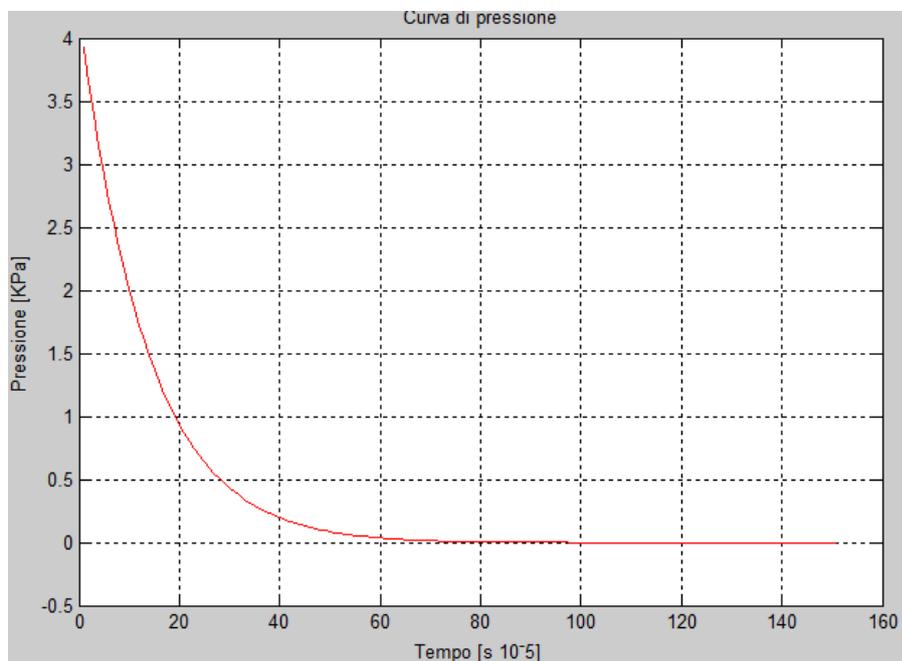


Fig.3.9 Curva di pressione prova E15 P2 teoria Henrich

3.3 Validazione delle curve di pressione mediante modello in ABAQUS

Nella sessione seguente andremo a creare, tramite il codice Abaqus,[17] il modello della piastra utilizzata nella prova sperimentale, in modo da poter caricare le curve di pressioni calcolate con le

varie teorie (Brode, Petrowski, Henrich) [6]; andremo a valutare la risposta dinamica del modello creato, confrontando in dettaglio gli spostamenti ottenuti dalla simulazione numerica con i valori riportati nella prova sperimentale sopra citata [11].

Riproduciamo il modello della piastra analizzata nella prova sperimentale considerando una superficie libera di muoversi sotto i carichi pari a un metro quadro e ipotizzata incastrata ai bordi.

La piastra viene discretizzata in quattro differenti superfici calcolando la pressione per ogni teoria nei punti rispettivamente 100-200-400-500 [mm] dal centro della piastra.

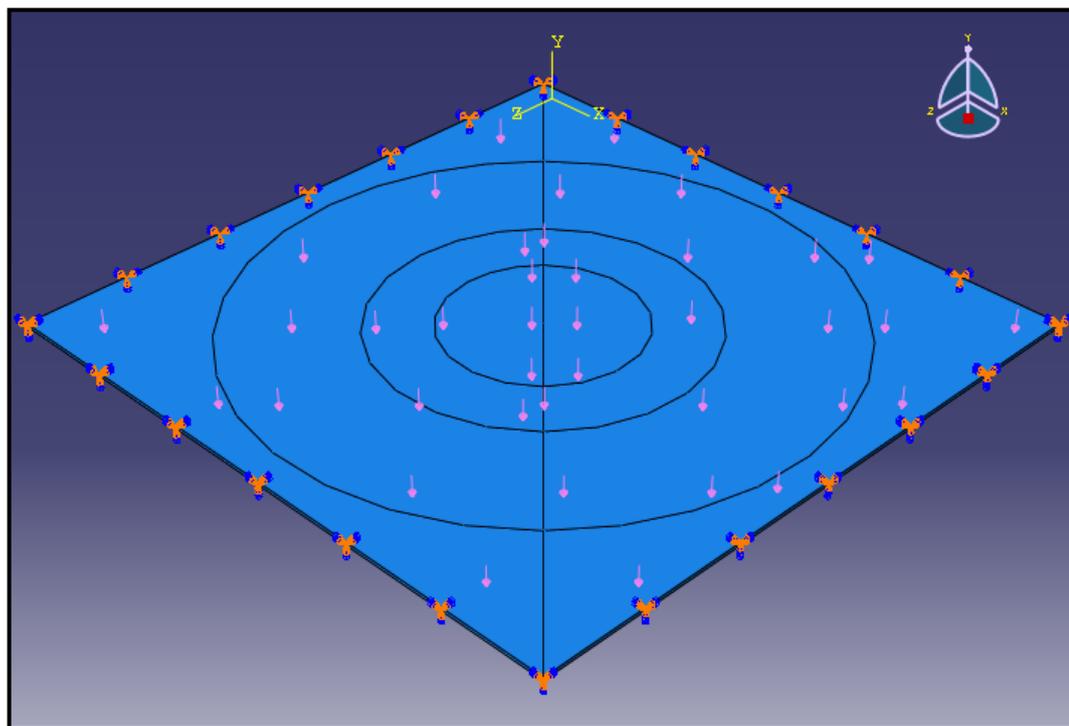


Fig.3.10 Modello piastra creata con il codice Abaqus

3.3.1 Analisi Elastica

La sessione seguente si prefissa l'obiettivo di valutare le oscillazioni causate dalla detonazione del materiale esplosivo, si è preferito analizzare la risposta dinamica della piastra ipotizzando il materiale elastico lineare in quanto si è valutato che oltre a non essere state valutate deformazioni plastiche durante il test sperimentale il comportamento elastico del materiale descrivere con maggiore precisione le oscillazioni della piastra soggetta ad elevati carichi d'esplosione.

Al modello creato si assegnano le caratteristiche geometriche e meccaniche della piastra utilizzata nella sperimentazione assegnandoli un comportamento del materiale elastico lineare.

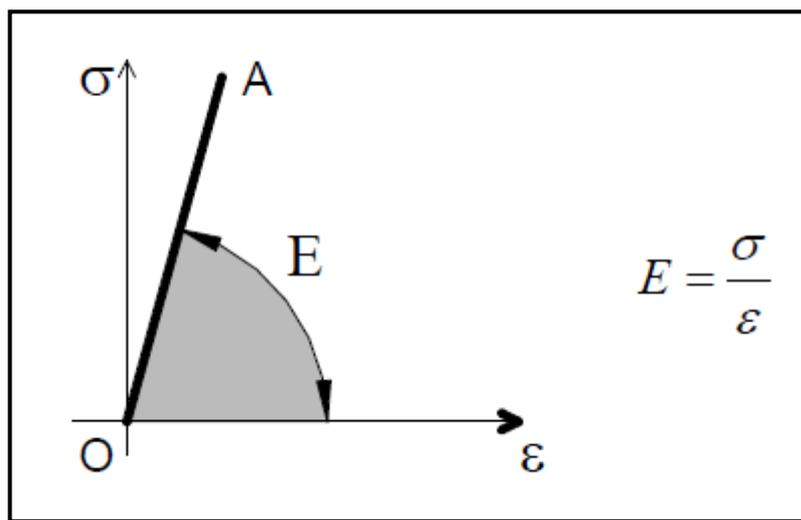


Fig.3.11 Grafico materiale elasto-lineare

Si esegue un'analisi dinamica esplicita per valutare gli spostamenti al centro della piastra, in modo da poter effettuare un confronto diretto con i risultati derivanti dalla prova sperimentale.

Riportiamo di seguito i plot degli spostamenti e alcuni fotogrammi della deformata della piastra.

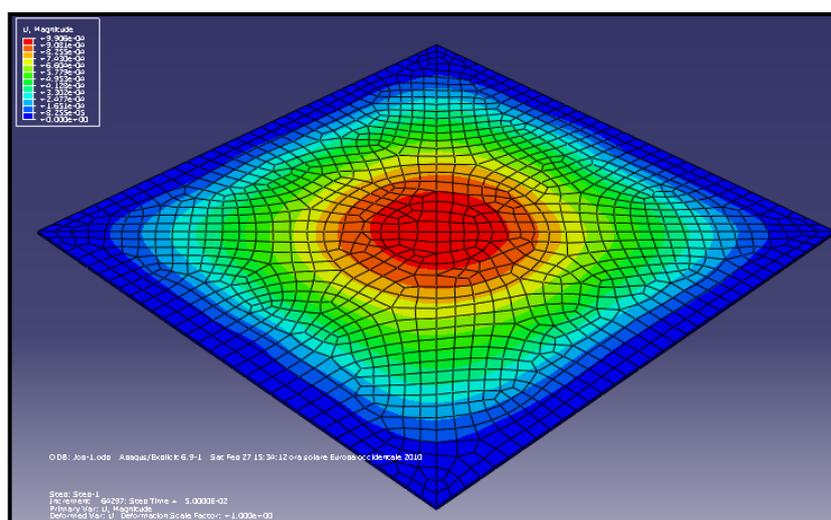


Fig.3.12 Plot degli spostamenti causati dai carichi

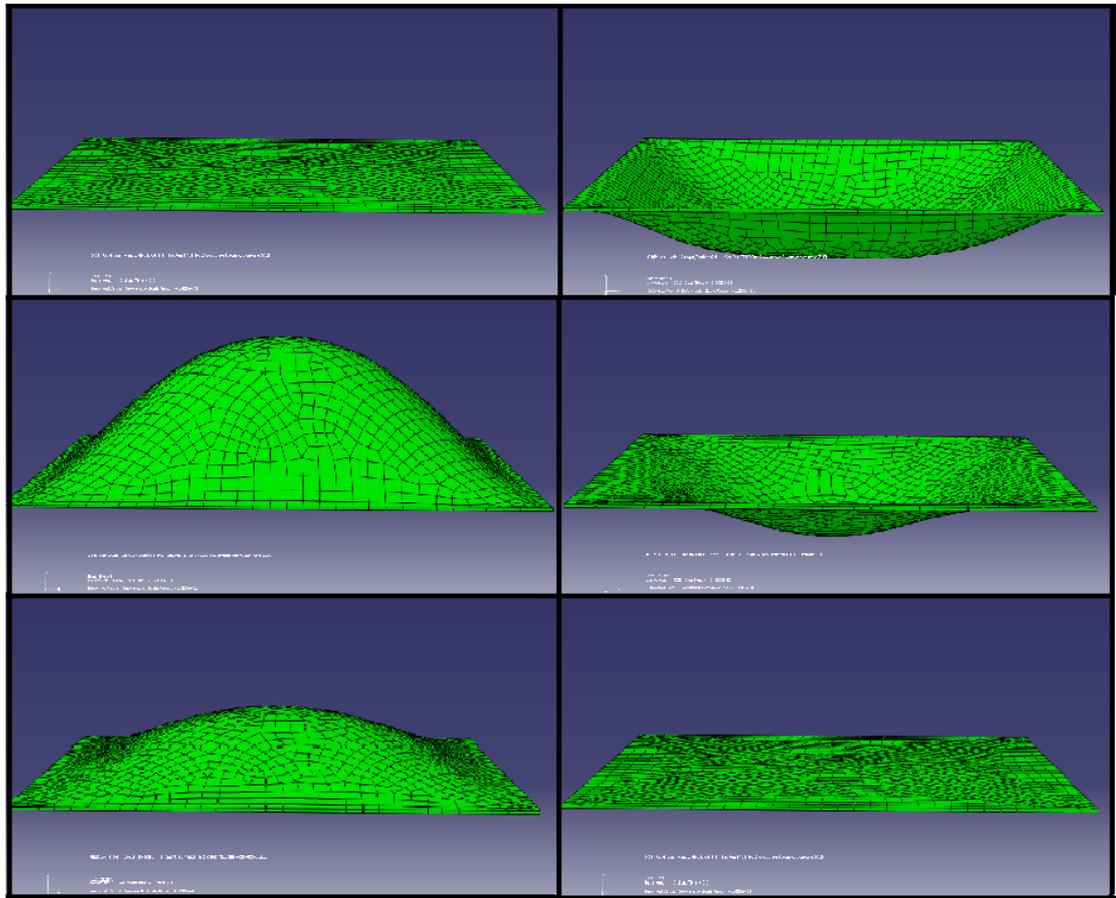


Fig.3.13. Alcuni fotogrammi della deformazione della piastra

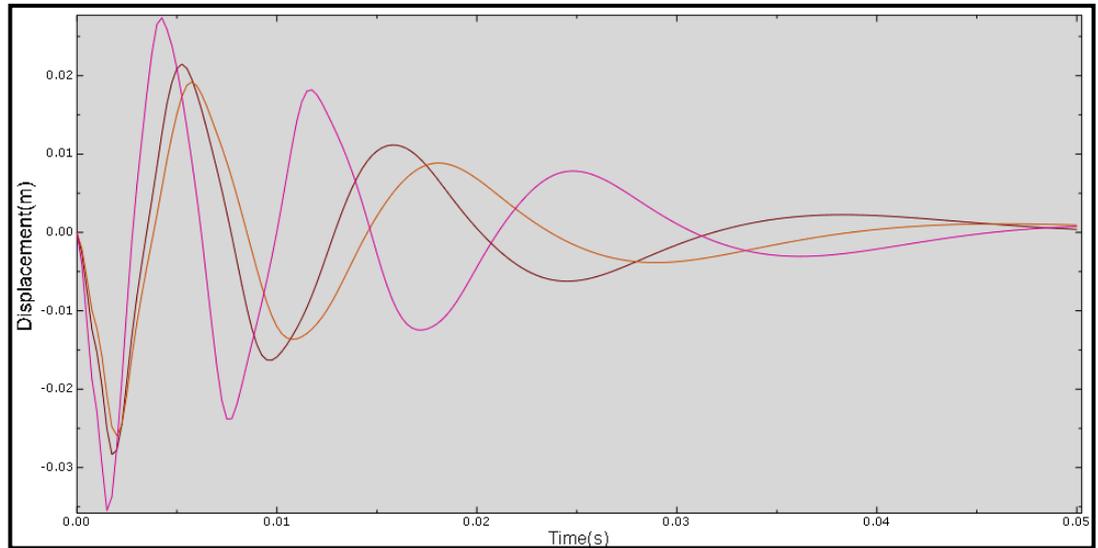


Fig 3.14 Plot degli spostamenti del centro della piastra derivanti dalle differenti teorie



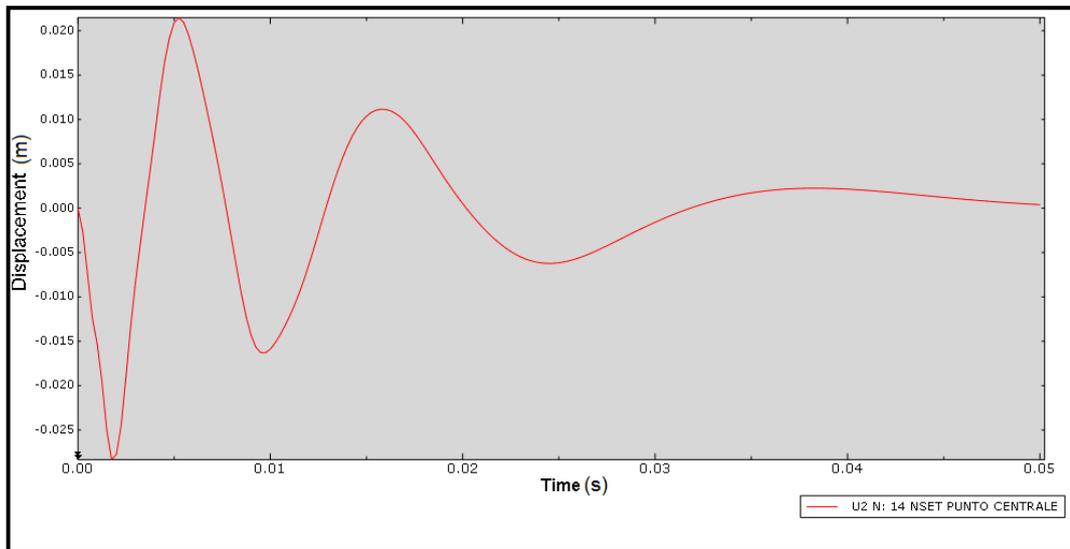


Fig 3.15 Plot degli spostamenti del centro della piastra applicando la teoria di Brade

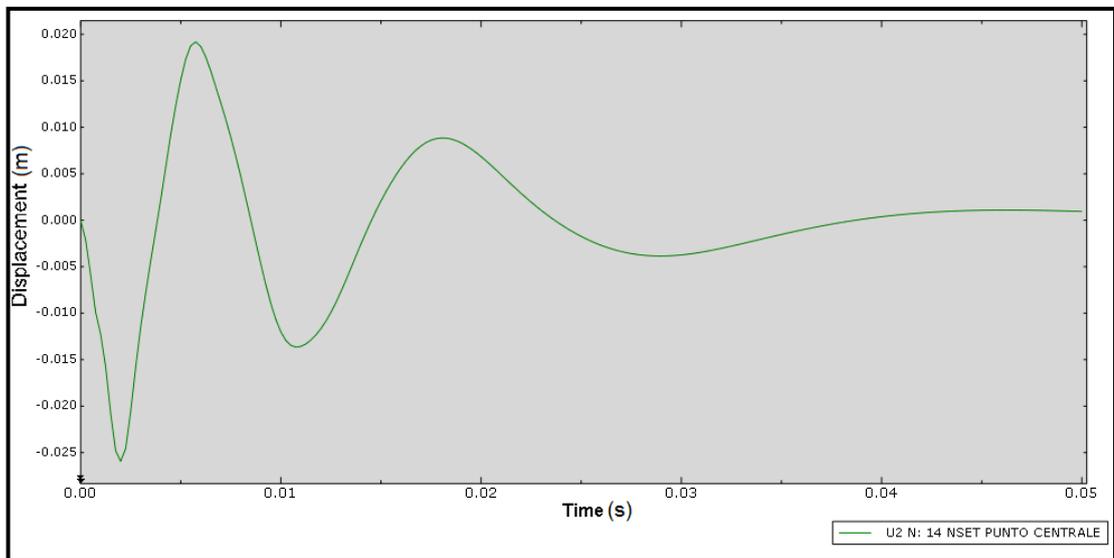


Fig.3.16 Plot degli spostamenti del centro della piastra applicando la teoria di Henrich

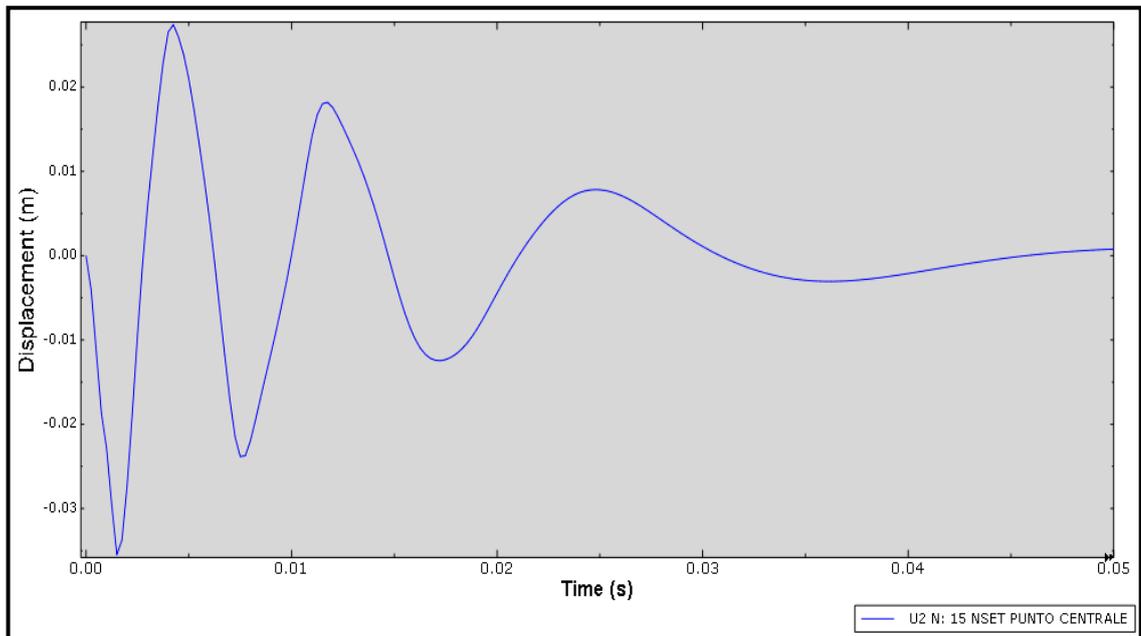


Fig.3.17 Plot degli spostamenti del centro della piastra applicando la teoria di Petroswi

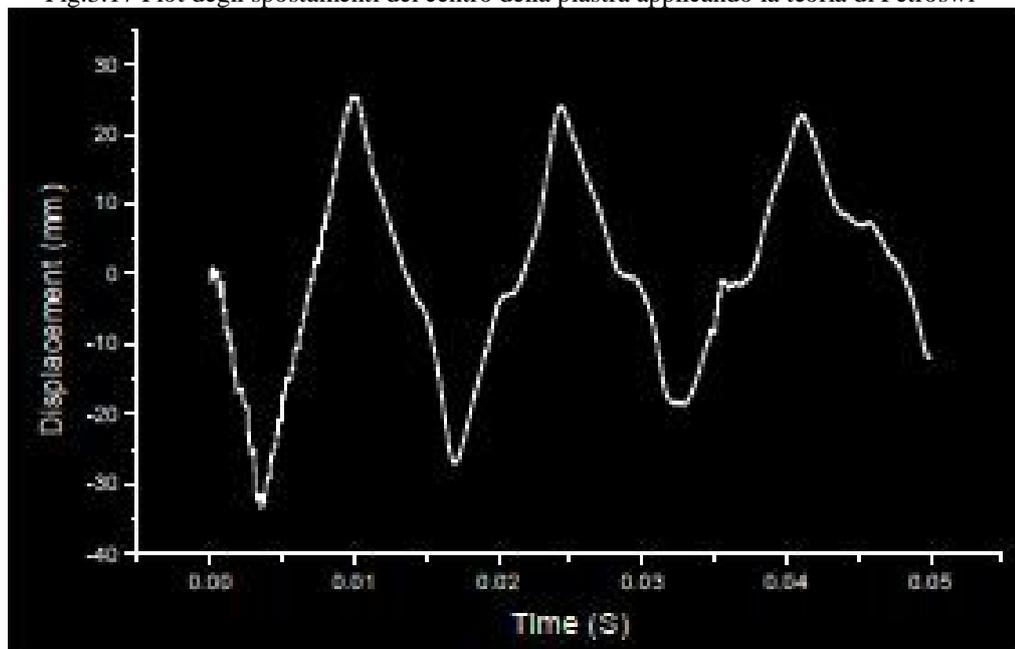


Fig.3.18 Plot degli spostamenti del centro della piastra registrato nella prova sperimentale

Tab.3.9

TEORIA	SPOSTAMENTI Stimati Max negativi	SPOSTAMENTI Misurati Max negativi	ERRORE Spostamento %
PETROSWI	-35.67 [mm]	-33.0 [mm]	+7.48 %
BRODE	-28.33 [mm]	-33.0 [mm]	-14.15%
HENRICH	-25.93 [mm]	-33.0 [mm]	-21.42 %
TEORIA	SPOSTAMENTI Stimati Max positivi	SPOSTAMENTI Misurati Max positivi	ERRORE Spostamento %
PETROSWI	+27.06 [mm]	+25.0 [mm]	+7.61 %
BRODE	+21.47 [mm]	+25.0 [mm]	- 14.12%
HENRICH	+19.18 [mm]	+25.0 [mm]	-23.28 %

In seguito ai risultati ottenuti si acquisisce per la valutazione del modello di mina Anti-Carro (AT Anti-Tank) la teoria di Petrosky in quanto per valori di distanza ridotta $[Z_i]$ minori di uno approssima più accuratamente la curva di pressione creata dalla detonazione di un ordigno esplosivo.

CAPITOLO 4

- *Effetto di una esplosione sulla piastra di base del veicolo lince: modellazione numerica*

4.1 Curva di pressione adottata

Nella modellazione delle curve di pressione consideriamo la piastra simmetrica, sia geometricamente, che per quanto concerne le condizioni di vincolo e di carico. Definiamo il sistema di riferimento scelto, con origine coincidente con il baricentro della piastra, si definisce una curva di pressione per ogni superficie di carico elementare.

Per conseguire una maggiore accuratezza nella modellazione della prova, la piastra viene discretizzata in un numero finito d'elementi.

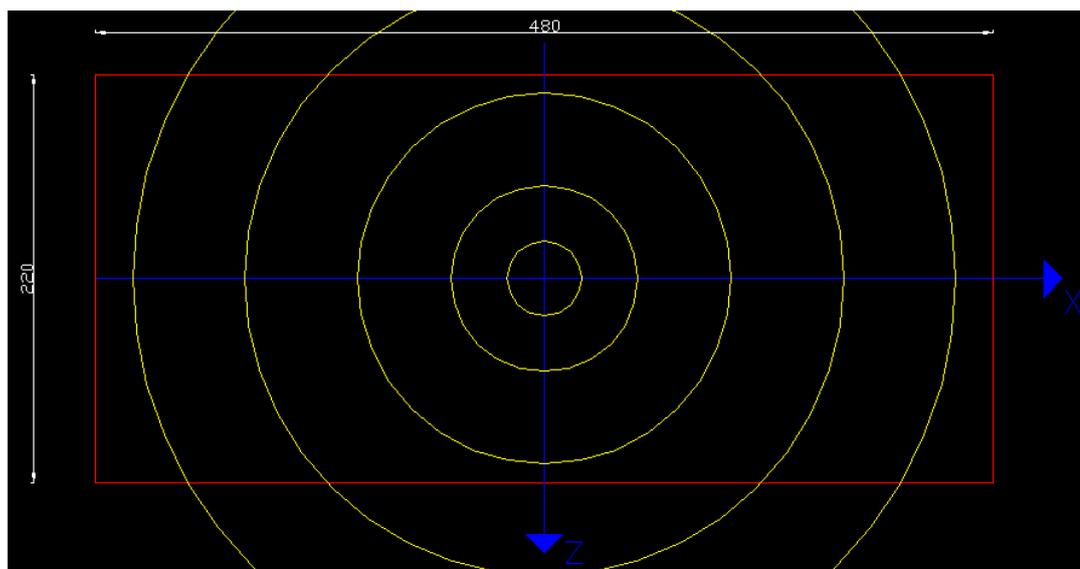


Fig.4.1 Piastra modello Lince

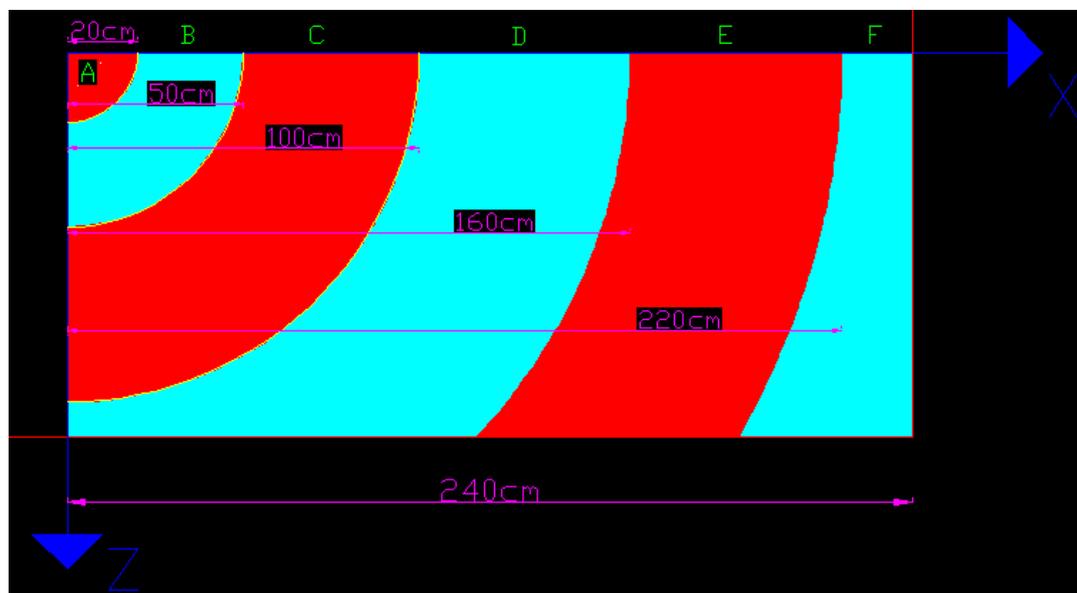


Fig 4.2 Discretizzazione della superficie di carico

Data la discretizzazione adottata, e le dimensioni delle singole superfici, saranno sei le curve di pressione da definire. Questa semplificazione, è resa possibile dalla simmetria d'applicazione del carico esplosivo, considerato centrato rispetto al baricentro della piastra stessa. Inoltre, la propagazione dell'onda di sovrappressione avviene in maniera sferica dal centro d'esplosione, essendo questo sollevato rispetto alla piastra e non ostacolato se non dalla piastra stessa. La pressione sui

singoli elementi, in un dato istante di tempo, sarà quindi una funzione della sola distanza effettiva dal centro d'esplosione. La curva di pressione quindi si ripete identicamente sulle superfici dei quattro elementi simmetrici rispetto al centro della piastra.

Si descrivono in seguito le operazioni, che si sono scelte di adottare per definire la curva di pressione prodotta dall'esplosione, facendo riferimento all'i-esimo elemento di dimensioni finite, in cui è stata suddivisa l'area di carico.

4.1.1 Coefficiente d'equivalenza

Nel considerare il peso della carica esplosiva è necessario introdurre un coefficiente d'equivalenza che consente di esprimere il peso della carica esplosiva in funzione del TNT (Trinitrotulene). L'esigenza di equiparare il peso di una qualunque carica esplosiva al TNT, nasce dalla necessità di impiegare formule empiriche nel calcolo della curva di pressione, ricavate attraverso prove sperimentali in cui il TNT è stato usato come materiale esplosivo di riferimento.

Il coefficiente d'equivalenza [q] è dato dal rapporto tra i calori specifici d'esplosione dei due materiali [6].

$$q = \frac{Q_{RDX}}{Q_{TNT}}$$

Considerando come esempio l'esplosivo del tipo RDX i rapporti valgono:

Tab. 4.1

Caratteristiche dell'esplosivo	
Esplosivo	Qw[Kcal/Kg]
RDX	1500
TNT	1000
Coefficiente d'equivalenza	
Q	1.5

Valore specifico degli esplosivi e coefficiente d'equivalenza

Ciò significa che, gli effetti prodotti da 1,0 [Kg] di RDX sono equivalenti a quelli prodotti dall'esplosione di 1,5 [Kg] di TNT.

Nel caso specifico si è utilizzata una composizione B la quale non altro che una miscela in percentuali specifiche TNT e RDX. Il risultato ottenuto è un tipo di esplosivo plastico più potente del tradizionale tritolo e di costo comunque contenuto, con un valore del coefficiente di equivalenza pari a [q=1.3];

4.1.2 Distanza Ridotta Z

Noti i pesi equivalenti della carica esplosiva e le distanze effettive tra il centro d'esplosione e quello della superficie dell'i-esimo elemento [R_i], è possibile calcolare la distanza ridotta [Z_i] d'ogni i-esimo elemento come: [6].

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$$

Dove la distanza effettiva dal centro d'esplosione [R_i] è così definita:

$$R_i = \sqrt{a^2 + b_i^2}$$

Così come si può semplicemente dedurre dalla seguente immagine, in cui si rappresentano la pianta e la sezione di un quarto di piastra, e l'i-esimo elemento a lei appartenente:

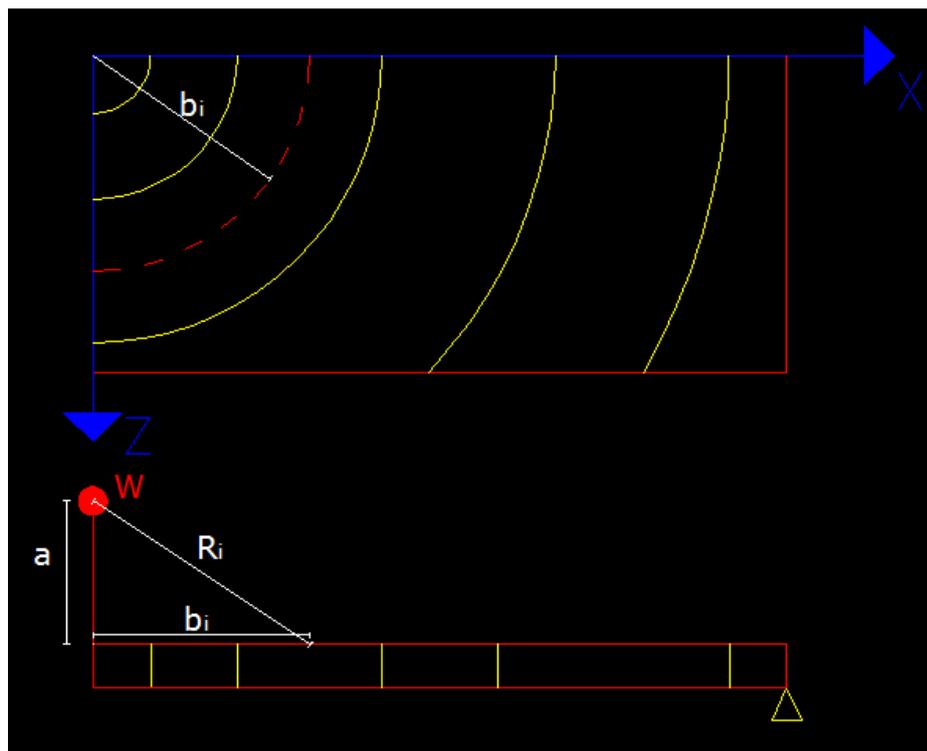


Fig:4.3 Distanza effettiva dell'i-esimo elemento dal centro d'esplosione.

4.1.3 Picco di Pressione Δp (Z)

In funzione delle distanze ridotte, si definisce il picco di pressione Δp (Z), per ogni singolo elemento in cui la piastra è stata in precedenza discretizzata.

Per la valutazione del picco di pressione Δp (Z) dopo aver equiparato i valori di pressione registrati nella prova sperimentale eseguita dal Laboratorio della Marina e Aeronautica di Melbourne [14] con

le varie teorie analizzate (Brode, Petrowski, Henrich) si è scelto di utilizzare la teoria di **Petrowsky** [6], in quanto approssima meglio la curva di pressione.

Riportiamo in dettaglio la teoria scelta.

- Petrowski G.I:

$$\Delta p(Z) = \left(\frac{10,7}{Z^3} - 1 \right) \quad Z \leq 1$$

4.1.4 Durata della fase positiva

La fase positiva è l'intervallo entro cui si annulla la sovrappressione prodotta dall'esplosione nell'aria circostante. L'espressione usata per la sua definizione è la seguente [6]:

$$t^+ = B - 10^{-3} \left(\sqrt[6]{W_{TNT}} \sqrt{R} \right)$$

Allo stesso modo di quanto visto nella definizione della curva di pressione, anche in questo caso la durata della fase positiva si esprime in funzione di $[W]$ e di $[R]$, attraverso una più semplice espressione semiempirica.

$[B]$ è una costante numerica che si assume nella pratica pari a $B=1,3$. [6]

4.1.5 Coefficiente Sperimentale $[\alpha]$.

Per definire ogni singola curva di pressione, è necessario esprimere in funzione della distanza ridotta $[Z]$, un coefficiente di natura sperimentale $[\alpha]$. Tale coefficiente si può trovare tabellato [6], in funzione però di soli alcuni valori di $[Z]$. Mediante un'operazione d'estrapolazione, dai valori noti del coefficiente, è stato possibile ricavare i diversi valori di $[\alpha]$ al variare della distanza ridotta.

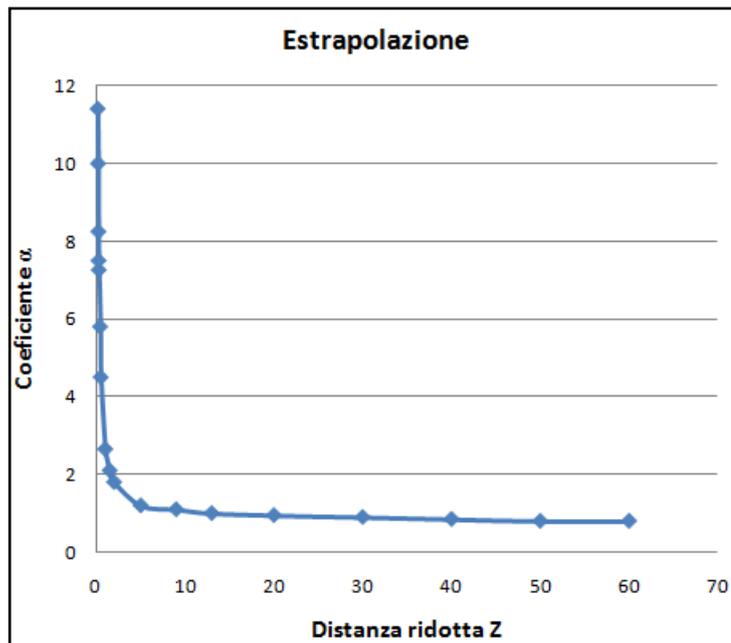


Fig. 4.4 Estrapolazione numerica del coefficiente sperimentale α .

4.1.6 Curva di Pressione $P(Z, t)$

La curva di pressione non è altro che l'andamento della pressione prodotta dall'esplosione in un dato istante di tempo $[t]$, e a una certa distanza ridotta $[Z]$. Analiticamente l'andamento della pressione può essere calcolato come segue [6]:

$$P(Z, t) = P_y^+ - P_0 = \Delta P(Z) \left(1 - \frac{t}{t^+} \right) e^{-\alpha \frac{t}{t^+}}$$

Fissata la distanza ridotta $[Z]$, da cui dipende sia il picco di pressione $\Delta p (Z)$ che il coefficiente sperimentale $[\alpha]$, attraverso quest'espressione si ottiene la curva di pressione al variare del tempo. Essendo $[Z]$ a sua volta funzione della distanza effettiva dal centro d'esplosione $[R]$, al variare di questa otteniamo diversi valori di $[Z]$, e quindi differenti curve di pressione. Ragion per cui sarà necessaria definire per ogni superficie della piastra una curva di pressione diversa.

Riportano di seguito i risultati conseguiti nella definizione delle curve di pressione ipotizzando che l'esplosione avvenga nel centro della piastra. Essendo, infatti, il centro della superficie superiore della piastra, il punto più vicino al centro d'esplosione, essa sarà la superficie maggiormente sollecitata.

Di seguito valutiamo che allontanandoci dal centro di esplosione le sollecitazioni diminuiscono. Nel definire l'andamento della pressione al variare del tempo, si trascura per semplicità di calcolo, la determinazione del tempo d'arrivo $[TOA]$, essendo irrilevante rispetto all'intera durata della curva di pressione. Il tempo d'arrivo si definisce come il tempo impiegato dal fronte d'onda a impattare contro la superficie superiore della piastra. Il metodo sopra esposto sarà impiegato nella definizione delle curve di pressione, per ogni singola superficie della piastra, al variare della distanza effettiva tra il centro d'esplosione e il baricentro dell'elemento.

Tab. 4.2

DATI CURVA	1	2	3	4	5	6
Teoria Petroswi						
a (m)	0.10	0.35	0.75	1.30	1.90	2.30
b (m)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Ri (m)	0.503	0.605	0.898	1.390	1.193	2.352
Wtnt (kg)	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
Wb (kg)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Zi (m)	0.213	0.257	0.382	0.591	0.835	1.000
α (adim)	9.18	7.90	6.57	5.87	3.76	2.65
Pmax(Mpa)	102.80	59.90	18.53	4.95	1.70	0.96
t+ (ms)	1.41	1.55	1.90	2.35	2.80	3.05

Di seguito si riportano le curve di pressione calcolate:

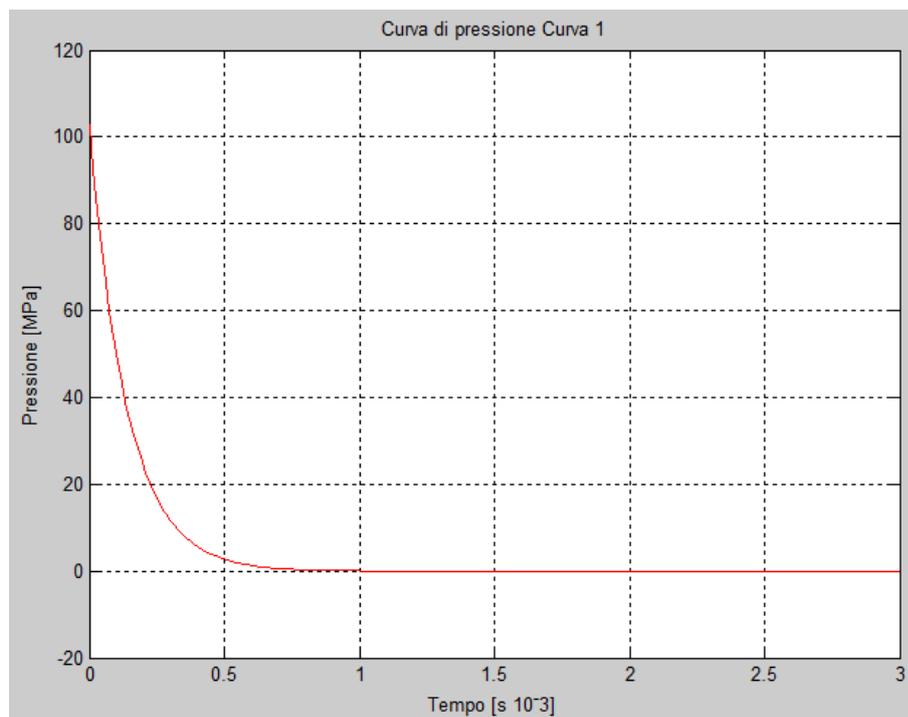


Fig.4.5 Pressione curva 1

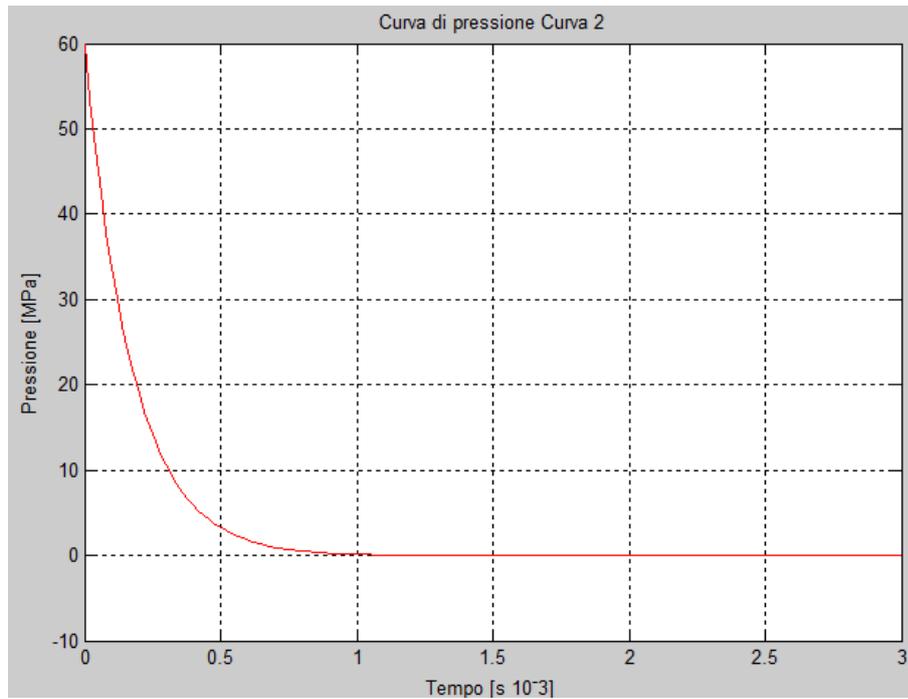


Fig.4.6 Pressione curva 2

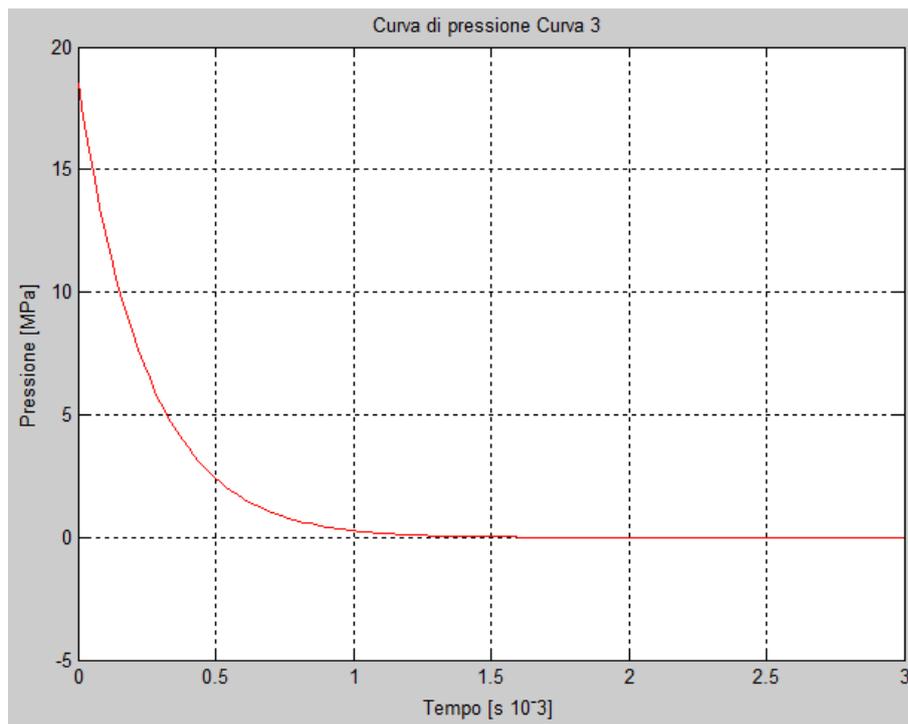


Fig.4.7 Pressione curva 3

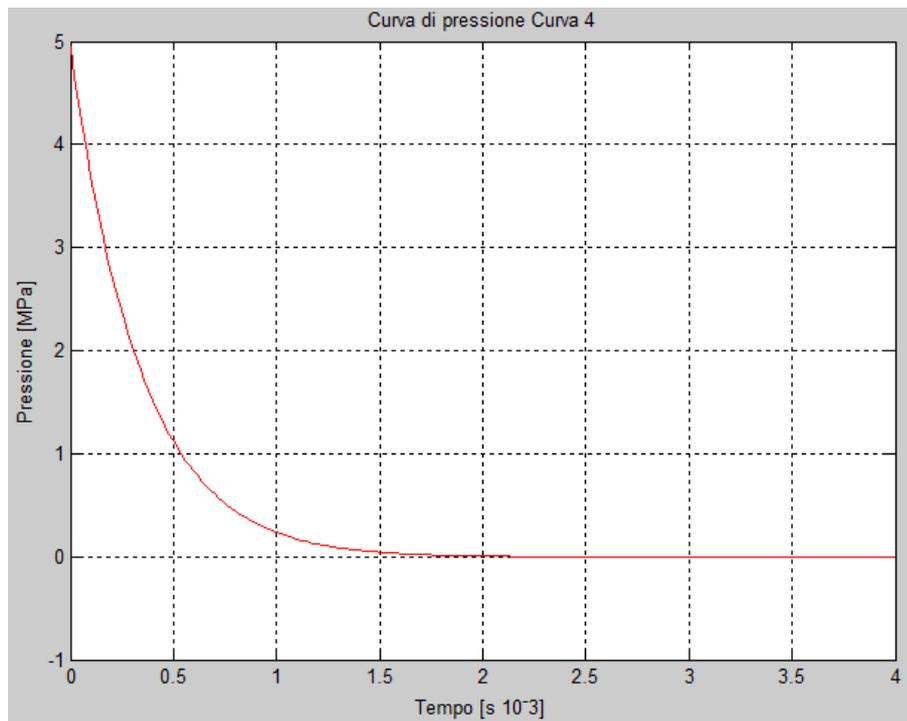


Fig.4.8 Pressione curva 4

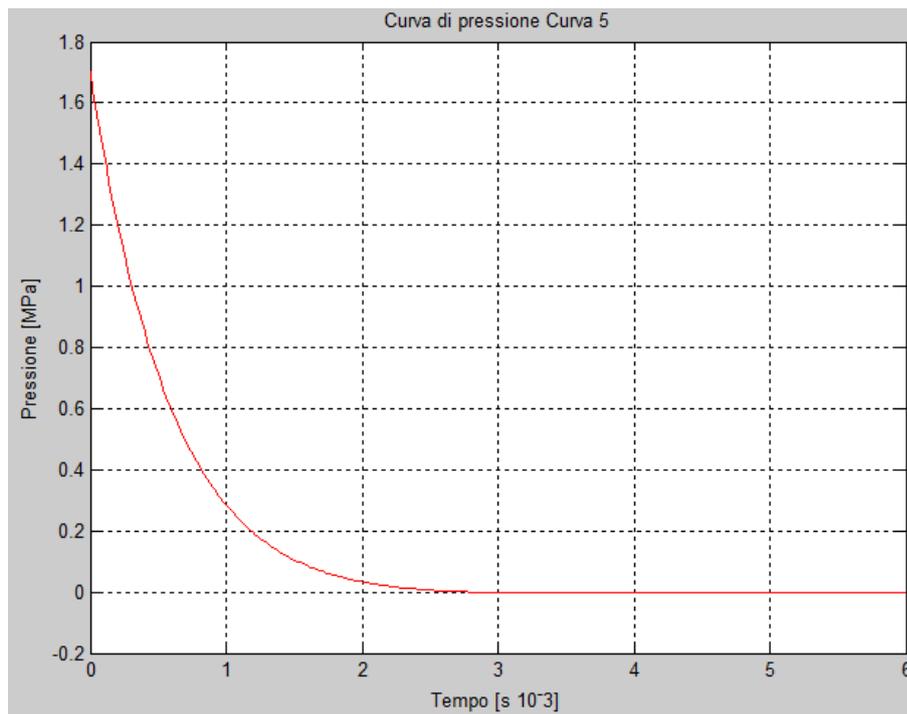


Fig.4.9 Pressione curva 5

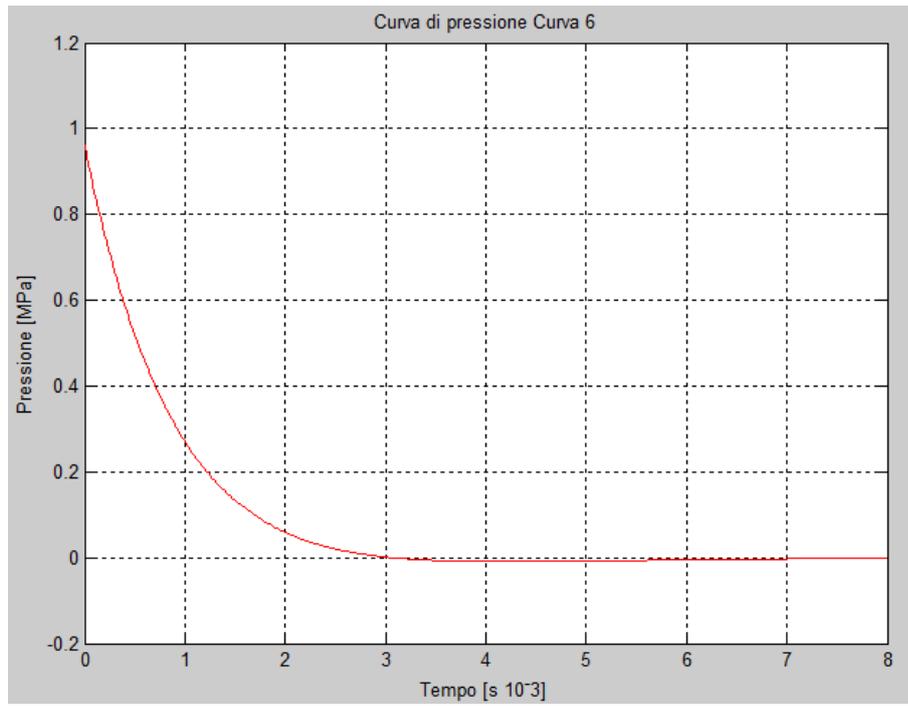


Fig.4.10 Pressione curva 6

4.2 Modellazione numerica con Abaqus

Introduzione

Modellare numericamente una prova sperimentale significa riprodurre, grazie all'ausilio di un codice di calcolo, lo stesso elemento oggetto della sperimentazione. Le evidenze sperimentali possono essere utilizzate per verificare l'attendibilità del modello creato al computer, oppure i risultati dei test potranno essere impiegati per calibrare il modello stesso. Tutto ciò è finalizzato alla costruzione di un modello che consente di eseguire sperimentazioni numeriche, senza ricorrere necessariamente alle prove sperimentali da realizzare in laboratorio, con i costi e le problematiche che esse comportano. Individuate quali sono le principali finalità della modellazione numerica, bisogna poi in seguito scegliere tra i codici di calcolo strutturali a disposizione, quello da impiegare per la simulazione stessa.

Il lavoro di tesi prosegue nella definizione di un modello agli elementi finiti in grado di simulare il comportamento della piastra in esame sotto carichi d'esplosione.

Per proseguire tale obiettivo si è fatto ricorso all'utilizzo di un programma agli elementi finiti (FEM), quale Abaqus nella versione 6.9-1.

Sin dalla sua invenzione, risalente alla metà del secolo scorso, il metodo degli elementi finiti (*FEM*), è stato largamente impiegato per le computazioni numeriche nell'ambito ingegneristico [10]. Il *FEM* rientra tra i metodi approssimati per la risoluzione delle equazioni fondamentali della statica e della dinamica.

La sua principale caratteristica risiede nella possibilità di suddividere un continuo in un numero discreto d'elementi, che non si sovrappongono nel dominio di nostro interesse. Tale operazione è chiamata "*Discretizzazione del continuo in Elementi Finiti*".

I singoli elementi sono vincolati tra loro da una mappa topologica, definita *Mesh (Maglia)*, sopra la quale sono costruite le funzioni di interpolazione. A ogni elemento in cui il continuo è stato suddiviso, vanno associate delle funzioni spostamento mediante il vettore spostamento così definito:

$$s = s\{x, y, z, t\}$$

Questi vettori sono definiti attraverso la funzione di spostamento dei singoli nodi [10]:

$$s(x, y, z, t) = \begin{bmatrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ z(x, y, z, t) \end{bmatrix} = [N]\{\Delta\}$$

Dove $[N]$ è la matrice delle funzioni di forma, questa lega gli spostamenti generici all'interno dell'*i*-esimo elemento agli spostamenti dei nodi $\{\Delta\}$, che lo individuano nello spazio. Le funzioni di forma sono in numero pari al numero di nodi della *Mesh*, e per definizione valgono 1 se calcolate nel nodo a cui si riferiscono, e 0 negli altri nodi dell'elemento *i*-esimo. Le funzioni di forma hanno un ruolo

fondamentale nel metodo d'analisi, in quanto rappresentano il polinomio che approssima il valore esatto degli spostamenti, e determinano quindi la convergenza del metodo [10].

La Mesh assicura la compatibilità delle interpolazioni, sebbene non sempre le condizioni di compatibilità numerica coincidono con quelle fisiche del continuo stesso.

In oltre, quando uno stesso corpo presenta caratteristiche locali diverse, o geometrie complesse, è necessario suddividerlo in un numero molto elevato di elementi finiti, realizzando quindi una maglia sempre più fitta, ed aumentando l'onere di computazione.

Abaqus è un programma di simulazione, utilizzato sia per la risoluzione di problemi che variano da analisi relativamente semplice, come analisi lineari, che per simulazioni più impegnative come quelle non lineari. Abaqus contiene una vasta libreria di materiali con i quali è possibile simulare il comportamento dei più comuni materiali utilizzati nelle costruzioni tra cui metalli polimeri, materiali compositi, cemento armato ecc.. Concepito come un generale strumento di simulazioni, è in grado di simulare i problemi in settori diversi come problemi strutturali (stress / strain), trasferimento di calore, diffusione di massa, gestione termica dei componenti elettrici, acustica, meccanica del suolo ecc.[18]

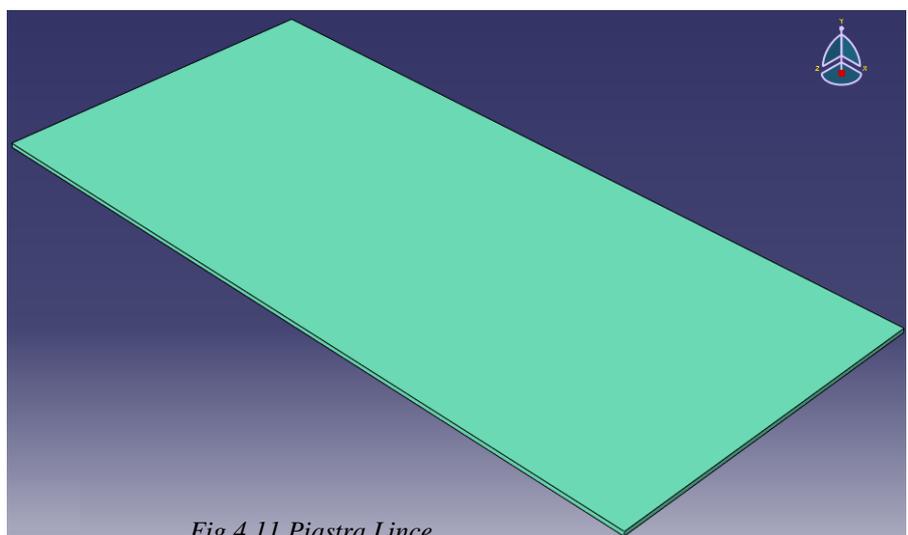
Il seguente scritto contiene la descrizione dell'attività di modellazione svolta, sviluppata seguendo lo schema di lavoro proposto da Abaqus stesso.

Lo schema di lavoro utilizzato ha il pregio di essere particolarmente dinamico, in quanto consente di avanzare rapidamente da uno modulo di lavoro a quello successivo, o eventualmente di retrocedere a moduli precedenti, nei casi in cui si renda necessario apportare correzioni o nuove definizioni al modello in esame.

Abaqus, inoltre, permette di visualizzare sul lato sinistro del display un comodo riepilogo di tutte le operazioni svolte per facilitare il controllo dell'attività di modellazione. I passaggi principali attraverso i quali si sviluppa il percorso di lavoro adottato in questo studio sono di seguito riportati e descritti in dettaglio, nel tentativo di fornire al lettore un rapido strumento di acquisizione dei concetti fondamentali alla base del software in esame.[19]

I moduli di lavoro sono complessivamente sette e sono prima elencati e in seguito approfonditi:

- Parts
- Property
- Assembly
- Step
- Load
- Mesh
- Job



4.2.1 Parts

La costruzione del modello geometrico avviene attraverso la definizione di una o più “Parts”, che è possibile creare a partire dallo stesso Abaqus, oppure più semplicemente è possibile importare modelli geometrici da altri programmi di disegno con i quali è possibile interfacciare.

In seguito occorre assegnare alla “Parts” le caratteristiche di un solido tridimensionale deformabile. In questa prima fase del lavoro le “Parts” si muovono liberamente nello spazio virtuale di Abaqus, poiché ancora non è stata definita la loro posizione rispetto al sistema di riferimento principale del programma.

4.2.2 Property

Definita la geometria del collegamento, è ora necessario definire il materiale o i materiali costituenti la sezione, prestando particolare attenzione alla definizione delle sue caratteristiche meccaniche, quali l’elasticità, la plasticità, e eventualmente anche le caratteristiche termiche, qualora fosse richiesta un’analisi termica.

In questo lavoro di tesi, la modellazione è stata condotta in riferimento alle sole caratteristiche meccaniche della piastra in analisi. Per quanto riguarda le analisi dimensionali è bene notare che Abaqus è sprovvisto di sistema di unità di misure, quindi occorre al momento della creazione del modello geometrico imporre un sistema congruente. Si è fissato all’atto di creazione di definire le Lunghezze in Metri, in riferimento invece, all’unità di misura delle Forze si è deciso di adottare il Newton e quindi di esprimere le Pressioni in N/m^2 .

Tab 4.3 Unità di misura congruenti

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m^2)	MPa (N/mm^2)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Definita la geometria del modello e i materiali costitutivi della piastra, è necessario assegnare a una o a eventuali più “Part” la relativa sezione tramite la funzione “Section Assignment”.

4.2.3 Assembly

Questo modulo è utilizzato per assegnare le “Part” al riferimento generale del programma. Per conseguire tale operazione, Abaqus richiede la creazione di nuove entità definite “Istances”, che ovviamente andranno create in un numero pari agli elementi costituenti il modello.

La fase di “Assembly” è caratterizzata inoltre, dalla possibilità di eseguire una molteplicità di operazioni sulle varie “Istances” create, quali ad esempio la definizione di punti o di superfici di

particolare interesse, i cosiddetti “Referance Points” o le genericamente chiamate ”Surfaces”, fondamentali per applicare con precisione eventuali carichi concentrati o disporre i vincoli necessari. Nel caso in cui si renda necessario partizionare una linea di contorno, una superficie o un volume del modello in esame, si può ricorrere, sempre operando nel contesto dell’“Assembly” al comando “Partition”. Quest’ultimo consente una rapida suddivisione geometrica dell’“Istances” desiderata, qualora si renda necessario delimitare una zona di particolare interesse per poter applicare solo localmente un carico o un’eventuale interazione tra superfici.

In particolare, nel modello realizzato si sono utilizzate queste funzioni allo scopo di suddividere la superficie della piastra in modo da poter applicare le differenti curve di pressione generate dalla detonazione del materiale esplosivo.

Infine si sono creati dei punti sulla superficie i quali diventeranno i nostri punti di controllo per le registrazioni degli spostamenti e delle velocità impresse dall’esplosione alla nostra piastra. Ricordiamo a titolo di curiosità che queste operazioni possono essere definite anche al momento della creazione delle varie “Part”.

4.2.4 Step

Abaqus permette di sviluppare l'analisi statica o dinamica del modello in presenza o meno degli effetti di non linearità geometrica, attraverso la successione di diverse fasi di lavoro il cui numero e il cui ordine di successione ovviamente dipende dalla scelta del percorso di modellazione che l'autore si propone di seguire.

Nel caso particolare è stata scelta un'analisi dinamica esplicita la quale assicura un cospicuo guadagno dal punto di vista computazionale del modello. In seguito sono stati imposti la frequenza d'interazione e il periodo di analisi.

All'interno del modulo "Step" occorre definire anche le funzioni di output le quali forniscono al programma le istruzioni dei dati da visualizzare al termine della simulazione, in particolare si è scelto di misurare gli spostamenti sia del modello nel suo insieme che dei "Reference Points" definiti precedentemente.

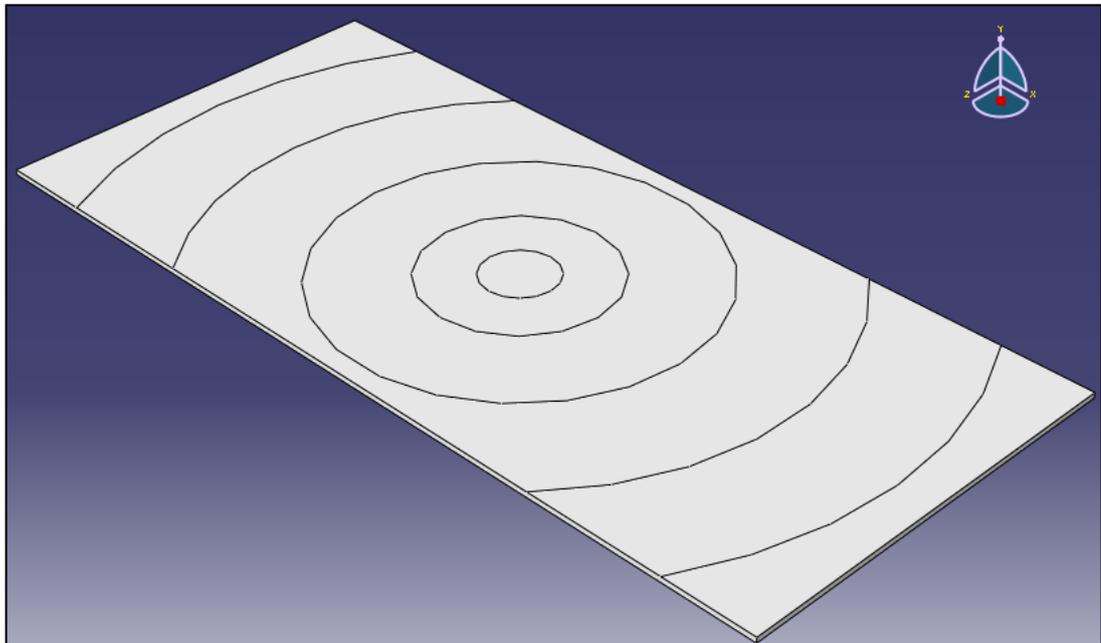


Fig.4.12 Superfici di discretizzazione curve

4.2.5 Load

Nel successivo modulo di lavoro è necessario fare ricorso al comando “Boundary Condition”, la cui funzione è fondamentalmente quella di imporre i vincoli della sezione. Nel caso in esame si è scelto di appoggiare la piastra su tutti e quattro i bordi vincolando esclusivamente le traslazioni.

Il passo successivo è quello di caricare le curve di pressione calcolate precedentemente utilizzando il comando “Load” definendone l’andamento delle pressioni dipendente dal tempo e imponendo le aree interessate dall’ esplosione

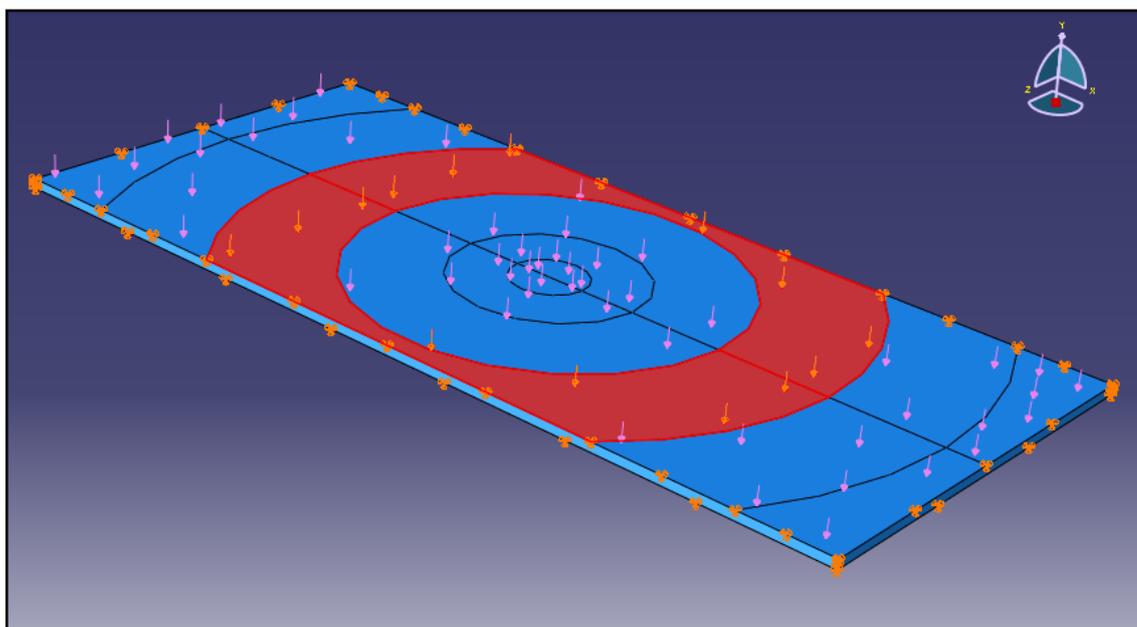


Fig. 4.13 Carichi piastra

4.2.6 Mesh

Prima di poter procedere alla suddivisione delle “Istances” in elementi finiti, è consigliabile controllare se le partizioni adottate nel modulo di lavoro “Assembly”, consentono di far ricorso alle tecniche di mesh che il programma mette a disposizione. Infatti, Abaqus propone tre differenti metodologie di mesh:

- “Structured”
- “Swept”
- “Free”

La metodologia “Stuctured” è indicata nei casi in cui la geometria del modello è piuttosto semplice e regolare, ed è in grado di fornire risultati molto precisi a patto che le “Istances” siano partizionate in modo estremamente fitto. Il principale vantaggio che tale tecnica offre, è quello di poter applicare all’intera “Istances” un “Global Seed”, cioè permette di realizzare, attraverso tale comando, la suddivisione istantanea in elementi di dimensioni e di forma tutti uguali.

Le tecniche del tipo “Swept” e “Free”, invece sono preferibili nei casi in cui la geometria del modello sia irregolare e richiede l’utilizzo di elementi di forma e dimensione differenti.

Abaqus consente, nel caso di modellazioni tridimensionali, di suddividere le “Istances”

in esaedri, tetraedri o prismi, di ordine lineare o quadratico, a seconda del numero di punti di integrazione che essi presentano lungo ciascuna direzione.

Ad esempio, un elemento di forma cubica, si dice lineare se presenta due soli punti d'integrazione lungo ciascuna direzione, e quindi complessivamente è rappresentato da otto punti. Sarà quadratico, invece, se è caratterizzato dalla presenza di tre punti d'integrazione lungo ogni direzione, per un totale di diciotto punti.

Per quanto riguarda invece il metodo d'integrazione offerto da Abaqus, è possibile scegliere tra un'integrazione piena o ridotta, a seconda del numero di punti di Gauss utilizzati per risolvere l'integrazione dei termini dell'equazione polinomiale relativa alla matrice delle rigidezze del generico elemento. In particolare, l'integrazione si dice piena se fa uso di tutti i punti d'integrazione cui dipende ciascun elemento. Si definisce invece ridotta, se per ciascun elemento ricorre a un solo punto d'integrazione disposto nel suo baricentro. Ovviamente l'analisi a integrazione ridotta conduce a risultati meno precisi, ma in ogni modo attendibili e tali da comportare un notevole risparmio in termini di oneri computazionali per il processore.

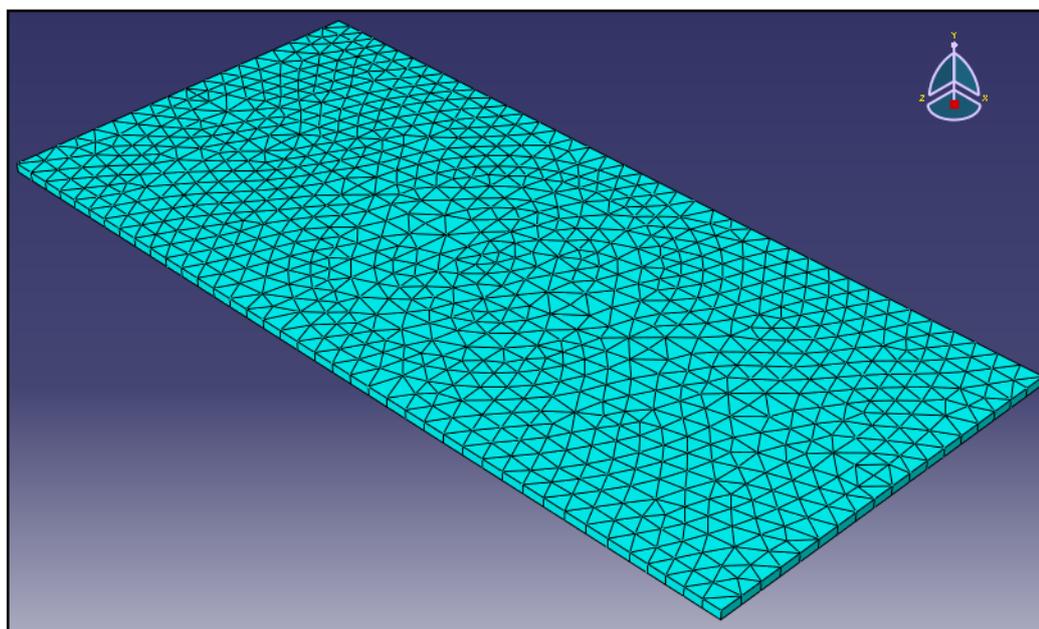


Fig.4.14 Mesh piastra

4.2.7 Job

In quest'ultimo modulo, prima di poter comandare l'esecuzione dell'analisi numerica, è richiesta la creazione di un "Job", di cui occorre definire il nome e la tipologia. In relazione alle possibili scelte di "Job Type", è stata selezionata l'opzione "Full Analysis" in modo da eseguire un'analisi completa e approfondita.

Dopo aver ultimato la creazione del "Job", è buona regola sottoporlo sempre alla procedura "Data Check" preventiva. Abaqus, infatti, mediante l'applicazione di tale comando, consente di individuare la presenza di possibili errori commessi nella modellazione, e in alcuni casi, attraverso gli avvertimenti, detti "Warnings", ne permette il riconoscimento e la correzione.

Il “Data Check”, viene utilizzato in quanto consente anche senza sottoporre il modello a un’analisi completa, a prevederne l’arresto nell’ipotesi di errori gravi, o l’esecuzione nel caso di semplici avvertimenti, che però potrebbero condurre a risultati errati, il tutto senza l’onere computazionale dell’analisi completa.

Inoltre, una volta che l’analisi è stata avviata, è possibile controllarne lo sviluppo nei vari “Steps”, facendo ricorso al comando “Monitor”.

Nel caso frequente in cui dai “Warnings” emessi da tale comando, si riscontri un errore, ma non sia possibile identificarlo chiaramente, è consigliabile ricorrere all’uso dell’”Edit Keywords”, il quale agisce come una sorta di diario in cui sono annotate e riepilogate nel linguaggio di programmazione di Abaqus, tutte le operazioni che sono state comandate al programma nel corso della modellazione.

In conclusione, sia mediante l’ausilio della funzione “Monitor”, che consente di risalire facilmente allo “Steps” interessato dall’errore, sia attraverso il ricorso dell’opzione “Edit Keywords”, nella quale è lecito investigare approfonditamente tutte le operazioni comandate, si può porre rimedio agli inevitabili errori commessi nel corso di tale attività di modellazione.

4.3 Risultati

4.3.1 Analisi Elastica

Nelle sessione seguente si è svolta l'analisi elastica della piastra sottostante il veicolo VLTM Lince, essa svolge un ruolo fondamentale sulla protezione e blindatura del mezzo.

Inizialmente si esegue in analogia all'analisi svolta nel capitolo 3.3 un'analisi considerando il materiale elastico lineare per poter valutare le oscillazioni causate dalla detonazione dell'ordigno anti-carro sul pianale del veicolo.

Si effettua l'analisi su quattro piastre aventi le dimensioni geometriche del pianale del veicolo in analisi le quali si differiscono per differenti spessori relativamente (10[cm]-5[cm]-3[cm]-1.5[cm])

Riportiamo le caratteristiche del materiale nella tabella seguente.

Tab. 4.4

Caratteristiche Materiali	
Dimensioni	480X220 [cm]
Modulo di Young	203 [GPa]
Coeff. di Poisson	0.3
Densità	7850 [Kg/mc]

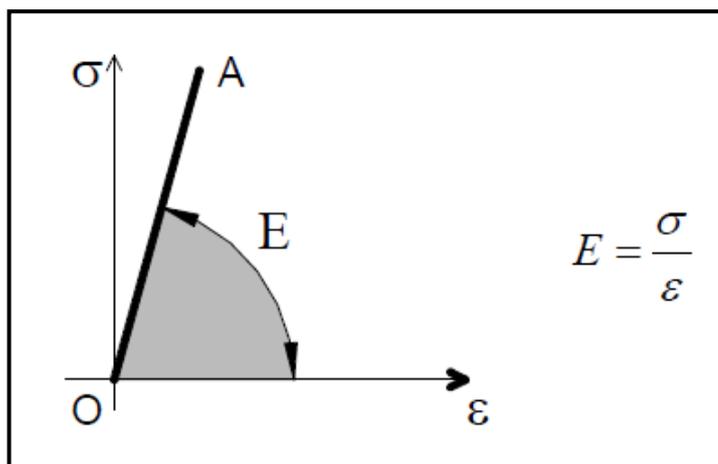
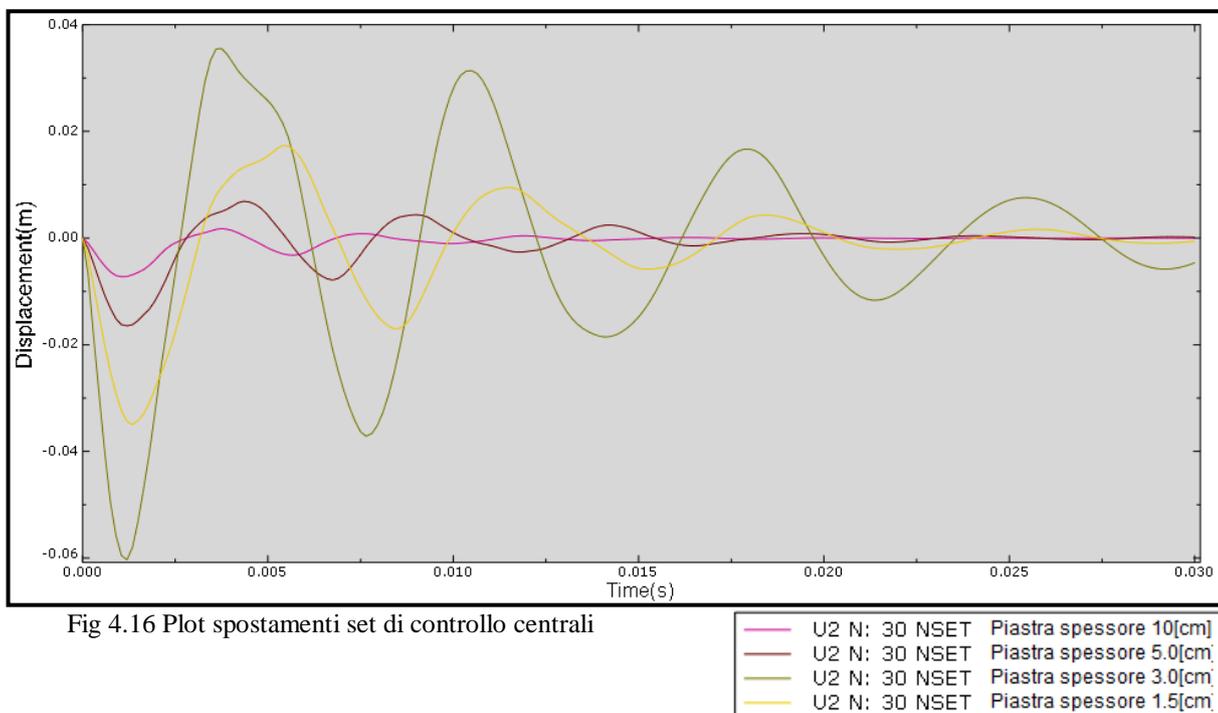


Fig. 4.15 Materiale elastico lineare

Succeivamente aver caricato le curve di pressione valutate nel capitolo 3.4.6. in modo da analizzare gli spostamenti generati dalla detonazione del materiale esplosivo, confrontiamo gli spostamenti calcolati nei set di controllo disposti nel centro delle differenti piastre.



Tab 4.5 Spostamenti Max per i vari spessori nel set di controllo centrale

SET	SPOST. Max	
	Negativo	Positivo
Spessore 10 [cm]	- 0.7 [cm]	+ 0.2 [cm]
Spessore 5 [cm]	- 1.6 [cm]	+ 0.7 [cm]
Spessore 3 [cm]	- 3.5 [cm]	+ 1.7 [cm]
Spessore 1.5 [cm]	- 6.0 [cm]	+ 3.6[cm]

Riportiamo per brevità in dettaglio esclusivamente gli spostamenti della piastra avente come spessore 3 [cm], calcolati nei set di controllo disposti rispettivamente a distanza (0-35-75-130-230 [cm]) dal centro della piastra.

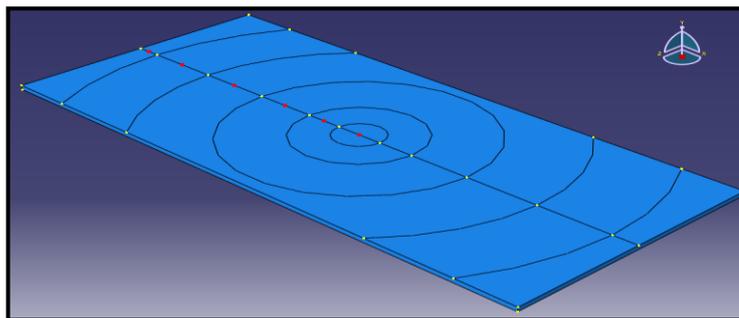


Fig.4.17 Disposizione Set di controllo

Tab.4.5 Spostamenti generati dall'esplosione

SET	SPOST. Max Negativo	SPOST. Max Positivo
Punto centrale	- 3.496 [cm]	+ 1.732 [cm]
Punto 35 [cm]	- 3.238 [cm]	+ 1.678 [cm]
Punto 75 [cm]	- 2.760 [cm]	+ 1.875 [cm]
Punto 130 [cm]	- 0.905 [cm]	+ 0.708[cm]
Punto 190 [cm]	- 0.863 [cm]	+ 0.594[cm]
Punto 230 [cm]	- 0.044[cm]	+ 0.031 [cm]

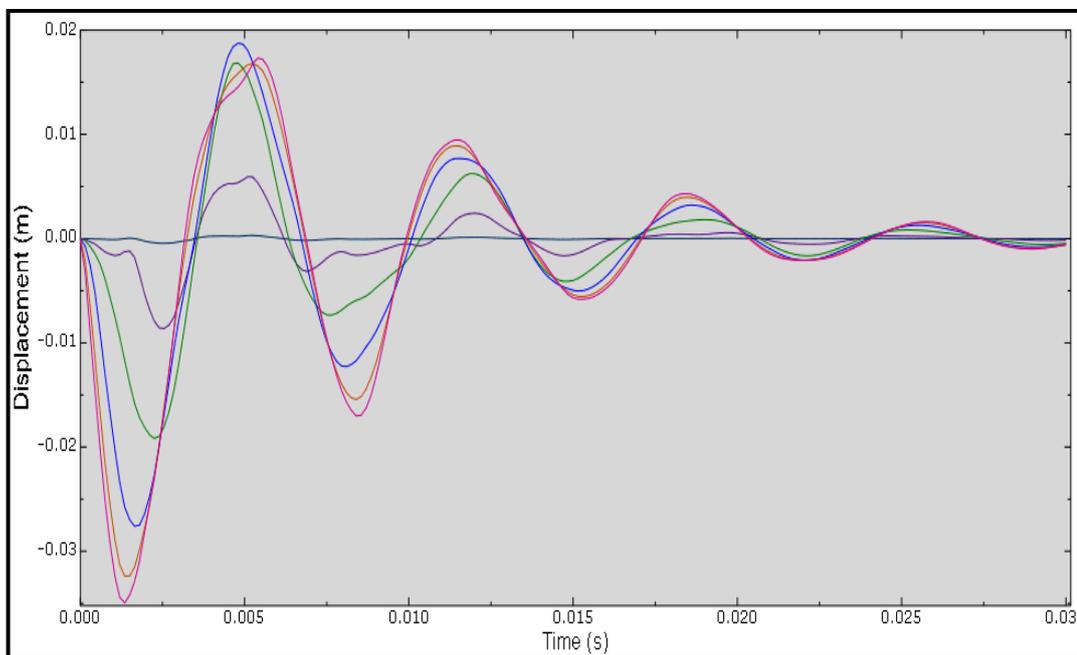
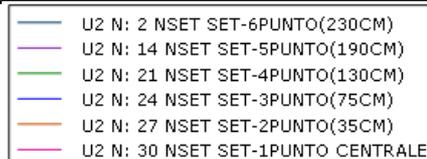


Fig.4.18 Plot spostamento tutti i set controllo



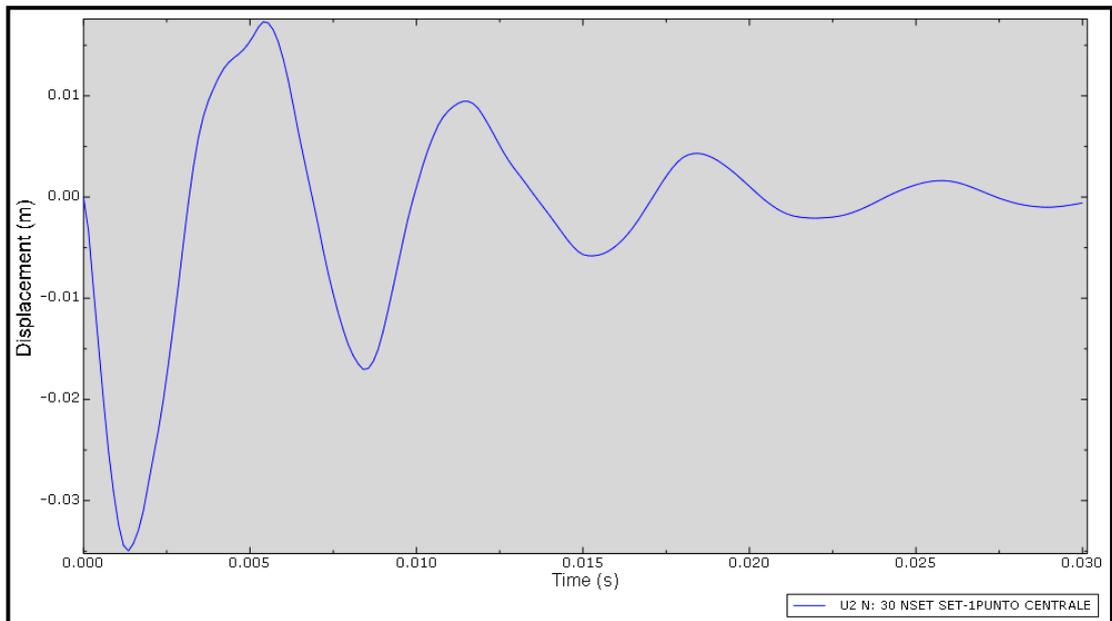


Fig.4.19 Plot spostamento Set centrale

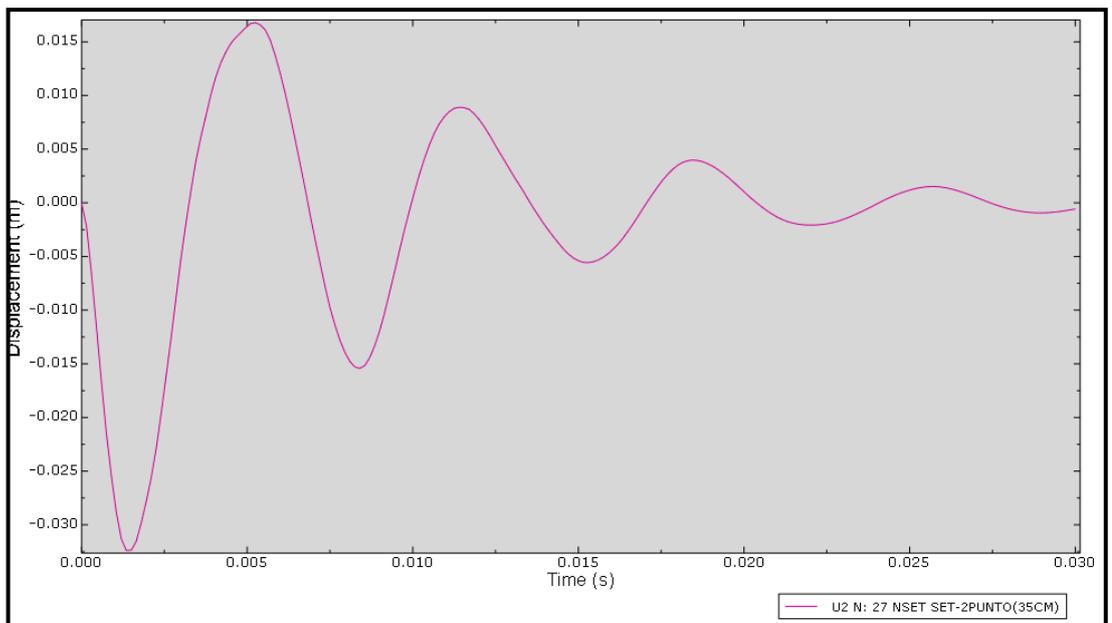


Fig.4.20Plot spostamento Set 35[cm]dal centrale della piastra

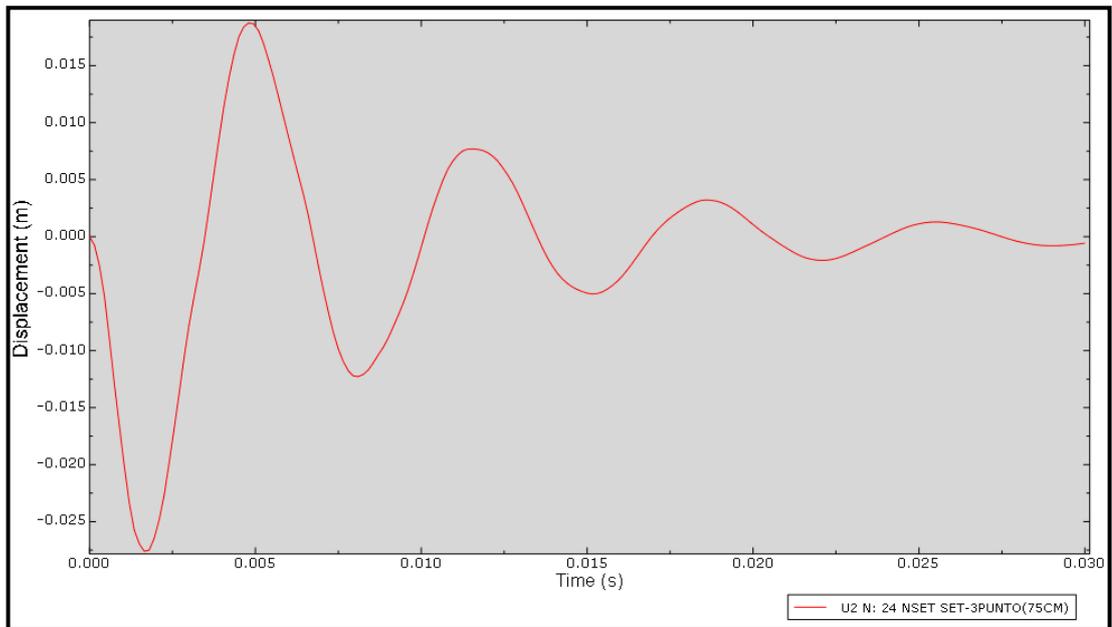


Fig.4.21 Plot spostamento Set 75[cm]dal centrale della piastra

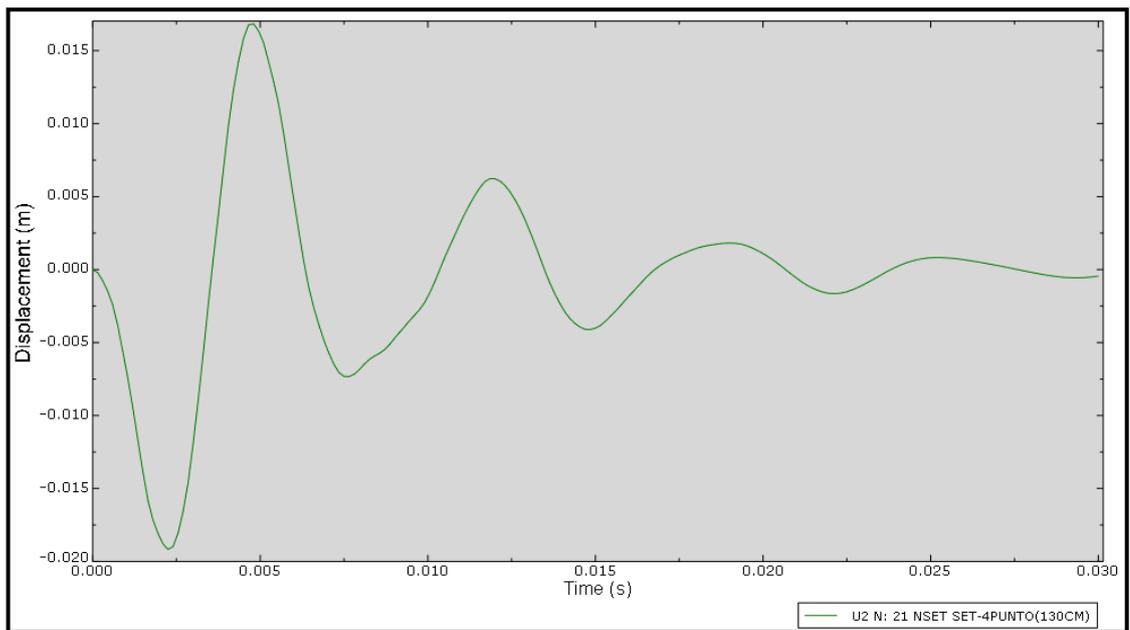


Fig.4.22 Plot spostamento Set 130[cm]dal centro della piastra

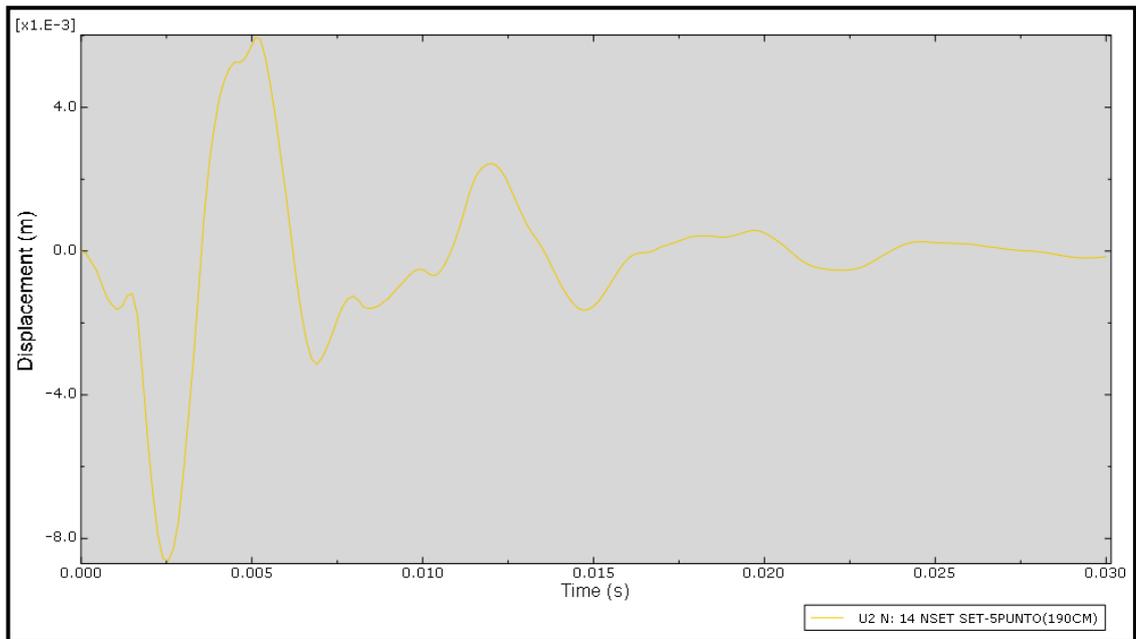


Fig.4.23 Plot spostamento Set 190[cm]dal centro della piastra

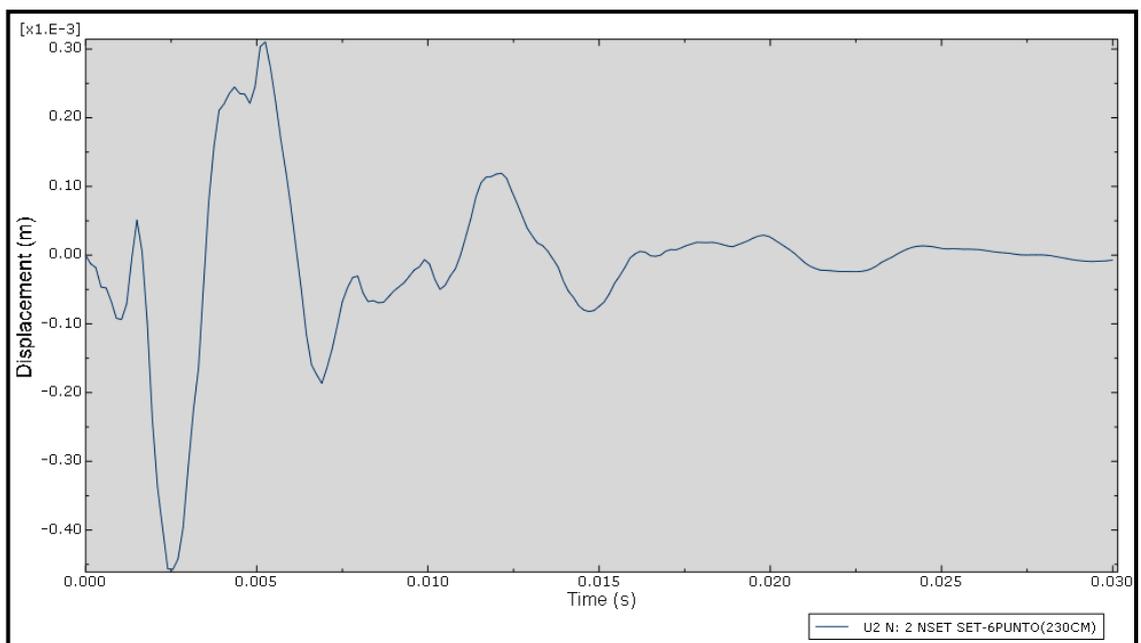


Fig.4.24 Plot spostamento Set 230[cm]dal centro della piastra

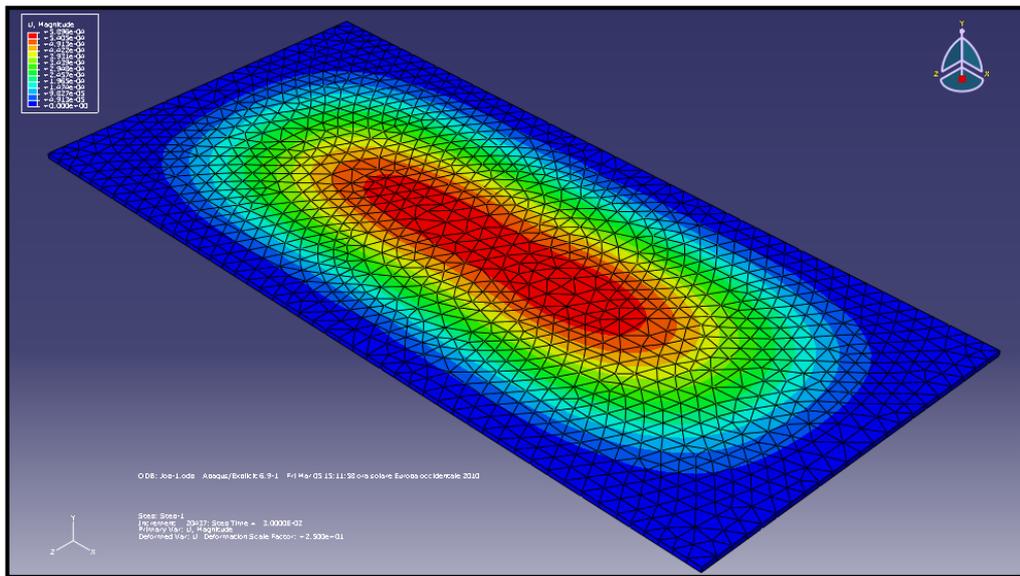


Fig.4.25 Plot spostamenti

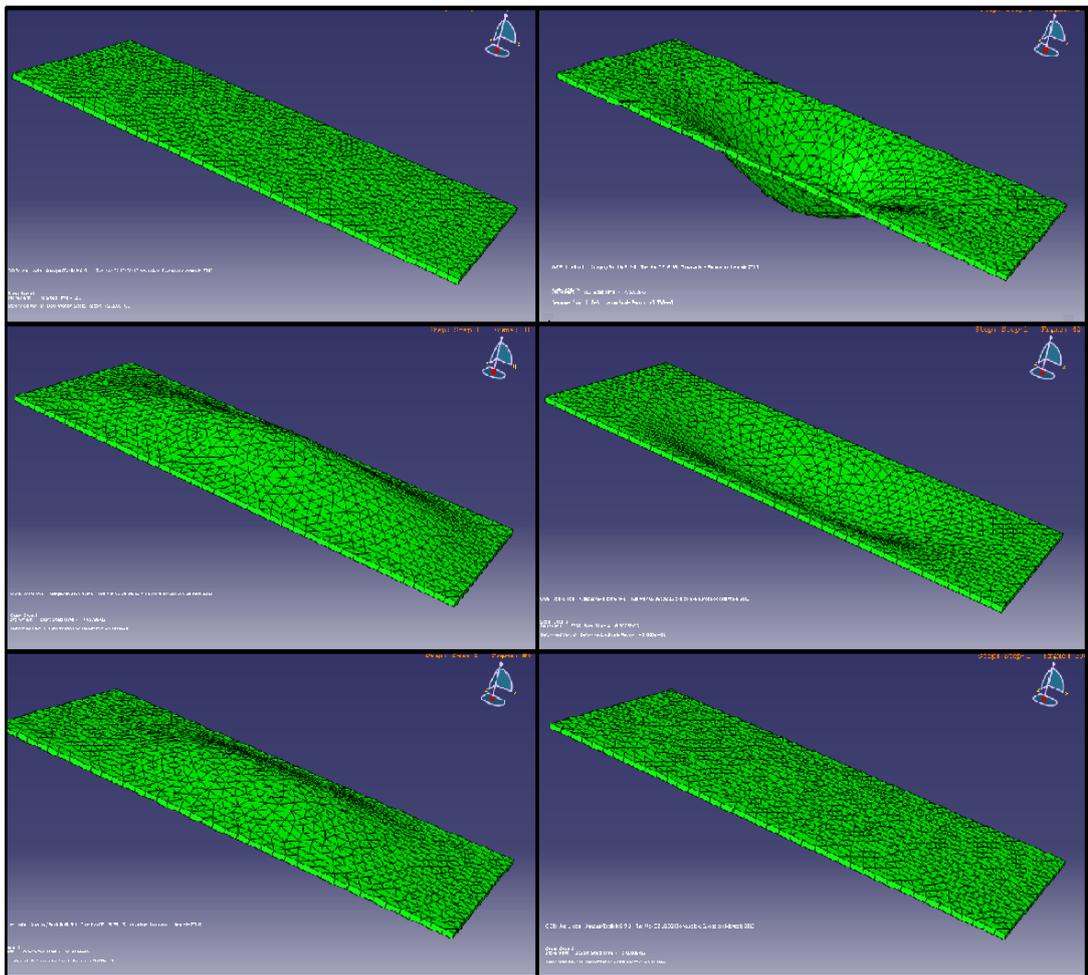


Fig. 4.26 Plot di alcuni fotogrammi amplificati della deformazione della piastra

4.3.2 Analisi Elasto-Plastica

Questa tipologia di analisi è stata affrontata per ottenere informazioni utili alla progettazione dello spessore del pianale.

Il codice Abaqus richiede come input i valori di “Stress True” (Tensioni di Cauchy), avendo le tensioni nominali del materiale isotropo sottoposto a prova monoassiale la conversione è data dalle seguenti formule:

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}}(1 + \epsilon_{\text{nom}})$$

$$\epsilon_{\text{ln}}^{\text{pl}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) - \frac{\sigma_{\text{true}}}{E}$$

Riportiamo le caratteristiche nella tabella seguente (ringraziamo l'Esercito Italiano per averci fornito i dati relativi ai materiali utilizzati).

Tab. 4.7

Caratteristiche Materiali	
Dimensioni	480X220 [cm]
Modulo di Young	203 [GPa]
Coeff. di Poisson	0.3
Densità	7850 [Kg/mc]
Snervamento	270 [MPa]
Tensione perfetta plasticizzazione	350 [Mpa]
Percentuale deformazione	2.0%

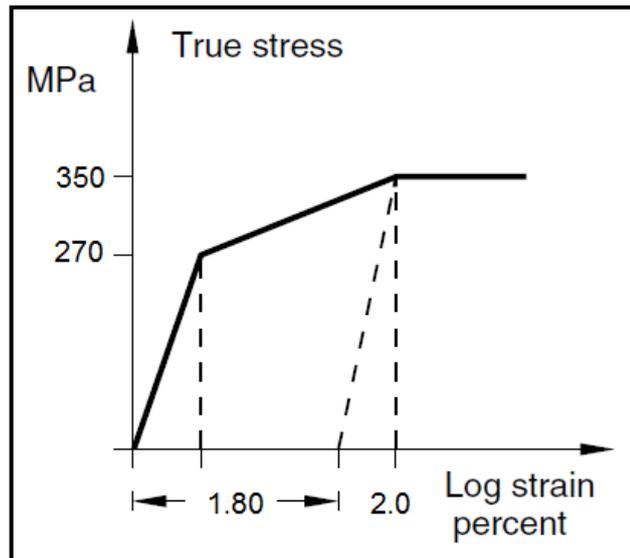


Fig. 4.27 Materiale elasto-plastico

Si sono paragonate le tensioni di Mises ipotizzando quattro differenti spessori e valutando le deformazioni plastiche residue, e quelle equivalenti.

(Si è adoperato valutando tali unità in relazione all'approccio svolto nel manuale di Abaqus sessione 10.5 Getting Started with Abaqus: Interactive Edition: Blast loading on a stiffened plate)

Si riportano i valori delle tensioni di Mises e delle deformazioni plastiche analizzando i valori ottenuti dalla simulazione numerica eseguita variando gli spessori della piastra di blindatura.

Tab.4.8 Tensioni e deformazioni plastiche

SPESSORE	Max Tensioni MISES [MPa]	Deformazioni Plastiche [cm]	Deformazioni Plastiche Equ (PEEQ)
Spessore 10.0 [cm]	272.6 [MPa]	0.04 [cm]	$1.299 E^{-3}$
Spessore 5.0 [cm]	285.3 [MPa]	2.73 [cm]	$4.217 E^{-3}$
Spessore 3.0 [cm]	300.5[MPa]	6.69 [cm]	$7.320 E^{-3}$
Spessore 1.5 [cm]	357.0 [MPa]	22.18 [cm]	$4.198 E^{-2}$

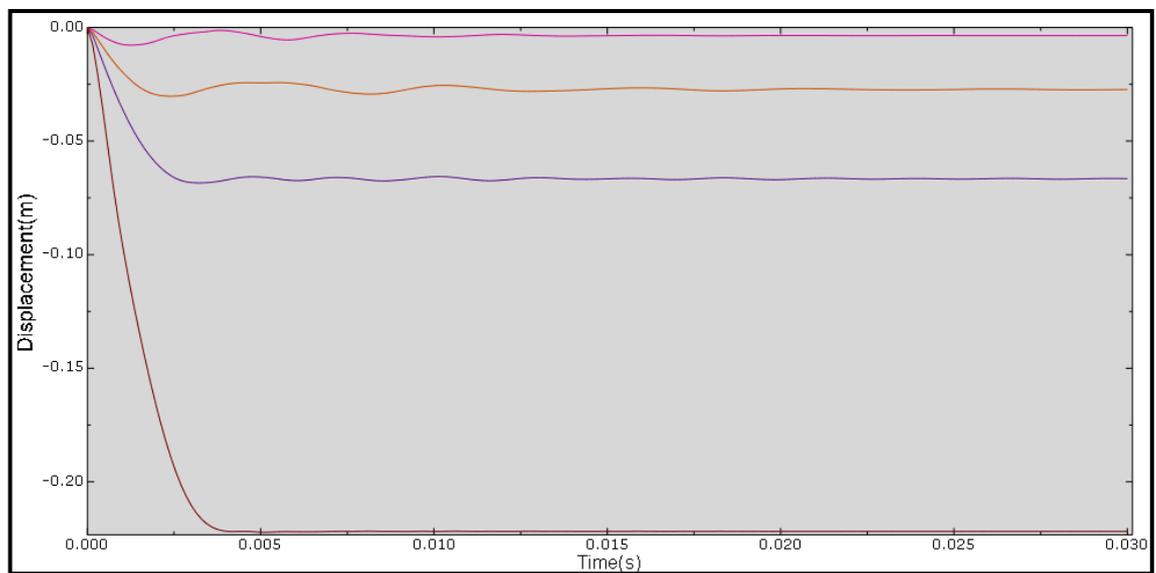
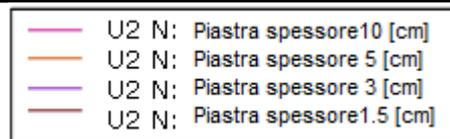


Fig. 4.28 Plot deformazioni plastiche residue calcolate per i diversi spessori



Come mostrato in tabella per spessori maggiori di 3 [cm] le tensioni non superano il valore di perfetta plasticizzazione mantenendosi nel ramo elasto-plastico.

Questo garantisce l'integrità della piastra per esplosioni di questo ordine di grandezza, è possibile adottare spessori maggiori il tutto a discapito dell'agilità del mezzo, essendo questi particolari costruttivi gravanti sulla massa totale del veicolo.

Ricordiamo che in caso di esplosione la piastra deve garantire esclusivamente l'incolumità del personale a bordo e non garantisce la perfetta funzionalità del mezzo.

Riportiamo di seguito i plot delle varie deformazioni plastiche equivalenti (PEEQ) e delle distribuzioni delle tensioni di Mises valutate nelle varie simulazioni numeriche.

I Plot delle deformazioni plastiche (PEEQ) sono utili per valutare le zone che sono maggiormente soggette a plasticizzazione, fornendoci informazioni utili a determinare le zone in cui è consigliabile rinforzare per assicurare una maggiore sicurezza della blindatura nel suo complesso.

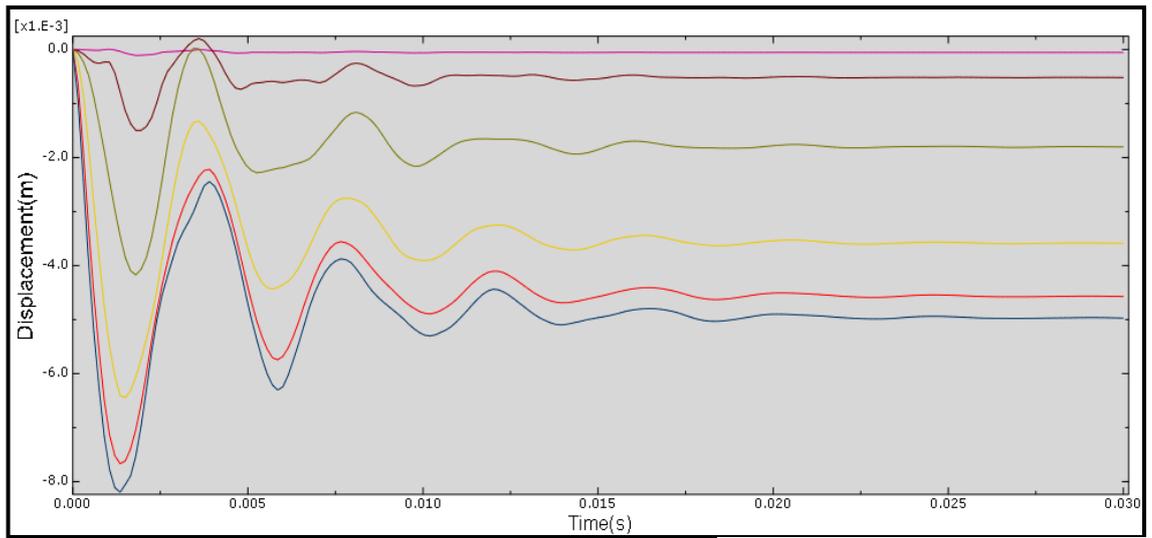
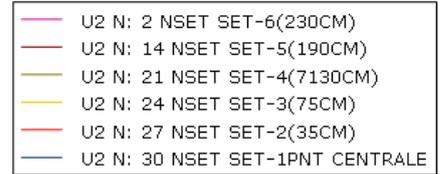


Fig. 4.31 Plot deformazioni plastiche Spessore 10[cm]



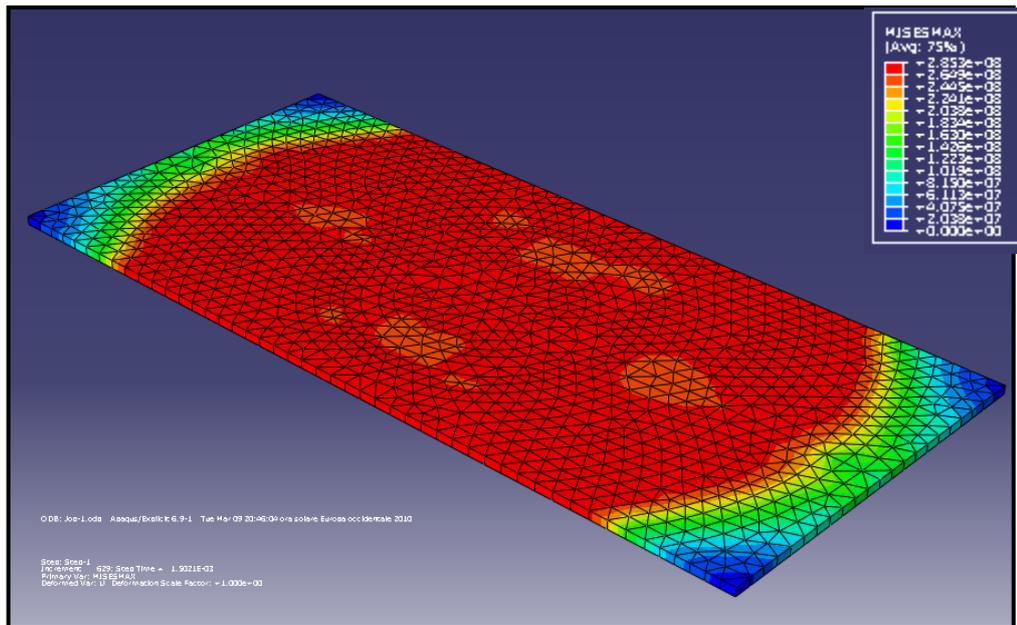


Fig .4.32 Plot Tensioni Di Mises Spessore 5[cm]

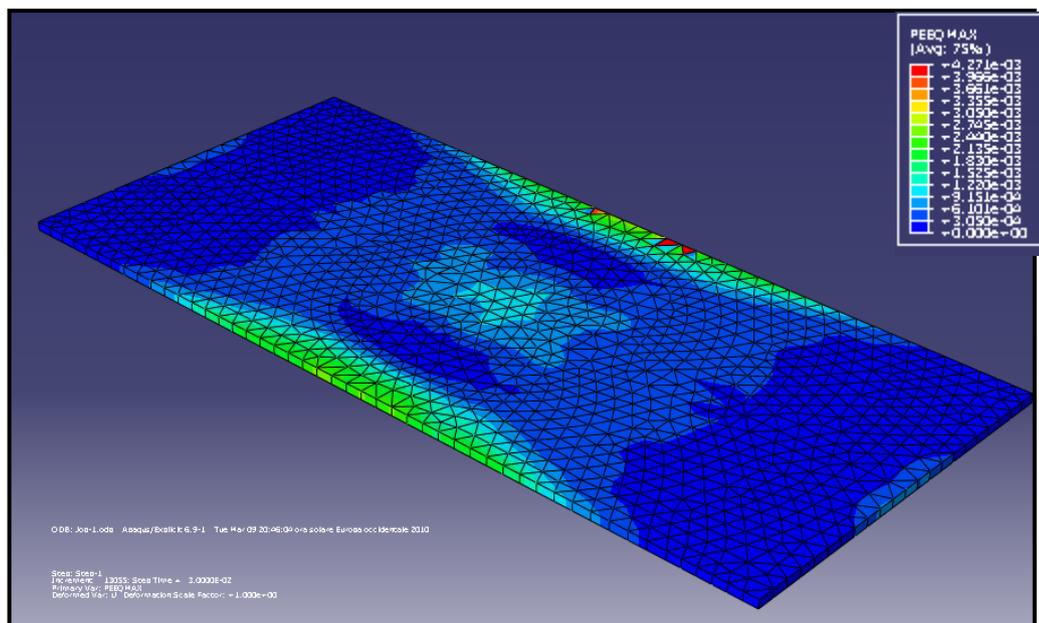


Fig.4.33 Plot Deformazioni plastiche equivalenti Spessore 5.0[cm]

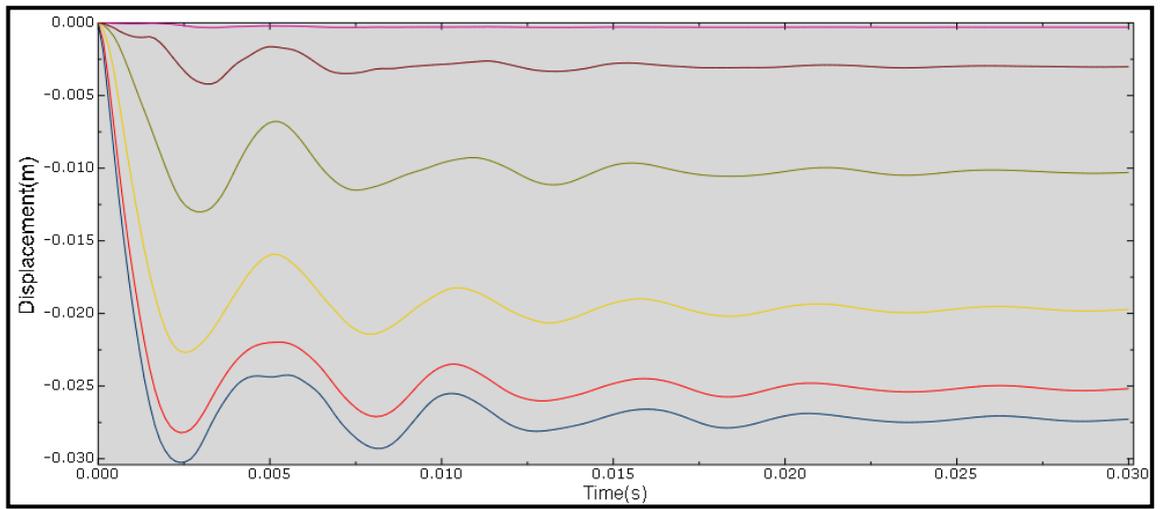


Fig .4.34 Plot deformazioni plastiche Spessore 5[cm]

- U2 N: 2 NSET SET-6(230CM)
- U2 N: 14 NSET SET-5(190CM)
- U2 N: 21 NSET SET-4(130CM)
- U2 N: 24 NSET SET-3(75CM)
- U2 N: 27 NSET SET-2(35CM)
- U2 N: 30 NSET SET-1 PUNTO CENTRALE

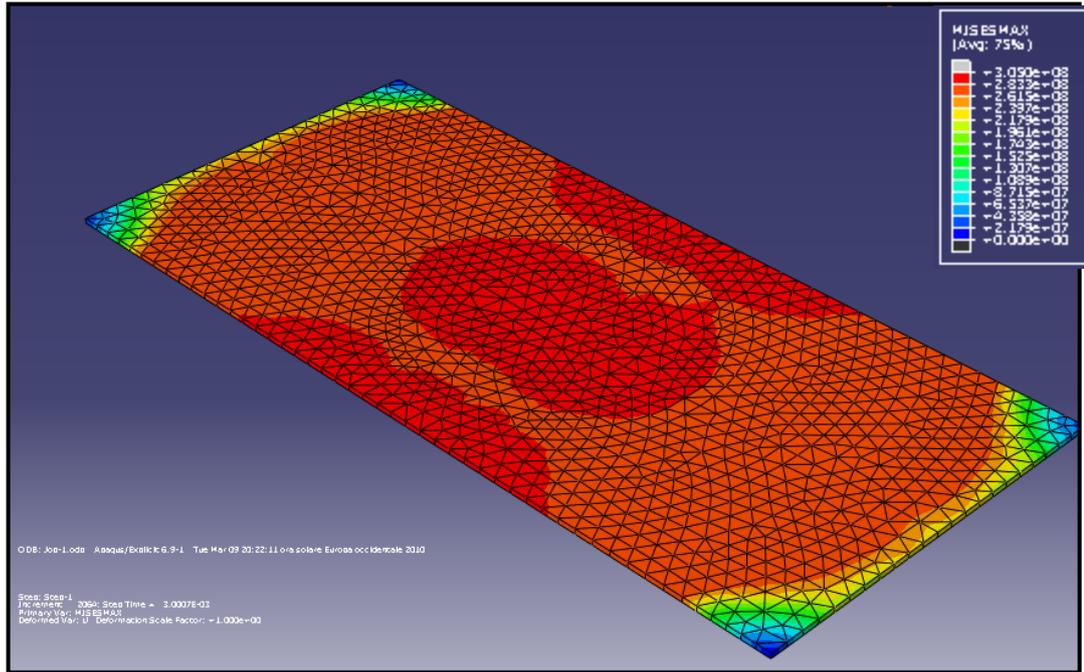


Fig .4.35 Plot Tensioni Di Mises Spessore 3[cm]

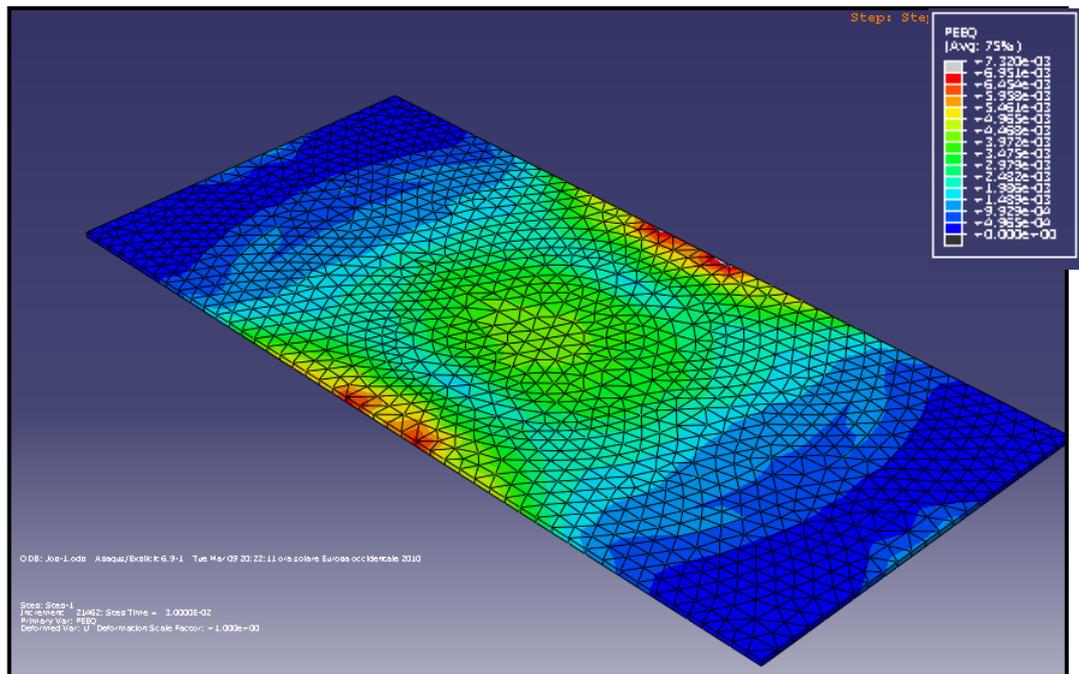


Fig.4.36 Plot Deformazioni plastiche equivalenti Spessore 3.0 [cm]

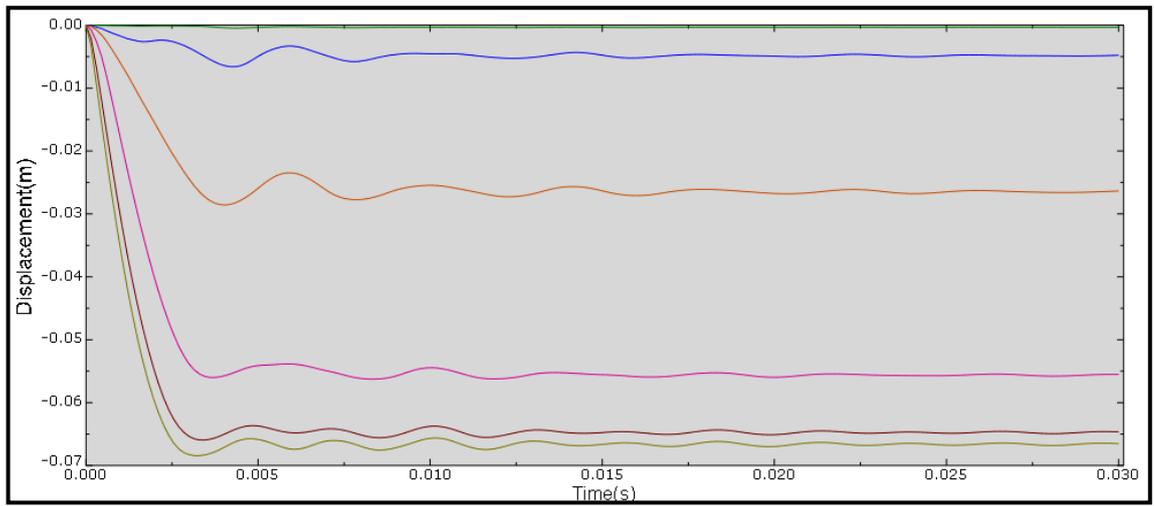


Fig . 4.37 Plot deformazioni plastiche Spessore 3 [cm]

- U2 N: 2 NSET SET-6PUNTO(230CM)
- U2 N: 14 NSET SET-5PUNTO(190CM)
- U2 N: 21 NSET SET-4PUNTO(130CM)
- U2 N: 24 NSET SET-3PUNTO(75CM)
- U2 N: 27 NSET SET-2PUNTO(35CM)
- U2 N: 30 NSET SET-1PUNTO CENTRALE

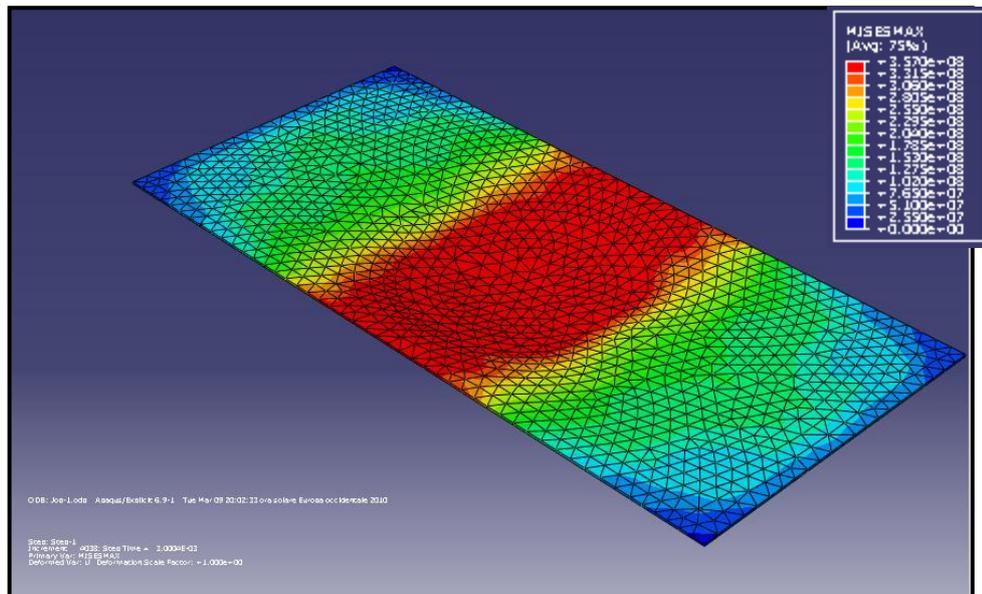


Fig.4.38 Plot Tensioni Di Mises Spessore 1.5[cm]

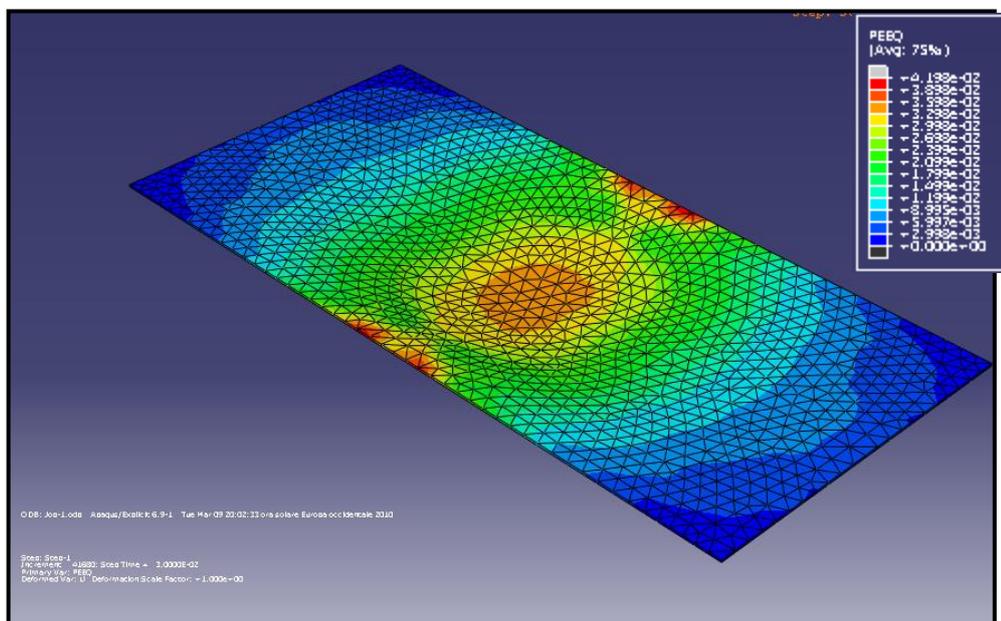


Fig.4.39 Plot Deformazioni Plastiche equivalenti Spessore 1.5[cm]

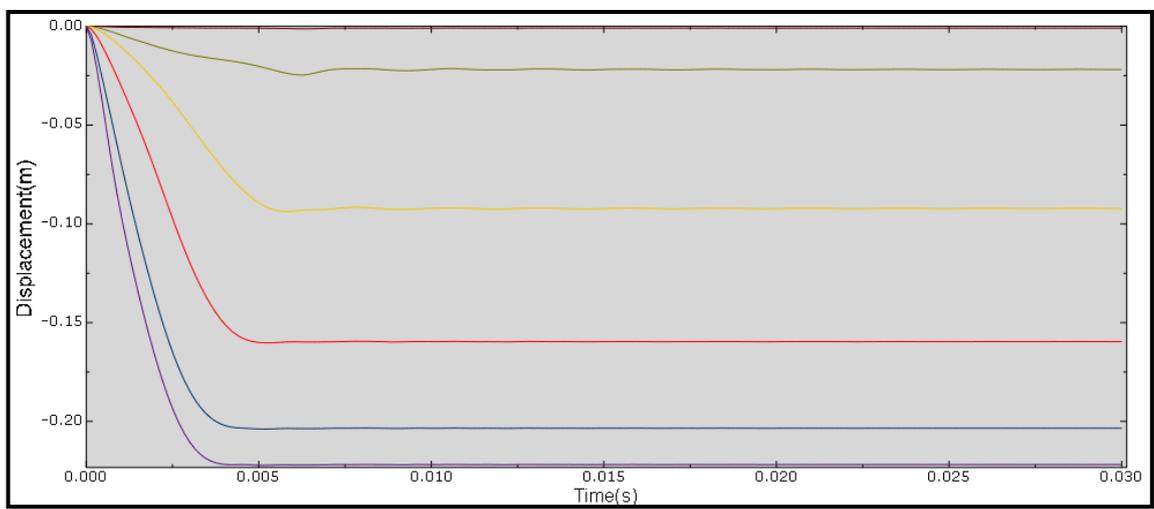


Fig . 4.37 Plot deformazioni plastiche Spessore 1.5 [cm]

- U2 N: 2 NSET SET-6PUNTO(230CM)
- U2 N: 14 NSET SET-5PUNTO(190CM)
- U2 N: 21 NSET SET-4PUNTO(130CM)
- U2 N: 24 NSET SET-3PUNTO(75CM)
- U2 N: 27 NSET SET-2PUNTO(35CM)
- U2 N: 30 NSET SET-1PUNTO CENTRALE

4.3.3 Interpretazione fisica dei risultati

Valutando i dati ottenuti dall'analisi elasto-plastica si esegue un'interpretazione fisica per valutare le accelerazioni trasmesse dal sistema di protezione.

Ricordiamo che nel veicolo oltre alla piastra di blindatura sono applicati ulteriori particolari costruttivi con il compito di smorzare le sollecitazioni trasmesse dalla piastra, riportiamo l'analisi a titolo informativo.

Tramite semplici formule cinematiche e ipotizzando che tutta la massa sia disposta in un generico punto, e trascurando la presenza di attriti è possibile tramite semplici passaggi valutare le sollecitazioni trasmesse dall'esplosione al personale a bordo.

Sottolineiamo che tale analisi è a titolo di curiosità e non ha nessun significato progettuale data la semplicità dell'approccio.

Ipotizzando le accelerazioni costanti

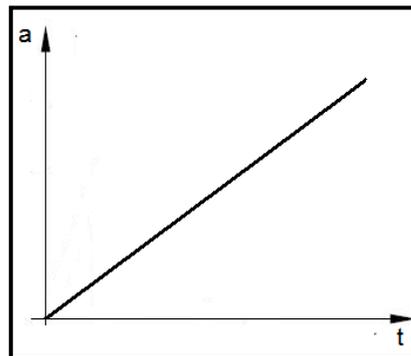
$$a_c = \text{cost}$$

$$V = V_0 + At$$

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a_c t^2$$

$$a_c = \frac{2S}{t^2}$$

$$h = \frac{V^2}{2g}$$



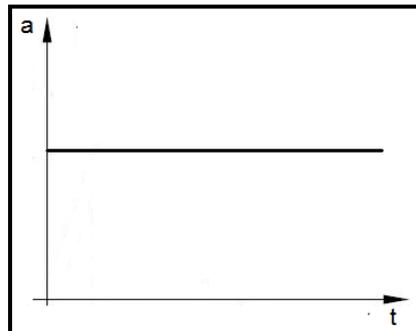
Ipotizzando le accelerazioni lineari

$$a = ct$$

$$V = V_0 + \frac{1}{2} ct^2$$

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{1}{6} ct^3$$

$$h = \frac{V^2}{2g}$$



Riportiamo di seguito la tabella con riportati i valori di velocità e l'altezza massima raggiunta da un ipotetico oggetto disposto al centro della piastra al momento della detonazione dell'ordigno anti carro.

Tab.4.9 Ipotesi Accelerazioni costanti

IPOTESI ACCELERAZIONI COSTANTI				
Spessore	Spostamento	Tempo	Velocità	Altezza Max
10 [cm]	0.0007 [m]	0.001 [s]	0.14 [m/s]	0.0009 [m]
5 [cm]	0.027 [m]	0.003 [s]	18.0 [m/s]	16.5 [m]
3 [cm]	0.067 [m]	0.0038 [s]	33.5 [m/s]	57.2 [m]

Tab.4.10 Ipotesi Accelerazioni lineari

IPOTESI ACCELERAZIONI LINEARI				
Spessore	Spostamento	Tempo	Velocità	Altezza Max
10 [cm]	0.0007 [m]	0.001 [s]	0.21 [m/s]	0.0022 [m]
5 [cm]	0.027 [m]	0.003 [s]	27.0 [m/s]	37.15 [m]
3 [cm]	0.067 [m]	0.0038 [s]	50.3 [m/s]	128.65 [m]

4.4 Discussione

La deformazione finale nel caso della piastra caratterizzata dallo spessore di 3 [cm] è di 6.70 [cm], ciò garantisce l'incolumità del personale a bordo sotto attacchi con ordigni Anti-Carro (AT) nonostante sia prevedibile il danneggiamento del mezzo con possibile perdita parziale o totale di funzionalità del veicolo.

Il sovradimensionamento della piastra è dovuto alla possibilità che si utilizzino quantitativi di materiali esplosivi maggiori durante attacchi terroristici apportati con ordigni rudimentali.

Ricordiamo che per la protezione da esplosioni sottostanti il veicolo oltre alla piastra di blindatura si sono escogitati altri accorgimenti che garantiscono la sicurezza del personale a bordo come ad esempio la disposizione di parti meccaniche come l'asse differenziale o lo scarico ai bordi della piastra in modo da assicurare la non penetrazione delle parti meccaniche, o l'utilizzo di sedili con tecnologie speciali che assorbano le sollecitazioni create dall'esplosione.

Nell'elaborato svolto si è considerata la piastra incastrata ai bordi, mentre nella realtà il mezzo è sollevato dalla detonazione dell'ordigno esplosivo, questo comporta una sollecitazione minore per la piastra ma effetti dinamici sul personale a bordo considerati trascurabili in questo tipo di analisi atta a valutare la resistenza del particolare di blindatura del mezzo.

Il dato rilevante in questo tipo di analisi è l'esigenza di comparare le teorie realizzate con analisi numeriche con dati provenienti da valutazioni sperimentali di natura simile al modello in analisi, in modo da poter valutare quale delle numerose teorie che descrivono questa tipologia di fenomeni, di natura molto complessa, descriva meglio la dinamica e la propagazione del fenomeno esplosivo.

Risulterebbe elevatamente complesso la realizzazione di un modello che descriva la detonazione di un materiale esplosivo in qualsiasi tipo di condizione, e ordine di grandezza (valori di distanza ridotta, quantitativo di materiale detonante, ecc.) senza la comparazione di test sperimentali che ne certifichino la validità del modello creato.

Conclusioni

Fino a un decennio fa la progettazione di strutture resistenti alle esplosioni era svolta esclusivamente attraverso test sperimentali. Negli ultimi anni, tuttavia, l'analisi computazionale sta assumendo un ruolo importante in questo campo, sia come affiancamento sia in totale sostituzione di test sperimentali, laddove non sia possibile fare uso di materiali esplosivi. L'esplosione è un fenomeno complesso e multidisciplinare. Numerosi sono i parametri che possono influenzare la quantità di energia trasferita alle strutture: l'onda d'urto generata dalla detonazione, l'elevate temperature e i frammenti vaganti.

L'esigenza di intraprendere la strada della simulazione numerica nel campo dei fenomeni esplosivi, nei quali la simulazione numerica ha assunto un ruolo crescente se confrontata con la progettazione attraverso test sperimentali.

Questo è dovuto ai diversi vantaggi che permette di conseguire rispetto alla sperimentazione a parità di significatività dei risultati: minore pericolosità, maggiore possibilità di analisi di differenti scenari e di modifiche progettuali e non ultimo costi notevolmente inferiori.

I test, inoltre, non solo presentano costi proibitivi, ma hanno anche una difficile ripetibilità. Pertanto è difficile ricavare delle interpretazioni univoche dai dati ottenuti.

La simulazione numerica permette una prima fase di "*Design of Experiment*", poiché è possibile studiare scenari molto diversi tra di loro agendo sui molti parametri coinvolti. Dall'esito delle simulazioni si può comprendere meglio il fenomeno dell'esplosione e indirizzarsi sugli scenari ritenuti più interessanti, su cui svolgere i test sperimentali, che forniranno a loro volta la validazione per i dati ottenuti dalle simulazioni numeriche. Laddove, a causa delle norme vigenti molto restrittive sull'uso degli esplosivi, non sia possibile eseguire questi test, la simulazione numerica rappresenta l'unico percorso disponibile in fase di progettazione. La simulazione numerica dei fenomeni esplosivi è molto complessa poiché deve tenere conto di numerosi parametri, le caratteristiche del materiale esplosivo, il mezzo di trasmissione dell'onda d'urto e la tipologia di struttura che questa investe.

La modellazione numerica applicata ai fenomeni esplosivi ha incontrato una forte crescita negli ultimi anni, dovuta soprattutto all'aumento delle potenzialità di calcolo e della sofisticazione dei codici numerici. I vantaggi ottenibili rispetto alla progettazione classica attraverso test sperimentali sono sintetizzabili in un abbattimento dei costi, una progettazione più mirata poiché si possono studiare un maggior numero di scenari e, non meno importante, azzeramento dei rischi che si affrontano nell'utilizzo di materiali esplosivi, non tralasciando il particolare che i materiali altamente energetici sono sottoposti a normative molto rigide sul loro utilizzo, le quali spesso ne vietano l'uso ad enti o società civili

Il modello numerico di mina terrestre descritto in questo lavoro ha prodotto risultati compatibili con quelli ottenuti da test sperimentali. Può quindi essere utilizzato per affiancare i test sperimentali condotti con materiale esplosivo come fase di "*Design of Experiment*", permettendo un'ottimizzazione dei costi attesi.

Concludiamo affermando che la modellazione numerica rappresenta quindi una valida soluzione nella progettazione di strutture o mezzi militari che devono resistere ai carichi fortemente impulsivi dovuti

alle esplosioni, apportando un contributo essenziale per migliorare la sicurezza di tutto il personale che per varie motivazioni corre il rischio di essere obiettivo di attacchi terroristici.

Bibliografia

- [1] **Esercito Italiano** *Rapporto esercito 20 08 Rivista Militare 2008*
- [2] **Camillo Belgrano**. *Gli esplosivi*. Ed. Hoepli, Milano, 1973
- [3] **Seguiti T.**, *Le Mine nei lavori minerari e civili*. Ed. Rivista *L'Industria mineraria*, Roma 1969
- [4] **Henrych, J** *The dynamics of Explosion and its use*. Elsevier, Amsterdam 1979
- [5] **C. Giorgio**. *Tecnica degli esplosivi-Impiego degli esplosivi (2 vol.)*. Ed. Bianco, Udine, 1964.
- [6] **A.Bacci**, *L'Esplosivistica in Campo Civile e Militare* , pubblicato sugli Atti del "T° seminario Nazionale sugli Ordigni Esplosivi", svolto presso il Comando Generale dell'Arma dei Carabinieri - III° Reparto Armamenti ed Equipaggiamenti Speciali.
- [7] **Russo Sebastiano** *Esplosivi A & B 2008*
- [8] **Di Chris McNab, Will Fowler** *Enciclopedia delle tecniche di combattimento Edizioni Mediterranee 2004*
- [9] **Department of the Army, Navy and the Air force**, *Technical Manual: To resist the effect of accidental explosions.*, DC Washington (1990)
- [10] **Francesco Cesari**. *Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti*. Ed. Pitagora, Bologna(1989)
- [11] **Aeronautical and Maritime Research Laboratory** *Plate Subject to Explosive Blast Stephen D. Boyd Melbourne (2000)*
- [12]. **Capt. J.Barr, et.al.**, *Solid Blast Personnel Injury: A Clinical Study* , *The Military Surgeon*, Vol.98 No.1, January 1946, pp 1-12.
- [13]**Fagel L. W.**, *Acceleration Response of a Blast-Loaded Plate*, *Proceedings Shock and Vibration Symposium #42, Shock and Vibration Information Analysis Centre (SAVIAC)*, 1971, pp 221-233
- [14]**Yiannakopoulos G.**, *Accelerometer Adaptor for Measurements of Metal Plate Response From A Near Field Explosive Detonation*, *Rev. Sci. Instrum.* 68 (8), August 1997
- [15] **Slater J.E**, *Procedure for Curve-Fitting a Shock Wave*, *Explosive Physics Establishment Suffield, Medicine Hat, Alberta, Canada, December 1996*.
- [16] **MATLAB** *Manual: Analysis User's Manual*
- [17] **ABAQUS** *Manual: Getting Started with ABAQUS*
- [18] **ABAQUS** *Manual: ABAQUS Theory Manual*
- [19] **ABAQUS** *Manual: Analysis User's Manual*

Ringraziamenti

Giunta al termine di questo lavoro desidero ringraziare ed esprimere il mio affetto e la mia riconoscenza nei confronti di tutte le persone che, in modi diversi, mi hanno accompagnato e aiutato a portare a termine questa lunga esperienza universitaria.

Appaiono scontati i ringraziamenti ai propri Genitori per gli sforzi economici profusi nel corso di questi anni, più appropriati sono invece i ringraziamenti nei loro confronti per l'aiuto morale dimostratomi per tutto il periodo universitario.

Un pensiero particolare va a tutti parenti Fratelli , Nonni, Zii , Padrini e Madrine per aver condiviso con me le gioie e le preoccupazioni di ogni esame .

Infine per ultimi ma non meno importanti vanno i miei calorosi e sinceri ringraziamenti a tutti gli Amici, da quelli di sempre, a quelli conosciuti in questo percorso, per aver trasformato ogni momento passato lontano dai libri in un istante nel bene e nel male indimenticabile.

L'ultimo pensiero lo dedico a coloro che hanno avuto la sfortuna di sopportarmi sia come coinquilino che come compagno di studi, e a qualche sfortunato che mi ha avuto in entrambi i modi nello stesso momento, a voi va la mia gratitudine perché grazie alla vostra compagnia questo periodo risulterà indistinguibile nella mia memoria.

Infine un piccolo pensiero lo dedico a Me per essere riuscito a raggiungere un difficile obiettivo mantenendo sempre la tranquillità e la gioia di affrontare una esperienza fantastica come la vita universitaria.