

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Predizione dei carichi di *blast* generati da un'esplosione sferica in aria

Relatore: Marco Giglio

Co-relatore: Andrea Manes

Tesi di Laurea di:
Vincenzo Guarrato, 755611

Anno accademico 2011/2012

*L'uomo ha inventato la bomba atomica,
ma nessun topo al mondo costruirebbe mai
una trappola per topi.*

Albert Einstein

Ringraziamenti

Le persone che desidero ringraziare sono veramente tante e ognuna per un motivo particolare. Ringrazio il mio relatore, il prof. Marco Giglio, e il corelatore, prof. Andrea Manes, per avermi permesso di partecipare a questo progetto di tesi. Devo riconoscenza anche a Massimo Fossati per la quantità di tempo che mi ha dedicato nell'esecuzione pratica di questo lavoro e a tutti i ragazzi del Sigma Lab: Andrea Giglioli e Matteo Corbetta.

Un grazie veramente speciale va a Federico, Angela e Alessandro per avermi assistito, sopportato e accudito non solo durante la fase finale dei miei studi, ma anche lungo tutto il percorso accademico, proprio come una seconda famiglia.

Ringrazio molto Uccio, Mariella e Caterina, la mia famiglia, per avermi accompagnato e sostenuto sia moralmente sia economicamente nel cammino di questi anni. Un pensiero molto importante va anche alla zia Maria, allo zio Filippo, al quale devo parte della mia formazione e determinazione, allo zio Paolo, Mario e Giovanna e ai cugini Alessandro, Valeria e Benny.

Un ringraziamento sentito va a Fernanda, che mi ha incoraggiato e motivato durante questo lavoro e nella fase finale dei miei studi e voglio ricordare il contributo di tutti i miei compagni e amici che hanno vissuto con me l'esperienza universitaria e in particolare Luca e Stefano.

Ringrazio anche gli amici di sempre e sperando di non aver dimenticato nessuno, dedico questo lavoro a tutti quelli che hanno creduto in me.

*Ai nonni che non ci sono più:
Bernardo e Antonietta
e alla zia Nuccia ed Adelaide*

Indice

Sommario	I
Abstract	II
Introduzione	III
Stato dell'arte	IV
1. Caratteristiche generali di un'esplosione	1
1.1 Il fenomeno dell'esplosione	1
1.2 Classificazione dei processi esplosivi	2
1.3 Esplosivi	4
1.3.1 Classificazione degli esplosivi	4
1.3.2 Caratteristiche dei materiali esplosivi	7
1.3.3 Impieghi di esplosivi	21
1.3.4 Descrizione sintetica di alcuni tra i principali esplosivi	23
1.4 TNT equivalente	30
1.5 Onde d'urto.....	34
1.6 Tolleranza umana	40
1.6.1 Tolleranza alle pressioni generate dallo scoppio	40
1.6.2 Movimento strutturale	43
1.6.3 Tolleranza ai frammenti	44
1.7 Categorie di carichi esplosivi	46
1.7.1 Esplosioni non confinate	46
1.7.1.1 Esplosioni in aria libera	46
1.7.1.2 Esplosioni ad una certa altezza dal suolo	52
1.7.1.3 Esplosioni al suolo.....	55
1.7.2 Esplosioni confinate	56
1.7.2.1 Effetto del confinamento	56
2. Esplosione di una carica sferica in aria	57
2.1 Calcolo scalato	57
2.2 Modelli Empirici	59
2.2.1 Picco di sovrappressione incidente	60

2.2.2 Tempo di arrivo	62
2.2.3 Durata della fase positiva	63
2.2.4 Coefficiente di decadimento della pressione nel tempo	64
2.2.5 Parametri caratteristici della fase negativa	64
2.3 Ottimizzazione.....	66
2.3.1 Idea del modello ibrido per la sovrappressione statica di picco e la durata della fase positiva	70
2.3.2 Scelta dei restanti parametri	74
2.4 Modello numerico	81
2.4.1 Analisi 2D assial-simmetrica	81
2.4.2 Mesh refinement	88
2.4.3 Risultati e commenti.....	92
3. Graphical user interface	96
3.1 GUI Matlab	96
3.2 Costruzione di un interfaccia grafica per la predizione dei carichi di <i>blast</i> generati da un'esplosione sferica in aria	100
4. Conclusioni e sviluppi futuri.....	105
4.1 Conclusioni	105
4.2 Sviluppi futuri.....	106
Bibliografia.....	107

Indice delle figure

1.1 Esplosione	1
1.2 Esplosione deflagrante.....	2
1.3 Esplosione detonante	2
1.4 Onda di “pressione”	3
1.5 Onda di “shock”	3
1.6 Principali forme delle cariche esplosive	20
1.7 Blasting cap.....	22
1.8 Tritolo	24
1.9 Candelotti di dinamite.....	27

1.10	Polvere nera.....	28
1.11	Esplosivo al plastico (C-4).....	29
1.12	Semtex-H.....	30
1.13	ANFO.....	31
1.14	Decadimento del picco di pressione	35
1.15	Detonazione di una carica e formazione dell'onda d'urto	36
1.16	Andamento qualitativo della pressione dell'onda d'urto nel tempo.....	37
1.17	Comportamento di una struttura sottoposta alla pressione generata da un'onda d'urto.....	38
1.18	Parametri caratteristici di un'onda d'urto	39
1.19	Curve di sopravvivenza per danno ai polmoni.....	42
1.20	Esplosione in aria libera	47
1.21	Parametri caratteristici relativi alla fase positiva di un'onda d'urto generata da un'esplosione di TNT in aria libera al livello del mare.....	48
1.22	Procedura per l'ottenimento dei parametri caratteristici relativi alla fase positiva di un'onda d'urto generata da un'esplosione di TNT in aria libera al livello del mare	50
1.23	Parametri relativi alla fase negativa di un'onda d'urto generata da un'esplosione di TNT in aria libera al livello del mare.....	51
1.24	Air Burst.....	52
1.25	Altezza scalata del punto triplo.....	53
1.26	Variazione della pressione riflessa in funzione dell'angolo d'incidenza.....	54
1.27	Variazione dell'impulso riflesso in funzione dell'angolo d'incidenza.....	55
1.28	Surface Burst	56
2.1	Calcolo scalato di Hopkinson-Cranz	58
2.2	Parametri necessari per diagrammare un'onda d'urto	60
2.3	Modelli empirici	67
2.4	Zoom picco di pressione	68
2.5	Andamento del picco di pressione in funzione della distanza scalata.....	69
2.6	Andamento della durata della fase positiva in funzione della distanza scalata.....	70
2.7	Henrych vs Kingery e Bulmash	71
2.8	Kinney e Graham vs Kingery e Bulmash	71
2.9	Gelfand e Silnikov vs Kingery e Bulmash	72
2.10	Hybrid(p_s) vs Kingery e Bulmash	73
2.11	Hybrid(t_0) vs Kingery e Bulmash	74
2.12	Eq.2.12 vs Kingery e Bulmash per il tempo di arrivo	75
2.13	Coefficiente di decadenza derivato dall'impulso	76

2.14	Coefficiente di decadenza derivato dal rapporto tra la minima e la massima pressione	77
2.15	Coefficiente di decadenza di Wei e Dharani.....	77
2.16	Andamento pressione-tempo con coefficiente di decadenza derivato dall'impulso.....	78
2.17	Andamento pressione-tempo con coefficiente di decadenza derivato dal rapporto p_s^-/p_s	79
2.18	Andamento pressione-tempo con coefficiente di decadenza di Wei e Dharani	79
2.19	Simmetria sferica.....	82
2.20	Posizione dei materiali nel modello numerico.....	83
2.21	Punto di detonazione, gauges e condizione al contorno.....	86
2.22	Propagazione dell'onda d'urto dopo 2,7 millisecondi.....	86
2.23	Propagazione dell'onda d'urto dopo 11 millisecondi	87
2.24	Propagazione dell'onda d'urto dopo 22,53 millisecondi	87
2.25	Picco di pressione a 2 metri vs numero elementi	88
2.26	Picco di pressione a 5 metri vs numero elementi	89
2.27	Picco di pressione a 8 metri vs numero elementi	89
2.28	Picco di pressione a 2 metri vs dimensione elementi	90
2.29	Picco di pressione a 5 metri vs dimensione elementi	90
2.30	Picco di pressione a 8 metri vs dimensione elementi	91
2.31	Tempo computazionale vs numero elementi	91
2.32	Mesh selezionata	92
2.33	Confronto empirico-numerico a 2 metri	93
2.34	Confronto empirico-numerico a 5 metri	94
2.35	Confronto empirico-numerico a 8 metri	94
3.1	GUI	96
3.2	Guide Quick Start	97
3.3	Layout editor Guide	97
3.4	Tool per l'allineamento	98
3.5	Property Inspector	98
3.6	Layout GUI <i>blast</i>	102
3.7	GUI <i>blast</i>	103
3.8	Prova GUI <i>blast</i>	104

Indice delle tabelle

1-1	Energia specifica di alcuni esplosivi/combustibili	9
1-2	Potenziale di alcuni esplosivi	10
1-3	Brisanza di alcuni esplosivi.....	11
1-4	Velocità di detonazione di alcuni esplosivi.....	12
1-5	Densità di alcuni esplosivi.....	14

1-6	Pressione di detonazione di alcuni esplosivi	15
1-7	Temperatura di detonazione di alcuni esplosivi	15
1-8	TNT equivalente – confronto tra diversi criteri	32
1-9	Fattore di conversione di alcuni esplosivi	33
1-10	Livelli critici di pressione sopportabili da un essere umano	41
1-11	Probabilità del 50% di penetrazione pelle umana.....	45
1-12	Soglia di gravi lesioni al personale a seguito dell’impatto di frammenti.....	45
1-13	Categorie di carichi esplosivi	46
2-1	Proprietà dell’aria (EOS).....	84
2-2	Proprietà TNT (JWL).....	85
2-3	Scostamento Empirico-Numerico a 5 metri per il picco di pressione.....	93

Sommario

A quasi dodici anni di distanza dall'11 settembre 2001, Al Qaeda ha assunto i contorni cangianti di un prisma multiforme e variabile capace di organizzare e pianificare attacchi jihadisti in ogni parte del mondo. Fattori come il libero accesso alle informazioni sulla costruzione di dispositivi bomba, la relativa facilità di produzione e mobilità, accoppiati con un fattore di danno catastrofico sono responsabili della scelta di ordigni esplosivi da parte delle coalizioni per disseminare il terrore. L'elevato numero di morti secondo i dati diffusi dal ministro dell'interno, della difesa e della salute per attentati terroristici ha destato l'attenzione dei tecnici e delle organizzazioni di sicurezza sull'argomento "salvaguardia del personale e delle strutture" maggiormente a rischio, spingendoli a ricercare nuove soluzioni per la protezione degli stessi. Eseguire un lavoro di ricerca e studio su questo tema è di primaria importanza al fine di prevedere misure di protezione e di sicurezza.

Una delle principali tecniche utilizzate per la prevenzione di postazioni militari o edifici civili sottoposti ad azioni terroristiche, o più in generale soggetti a cariche esplosive, è stato quello di prevedere un irrobustimento della struttura consono a tollerare il carico di *blast* proveniente da un'esplosione. Questi interventi d'irrobustimento sono però difficilmente attuabili per strutture già esistenti, in quanto prevedere opere di questo genere comporta notevoli costi aggiuntivi e i risultati comparati con strutture anti-bomba progettate e costruite dalla radice sono dinamicamente meno prestanti. Inoltre, uno dei fattori che determina la criticità di una struttura è la fragilità delle superfici vetrate, ritenute il tallone d'Achille rispetto agli elementi strutturali nella protezione di strutture investite da onde d'urto. Un metodo ragionevolmente efficace che si sta sviluppando in questi ultimi anni, è quello di prevedere un perimetro di protezione per le strutture maggiormente a rischio attentati, in grado non solo di separare fisicamente la struttura dalla fonte esplosiva, ma di aumentare la "distanza scalata" tra la fonte dell'esplosione e la postazione da proteggere. Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo quello di individuare i principali fenomeni e comportamenti delle onde esplosive provenienti da una carica sferica di un dato raggio e contenente una certa quantità d'esplosivo, e di generare modelli e metodi per la previsione del picco di pressione in un punto ad una certa distanza dallo scoppio.

Parole chiave: esplosione, onda d'urto, carica sferica, pressione d'urto.

Abstract

Nearly twelve years after September 11, 2001, Al-Qaeda has taken on the changing contours of a prism manifold and variable capable of organizing and planning jihadist attacks around the world. Factors such as free access to information on the construction of bomb devices, the relative facility of production and mobility, coupled with a factor of catastrophic damage are responsible for the choice of explosive devices by coalitions to spread terror. The high number of deaths, according to data released by the minister of the interior, defense and health for terrorist attacks has attracted the attention of engineers and security organizations on the topic "Protection of personnel and facilities" most at risk , urging them to seek new solutions for their protection. Perform a research and study on this subject is of paramount importance in order to provide appropriate protection and security. One of the major techniques used for the prevention of military or civil buildings subjected to terrorist acts, or more generally subject to explosive charges, has been to provide a strengthening of the structure suited to tolerate the load of blast from an explosion. These interventions, however, are difficult to implement for strengthening existing structures, as expected works of this kind results in significant additional costs and the results compared with bomb-sniffing structures designed and built by root are dynamically less-performing. In addition, one of the factors that determines the criticality of a structure is the fragility of the glass surfaces, which are considered the Achilles' heel compared to the structural elements in the protection of structures hit by shock waves. A reasonably effective method that is being developed in recent years, is to provide a perimeter protection for the structures most at risk attacks, able not only to physically separate the structure from the explosive source, but also to increase the "scaled distance" between the source of the explosion and the location to be protected. The present work aims to identify the main phenomena and behavior of shockwaves from a spherical charge of a given radius and containing a certain amount of explosives, and generate models and methods for predicting the peak pressure at a point at a certain distance from the outbreak.

Keywords: explosion, blast wave, spherical charge, blast overpressure.

Introduzione

Esplosioni e attacchi kamikaze sono diventati parte della vita quotidiana in paesi come l'Iraq, l'Afghanistan e il Pakistan. Nasce spontaneo dunque un particolare interesse e la necessità di sviluppare simulazioni e modelli di vita reale per comprendere, analizzare e pianificare tali eventi per una migliore difesa.

Le seguenti sezioni sono un tentativo di fornire agli sviluppatori le conoscenze necessarie sulle esplosioni e sugli avvenimenti seguenti, in modo che possano mantenere le proprietà reali di un materiale esplosivo e il comportamento fisico di un'onda d'urto che ne deriva, durante la scrittura di codici di calcolo per la predizione degli effetti su strutture. Questa conoscenza può anche contribuire allo sviluppo di modelli per la valutazione del rischio, e in fase di progetto per valutare correttamente le caratteristiche (ad esempio, una maggiore capacità di carico strutturale, elmetti, giubbotti antiproiettile, veicoli blindati ed edifici) per mitigare gli effetti di scoppio.

Predire l'effetto di un onda d'urto su una struttura solida è un passo molto importante per la progettazione di strutture sicure e di veicoli civili e militari per proteggere il personale da eventuali attentati terroristici. La ricerca in questo settore era principalmente focalizzata su studi sperimentali che coinvolgevano la detonazione fisica di materiali esplosivi e sondavano gli effetti derivanti dall'impatto dell'onda di *blast* con strutture appositamente realizzate per questi esperimenti. Tali prove però, non solo sono molto pericolose, ma sono anche molto costose da eseguire, poiché ogni prova compiuta comporta la distruzione del materiale e della strumentazione sperimentale in gioco. In alternativa alle tecniche sperimentali si sono quindi diffusi studi computazionali, in cui vengono eseguite simulazioni d'impatto utilizzando i computer. Questo approccio, molto più fattibile e accessibile, permette di evitare i pericoli connessi con la manipolazione di esplosivi e di eseguire svariate prove, pur con cambiamenti significativi, semplicemente e senza alcun costo.

Fisicamente una detonazione può essere definita come l'onda d'urto generata a causa del rilascio di energia di una reazione esotermica. Quando si verifica una detonazione uniforme, la conseguente alta pressione e alta temperatura dei gas fanno sì che quest'ultimi si espandano nell'aria ambiente, generando un'onda d'urto sferica. Pertanto, un metodo numerico utilizzato per la simulazione di onde d'urto deve contenere una fisica sufficiente per gestire il movimento di propagazione ed eventualmente quello di riflessione da una superficie solida.

In aggiunta a quanto detto, un risolutore numerico deve anche essere sufficientemente veloce da produrre risultati rapidamente e convergere con buona approssimazione alla soluzione.

Il presente lavoro è suddiviso in sei capitoli:

1. Nozioni base sull'esplosione e sulle onde d'urto, tipi di esplosivi noti e loro caratteristiche generali.
2. Esposizione generale del fenomeno esplosivo in ambiente non confinato: in aria libera (quindi senza alcuna interazione con il suolo), esplosione al livello del suolo e ad un'altezza nota da esso.
3. Effetti del confinamento sulla detonazione, sui gas prodotti e sulla loro propagazione.
4. Esplosione sferica in campo libero – Analisi dei diversi modelli empirici ricavati da letteratura, i quali verranno confrontati tra loro, con la modellazione numerica e con dati sperimentali con l'obiettivo di ricavare un modello ottimizzato per la costruzione di un'interfaccia utente pratica e corretta.
5. Costruzione e ottenimento di un'interfaccia grafica per la previsione del picco di pressione derivante dallo scoppio di una carica sferica, ove sia contenuta una desiderata quantità di un voluto materiale esplosivo, che si registra ad una distanza prescelta.
6. Esposizione delle conclusioni sul lavoro fatto e sulle possibilità di sviluppo futuro.

Stato dell'arte

La ricerca e lo studio sulla valutazione dei parametri di un'onda d'urto derivante dall'esplosione di una carica contenente una certa quantità di esplosivo sono in piena espansione e su questo argomento la produzione scientifica è molto ricca. La grande mole di lavoro sviluppata riguarda sostanzialmente la trattazione empirica del problema, qualche volta confrontata con un'analisi FEM o con un metodo analitico che generalmente termina in approssimazioni poco esaustive alle differenze finite, poiché la complessità delle equazioni di conservazione del fenomeno non permettono una risoluzione puntuale del sistema. Approssimare infatti un fronte d'urto discontinuo in ogni punto con il metodo della viscosità artificiale per rendere più dolce il cambiamento repentino dei parametri che lo caratterizzano, non è affatto esauriente. Tali difficoltà si ampliano ancor più quando si tratta di risolvere il problema in coordinate sferiche in cui, oltre alla presenza del termine sorgente a secondo membro dell'equazione dell'energia che rende il sistema non omogeneo, all'interno delle derivate parziali si presenta la variabile indipendente a moltiplicare le variabili dipendenti. Si preferisce quindi condurre analisi numeriche ed empiriche, che prescindendo dalla fisica di

base, vengono derivate da correlazioni con dati sperimentali ottenuti precedentemente e che permettono di ottenere risultati accettabili in minor tempo. Per avere un'idea del lavoro svolto è utile riferirsi a [1] in cui si riportano le principali caratteristiche e lo stato dell'arte riguardanti le onde d'urto sferiche ed emisferiche. Nel lavoro riportato in [1] il calcolo dei parametri rappresentanti i carichi di blast generati da quattro cariche di peso differente a diverse distanze viene eseguito tramite l'ausilio del diagramma sperimentale ricavato da Kingery e Bulmash [2], dove sono riportati gli andamenti di pressione incidente, pressione riflessa, durata della fase positiva, tempo di arrivo, velocità e relativi impulsi di un'onda d'urto derivante dall'esplosione di una carica di TNT. Questo manuale è una delle più ampie pubblicazioni disponibili utilizzate per la progettazione di strutture di protezione contro carichi esplosivi in entrambi i settori civile e militare, ed è quello a cui farà riferimento questo lavoro per il confronto empirico-sperimentale con lo scopo di derivare un modello empirico ottimizzato, rispetto ai modelli poco precisi per la previsione della sovrappressione ad una certa distanza dallo scoppio, appartenenti a questa categoria.

In [1] viene presentata infine una simulazione numerica di un'esplosione, che avviene ad una certa altezza dal suolo, in un centro urbano dove si ha la compresenza di più edifici, che insieme al terreno, provocano la riflessione dell'onda generatasi modificando quindi il comportamento dei parametri caratteristici del fronte d'urto e la propagazione dell'onda stessa, ma per la singolarità del caso si rimanda questa trattazione ad uno studio futuro.

Il presente lavoro di tesi, la cui struttura è stata illustrata al termine dell'introduzione, presenta contenuti utili per la valutazione dei parametri caratteristici di un fronte d'urto proveniente da un'esplosione sferica.

In particolare, si propone lo scopo di fornire agli strutturisti un'interfaccia grafica pratica e completa che consenta di conoscere con buona approssimazione la massima pressione sviluppatasi in un punto ad una certa distanza dalla sorgente dove è posta una carica contenente un quantitativo voluto di un certo esplosivo.

L'aumento di pressione infatti, costituisce nella maggior parte dei casi la principale causa di mortalità per il personale ed è il parametro cardine per il progetto di strutture di protezione.

Quindi dopo aver compreso il fenomeno e analizzato i diversi modelli empirici presi in considerazione si farà, come anticipato, un confronto qualitativo di questi modelli con le curve sperimentali presenti in [2] e con un modello numerico sviluppato tramite l'ausilio di Ansys Autodyn con l'obiettivo di ricavare un modello che si adatti e che rispetti con migliore precisione l'andamento e i valori numerici di quest'ultimi e su cui si costruirà la GUI (*Graphical User Interface*) per l'ottenimento dell'onda di *blast* derivante dall'esplosione impostata dall'utente.

1 Caratteristiche generali di un'esplosione

1.1 Il fenomeno dell'esplosione

Un'esplosione, nell'ampio senso del termine, è un processo chimico-fisico di rapida trasformazione di un sistema in lavoro meccanico. Il lavoro compiuto durante un'esplosione è dovuto alla rapida espansione dei gas o vapori esistenti prima o prodotti dopo l'innesco della reazione.



Figura 1.1. Esplosione.

Una caratteristica comune di tutte le esplosioni, come quella mostrata in figura 1.1, è il rilascio di un'enorme quantità di energia in un periodo di tempo relativamente breve.

La solerte quantità di energia rilasciata genera un' istantaneo salto di pressione e temperatura attraverso il materiale esplosivo che viene avvertito rapidamente nell'ambiente circostante il luogo in cui è avvenuta l'esplosione.

Le esplosioni possono essere classificate sulla base della loro natura di eventi fisici o chimici. Nelle esplosioni fisiche l'energia può essere rilasciata dal guasto di una bombola contenente gas compresso o per miscelazione di due fluidi a diverse temperature, mentre la rapida ossidazione di elementi combustibili è la generale sorgente di energia nel caso di esplosioni chimiche e che rappresenta lo standard di processo per le esplosioni non accidentali o d'assalto. I materiali

esplosivi per l'appunto, si distinguono dalle usuali sostanze combustibili per la presenza di ossigeno legato all'interno della loro molecola.

Questa caratteristica è la ragione diretta per cui questi materiali bruciano con velocità elevatissime generando pressioni istantanee. Le esplosioni infatti, si distinguono dalle altre reazioni esotermiche per l'estrema rapidità delle loro reazioni.

Da quanto detto segue che l'abilità di un sistema chimico a generare trasformazioni esplosive è determinata da tre fattori: l'esotermicità del processo (ovvero l'evoluzione di calore durante la conversione), l'alta velocità di propagazione e la presenza di gas (vapori) nei prodotti di reazione.

Rimandiamo a [3] per maggiori dettagli su queste proprietà, le quali possono essere esibite in varia misura negli esplosivi, ma è solo la loro simultanea combinazione a conferire il carattere di una normale esplosione al fenomeno.

1.2 Classificazione dei processi esplosivi

A seconda delle condizioni d'innescò, il comportamento degli esplosivi può mostrarsi qualitativamente differente. Per quanto riguarda il carattere e la loro velocità di propagazione, tutti i processi esplosivi noti, sono suddivisi nelle due seguenti tipologie: deflagrazioni e detonazioni. Essi differiscono principalmente per la velocità del processo di reazione che provoca il rilascio di energia. Se la velocità di reazione è inferiore alla velocità del suono nel materiale esplosivo, l'esplosione è considerata una deflagrazione. Se la velocità di reazione è uguale o superiore, la velocità del suono nel materiale esplosivo, è considerata una detonazione.



Figura 1.2. Esplosione deflagrante.



Figura 1.3. Esplosione detonante.

Nelle figure (1.2) e (1.3) vengono mostrati rispettivamente un esempio di deflagrazione e di detonazione.

Si parla di deflagrazione sostanzialmente, quando la zona di reazione si sposta nel mezzo (esplosivo) per conducibilità termica. La deflagrazione è dunque una combustione con carattere progressivo che avviene a velocità subsonica con durata dell'ordine dei decimi di secondo [4].

La detonazione è invece una reazione chimica esotermica che si propaga in pochi millisecondi nell'esplosivo producendo un'onda d'urto. Il fenomeno si autoalimenta grazie all'energia che man mano si sviluppa con la reazione, e dopo un breve regime transitorio, caratterizzato da velocità crescente, si stabilizza su una velocità costante tipica di quelle particolari condizioni (tipo di sostanza, di confinamento, temperatura, ecc).

Esplosivi ad alto contenuto energetico, quali TNT e C-4, sono costruiti in modo tale che il loro processo di reazione provoca una detonazione. Polveri e nubi di vapore, che di solito vengono innescati accidentalmente e la cui proporzione aria-combustibile non risulta ottimale, tipicamente deflagrano.

L'improvviso rilascio di energia da una detonazione, come anticipato, provoca un'onda di "shock", la quale è un disturbo di pressione che si propaga radialmente verso l'esterno della sorgente in tutte le direzioni (sferica) o in una qualche direzione preferenziale (cilindrica) e causa un immediato aumento del picco di pressione che si muove attraverso l'aria circostante. Una deflagrazione crea invece un'onda di "pressione", che provoca un più graduale aumento del picco di pressione, il quale si muove attraverso l'aria circostante, e che a parità di energia equivalente risulta inferiore a quello creato da un'esplosione detonante[5].

Le figure seguenti, (1.4) e (1.5), forniscono l'andamento ideale caratteristico nel tempo dell'onda di pressione proveniente da una deflagrazione e da una detonazione in aria libera.

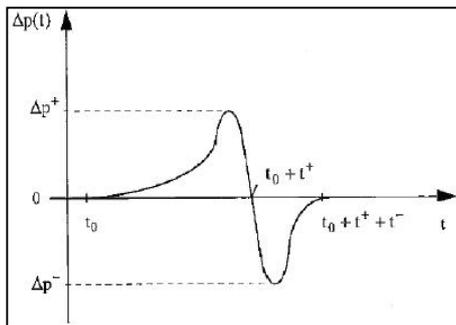


Figura 1.4. Onda di "pressione"

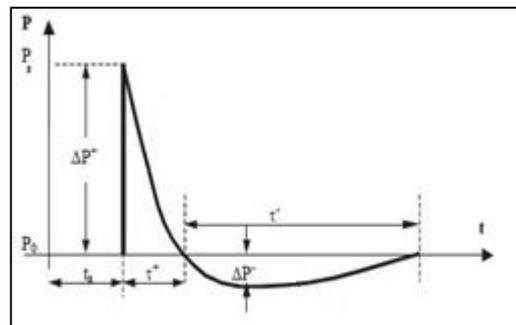


Figura 1.5. Onda di "shock".

In entrambi i casi, le pressioni sviluppate sono ordinariamente superiori di quelle di qualsiasi uragano o tornado, ma hanno durate di qualche decimo o centesimo di secondo. Il tempo di salita di un'onda d'urto, pur se istantaneo, può provocare danni significativamente più rilevanti rispetto a quelli di un'onda di pressione su un qualsiasi componente strutturale.

Tuttavia i limiti della velocità di una 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 e la forma del contenitore. In funzione di alcuni fattori, come la violenza dell'urto iniziale con cui viene innescata la carica o l'esistenza di una dimensione preferenziale di propagazione, una deflagrazione può tramutarsi in una detonazione e così un esplosivo normalmente deflagrante, com'è la polvere nera, può detonare. Viceversa un materiale esplosivo abitualmente detonante, come la dinamite, può deflagrare se stimolato con un innesco troppo debole [6]. È sempre conservativo trattare un'esplosione come una detonazione, in particolar modo se questa coinvolge la rapida reazione di un materiale solido. Per questo motivo, il presente lavoro si concentrerà sulle onde d'urto create dalla detonazione di esplosivi ad alto potenziale energetico.

1.3 Esplosivi

Gli esplosivi sono sistemi relativamente instabili in senso termodinamico, che sotto l'influenza di azioni esterne sono in grado di trasformazioni esotermiche estremamente rapide, accompagnate dalla formazione di gas o vapori molto caldi e con conseguenti effetti meccanici, ottici ed acustici di rilevante entità.

1.3.1 Classificazione degli esplosivi

Al giorno d'oggi esistono svariati criteri per la classificazione dei materiali esplosivi, che vengono di seguito indicati.

Classificazione secondo il modo di esplodere

Da quanto esplicitato nel paragrafo precedente, s'intuisce che una prima classificazione di questi particolari materiali può essere quella basata sul loro modo di esplodere :

- esplosivi deflagranti
- esplosivi detonanti (o dirompenti):
 - a) esplosivi primari (o innescanti)
 - b) esplosivi secondari

I *primari (o innescanti)* sono esplosivi estremamente sensibili. Grazie a questa caratteristica infatti, riescono ad assumere il regime di detonazione per semplice infiammazione (fiamma, scintilla) oppure per urto, ed è per questo che vengono implementati per la costruzioni dei detonatori, il cui compito è innescare esplosivi che non riescono a detonare sotto la semplice azione di una fiamma, ma che richiedono un urto esterno, *i secondari*. Il Fulminato di Mercurio, l'Azoto Idrato e lo Stifnato di Piombo sono gli innescanti più utilizzati [7].

Gli esplosivi *secondari* invece sono miscele o composti ad alto contenuto energetico che possiedono una grande stabilità, e che tradizionalmente appartengono a due delle tre tipologie che esplicheremo successivamente: esplosivi militari ed esplosivi civili.

Classificazione secondo la composizione chimica

Un altro sistema di classificazione adottato (quello forse più didattico), è basato sulla composizione chimica. In base a questa gli esplosivi possono essere raggruppati nelle seguenti famiglie:

- 1) esplosivi chimici;
- 2) miscele esplosive;
- 3) miscugli esplosivi.

Esplosivi chimici

Gli esplosivi chimici contengono nella loro molecola sia il comburente (l'ossigeno) sia gli elementi combustibili (in genere *C* e *H*). All'atto dell'esplosione questi elementi si combinano fra loro dando vita a prodotti gassosi variamente ossigenati.

Esplosivi chimici sono:

- Nitroglicerina
- Nitroglicol
- Nitrocellulose
- Pentrite (PETN, Nitropenta, Tetranitropentaeritrite)
- Tritolo (Trinitrotoluene TNT)
- Acido picrico, o Pertite
- Nitrobenzoli
- Nitronaftaline
- Tetrile (Tetralite)
- Esogene (T4, RDX, Cyclonite, Trimetilentrinitroammina)
- Ottogene (HMX, Ciclotetrametiletranitroammina)

Miscela chimiche esplosive

Si chiamano così le miscele di due o più esplosivi, cui talvolta vengono aggiunte una o più sostanze non esplosive (che possono essere inerti o attive).

Le aggiunte hanno di solito lo scopo di mitigare la potenza dell'esplosivo, di ridurre l'eccessiva sensibilità alle azioni esterne, e di mirare ad un compromesso prezzo-prestazioni che risponda alle richieste di mercato.

Mentre negli esplosivi chimici i gruppi atomici sono tutti contenuti nella molecola, quindi l'esplosione avviene secondo equazioni chimiche ben definite, nelle miscele chimiche i gruppi di atomi sono contenuti in molecole diverse e la reazione potrà essere abbastanza completa solo se la miscela sarà intima e omogenea. Le miscele si distinguono in miscele fisiche (ottenute per fusione degli ingredienti) e in miscele chimiche (ottenute per gelatinizzazione). Si chiama gelatinizzazione la soluzione degli ingredienti solidi in quelli liquidi oppure la soluzione di ingredienti solidi in adatti solventi (che poi vengono eliminati). Si ottengono così composti nei quali i caratteri sia fisici sia chimici dei componenti risultano profondamente alterati. Le miscele chimiche hanno caratteri e proprietà molto prossime a quelle degli esplosivi chimici e la loro esplosione avviene in modo completo. Poiché, queste miscele possono essere costituite dall'unione di due o più esplosivi, eventualmente con l'aggiunta di una o più sostanze non esplosive, si comprende che le combinazioni possono essere infinite. Molte di queste combinazioni sono state preparate e sono risultate soddisfacenti a livello energetico, per cui il numero degli esplosivi messi in commercio per miscelazione risulta alquanto elevato. Alcune miscele esplosive, se fossero utilizzate con i soli componenti che provocano l'esplosione, risulterebbero di scarsa potenza oppure presenterebbero inconvenienti vari (igroscopicità, eccessiva sensibilità all'urto o al calore, scarsa conservabilità, ecc). Le qualità vengono allora migliorate con l'aggiunta di adatte sostanze correttive (ad esempio la potenza di alcune miscele viene esaltata dall'aggiunta di polveri di metalli). Così pure la grande sensibilità all'urto di certe miscele viene notevolmente inibita dall'aggiunta di un lubrificante, il quale avvolge i cristalli dell'esplosivo con un sottile velo evitando lo sfregamento diretto di essi, e quindi il pericolo di esplosione. Si tratta di quell'operazione definita flemmatizzazione.

Esempi di miscele esplosive sono:

- Dinamite
- Gelatine esplosive
- Esplosivi al plastico

Miscugli esplosivi

I miscugli esplosivi sono costituiti da due o più sostanze mescolate meccanicamente in opportune proporzioni dopo essere state ridotte in polvere fina. Possono aversi miscugli costituiti da:

- una sostanza esplosiva e una inerte;
- due o più sostanze esplosive;
- una sostanza esplosiva e altre combustibili o ossidanti;

- sostanze non esplosive, di cui almeno una ossidante e una combustibile.

Nei miscugli esplosivi l'ossigeno non si trova allo stato libero ma viene fornito, all'atto dell'esplosione, da uno dei composti. Come sostanze ossidanti si adoperano quelle che contengono notevole quantità di ossigeno (nitrati, clorati, ecc.). Dalle caratteristiche del sale dipendono quelle del miscuglio esplosivo, quindi il sale diventa caratterizzante; per questo si parla di esplosivi al nitrato, di esplosivi al clorato, ecc.

Si citano:

- Polvere nera
- Miscela di Nitrato ammonico e Carbonio (NA-C)
- Miscela di Nitrato ammonico e olio combustibile (NA-OC) ANFO

Classificazione in base allo stato fisico

Gli esplosivi possono essere classificati anche in base allo stato fisico, in:

- 1) gassosi (miscugli detonanti);
- 2) liquidi (per esempio la nitroglicerina, che però non si usa mai sola);
- 3) gelatinati o gelatinizzati (come le gomme, ecc.);
- 4) solidi (compatti o pulverulenti).

1.3.2 Caratteristiche dei materiali esplosivi

I materiali esplosivi utilizzati per la fabbricazione di ordigni esplodenti, come si è potuto constatare dalla lettura del paragrafo 1.3.1, sono numerosi e in continua crescita. Tutti però presentano comuni proprietà che conferiscono a questi materiali il carattere tipico esplosivo, la cui conoscenza è di fondamentale importanza per la predizione delle loro prestazioni.

Bilancio d'ossigeno

L'ossigeno negli esplosivi non è indispensabile (e infatti alcune famiglie di esplosivi non lo contengono) però esso è presente in quasi tutti gli esplosivi e il suo ruolo è molto importante in quanto nell'esplosione una molecola ossigenata si scinde in altre molecole più semplici con liberazione di energia termica. La capacità ossidante dell'ossigeno dipende non tanto dalla sua proporzione quanto dalla struttura della molecola dell'esplosivo stesso: se l'ossigeno nella molecola è già associato all'idrogeno e al carbonio in combinazioni stabili esso non ha più valore agli effetti di reagire con essi, cosa invece possibile quando il legame è

labile, come è quello dell'ossigeno con il gruppo NO. Si può distinguere la percentuale di ossigeno totale da quella di ossigeno attivo, ma ancora i dati non sono significativi in conseguenza dei diversi tipi di legami che esso ha nella molecola con il carbonio e con l'idrogeno: infatti, data la rapidità dell'esplosione, l'ossigeno che viene consumato nella reazione è solo quello interno delle molecole di esplosivo, nella cui composizione entrano normalmente anche l'idrogeno, il carbonio e l'azoto. Se l'ossigeno nell'esplosivo, è sufficiente per ossidare tutto il carbonio in CO_2 e tutto l'idrogeno in H_2O , l'esplosivo è detto ad esplosione completa e si parla di bilancio di ossigeno nullo.

Ci sono esplosivi che contengono ossigeno esuberante per la reazione, nel qual caso resta ossigeno libero nei prodotti della reazione, come la glicerina ad esempio, la cui reazione esplosiva cede ossigeno all'aria. In questo caso si parla di bilancio d'ossigeno positivo.

In molti esplosivi viceversa l'ossigeno non è sufficiente per ossidare tutto il carbonio e l'idrogeno, per cui questi restano ossidati parzialmente o liberi. Così è per l'esplosione del trinitrotoluene e allora il bilancio d'ossigeno si dice negativo.

Il bilancio di ossigeno quindi può essere definito come il numero di grammi di ossigeno che mancano o eccedono rispetto alla combustione completa di 100 g di esplosivo.

Sono state pubblicate tabelle [8] nelle quali è indicata la quantità di ossigeno necessaria per la combustione di ognuna delle sostanze impiegate nella fabbricazione degli esplosivi. Con esse è molto semplice calcolare il bilancio di ossigeno di un esplosivo: basta moltiplicare le quantità lette in tabella per le rispettive percentuali dei componenti e fare la somma algebrica.

Si fa osservare che alcuni esplosivi (come ad esempio l'Azotidrato di Piombo) nell'esplosione non comprendono reazione ossidante; così per essi non si può parlare di bilancio di ossigeno.

Il bilancio d'ossigeno influenza sia l'efficacia dell'esplosivo che la tossicità dei gas d'esplosione. Un esplosivo ricco d'ossigeno, infatti, offre prestazioni superiori rispetto ad un altro esplosivo con bilancio negativo, proprio perché la completa ossidazione degli elementi combustibili produce maggiore energia. Per quanto riguarda i prodotti d'esplosione invece, sia gli esplosivi con eccesso che con difetto di ossigeno generano gas tossici, quali ossidi di azoto i primi ed ossidi di carbonio i secondi. Proprio per tale ragione le dinamiti impiegate per opere di scavo (caverne, gallerie, altoforni) devono possedere un bilancio d'ossigeno nullo o quanto più possibile vicino allo zero.

Calore di esplosione

Come già precedentemente detto, l'esplosione è un fenomeno esotermico, cioè nella reazione si libera una quantità di calore uguale alla differenza tra l'entalpia di formazione dei prodotti generati dall'esplosione e l'entalpia di formazione dell'esplosivo stesso. I calori di formazione vengono determinati a $20\text{ }^\circ\text{C}$ e a

pressione costante, ma nel caso delle utilizzazioni pratiche da mina, la reazione avviene nell'ambiente del foro che rimane a volume costante, quindi quello che interessa è il calore sviluppato a volume costante. Questo è superiore al calore calcolato a pressione costante di una quantità pari al lavoro speso per la dilatazione dei gas fino alla pressione atmosferica [9]. Si definisce calore di esplosione la quantità di energia termica che viene liberata, in condizioni adiabatiche, da un chilogrammo di esplosivo, e che solitamente si esprime in Kcal/Kg o in KJ/Kg [10].

Tabella 1-1. Energia specifica di alcuni esplosivi/combustibili.

Esplosivo/Combustibile	Q[Kcal/Kg]
Tritolo (TNT)	1079
Pentrite (PETN)	1385
Ottogene (HMX)	1357
Ciclotrimetiltrinitroammina (RDX)	1280
Nitroglicerina (NG)	1600
Tetrile	1320
Ammonio Nitrato	260
Azotidrato di piombo	260
SPDF	810
M6+2	750
Carbone	9000
Benzina	11000

La tabella 1-1 riporta valori di energia specifica per unità di massa in Kcal/Kg di alcuni esplosivi e combustibili noti. Non deve meravigliare che gli esplosivi siano scarsi produttori di energia termica rispetto ai più comuni combustibili; a parità di peso infatti, essi contengono una quantità inferiore di elementi combustibili (carbonio e idrogeno) compensata dall'ossigeno, sempre presente all'interno della loro molecola. D'altra parte però questi materiali presentano un vantaggio unico rispetto alle altre fonti energetiche, e cioè quello di fornire l'energia termica in un tempo brevissimo e quindi con elevata potenza.

Potenza

Dalla seconda legge della termodinamica è risaputo che è impossibile convertire tutto il calore in lavoro senza che ci siano perdite termiche durante la trasformazione. Parlando del calore sviluppato dallo scoppio di un esplosivo, si è osservato inoltre, che le quantità di energia in gioco sono tuttavia minori di quelle sviluppate dalla combustione di un qualunque propellente ordinario, per cui anche la misura di lavoro prodotto sarà modesta. Ciò nonostante, esso viene sviluppato in un tempo di brevissima durata, caratteristica di un'esplosione, e per questo i suoi effetti sono fortemente devastanti.

Il lavoro sviluppato da un chilo di esplosivo quando i gas dell'esplosione possono espandersi nell'ambiente circostante secondo un'adiabatica indefinita prende il nome di *potenziale* di quell'esplosivo. In altre parole il potenziale è l'equivalente meccanico del calore d'esplosione; è quindi un valore convenzionale che esprime l'attitudine meccanica dell'esplosivo in esame.

Ad esempio la nitroglicerina, il cui calore d'esplosione ricavato dalla tabella 1-1 è di 1510 Kcal/Kg, avrà un potenziale pari a:

$$P_{\text{potenziale Nitroglicerina}} = 1600 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \times 427 \frac{\text{Kgf m}}{\text{Kcal}} = 683200 \frac{\text{Kgf m}}{\text{Kg}} \quad (1.1)$$

Nella tabella 1-2 vengono riportati i valori di potenziale di alcuni esplosivi in chilogrammo-forza per metro per unità di massa d'esplosivo.

Tabella 1-2. Potenziale di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Potenziale [Kgf]
Tritolo (TNT)	460733
Nitroglicerina (NG)	683200
Pentrite (PETN)	591395
Ciclotrimetilentrinitroammina (RDX)	546560
Tetrite	563640
Ottogene (HMX)	579439
Ammonio Nitrato	111020

Ma la breve durata del tempo di esplosione fa sì che solo una parte di questo potenziale possa essere effettivamente pronunciata: questa è la *potenza*.

La potenza di un esplosivo dipende dalla densità di carica e dalla temperatura di esplosione, ma gli effetti distruttori sono tanto maggiori quanto è più grande la velocità di detonazione, e così si considera la *dirompenza*, ovvero la maggiore o minore abilità di un esplosivo a frantumare la roccia. La formula utilizzata per il calcolo di quest'ultima quantità dipende, oltre che dalla densità e dalla velocità di detonazione, dalla forza specifica, convenzionalmente espressa in *Strenght* e misurata al pendolo balistico. La capacità di un esplosivo di provocare la rottura e la frantumazione di un oggetto a contatto con esso al momento dell'esplosione prende anche il nome di *brisanza* (dal francese *briser*, rompere). Ci sono diversi metodi per la valutazione dell'effetto brisante di un esplosivo (test con sabbia, ammaccatura di una piastra, cilindro di metallo), ma i vari test, come si può osservare dalla tabella 1-3, possono dare risultati diversi per lo stesso esplosivo. Sfortunatamente, nessun singolo test è utilizzabile per tutti gli esplosivi (ad esempio, il nitrato d'ammonio non detona completamente nella sabbia).

Tabella 1-3. Brisanza di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Brisanza
Azotidrato di piombo	0.40
Ammonio Nitrato	0.54 (test cilindro di piombo)
TNT	1.00 (riferimento)
HMX	1.25 (test con sabbia)
PETN	1.27-1.41 (a seconda della densità)
C4	1.34
RDX	1.25-1.45 (test multipli)

L'effetto utile generato da un esplosivo si detrae essenzialmente da due comportamenti distinti: *l'azione di spinta* (che dipende principalmente dalla pressione esercitata dalla massa gassosa) e *l'azione d'urto* (che dipende in primo luogo dalla velocità d'esplosione). Il lavoro compiuto da un esplosivo potrebbe essere misurato in base alle sue caratteristiche chimico-fisiche, ma in pratica i valori ottenuti differiscono sensibilmente dagli schemi teorici in quanto la composizione dei gas sviluppati dall'esplosione dipende da equilibri chimici legati alle condizioni termo-bariche dell'insieme, le quali variano sensibilmente con le condizioni di dilatazione lasciate ai prodotti dell'esplosione. Di conseguenza la capacità di un esplosivo di sviluppare energia (quindi potenza), viene determinata con due prove sperimentali in cui sono diverse le condizioni consentite ai prodotti discendenti dalla detonazione per dilatarsi: la *prova di Trauzl* o *prova al blocco di piombo* e la già citata *prova al mortaio o pendolo balistico* o di *Strenght*. Le prove utilizzate per la misura della dirompenza invece sono generalmente tre: quella di *Hess* e di *Kast* piuttosto antiche e imprecise al cospetto dei risultati ottenuti con la prova di Trauzl, e perciò sostituite con una prova messa a punto dall'*Explosive Research Laboratory* (Pennsylvania), detta *dell'incavo della piastra*. Rimandiamo a [9] per maggiori dettagli sulla consistenza di questi test.

Velocità di detonazione

È la velocità con cui l'onda di detonazione si muove all'interno dell'esplosivo, ovvero la velocità con cui si propaga la reazione per mezzo della massa dell'esplosivo stesso. La velocità dell'onda di detonazione ha dunque lo stesso ordine di grandezza della velocità delle onde sonore nei solidi e può essere espressa attraverso la seguente:

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.2)$$

in cui μ è il modulo di elasticità e ρ la densità.

Essendo strettamente connessa alla struttura chimica dell'esplosivo, bisogna precisare che la caratterizzazione in velocità viene considerata in valore massimo, pur se le misure sperimentali potrebbero fornire risultati notevolmente più bassi, poiché su queste influiscono diversi fattori quali ad esempio: la densità del caricamento, il diametro della carica (per ogni esplosivo esiste un diametro minimo, critico, al di sotto del quale si verifica una diminuzione notevole della velocità), confinamento (se la carica è racchiusa in un involucro aumenta la velocità di detonazione), entità e tipo d'innesco, stato fisico e granulometria degli ingredienti, ecc.

La tabella 1-4 riporta la velocità di detonazione caratteristica di alcuni tra i principali esplosivi.

Tabella 1-4. Velocità di detonazione di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Velocità di detonazione [Km/s]
TNT	6.93
Nitroglicerina (NG)	7.30
PETN	8.40
RDX	8.75
HMX	9.40
Ammonio Nitrato	5.27
Azotidrato di piombo	4.63

Questa grandezza è, da quanto esposto precedentemente, un parametro estremamente indicativo dell'efficacia di un materiale esplosivo, in quanto direttamente correlata con il tempo di rilascio dell'energia, portavoce quindi della potenza emanabile dall'esplosione.

Esplosivi con velocità superiore a quella dell'acido picrico (7.35 Km/s) vengono chiamati *esplosivi ultradirompenti* (o *nobili*). La velocità massima registrata appartiene oggi alla miscela Tetranitrometano-Toluolo, con 9.30 Km/s. Vale la pena indicare che alcuni esplosivi, come la nitroglicerina e le gelatine esplosive, presentano due velocità di detonazione distinte e stabili: *regime di bassa velocità* e *regime di alta velocità*. Le gelatine ad esempio hanno velocità di basso regime comprese tra 1.5 e 2.0 Km/s e velocità di alto regime di 6.5-7.5 Km/s in dipendenza del contenuto di nitroglicerina presente nella miscela. Può anche verificarsi che, pur se l'esplosione parta con un regime di bassa velocità, ad un certo punto quest'ultima si porti ad un regime di alta velocità, corrispondente ad una reazione con completa liberazione di energia.

Densità

La densità è un parametro di considerevole importanza nella scelta di esplosivi. La prova più utilizzata nella pratica per la misura di questa quantità, che in tal caso prende il nome di *densità di carica*, è quella in cui si misura il peso di esplosivo nell'unità di volume del foro da mina e a cui fa riferimento questa trattazione. Si distingue anche la *densità di carica assoluta o reale o peso specifico* che rappresenta il peso di un certo volume nel quale la sostanza esplosiva è contenuta senza interspazi (per questo detta anche *densità di cristallo*) e la *densità gravimetrica o apparente* che rappresenta il rapporto fra il peso di un certo esplosivo in condizioni normali, comprese le inclusioni gassose, e il volume che esso occupa.

Nelle opere civili, per esempio, dove le condizioni per lo scoppio sono difficoltose o dove è richiesta una frammentazione fine di ciò che si vuole demolire, l'utilizzo di esplosivi densi è solitamente necessario. Esplosivi meno densi sono invece adoperati quando è soddisfacente una frammentazione grossolana. Si deduce, quindi, che esplosivi densi, a parità di quantità di materiale e distanza dalla sorgente, produrranno pressioni d'esplosione di maggiore ampiezza e onde d'urto con maggiore dirompenza. Con l'aumento della densità di carica, infatti, generalmente aumenta la velocità di detonazione poiché si riduce la compressibilità e si ha un aumento conseguente del modulo di elasticità riscontrabile dalla precedente equazione (1-2). Se si considera tale correlazione sul singolo esplosivo, si nota che l'aumento di velocità corrispettivo ad un incremento di densità, in realtà, si verifica fino ad un certo valore detto *densità di carica limite pratica*. Oltrepassando questo termine difatti, per alcuni esplosivi si registra una diminuzione della velocità di detonazione, ragion per cui viene adoperato nelle mine per avere massimo rendimento. Il tritolo, per esempio, possiede una velocità di detonazione pari a 4.2 Km/s quando ha una densità di 0.8 Kg/m³ e una velocità di 6.9 km/s quando la sua densità è di 1.6 kg/m³. Questo comportamento spiega perché, a volte, mine di lunga carica presentano un'esplosione parziale: l'onda esplosiva che parte dall'estremità della carica, dove si ha l'innesco, comprime infatti l'esplosivo nell'estremità opposta aumentandone la densità che potrebbe superare quella del limite pratico. Potrebbe accadere quindi, sotto l'ipotesi che si abbia una distanza utile dal punto di densità limite all'estremità non ancora esplosa, che l'onda potrebbe giungere con una velocità non in grado di attivare la restante parte di materia esplosiva.

La tabella 1-5 riporta valori di densità in kilogrammo al metro cubo per diversi materiali esplosivi solidi.

Tabella 1-5. Densità di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Densità [Kg/m ³]
TNT	1630
HMX	1910
C4	1590
PETN	1778
Tetrile	1730
RDX	1816

Bisogna aggiungere che, all'aumentare della densità, si rileva inoltre una diminuzione della sensibilità. Questa viene attribuita al fatto che l'energia data ad una particella viene dissipata con maggiore rapidità in un mezzo più denso e, analogamente a quanto succede per la velocità, bisogna imprimere un impulso di maggior contenuto energetico per avere la detonazione dell'esplosivo. La densità di un esplosivo gioca anche un ruolo apprezzabile quando si hanno condizioni ambientali con alto tasso di umidità.

Pressione di detonazione

È una grandezza specifica misurata sperimentalmente che dipende dalla densità di caricamento e che rappresenta il picco massimo di pressione che si ha sul fronte di detonazione all'interno della massa di esplosivo.

Dall'equazione di stato dei gas perfetti:

$$pv_s = RT \quad (1.3)$$

nella quale p è la pressione, v_s il volume specifico, R la costante del gas e T la sua temperatura assoluta, si evince, a conferma di quanto detto per la densità, che la pressione è inversamente proporzionale al volume. Ciò in realtà si verifica con buona approssimazione quando la pressione ha valori regolari, mentre la proporzionalità non viene rispettata per valori di pressioni elevate che si generano tipicamente nel brillamento di esplosivi. In queste condizioni la proporzionalità inversa vale se si riduce il volume iniziale di una quantità pari allo spazio minimo entro cui il gas può essere contenuto e che prende il nome di *covolume*. Queste considerazioni sono valide quando tutti i prodotti derivanti dalla reazione sono gassosi. Se ci sono residui solidi, il loro volume va sommato al covolume e la capacità della camera (foro da mina) può risultare sensibilmente diminuita.

Si può quindi definire la *pressione di detonazione o specifica* come la pressione che si ottiene facendo brillare l'unità di peso di un esplosivo nell'unità di volume netta, ossia volume unitario più covolume. In altre parole è praticamente

la pressione che un chilo di esplosivo esercita esplodendo a volume costante in un recipiente avente capacità di un litro più il covolume dell'esplosivo in esame. La tabella 1-6 seguente riporta valori tipici di pressione per alcuni esplosivi in giga pascal:

Tabella 1-6. Pressione di detonazione di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Pressione di detonazione [GPa]
TNT	18.9
PETN	31.0
RDX	33.8
HMX	39.5

La misura della pressione di detonazione viene fatta determinando lo schiacciamento di un cilindro di rame provocato dallo spostamento di uno stantuffo spinto dallo scoppio di una piccola carica dell'esplosivo in studio all'interno di una camera d'acciaio. I risultati che si ottengono sono comunque prossimi a quelli ricavabili teoricamente.

Temperatura di esplosione

È la temperatura massima che viene raggiunta dai gas prodotti durante la reazione esplosiva a volume costante. Per gli esplosivi detonanti i valori di temperatura rientrano in un *range* tra i 2500 e i 6000 gradi centigradi.

La tabella 1-7 espone alcuni di questi valori per sei differenti materiali esplosivi:

Tabella 1-7. Temperatura di detonazione di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Temperatura di detonazione [°C]
TNT	3447
RDX	3867
HMX	3797
PETN	4007
Nitroglicerina	4277

Questi valori di temperatura sono ricavati dall'equazione di stato, ritenuta la migliore per la predizione di questo parametro caratteristico [11], poiché la loro misura non può essere condotta con sufficiente rigore sperimentale in quanto il tempo di risposta delle sonde termiche è troppo alto rispetto alla rapidità con cui vengono raggiunti gli elevati livelli termici dei gas generati dall'esplosione.

Nella pratica, come accennato, la temperatura d'esplosione è strettamente legata alla capacità dell'esplosivo di compiere lavoro.

Stabilità

È l'attitudine che ha un esplosivo a resistere all'autodecomposizione chimica. In altri termini è la capacità di un esplosivo a mantenere costanti determinate caratteristiche al variare di determinate condizioni marginali. Questa resistenza è caratteristica di ogni materiale esplosivo ed è più accentuata quando le materie prime sono accuratamente selezionate.

Per i miscugli esplosivi si considera una stabilità globale che è uguale a quella della sostanza componente che ha minore stabilità.

Meritano un cenno i composti nitrici, specie le nitrocellulose, perché tendono a decomporsi già a temperatura ambiente con formazione di prodotti acidi e nitrosi o di ossidi di azoto, i quali agiscono poi da catalizzatori rendendo più rapido il fenomeno nel tempo. La decomposizione è accelerata infatti dall'aumento di temperatura, dall'umidità e dalla luce e si può giungere a situazioni pericolose sia nell'immagazzinamento sia nell'uso di esplosivi che abbiano subito l'effetto combinato o il singolo agente esterno.

Gli esplosivi di scoppio industriali hanno una stabilità che generalmente garantisce la loro integrità, sotto normali condizioni di immagazzinamento, oltre il termine generalmente accettato per il loro impiego.

Sensibilità

La sensibilità di un esplosivo è la sua attitudine a esplodere più o meno facilmente sotto l'azione di un impulso esterno: urto, frizione, temperatura, pressione, innescamento.

Sensibilità agli urti

Gli esplosivi più comuni sono abbastanza resistenti agli urti e agli sfregamenti non eccessivi, quindi possono essere spinti e compressi, purchè non si proceda troppo bruscamente.

La prova per misurare la sensibilità all'urto di un esplosivo viene eseguita facendo cadere un peso su una piastra d'acciaio su cui è posta la carica esplosiva e si misura in centimetri di caduta (prova della *berta*). Si determina così l'altezza minima di caduta che provoca l'esplosione del materiale sottoposto e che varia ordinariamente tra i 4 e i 110 centimetri. Per dare un'idea dell'ordine di grandezza, si cita la nitroglicerina che con un peso di 2 chilogrammi comincia ad esplodere ad un'altezza di caduta di 6 centimetri. Come anticipato quando è stata trattata la *classificazione di esplosivi secondo la composizione chimica*, si può abbassare la sensibilità di alcuni di essi mediante l'uso di sostanze *stabilizzanti* o *flemmatizzanti* (come la farina fossile per la nitroglicerina), le quali penetrano all'interno della massa dell'esplosivo che rimane diviso in minuscole particelle protette, sia pure relativamente, dagli urti.

Sensibilità all'attrito

La sensibilità all'attrito può essere determinata con il *pendolo d'attrito*, ove si ha un blocco di acciaio liscio posto all'estremità di un pendolo che liberato a una certa altezza sfrega nelle sue oscillazioni contro la base d'acciaio al centro della quale, entro solchi trasversali, è sistemata una piccola quantità dell'esplosivo in esame, la cui sensibilità alla frizione viene determinata dal numero di esplosioni che si verificano su 10 prove.

Sensibilità all'innescamento

Per far sì che un esplosivo venga innescato in un momento desiderato, bisogna esercitare un'azione esterna che sia capace di farlo esplodere. L'azione è data da un mezzo, chiamato *mezzo d'innescamento*, il quale deve agire con minore o maggiore intensità a seconda della sensibilità dell'esplosivo su cui si opera.

Per esplosivi molto sensibili è sufficiente un piccolo urto, mentre esplosivi poco sensibili (come sono la maggior parte degli esplosivi detonanti) richiedono urti di maggiore intensità oppure l'apporto di una fiamma, che vengono generati rispettivamente dall'onda esplosiva di una piccola carica molto sensibile (*innesco*) e da una miccia a lenta combustione, detta anche *innesco fusante*. Dalla lettura del paragrafo sulla *classificazione di esplosivi secondo il modo d'esplosione*, si è potuto apprendere che esplosivi deflagranti sono materiali che presentano un'elevata sensibilità ad essere innescati, mentre i detonanti si dividono in due categorie: *primari (o innescanti)* e *secondari*, dove i primi vengono utilizzati (insieme ai deflagranti) come detonatori per l'innescamento dei secondari, meno sensibili ma più potenti e distruttivi.

Esiste una scala di sensibilità all'innescamento, detta di *Sellier-Bellot*, che classifica in funzione della quantità d'innescamento necessario i diversi tipi di esplosivi. Essa comprende una serie di detonatori numerati da 1 a 10 a cui corrisponde un peso di carica man mano crescente. Oggi quasi tutti gli esplosivi s'innescano con il numero 8 a cui corrispondono 2 grammi di Fulminato di Mercurio, mentre l'ANFO ha bisogno del numero 10 a cui corrispondono 3 grammi di fulminato di mercurio.

Si definisce allora *sensibilità all'innescamento* il numero del minimo detonatore necessario ad accendere una cartuccia dell'esplosivo considerato, di diametro 30 millimetri, distesa su una piastra di piombo.

Sensibilità al calore

L'alta temperatura nell'ambiente di conservazione degli esplosivi, provocata dall'irradiazione solare ad esempio, può, come anticipato, facilitarne la decomposizione. Si deve considerare inoltre, che qualunque esplosivo sottoposto ad un aumento di calore, ad un certo istante, si accende, brucia e può addirittura esplodere. La polvere nera, per esempio, si accende quando la temperatura è prossima ai 130 gradi centigradi. Queste *temperature d'accensione* sono in genere più basse di quelle di detonazione, con cui avviene l'esplosione che dipende anche dalla pressione, ma non bisogna fidarsi troppo perché talvolta l'accensione può tramutarsi in esplosione, specie se l'aumento di temperatura cui è soggetto l'esplosivo è repentino.

Attitudine alla detonazione (Distanza di colpo)

Si definisce *attitudine alla detonazione* di un esplosivo la sua capacità di trasmettere la detonazione da una cartuccia ad un'altra distanziata dalla prima e separata da aria o da materiale inerte. Da un altro punto di vista è quindi la sensibilità di una carica all'esplosione di un'altra a non immediato contatto. Si dice che la carica distanziata dallo scoppio della prima detona per *simpatia* o per *influenza*.

Questo fenomeno dipende dal fatto che un'onda d'urto esercita pressioni accertabili anche a lunghe distanze, che generano quindi un urto che potrebbe far detonare altre cariche (ogni tipo di carica fino ad una certa distanza).

La distanza massima alla quale, nell'aria, la detonazione di una cartuccia innescata provoca la detonazione completa di un'altra cartuccia allineata sul suo stesso asse longitudinale prende il nome di *distanza di colpo*. Essa caratterizza la maggiore o minore facilità di trasmissione dell'onda esplosiva, che viene richiesta in certi casi, e che può costituire un grave danno in altri.

Per la determinazione di questa proprietà si usano normalmente cartucce di 30 millimetri di diametro e di 120 millimetri di lunghezza. Esse vengono poste allineate su un piano di piombo o su un piano ricoperto di sabbia o essere sospese in aria mediante un filo.

La distanza di colpo dipende dalla conduttività del mezzo interposto tra le cariche, aumenta con la velocità di detonazione dell'esplosivo, con la purezza dei componenti di questo e con la potenza del detonatore utilizzato, mentre diminuisce con il crescere dell'umidità e dello spessore della carta di rivestimento dell'esplosivo.

Ad esempio si hanno valori di 35 centimetri per la gelatina 92/8 (92% di Nitroglicerina e 8% di Cotone Collodio) e di 20 centimetri per la dinamite al 40% di Nitroglicerina. Alcuni esplosivi hanno distanza di colpo nulla.

In letteratura sono presenti due formulazioni simili per il calcolo di questa quantità, ma al cospetto di recenti risultati sperimentali non sono attendibili e andrebbero modificate a seconda di alcune condizioni d'influenza.

Da quanto detto si capisce che la distanza di colpo fra due cartucce in un foro da mina è diversa da quella che si avrebbe in aria, ed è variabile in quanto la propagazione dell'onda di detonazione attraverso la roccia è influenzata dal modulo di elasticità di quest'ultima. Studi approfonditi hanno peraltro mostrato che l'attitudine alla detonazione di esplosivi in fori da mina è maggiore che nell'aria quando la roccia del massiccio è dura. In rocce friabili (come il carbone) invece, alcuni esplosivi hanno attitudine alla detonazione superiore a quella nell'aria, mentre per altri detta attitudine diminuisce nettamente.

Igroscopicità

L' *igroscopicità* è la resistenza di un esplosivo all'umidità, senza la perdita delle sue qualità esplodenti. Alcuni esplosivi, come quelli che contengono sali deliquescenti o che sono più o meno decomposti dall'acqua, sottoposti all'aria umida sono in grado di assorbire acqua dall'atmosfera, con la conseguenza di perdere le caratteristiche esplosive in breve tempo.

A titolo d'esempio, si riportano in scala decrescente di sensibilità all'umidità alcune categorie di esplosivi:

- Esplosivi al nitrato ammonico;
- Polvere nera;
- Esplosivi al clorato e al perclorato;
- Dinamiti;
- Acido picrico;
- Pentrite, T4 e tritolo

Come regola gli esplosivi plastici resistono all'umidità meglio rispetto ai polverulenti.

L'igroscopicità dei sali deliquescenti può essere ridotta con l'aggiunta di sostanze flemmatizzanti (vasellina, olio di ricino, ecc). Ma per questi esplosivi occorre adottare in sistema d'incartucciamento che non permetta all'acqua di raggiungere l'esplosivo stesso.

Per alcuni esplosivi igroscopici polverulenti l'alternanza di maggiore e minore umidità nell'aria provoca l'agglomerazione in una massa solida, per cui si aggiungono particolari sostanze antiagglomeranti.

Congelabilità

Con il diminuire della temperatura diminuisce la sensibilità di quasi tutti i materiali esplosivi, per cui d'inverno è bene aumentare la potenza degli inneschi delle cariche. Se inoltre alcuni esplosivi sono stati portati a una temperatura così bassa da congelare, essi diventano molto più sensibili agli urti, quindi pericolosi da usare.

Fra gli esplosivi industriali il pericolo del congelamento ha importanza per le Nitrocellulose umide, per il fulmicotone umido e per le dinamiti. Una Dinamite congelata infatti, diventa talmente sensibile agli urti che può esplodere per semplice caduta da una piccola altezza o per l'urto del calcatoio nel caricamento nel foro da mina.

Essudamento

Questa caratteristica riguarda solo gli esplosivi a base di nitroglicerina. Precisamente a seguito di brusche alternanze di temperatura, alti e bassi, o per difetti di fabbricazione, la nitroglicerina può essudare, ossia portarsi alla superficie delle cartucce sotto forma di goccioline. In tal modo la nitroglicerina

diventa maggiormente sensibile agli urti, quindi pericolosa, specie a temperature piuttosto basse alle quali cristallizza.

Velenosità

Tendenza di un esplosivo ad originare fumi tossici e in particolare gas nitrosi ed ossidi di carbonio.

Forma

Si può migliorare l'efficacia di un esplosivo giocando sulle loro forme fisiche. Infatti, inizialmente, l'onda d'urto degli esplosivi si propaga perpendicolarmente alla superficie messa in reazione. Lavorando sulle forme delle cariche, si può dunque orientare l'onda d'urto in modo da dirigere il massimo dell'energia in una data direzione. È così che si trovano cariche sferiche la cui onda d'urto parte in tutte le direzioni, cariche cilindriche come quelle che costituiscono le granate, cariche piatte che permettono di creare fori con il minimo dispendio di energia. La figura 1.6 riporta le principali forme delle cariche esplosive di maggior utilizzo pratico.

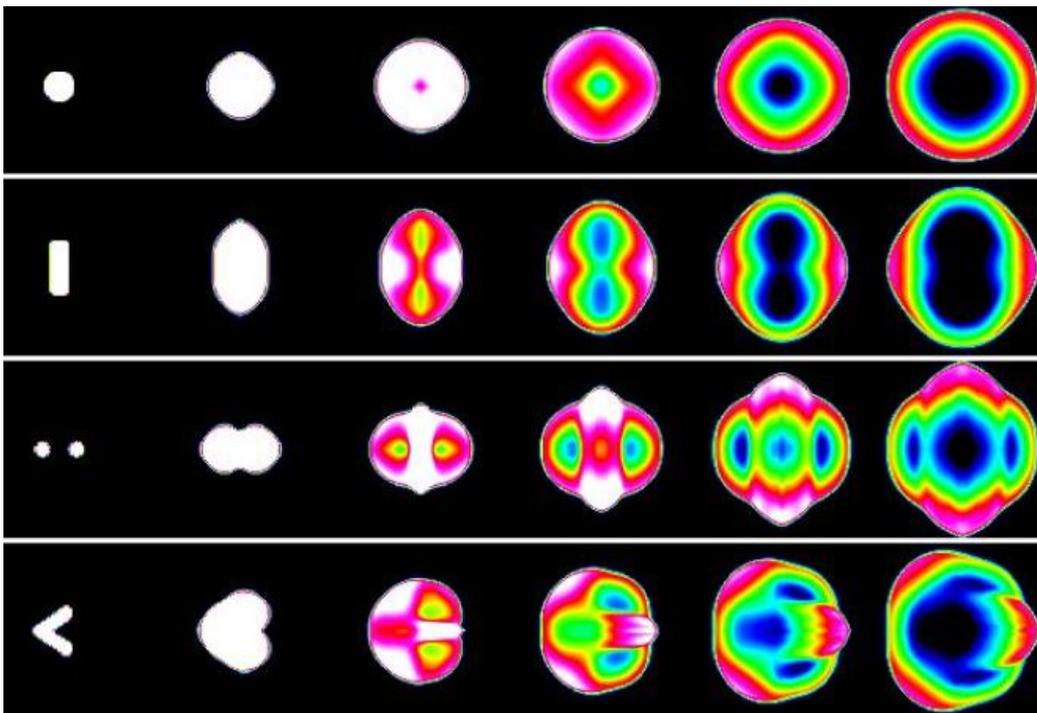


Figura 1.6. Principali forme delle cariche esplosive.

Colore

Se l'esplosione è aerea e senza ostacoli, la fiamma è spesso giallo pallido al punto d'esplosione. Allontanandosi dal punto di detonazione si ha una tendenza all'arancio e successivamente al rosso.

1.3.3 Impieghi di esplosivi

Le caratteristiche dei materiali esplosivi sono la chiave di scelta per il loro utilizzo. Queste infatti incidono sui loro vari impieghi, tra cui quelli *militari*, *civili* e purtroppo anche terroristici, dove vengono adoperate delle cariche "*improvvisate*" in cui vengono miscelati composti chimici diversi con lo scopo di rendere l'ordigno di difficile individuazione da parte degli organi cinofili addetti ai controlli di sicurezza e allo stesso tempo in grado di produrre e arrecare gravi danni agli obiettivi preposti.

Gli *esplosivi militari*, come il Trinitrotoluene (TNT), l'Acido Picrico (Melinite, Ekrasite), la Pentrite (PETN), il Tetrile (CE, Tetralite), l'Esogeno (Hexogene, T4, Ciclonite, C6), possono essere usati singolarmente o mescolati tra loro o con altre sostanze, tra cui la polvere d'alluminio, per migliorarne le prestazioni.

Quando alcuni di essi vengono mescolati con sostanze plastiche, quali vaselina, cere o polimeri sintetici, si ottengono gli esplosivi al plastico, i quali sono gelatinizzati in modo da ottenere le cosiddette gelatine esplosive, di consistenza gommosa e pastosa. Proprio in questa categoria rientra uno degli esplosivi più potenti e cioè la gelatina esplosiva 92/8 di cui si è già parlato in precedenza in questa trattazione. Negli Stati Uniti sono noti gli esplosivi plastici a base di T4, come il C-2 e il C-3 (dove la lettera 'C' sta per 'Compound', 'Composition') sviluppati durante la seconda guerra mondiale, sostituiti successivamente dall'ormai diffuso C-4, prodotto dalla combinazione di RDX (Ciclotrimetilentrinitroammina), che compone circa il 91% del suo peso, in melma con il legante plastico dissolti in un solvente.

Questi esplosivi sono caratterizzati da una densità simile a quella dell'acqua, sono tolleranti alle condizioni d'umidità e resistenti alle temperature estreme e 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 ad evitare i solventi organici nei quali potrebbero dissolversi. L'innesco avviene singolarmente o tra più cariche esplosive attraverso l'uso di uno o più "*blasting cap*" (cappuccio esplosivo: non è altro che una piccola carica di esplosivo utilizzata come detonatore per innescare l'ordigno vero e proprio). La figura 1.7 sottostante rappresenta un *blasting cap* tipico per l'innescamento di dispositivi esplosivi per opere di demolizione.



Figura 1.7. Blasting cap.

È stato provato che molti attacchi terroristici siano stati realizzati proprio avvalendosi di ordigni militari, con l'artificio di nascondere gli ordigni in solventi organici, quale 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 con quello del solvente, rendendolo quindi meno intercettabile dai controlli di sicurezza tenuti dalle unità cinofile.

Non si deve dimenticare tralaltro, che molti esplosivi militari finiscono sul mercato civile come esplosivi di recupero e vengono mescolati fra di loro o miscelati con gli stessi esplosivi commerciali.

Gli *esplosivi commerciali* d'uso civile si distinguono per dimensione, colore e consistenza, tra solidi e gelatinosi. Vengono utilizzati principalmente in opere geotecniche, di demolizione e di scavo. Tra questi, quelli maggiormente impiegati sono gli esplosivi da mina a base di Nitrato di Potassio o d'Ammonio, la gelatina esplosiva formata per il 92% da Nitroglicerina e per il restante 8% da Cotone Collodio e Dinamiti a base di Nitroglicerina e sostanze inerti. Quest'ultimi si annoverano tra i più pericolosi in quanto, essendo molto suscettibili agli urti, costituiscono un grande rischio durante il maneggio ma soprattutto durante il trasporto. Questi 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 detonano se vengono immersi completamente in acqua o in altri solventi.

La detonazione avviene con un singolo "blasting cap" dato che l'innescò di un solo contenitore di materiale esplosivo può provocare la detonazione di altre cariche ad esso adiacenti.

Gli esplosivi commerciali non hanno una lunga vita utile, soprattutto se esposti per lunghi periodi ad elevate temperature, le quali possono provocare la decomposizione del materiale e quindi la fuoriuscita di oli esplosivi o di altri elementi contenuti al suo interno. Molti di questi esplosivi, ed in particolar modo la Dinamite, emanano un forte odore: l'esposizione a tali vapori può causare rapidamente un'intensa emicrania della durata di alcuni minuti.

Gli *esplosivi "improvvisati"*, sono realizzati clandestinamente e artigianalmente. Il loro potere distruttivo è funzione dei materiali impiegati e dell'abilità tecniche degli stessi produttori. Tali ordigni, a causa della scarsa competenza o possibilità di possedere le materie necessarie per la corretta costruzione, presentano svariate problematiche: 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, che potrebbe decomporsi se 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 di facile individuazione da parte delle organizzazioni d'ispezione, che in molti casi ne hanno rilevato la presenza in scomparti di veicoli stradali.

1.3.4 Descrizione sintetica di alcuni tra i principali esplosivi

Tra le tante pubblicazioni scientifiche si attesta che i principali materiali esplosivi rintracciabili sono la *Polvere Nera*, utilizzata per la produzione di bombe a tubo, la *Dinamite*, una miscela di Nitrato d'Ammonio e Oli Combustibili (*ANFO*), l'esplosivo al plastico (*C-4*) e il *TNT*. Questi ultimi due, come anticipato nel paragrafo precedente, sono utilizzati soprattutto per operazioni militari.

I più usati esplosivi artificiali sono esplosivi chimici, che normalmente comprendono una rapida e violenta reazione d'ossidazione che produce una notevole quantità di gas ad alta temperatura. Sono esplosivi molto versatili, compatti, disponibili in quantità e di svariato tipo.

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 tra i vari materiali per la costruzione del proprio ordigno, al fine di sottrarsi ai normali controlli di sicurezza all'interno degli aeroporti o altri luoghi controllati dalle unità cinofile, dai metal detector ed altri dispositivi di sorveglianza.

Molti materiali esplosivi appaiono sotto forma di polvere bianca o nera, solitamente con una struttura di tipo cristallina, ma quando vengono caricate nei contenitori queste vengono generalmente bagnate al fine di evitare esplosioni premature, il che può chiaramente appesantirle e conferirgli una configurazione pastosa.

E' possibile distinguere diversi esplosivi utilizzati per la fabbricazione di bombe, tra cui esplosivi semplici come il *TNT* (*trinitrotulene*), l'*Ottogene* (*HMX*), l'*RDX*, la *Nitrocellulosa* e la *Nitroglicerina*, ed esplosivi composti quali la *Dinamite*, la *Polvere nera*, gli esplosivi al plastico (*C-4*, *SEMTEX*) e l'*ANFO*.

Esplosivi semplici

- **Trinitrotoluene (TNT)**

Il trinitrotoluene (noto anche come tritolo e spesso abbreviato in TNT) è l'esplosivo più diffuso al mondo grazie alle sue ottime caratteristiche di stabilità e malleabilità. È un nitrocomposto aromatico ottenuto per nitrurazione del toluene. A temperatura ambiente, come si può osservare dalla sottostante figura 1.8, si presenta come un solido cristallino color giallo pallido, inodore, insolubile in acqua e abbastanza solubile nei più comuni solventi organici (etere etilico, acetone, benzene).



Figura 1.8. Tritolo.

Inoltre non emana esalazioni venefiche. In forma pura è molto stabile; contrariamente alla nitroglicerina è insensibile agli urti ed alle sollecitazioni, esposto ad una fiamma libera non esplosa, ma brucia con una fiamma rossastra e fumosa. Esplosa solo se viene innescato da un detonatore. Il TNT è poco igroscopico e non reagisce con i metalli; può quindi essere conservato per molti anni. Va però protetto dall'esposizione agli alcali, che formano con esso composti instabili, sensibili al calore e agli urti. Come la maggior parte dei nitrocomposti è impiegato nella preparazione di miscele esplosive come ad esempio l'*Amatol* in miscela con il Nitrato d'Ammonio, potente quasi quanto il TNT ma con lo svantaggio di essere igroscopico.

- **Nitrocellulosa**

La nitrocellulosa è un estere nitrico della cellulosa. È un materiale altamente infiammabile, più stabile della polvere nera, rispetto alla quale brucia con maggiore velocità emettendo gas molto caldi. Se asciutta presenta un'elevata sensibilità agli urti, all'attrito e alle scintille ed

appartiene alla famiglia di esplosivi impiegati per la produzione di polveri da sparo.

- **Nitroglicerina**

La nitroglicerina, detta anche *trinitrina*, è un potente esplosivo e fu ottenuta per la prima volta da Ascanio Sobrero nel 1847. A temperatura ambiente è un liquido oleoso da incolore a giallo (quando è poco pura) che si decompone facilmente esplodendo all'urto e per riscaldamento oltre i 50 gradi centigradi e detonando verso i 200. Anche a temperatura ambiente può detonare spontaneamente. È assai instabile: perciò per motivi di sicurezza non viene mai usata pura, ma sempre mescolata con sostanze stabilizzanti e costituisce la base delle varie dinamiti. È usata, seppure in piccolissime dosi (dell'ordine del milligrammo), in terapia come ipotensivo per via del suo effetto coronarodilatatore.

La nitroglicerina si ottiene industrialmente per gocciolazione della glicerina in una *miscela nitrante*, ossia una miscela di acido nitrico concentrato (70%) e acido solforico concentrato (98%) nella proporzione, all'incirca di 35/65 (in parti di volume acido nitrico/acido solforico) dove l'acido solforico svolge funzione disidratante ed il tutto viene svolto a 15°C circa in rigorose condizioni di sicurezza; in effetti, negli impianti di produzione della nitroglicerina il processo di reazione viene eseguito da macchine e robot telecomandati a debita distanza. Nonostante ciò, ogni tanto, pur sotto rigide norme di sicurezza e adatte condizioni di reazione, accadono inevitabili incidenti nella produzione di questa sostanza, motivo per cui si raccomanda vivamente di non tentare di produrla, nemmeno in piccole quantità, nemmeno nelle condizioni di reazione più adatte.

- **Ciclotrimetilentrinitroammina (RDX)**

La ciclotrimetilentrinitroammina, conosciuta anche come RDX, ciclonite, esogeno o T4 è una nitroammina facente parte dei materiali esplosivi di maggior utilizzo nel settore militare. È uno degli ultimi esplosivi che sono stati inventati e difatti le prime due lettere hanno lo stesso significato (*Research and Development*) dei nuovissimi esplosivi che come terza cifra d'identificazione presentano però un numero. Si racconta che a causa del raggiungimento del numero massimo negli archivi non è stato possibile assegnare a questo esplosivo un numero, e allora si è pensato ad una lettera provvisoria con l'intento di trovare in futuro un numero. Quindi si è deciso di dare la lettera "X" che sta per "sconosciuto", la quale pur se dopo qualche tempo venne sostituita con un numero, ormai di riferimento e memorizzata dai militari per quel materiale, prese posizione e da allora venne sempre chiamato "RDX".

L'RDX viene prodotto facendo reagire l'acido nitrico concentrato sull'esammina. Quando è stato appena preparato, ed è puro, è un solido cristallino bianco. Comincia a decomporsi a circa 170 gradi centigradi, deflagra sopra i 250 e conservato alla temperatura ambiente è molto stabile ed insensibile all'acqua, con una mediocre sensibilità all'impatto che può aumentare se cristallizzato a temperature di circa -4 gradi. Questo esplosivo brucia piuttosto che esplodere: per farlo esplodere bisogna utilizzare un detonatore. È usato solitamente in miscele con altri esplosivi e plastificanti oppure desensibilizzanti. È considerato il più potente di tutti gli altri esplosivi militari di alta potenza. L'RDX è infatti il componente base per alcuni dei più potenti esplosivi militari come il C-4.

- **Ciclotetrametilentanitroammina (HMX)**

La ciclotetrametilentanitroammina, conosciuto anche come HMX oppure Ottogene, è un esplosivo molto potente e insensibile agli urti. È una nitroammina molto simile all'RDX. Venne prodotto per la prima volta nel 1930 e venne da subito impiegato soprattutto per scopi militari: nei detonatori, come esplosivo al plastico, nelle armi nucleari e anche come combustibile solido (propellente) per razzi. HMX significa letteralmente "sostanza ad alto peso molecolare", quindi le prime due lettere vogliono significare "High Molecular weight" mentre la terza lettera è uguale a quella dell'RDX. L'HMX è uno degli esplosivi più potenti che finora sono stati realizzati (fatta eccezione per gli ultimissimi appena usciti sul mercato come ad esempio il CL-20/HNIW e l'ONC).

- **Pentrite (PETN)**

Noto anche come Tetranitrato di pentaeritrite, è uno degli esplosivi più potenti finora prodotti, insieme all'RDX e all'HMX. La sua produzione è infatti simile a quella dell'RDX, solo che al posto dell'esammina viene utilizzata la pentaeritrite.

Il PETN è più sensibile del TNT e non viene mai utilizzato come carica secondaria, ma sempre come carica primaria in detonatori o nelle "corde detonanti" e come carica di rinforzo nelle munizioni delle armi di piccolo calibro. Come la nitroglicerina, ha anche funzioni mediche: come questa viene usato per le proprietà di coronarodilatatore. È dimostrato che il PETN danneggia l'ambiente, infatti non è velocemente biodegradabile e, se gettato nei corsi d'acqua provoca l'inquinamento della stessa che può proseguire fino ad inquinare le falde acquifere. Viene usato anche in miscele esplosive con la nitroglicerina, dette pentrititi e usate come esplosivi da mina, con il dinitrotoluene e con tritolo (pentritolo). In campo militare la Pentrite, comunemente chiamata "Vipera", viene utilizzata soprattutto per operazioni di sminamento

rapido. Grazie a dei lanciatori speciali viene gettata sul campo minato una lunga striscia di questo materiale che all'impatto con il suolo detona per "simpatia". Le vibrazioni prodotte fanno "brillare" gli ordigni sotterrati nel raggio di qualche metro creando un corridoio "pulito" e transitabile da mezzi e uomini. Altra applicazione della pentrite in campo militare è il disboscamento. Grossi alberi che intralciano l'avanzamento di mezzi blindati possono essere abbattuti con facilità avvolgendo la base dello stesso con delle spirali di pentrite fatta detonare successivamente.

Esplosivi composti

- **Dinamite**

È un esplosivo solido commerciale, scoperto da Alfred Nobel nel 1866, realizzato con materiale poroso imbevuto con Nitroglicerina flemmatizzata ed avvolto in un foglio di cera, in un cartone o in una pellicola di plastica di colore variabile secondo il produttore, solitamente confezionata in candelotti di diverso peso.

La Nitroglicerina impiegata per la sua realizzazione varia in percentuali comprese tra il 5 e il 90% conferendogli un forte odore che può provocare immediato stordimento.

Può essere innescata con una corda di detonazione, solita e visibile in una delle estremità dei candelotti come mostra la figura 1.9, o con un blasting cap.

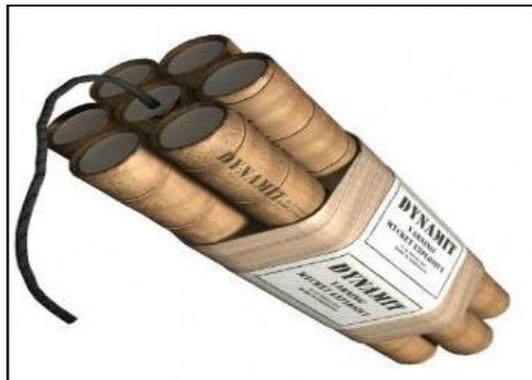


Figura 1.9. Candelotti di Dinamite.

- **Polvere nera**

La polvere nera è un esplosivo chimico tra i più vecchi conosciuti usata come propellente per le armi da fuoco, e per questo chiamata anche polvere da sparo. È una sostanza costituita da Nitrato di Potassio per il 74,64%, da Carbone per il 13,51% e da Zolfo per la restante parte. Il suo

colore varia tra il nero e il marrone, ed appare sottoforma di polvere sottile o granulare. È possibile osservarne una foto nella figura 1.10.



Figura 1.10. Polvere nera.

Brucia producendo un'onda di deflagrazione subsonica, in opposizione alla detonazione supersonica degli alti esplosivi; appartiene quindi alla categoria degli esplosivi deflagranti. Questo riduce le punte di pressione sulle camere di scoppio delle armi, ma la rende meno idonea per la demolizione delle rocce e delle fortificazioni. Solitamente viene arricchita con della grafite che ha il compito di ridurre l'attrito tra i singoli granuli che potrebbe anche provocarne l'innesco accidentale, dato che questo materiale risulta molto sensibile all'attrito oltre che al calore, all'impatto e alle scintille, che la rendono molto pericolosa da maneggiare. Inoltre, risulta essere sensibile all'elettricità, pertanto deve essere lavorata 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 innesco. Fino al 1870 è stato l'unico esplosivo da lancio e da scoppio.

- **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. Gli esplosivi al plastico sono esplosivi semisolidi generalmente ad alto potenziale insensibili all'urto e concepiti per atti di sabotaggio e per dotare personale poco specializzato di esplosivo in forma molto pratica, maneggevole, durevole e sicura.

La figura 1.11 ne illustra un'immagine, in cui l'esplosivo viene fissato ad una parete per buttarla giù.



Figura 1.11. Esplosivo al plastico (C-4).

Il C-4 è costituito da un materiale esplosivo, l'RDX, arricchito con degli additivi che lo rendono simile ad uno stucco facile da modellare. Può presentarsi in vari colori, dal bianco opaco al grigio scuro, ma assume sempre l'aspetto di una pasta malleabile grazie all'alta percentuale di paraffina. La peculiarità di quest'esplosivo è quindi la sua flessibilità che lo rende facile da modellare e da applicare su superfici irregolari, oltre che a un'elevata velocità di detonazione.

- **Semtex**

Il Semtex è un esplosivo al plastico, simile al C-4, di brevetto cecoslovacco, costituito da PETN ed RDX arricchiti anch'essi con additivi che lo rendono flessibile e malleabile. Come tutti gli esplosivi al plastico è facilmente modellabile ma, a differenza degli altri, è utilizzabile in un campo di temperature più vasto poiché rimane plastico in un ampio *range* che va dai -40 ai +60 gradi centigradi, ed inoltre è anche impermeabile. È assolutamente inodore ed è caratterizzato da un colore che varia tra il giallo e l'arancio.

La figura 1.12 raffigura un quantitativo di Semtex-H, sviluppato successivamente e destinato all'esportazione.

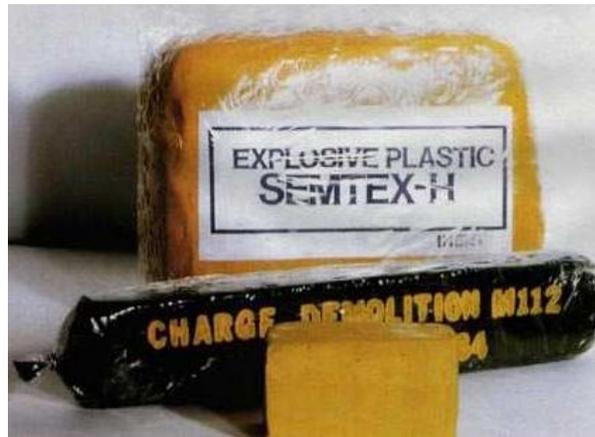


Figura 1.12. Semtex-H.

Il Semtex, preso singolarmente, è un materiale relativamente innocuo che può essere facilmente manipolato. Per la sua detonazione si usa solitamente un blasting cap o una corda di detonazione. La sua vita utile si aggira intorno ai 10 anni oltre i quali inizia a perdere flessibilità, diventando friabile e rigido.

Il Semtex venne sviluppato per scopi militari ed è definito dal produttore "senza dubbio l'unico tipo di esplosivo plastico nel mondo", anche se in realtà molte nazioni ne hanno sviluppato proprie versioni che variano per composizione e proprietà detonanti

- **ANFO**

ANFO è l'acronimo inglese di "Ammonium Nitrate Fuel Oil".

Gli ANFO sono miscele esplosive di grande sicurezza costituite da Nitrato d'Ammonio, Gasolio e altri additivi minori, impiegate in grossi quantitativi per usi civili in cave e miniere, data la loro bassissima sensibilità e il loro bassissimo costo. È un esplosivo secondario e per la sua preparazione occorre un rapporto ottimale combustibile-comburente che ne assicura la perfetta detonazione. La sua sensibilità è relativamente bassa, infatti richiede generalmente un *ripetitore* per accertarsi che la detonazione sia stata compiuta. Nella detonazione dell'ANFO la reazione fra Nitrato d'Ammonio con un idrocarburo (olio pesante) deve essere calcolata precisamente, in caso contrario non si ha una perfetta detonazione e non si formano soltanto i gas degli ossidi di azoto, acqua e anidride carbonica, ma anche dei fumi tossici.

Nell'industria estrattiva, il termine ANFO descrive specificamente una miscela di palline di nitrato di ammonio e di olio pesante, solide, come quelle mostrate in figura 1.13.



Figura 1.13. ANFO.

L'ANFO è estremamente igroscopico, quindi il relativo immagazzinaggio deve essere fatto con cura e lontano dagli ambienti umidi, dato che l'acqua interferisce con la sua funzione esplosiva. È inoltre solubile in acqua. La sua popolarità è in gran parte attribuita al relativo basso costo e dall'alta stabilità chimica. Nella maggior parte dei paesi, il nitrato di ammonio non è classificato come esplosivo nel trasporto di sostanze pericolose, ma è soltanto un comburente. Per la sua reperibilità e basso costo è spesso selezionato dai terroristi, come l'ETA e gli estremisti palestinesi che l'hanno già utilizzato in alcuni attentati.

1.4 TNT equivalente

Le differenze riscontrabili dalla lettura del precedente paragrafo sulle proprietà caratteristiche di un materiale esplosivo rispetto ad un altro, comparate sotto le stesse condizioni di stato, hanno dato modo di comprendere che l'esplosione generata da due cariche di uguale peso, ma contenenti materiali esplosivi diversi, produca fronti d'urto differenti alla medesima distanza.

Da quanto detto si capisce che, l'esplosione derivante dallo scoppio di una carica di un dato esplosivo "A" potrebbe essere equiparata a quella di un altro esplosivo "B" se s'introducesse un fattore di conversione che, in funzione di una qualche proprietà, rendesse la massa di "B" che dovrebbe essere utilizzata per avere le stesse conseguenze distruttive date dall'esplosione di "A". Nasce quindi l'idea di poter fare riferimento ad una singola curva per l'estrapolazione dei parametri caratteristici del fronte d'onda generato dall'esplosione di un qualsiasi

materiale esplosivo, diagrammata per un esplosivo preso come “riferimento”, che è il TNT.

La nozione di TNT equivalente deriva quindi dal desiderio di poter “riferire” un qualsiasi materiale esplosivo al tritolo. Questa grandezza rappresenta infatti la massa di TNT che produrrebbe un’esplosione di uguale livello energetico di quella dell’esplosivo in esame di peso unitario.

Dunque il primo passo per quantificare l’onda esplosiva generata dallo scoppio di un esplosivo diverso dal tritolo, è quello di convertire la massa di carica dell’esplosivo preso in considerazione in una massa equivalente di TNT.

Il motivo principale per cui è stato scelto questo materiale come esplosivo di riferimento, è dovuto all’esistenza di una grande mole di dati sperimentali relativi alle caratteristiche delle onde d’urto associate ad esso [12].

Esistono diversi criteri [13] per la determinazione del peso equivalente di un esplosivo generico a quello del trinitrotoluene: è possibile distinguere tra approcci basati sull’impulso, sulla pressione, sullo stato di Chapman-Jouguet [14] e sul metodo convenzionale dell’energia specifica.

Come mostra la tabella 1-8 i valori di equivalenza calcolati mediante criteri diversi non danno valori uguali per lo stesso esplosivo.

Tabella 1-8. TNT equivalente – confronto tra diversi criteri.

Criterio	Compound B	C-4	Pentolite
Energia	1.148	1.34	1.129
Pressione	1.11	1.37	1.42
Impulso	0.98	1.19	1

Ciò è imputabile, oltre alla diversa formulazione utilizzata da un criterio rispetto ad un altro, al fatto che l’esplosione non dipende da una sola grandezza, ma è influenzata da diversi fattori come ad esempio la forma del materiale e il *range* di pressione considerato [15] (in prossimità o lontano dalla carica). Molti esplosivi inoltre, presentano una carenza di ossigeno a vari livelli: di conseguenza non tutta l’energia disponibile viene rilasciata durante la detonazione, ma parte di essa viene dispersa successivamente nell’aria a causa della combustione dei prodotti esplosivi (*afterburning*). Questo indica che si avranno valori di peso equivalente differenti quando si considerano i criteri di pressione e impulso, entrambi dipendenti dalla detonazione e dalla combustione. Tuttavia, poiché per la valutazione dei parametri caratteristici di un fronte d’urto si considera infine la radice cubica della massa dell’esplosivo, l’errore complessivo che si ha utilizzando un criterio rispetto ad un altro è relativamente basso, generalmente inferiore al 10%.

Nella pratica il criterio dell’energia specifica, ovvero della quantità di energia termica rilasciata dall’esplosione in aria dall’unità di massa di esplosivo, è

quello convenzionalmente utilizzato. La pressione di picco, che è in genere il parametro di maggiore interesse per il progetto di strutture di protezione, è infatti direttamente correlata con l'energia rilasciata dal processo di detonazione, quindi con rispetto di questa priorità, anche questo lavoro si atterra al metodo dell'energia specifica per la stima del TNT equivalente. Tale metodo prende come fattore di conversione il rapporto tra l'energia specifica dell'esplosivo considerato rispetto all'energia specifica del TNT di riferimento. Dunque, se si ha una quantità di x kilogrammi di un esplosivo, del quale Q_x è la sua energia specifica e Q_{TNT} è l'energia specifica del tritolo, il fattore di conversione sarà quello dato dall'equazione (1.4).

$$\text{fattore di conversione} = \frac{Q_x}{Q_{TNT}} \quad (1.4)$$

Moltiplicando gli x kilogrammi per il fattore di conversione corrispettivo all'esplosivo considerato si otterrà la massa di TNT corrispondente agli effetti generati dallo stesso esplosivo di peso x .

Si potrà quindi dire, come spesso si sente nei media dopo un'esplosione o un fenomeno naturale in grado di generare onde d'impatto che, il fattore di danno provocato dal quantitativo x era pari a quello di y kilogrammi di tritolo, dove y sarà il peso equivalente di TNT calcolato mediante l'equazione (1.4).

La tabella 1-9 riporta l'energia specifica in kilojoule su kilogrammo di differenti tipologie di materiali esplosivi e i loro relativi fattori di conversione rispetto a quello del TNT.

Tabella 1-9. Fattore di conversione di alcuni esplosivi.

Esplosivo	Energia specifica [KJ/Kg]	Fattore di conversione in TNT equivalente
TNT	4520	1.000
RDX	5360	1.185
HMX	5680	1.256
Compound B (60% RDX,40% TNT)	5190	1.148
Semtex	5660	1.250
Pentolite	5110	1.130
C4	6057	1.340

Per qualsiasi tipo di esplosivo è sempre valida la seguente proporzione:

$$Massa_{esplosivo} \times Q_{esplosivo} = Massa_{TNT\ equivalente} \times Q_{TNT} \quad (1.5)$$

dove $Massa_{esplosivo}$ e $Q_{esplosivo}$ sono la massa e l'energia specifica dell'esplosivo considerato, mentre $Massa_{TNT\ equivalente}$ e Q_{TNT} sono rispettivamente la massa di tritolo in grado di arrecare lo stesso danno che si avrebbe dallo scoppio del quantitativo di esplosivo considerato, incognita dell'equazione (1.5), e l'energia specifica del tritolo che per i predetti motivi viene preso come riferimento.

È comune trovare valori di equivalenza differenti per lo stesso esplosivo anche utilizzando lo stesso criterio. Bulson [16] infatti, afferma che un kilogrammo “standard” di TNT rilascia, in condizioni ideali, un'energia di 4610 kilojoule. Se così fosse, la Pentolite, per esempio, che ha un fattore di conversione pari 1.130 quando l'energia specifica del tritolo è di 4520 kilojoule al kilogrammo, come mostra la tabella 1-9, con il valore ricavato da Bulson per il tritolo avrebbe un fattore di conversione di 1.108. Questa diversità è dovuta alla natura dell'esplosivo e al comportamento non ideale della reazione di detonazione, che per alcuni esplosivi necessita addirittura di lunghe distanze per raggiungere una condizione stazionaria di propagazione, che causano dunque errori e discrepanze nelle misure. Si può comunque osservare, per il caso della Pentolite, che l'errore commesso è relativamente basso, circa il 3.5%. Se si considera poi che, come anticipato, per il calcolo scalato dei parametri che caratterizzano un'onda d'urto, il termine di massa viene considerato sotto radice cubica, l'errore potenziale si riduce ancor più non presentando valori massimi superiori al 7%.

1.5 Onde d'urto

La maggior parte dei danni materiali causati da un'esplosione in superficie o ad una bassa o moderata altitudine nell'aria sono dovuti, direttamente o indirettamente, all'onda d'urto che accompagna questo fenomeno. Molte strutture subiscono infatti un certo grado di danno da soffio d'aria, quando la sovrappressione nell'onda d'urto (vale a dire il salto di pressione rispetto alla pressione atmosferica, pari a 1.01 bar, in condizioni standard al livello del mare) è di circa 3-5 bar o superiore. La distanza alla quale questo livello di sovrappressione si estenderà, dipende principalmente dall'energia dell'esplosione e in secondo luogo dalle caratteristiche del mezzo circostante la carica (aria, acqua) e dall'altezza alla quale avviene lo scoppio. All'incirca, nella maggior parte degli esplosivi ad alto contenuto energetico, solo un terzo dell'energia chimica totale disponibile viene rilasciata. I restanti due terzi vengono rilasciati più lentamente nell'aria, con cui i prodotti sviluppati dalla detonazione si miscelano e bruciano. Questo processo di post-combustione (chiamato *afterburning*) ha solo un lieve effetto sulle proprietà delle onde d'urto, poiché è molto più lento rispetto alla detonazione. L'onda di detonazione che propaga difatti all'interno di un materiale esplosivo ha *range* di velocità tra i 7000 e i 9000 metri al secondo, e converte rapidissimamente l'esplosivo solido o liquido

in gas caldissimi, densi e ad elevata pressione. I gas prodotti dalla detonazione si espandono rapidamente in tutte le direzioni dal punto d'esplosione, producendo un disturbo di pressione che impone uno spostamento forzato all'aria circostante lo scoppio e che prende il nome di onda d'urto. Il fronte d'onda è chiamato fronte di "shock" (o d'urto), ed è assimilabile ad un muro che si sposta ad elevatissima velocità costituito da aria altamente compressa che ha una forte sovrappressione. Nel mentre che l'onda si allontana dalla sorgente, il suo fronte perde energia a causa dell'attrito dell'aria, per cui la sua sovrappressione decade costantemente man mano che essa si allontana dal punto di detonazione. Con l'aumentare della distanza si potrà dunque assistere, come mostra la figura 1.14, ad un decadimento del picco di pressione.

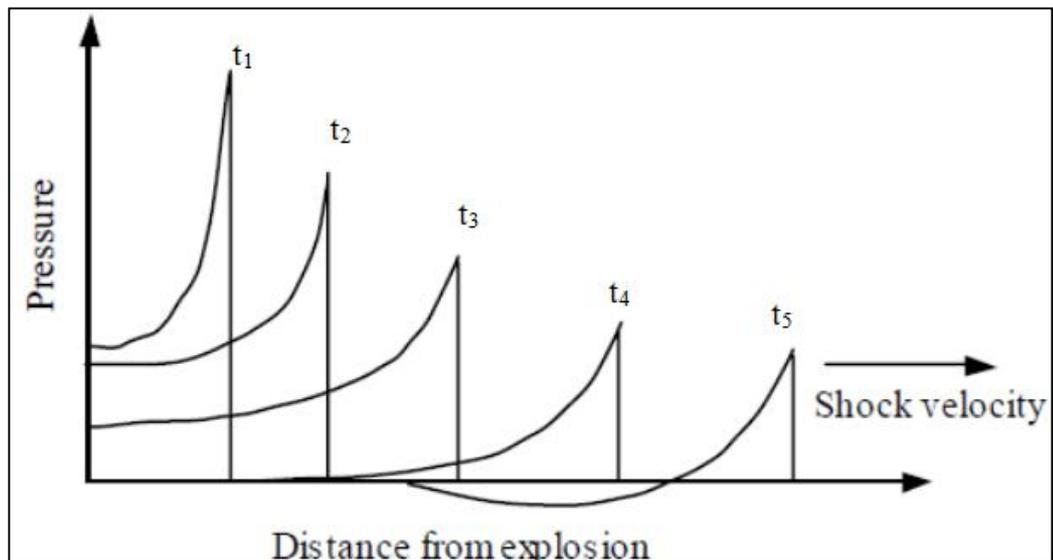


Figura 1.14. Decadimento del picco di pressione.

L'onda d'urto si espande verso l'esterno a velocità estremamente elevate, sovente superiori alla velocità del suono. Questa rapidità d'espansione produce dietro il fronte d'urto una zona di "depressione". Questo perché, anche se la pressione statica di questi gas è quella atmosferica, poiché le molecole gassose hanno una massa e sono in movimento, ci vuole un po' di più e un'ulteriore distanza di viaggio prima che la loro quantità di moto si arresti. L'espansione dei gas, come mostra la figura 1.15, genera infatti una vera e propria spinta sull'aria, la quale, costretta ad abbandonare il volume precedentemente occupato, crea un vuoto caratterizzato da aria altamente rarefatta in cui le pressioni registrate sono inferiori a quella atmosferica.

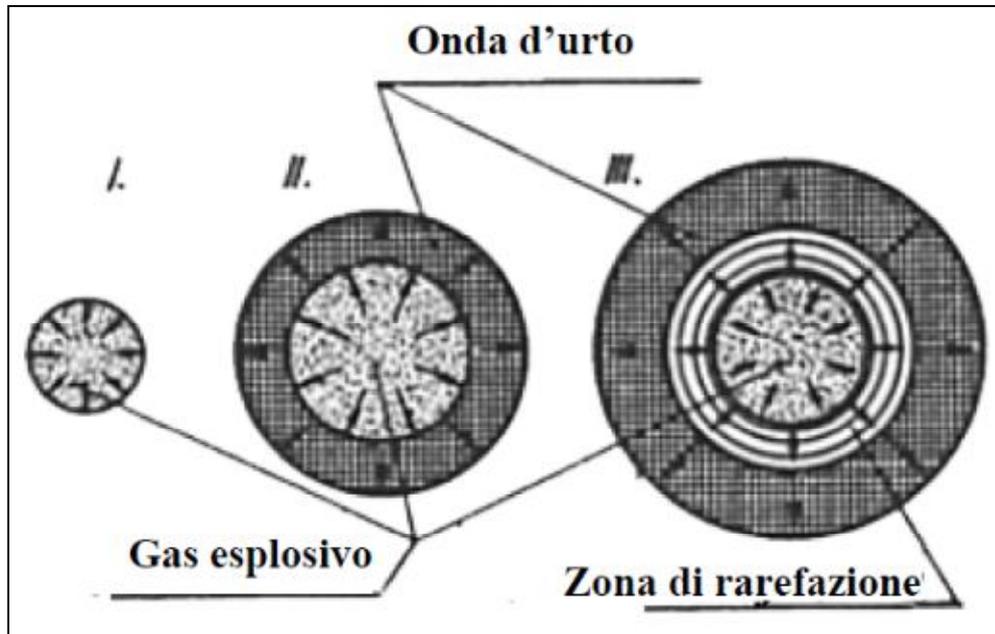


Figura 1.15. Detonazione di una carica e formazione dell'onda d'urto

Questa zona di bassa pressione, denominata anche “fase negativa” dell’onda d’urto, crea un effetto di “risucchio” per colmare il vuoto creato dallo spostamento d’aria, generando un vento che inizialmente, per inerzia segue il fronte d’onda, e che successivamente, quando i gas si sono completamente espansi e la pressione ha raggiunto il valore di pressione atmosferica, torna indietro soffiando verso il punto di scoppio. Il risultato è dunque un’inversione del flusso verso la sorgente guidato dalla (piccola) differenza di pressione tra le condizioni atmosferiche e la pressione dei gas (inferiore a quella ambiente), che nell’attraversare la zona di rarefazione già spazzata dal passaggio del fronte d’urto può superare, pur se di poco, la pressione atmosferica mostrando un picco secondario nel diagramma della pressione in funzione del tempo come quello mostrato in figura 1.16 e così si ripresentano le condizioni per l’espansione dei gas. Ciò determina un’oscillazione libera, che viene definita “pulsazione del sistema dei gas esplosivi”.

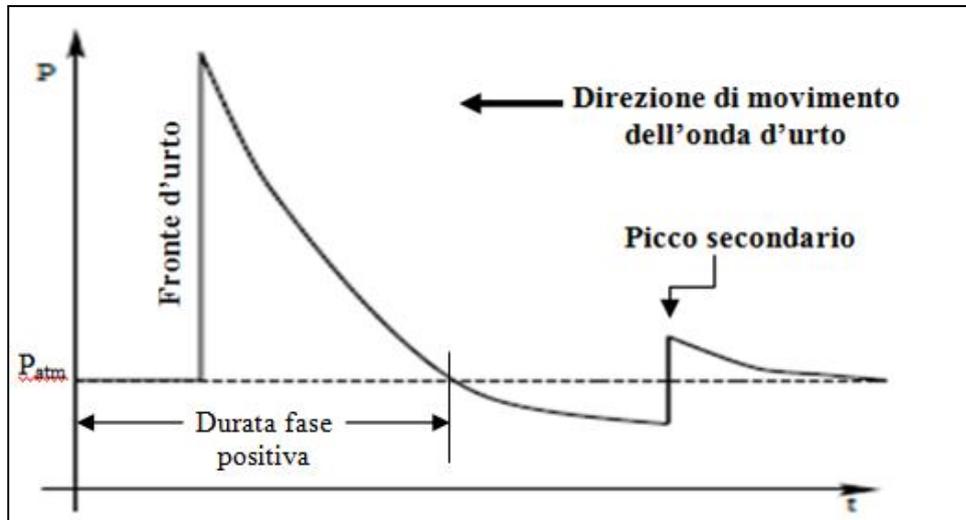


Figura 1.16. Andamento qualitativo della pressione di un'onda d'urto nel tempo

L'andamento riportato in figura 1.16 mostra la tipica forma ideale della pressione in un punto ad una certa distanza dalla detonazione di un esplosivo ad alto contenuto energetico registrato con il passare del tempo (in aria libera), in cui generalmente gli effetti associati allo *shock* secondario sono trascurati, poiché di minore rilevanza rispetto a quello che caratterizzano la *fase positiva* evidenziata nella precedente figura. In questa fase l'effetto associato alle azioni che accompagnano il passaggio del fronte d'urto in ugual direzione non è propriamente irrisorio e merita perciò un breve cenno: per alcune tipologie di strutture, come piccoli edifici o strutture intelaiate a rivestimento frangibile, il grado di danno da urto dipende infatti dalla forza di *drag* associata con il forte vento che accompagna il passaggio del fronte di shock e la cui pressione viene definita *pressione dinamica*. Questa grandezza è proporzionale al quadrato della velocità del vento e alla densità dell'aria dietro il fronte d'urto, entrambe funzioni della sovrappressione incidente, e perciò anch'essa funzione del picco di sovrappressione, che analogamente decresce all'aumentare della distanza dal centro dell'esplosione. La maggior parte dei danni diretti sono quindi procurati da questi due attori, pressione incidente (o di picco) e pressione dinamica, che operano entrambi durante la fase positiva. Sebbene la pressione dinamica abbia durate di maggiore lunghezza, la sua ampiezza durante questo tempo è generalmente molto bassa, tanto che gli effetti distruttori a essa relativi sono poco significativi e quindi ritenuti poco importanti rispetto a quelli provocati dall'urto incidente.

Ci potrebbero essere danni diretti sugli elementi strutturali anche durante la fase negativa, ad esempio su grandi finestre non pensate per resistere a carichi verso l'esterno e quindi non perfettamente fissate o sulle pareti mattonate o in gesso che non sono dimensionate per subire carichi di questo tipo. L'effetto di

risucchio provocato dalla depressione, è la risposta al perché molte strutture che sono state investite da carichi esplosivi, e che non sono state completamente spazzate via, vengono trovate inclinate in direzione opposta al verso di propagazione del fronte d'urto, deformate quindi verso il punto di scoppio come esibito nelle ultime due illustrazioni di figura 1.17.

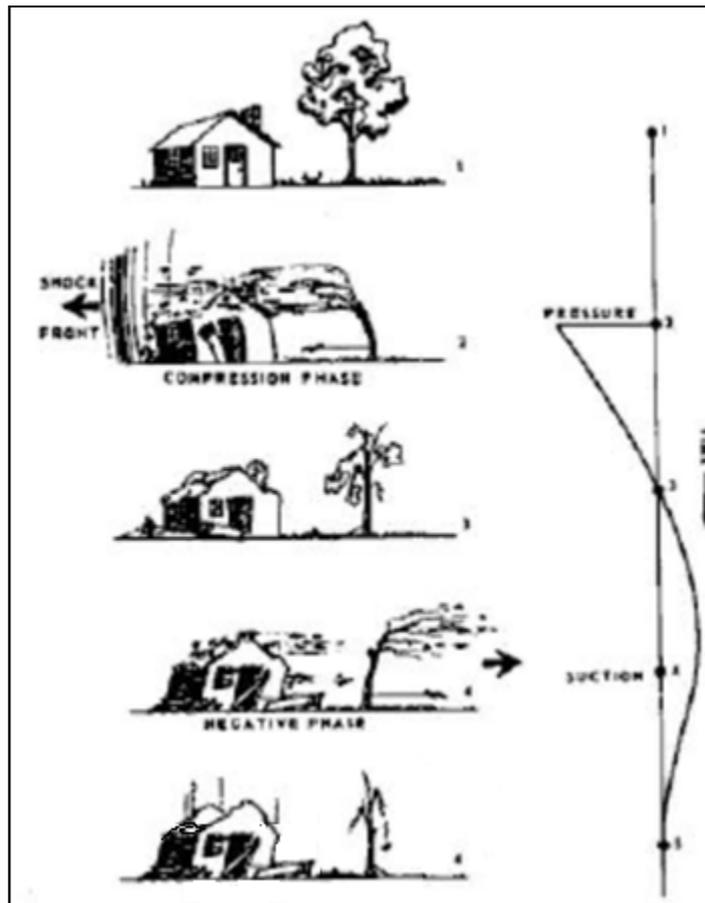


Figura 1.17. Comportamento di una struttura sottoposta alla pressione generata da un'onda d'urto

Com'è possibile osservare, anche le durate della fase negativa sono maggiori rispetto a quelle della loro precedente fase positiva, ma il picco di depressione è regolarmente piuttosto piccolo in confronto al picco di pressione che si ha al fronte di propagazione. Di conseguenza nella maggior parte degli studi sulle esplosioni la fase negativa, non avendo un'influenza importante sul fattore di danno tipicamente rilevato, viene ignorata e si considerano solo i parametri che caratterizzano la fase positiva.

La forma del carico esplosivo di un'onda d'urto che arriva ad un certo punto e che dipende principalmente dalla distanza e dalla misura della carica esplosiva, è caratterizzata dai parametri riportati in figura 1.18

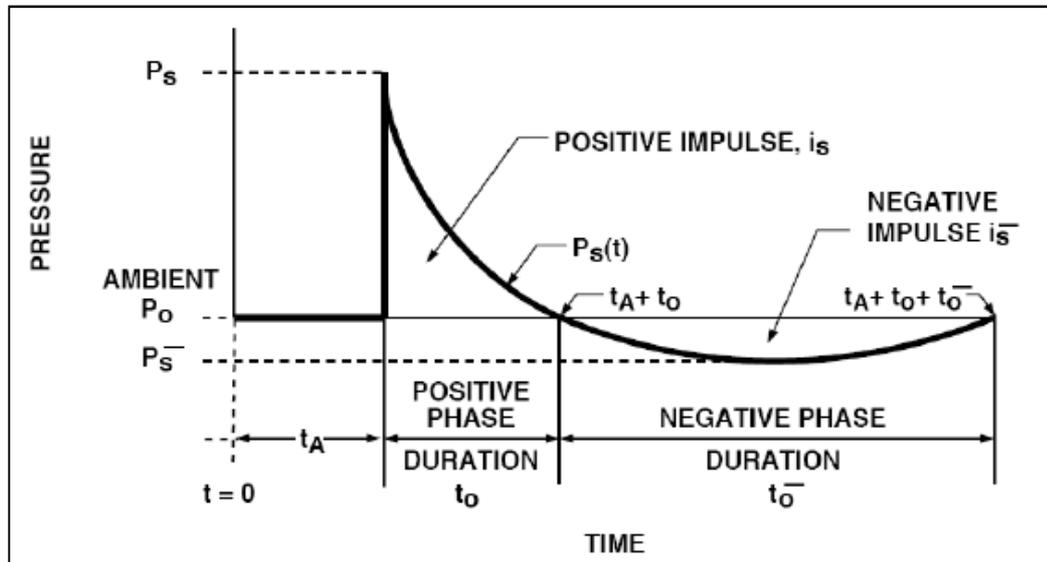


Figura 1.18. Parametri caratteristici di un'onda d'urto.

Le caratteristiche essenziali dello sviluppo di quest'onda di pressione sono le seguenti:

- Il tempo t_A (*tempo di arrivo*) impiegato dal fronte di shock per arrivare al punto di misura sotto considerazione. In esso è incluso il tempo che va dall'innesco della carica alla completa propagazione dell'onda di detonazione attraverso il materiale esplosivo.
- Il *picco di sovrappressione* p_s del fronte d'urto, ovvero la massima pressione che si rileva improvvisamente (tempo di salita estremamente breve) nella posizione considerata al tempo t_A .
- La *durata della fase positiva* t_0 , cioè il tempo impiegato dalla pressione per portarsi al valore di pressione atmosferica dal suo valore di picco p_s .
- Il *picco di depressione* p_s^- , ovvero la minima pressione raggiunta dopo lo spostamento d'aria provocato dal fronte d'urto.
- La *durata della fase negativa* t_0^- , di maggiore lunghezza rispetto alla fase positiva e che caratterizza tutto lo stato di depressione fino a che la pressione non si riporta alla pressione ambiente.
- L'*impulso della fase positiva* i_s e l'*impulso della fase negativa* i_s^- , che danno un'idea del grado di energia trasmesso dall'esplosione ad un target e che sono rappresentati dalle due aree indicate in figura 1.18.

Di conseguenza l'impulso associato alla fase positiva e alla fase negativa potrà essere definito come:

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_0} [P(t) - p_0] dt \quad i_s^- = \int_{t_A+t_0}^{t_A+t_0+t_0^-} [p_0 - P(t)] dt \quad (1.6)$$

dove $P(t)$ è la funzione che da l'andamento della pressione nel tempo e p_0 è la pressione atmosferica pari a 101325 Pascal.

Diversi autori hanno presentato varie funzioni per rappresentare la storia temporale della pressione, evidenziando generalmente la sola fase positiva [17]. La forma dell'onda di pressione generata dall'esplosione in aria aperta, illustrata in figura 1.18, può essere approssimata matematicamente con l'equazione 1.7 di forma esponenziale e nota come equazione di Friedlander modificata (Baker, 1973).

$$P(t) = p_0 + p_s \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (1.7)$$

in cui b è un parametro che controlla il tasso con cui decresce l'ampiezza d'onda e che prende il nome di *coefficiente di decadimento della pressione*. Esistono diverse formulazioni per il calcolo di questo parametro che verranno successivamente esposte e che mostrano come esso sia determinante per l'estensione della fase negativa nella distribuzione esponenziale dell'equazione.

1.6 Tolleranza umana

1.6.1. Tolleranza alle pressioni generate dallo scoppio

La resistenza di un essere umano all'onda d'urto generato 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 da un'esplosione. Alcuni test hanno indicato che la tolleranza umana all'impatto con un'onda d'urto varia, oltre che con l'intensità, anche con 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.

Le prove hanno inoltre indicato che i tessuti che contengono aria, come i polmoni, sono quelli che soffrono maggiormente variazioni di pressione (come

viene del resto confermato dall'esperienza delle immersioni subacquee) e possono quindi essere considerati organi critici nelle lesioni legate all'interazione corpo-onda d'urto. Il rilascio di bolle d'aria (embolia) all'interno del sistema vascolare dagli alveoli dei polmoni danneggiati dall'impatto rappresenta difatti la maggiore causa di decessi. Sulla base dei dati attuali, un preventivo tentativo di risposta umana al rapido incremento di pressione di breve durata (3-5 millisecondi) è presentata nella tabella 1.10, dove i livelli di pressione che definiscono la soglia minima e massima di un'emorragia polmonare sono rispettivamente di 2,1 bar e 5,6 bar, mentre la soglia di possibile letalità per danni ai polmoni è di circa 7 bar [12,18].

Tabella 1-10. Livelli critici di pressione sopportabili da un essere umano.

Organi critici	Massima pressione effettiva
Rottura timpani	
Soglia	0.35 [bar]
50%	1.05 [bar]
Danno medio	
Soglia	2.1 [bar]
50%	5.6 [bar]
Danno letale	
Soglia	7.1 [bar]
50%	9.1 [bar]
99%	14 [bar]

D'altra parte, il livello soglia di pressione per emorragia interna risultante da carichi di lunga durata potrebbe essere basso come 0,7- 1,05 bar, o circa un terzo di quello appena esposto per carichi di breve durata.

Poiché la resistenza di una persona dipende anche dalla sua conformazione fisica, quindi dal suo peso, l'indice di sopravvivenza per un neonato sarà differente rispetto a quello di un bambino e ancor più di un adulto. Queste differenze sono state descritte in figura 1.19, la quale indica che l'impulso percepito da un essere umano dipende dal suo peso.

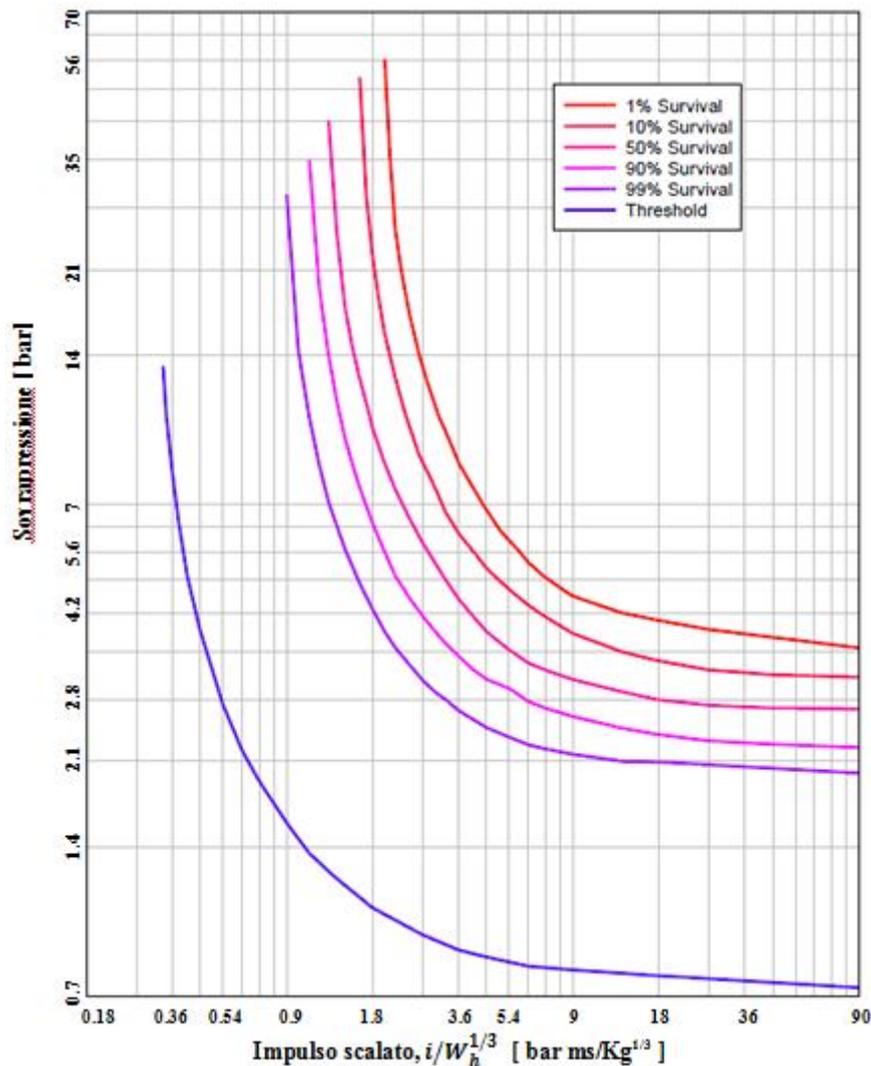


Figura 1.19. Curve di sopravvivenza per danno ai polmoni ($W_h = \text{peso essere umano}$).

Un'ulteriore relazione è stata ricavata anche per la pressione massima tollerabile dai timpani. Infatti si è ricavato che per pressioni di 1 bar generate da esplosioni che si propagano molto velocemente, il 50% dei timpani si rompe, e che la soglia minima di sopravvivenza del 99% dei timpani, considerando sempre esplosioni che si propagano ad elevate velocità, è di solo 0,35 bar. 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 impatto sull'orecchio. Le pressioni di cui sopra sono le massime pressioni incidenti "efficaci", misurate cioè al di sopra della pressione atmosferica di 1 bar.

Bisogna considerare inoltre, che la pressione dipende sia 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, o dalla formazione di eventuali getti supersonici dell'onda d'urto che si possono verificare in presenza di aperture, come porte e finestre. 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 venga spostato dall'impatto, le soglie di pressione si modificano rispetto a quelle analizzate per le ferite ai polmoni o ai timpani, a seconda del caso, quale potrebbe essere l'urto contro superfici dure o contundenti. Una recente pubblicazione ha, infatti, imposto il livello limite delle pressioni a 1.6 bar che rappresenta il limite inferiore della soglia per la perdita di udito temporanea.

1.6.2. Movimento strutturale

È necessario considerare la tolleranza dell'uomo all'esposizione di altri due tipi d'impatto:

1. L'urto provocato dall'accelerazione/decelerazione subita, e
2. Vibrazioni recepite come risultato del movimento vibratorio della struttura

Se un soggetto non è attaccato alla struttura, potrebbe essere vulnerabile all'urto risultante con il suolo a causa dell'abbandono strutturale sotto di sé o a causa del rimbalzo strutturale verso di esso. Tuttavia, i modi più plausibili, in cui vengono riscontrate lesioni da urto, sono quelli in cui il soggetto viene scaraventato contro altre persone, attrezzature o superfici dure a causa del movimento orizzontale della struttura. Studi approfonditi hanno definito alcune soglie minime per le velocità di movimento che un corpo può subire senza riportare gravi danni fisici. In particolare si è definita la soglia minima di 3 metri al secondo, mentre per una velocità di appena 5,5 metri al secondo c'è una probabilità del 50% di frattura da cranio, ed infine per una velocità di 7 metri al secondo la probabilità di frattura da cranio è del 99%. Queste si applicano all'impatto con superfici dure e piane con cui il corpo urta in diversi punti. Per un soggetto che invece subisce un'accelerazione diretta lungo l'asse longitudinale del suo corpo (come nei casi di cadute a testa in giù), le tolleranze sopra indicate si riducono drasticamente poiché la testa riceverebbe l'energia cinetica totale dell'intera massa corporea. L'impatto con angoli o superfici spigolose è considerato estremamente critico anche per velocità inferiori ai 3 metri al secondo. Una velocità d'impatto di 3 metri al secondo è ritenuta generalmente sicura per il personale che si trova in una posizione piuttosto,

pertanto, si possono tollerare velocità maggiori se il soggetto si trova in posizioni più flessibili o in aree relativamente grandi. L'effetto del movimento orizzontale sulla stabilità del personale, come la perdita di equilibrio o gli spostamenti laterali, dipendono fortemente dalla posizione relativa del corpo, dalla durata e dall'intensità iniziale dell'accelerazione. Un'indagine ottenuta dall'osservazione di arresti improvvisi sui treno passeggeri ha mostrato che, la massima accelerazione che il personale riesce a sopportare prima di perdere l'equilibrio è inferiore a 0.44 g (corrispondenti a 4.312 metri al secondo quadro). Le accelerazioni analizzate in questi dati sperimentali sono però ricavate da azioni che hanno durate mediamente lunghe; pertanto le accelerazioni analizzate in uno scoppio esplosivo saranno sicuramente superiori, in quanto l'evento esplosivo si sviluppa in pochissimi secondi.

1.6.3. Tolleranza ai frammenti

Bisogna innanzitutto dire che a differenza delle tolleranze analizzate per le pressioni e il movimento delle strutture, dove le soglie erano mediamente alte, quelle per la tolleranza ai frammenti sono molto basse.

I frammenti possono essere classificati in base alla loro dimensione, velocità, al materiale e all'origine da cui provengono. In particolare essi si dividono in due macrocategorie:

1. I *frammenti primari*, caratterizzati da dimensioni molto piccole e velocità elevatissime, si formano in genere dalla disgregazione e rottura dell'involucro che contiene l'esplosivo o di attrezzature nelle immediate vicinanze dell'esplosione.
2. I *frammenti secondari*, caratterizzati da dimensioni maggiori e velocità medio/basse, si formano invece dal disfacimento e dalla frammentazioni di apparecchiature o di strutture protettive che recintano edifici accettori gravemente danneggiati dallo scoppio.

È chiaro 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.

È evidente infatti che se si considera l'interazione tra un impatto di un frammento primario e un individuo, la tolleranza sarà molto bassa, poichè per le caratteristiche di peso e velocità il frammento può essere assimilato ad un proiettile (in genere sono schegge di metallo a velocità elevatissime) e riuscirà quindi a penetrare facilmente il corpo del soggetto esposto.

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 area/peso del frammento, la velocità relativa ad una probabilità del 50% di penetrare la pelle aumenta (come mostra la tabella 1.11).

Tabella 1-11. Probabilità del 50% di penetrazione pelle umana.

Rapporto area/peso frammento [m ² /Kg]	Area frammenti basata su 15 g. [m ²]	Velocità [m/s]	Soglia Energia [m Kg]
0.006	0.00009	30.5	0.69
0.020	0.00031	50.3	1.93
0.041	0.00061	76.2	4.42
0.061	0.00091	102.1	8.02
0.082	0.00123	129.5	12.8

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. La tabella 1.12 mostra valori di velocità che corrispondono alla soglia di lesioni gravi sull'uomo. Bisogna ricordare che, come già detto in precedenza, un elemento di massa relativamente grande che si muove ad una velocità di appena 3 metri al secondo può apportare ferite serie ad un essere umano.

Tabella 1-12. Soglia di gravi lesioni al personale a seguito dell'impatto di frammenti.

Organi critici	Peso [Kg]	Velocità [m/s]	Energia [m Kg]
Torace	>1.13	3.05	0.55
	0.045	24.4	1.38
	0.00045	121.9	0.34
Arti e addome	>2.72	3.05	1.24
	0.045	22.9	1.24
	0.00045	167.6	0.69
Testa	>3.63	3.05	1.66
	0.045	30.5	2.21
	0.00045	137.2	0.41

Come precedentemente detto, l'impatto di una massa relativamente grande con una velocità inferiore ai 3 metri al secondo contro un essere umano può procurare gravi lesioni corporee. Inoltre, l'impatto di piccole masse (come mostrato in tabella 1.12) con velocità molto elevate può causare gravi lesioni come quelle che produrrebbe una grossa massa nell'investire un essere umano.

1.7 Categorie di carichi esplosivi

I carichi generati da un'onda d'urto sulle strutture possono essere suddivisi in due gruppi principali in base al confinamento della carica esplosiva (esplosioni confinate e non confinate). Queste categorie di carichi esplosivi sono illustrate nella tabella 1.13, in cui è possibile osservare sei diverse tipologie di carico. La tabella 1.13 mostra inoltre i cinque possibili carichi di pressione associati con le categorie precedenti, con la posizione della carica esplosiva che produce tali carichi e con le strutture di protezione soggette ad essi.

Tabella 1-13. Categorie di carichi esplosivi.

Categorie di carichi esplosivi		
Confinamento	Categorie	Carichi di pressione
Esplosioni non confinate	Esplosioni in aria libera	No riflessioni
	Esplosioni ad una certa altezza dal suolo	Riflessioni
	Esplosioni al suolo	Riflessioni
Esplosioni confinate	Completamente ventilate	Shock interni
		Dispersione
	Parzialmente confinate	Shock interni
		Gas interni
		Dispersione
Completamente confinate	Shock interni	
	Gas interni	

Le categorie di carichi esplosivi e le risultanti pressione elencate in tabella in tabella 1.13 sono qualitativamente e quantitativamente definiti nelle successive sezioni.

1.7.1. Esplosioni non confinate

1.7.1.1 Esplosioni in aria libera

Un'esplosione che avviene in aria libera produce un'uscita iniziale la cui onda d'urto si propaga via dal centro della detonazione, colpendo la struttura di protezione, o a volte direttamente la struttura obiettivo, senza che vi siano amplificazioni intermedie, per cui i carichi agenti sulla struttura sono in aria libera (Figura 1.20).

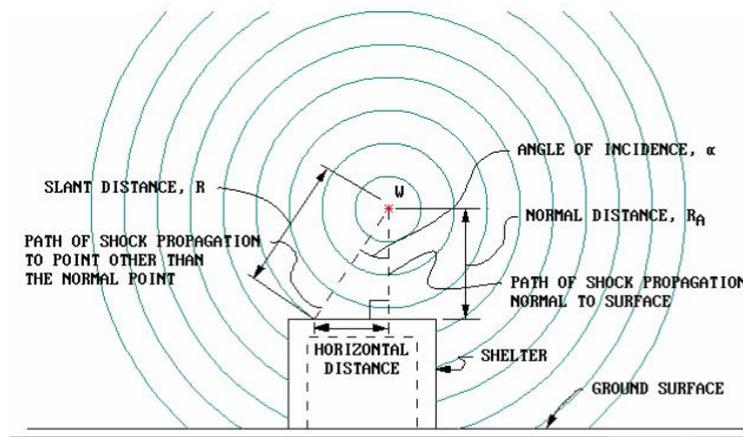


Figura 1.20. Esplosione in aria libera.

Il fronte d'urto incidente si muove quindi radialmente dal centro dell'esplosione e, al momento dell'impatto con la struttura, sotto l'ipotesi che questa sia rigida, sarà riflesso e rinforzato (pressione e impulso). I modelli di picco di pressione e impulso sulla struttura rappresentata nella precedente figura, variano da un massimo, che si ha alla distanza normale R_A , a un minimo dove il piano della superficie è perpendicolare al fronte d'urto. I parametri caratteristici della fase positiva, cioè pressione di picco, impulso, durata e tempo di arrivo di questo *shock* ambientale, cioè rilevati sul target prima che avvenga la riflessione, per un'esplosione sferica di una carica di TNT sono dati in figura 1.21 in funzione della distanza scalata, ovvero del rapporto tra la distanza reale dal punto di scoppio e il peso sotto radice cubica di carica esplosiva ($z = R/W^{1/3}$) che verrà approfondita successivamente.

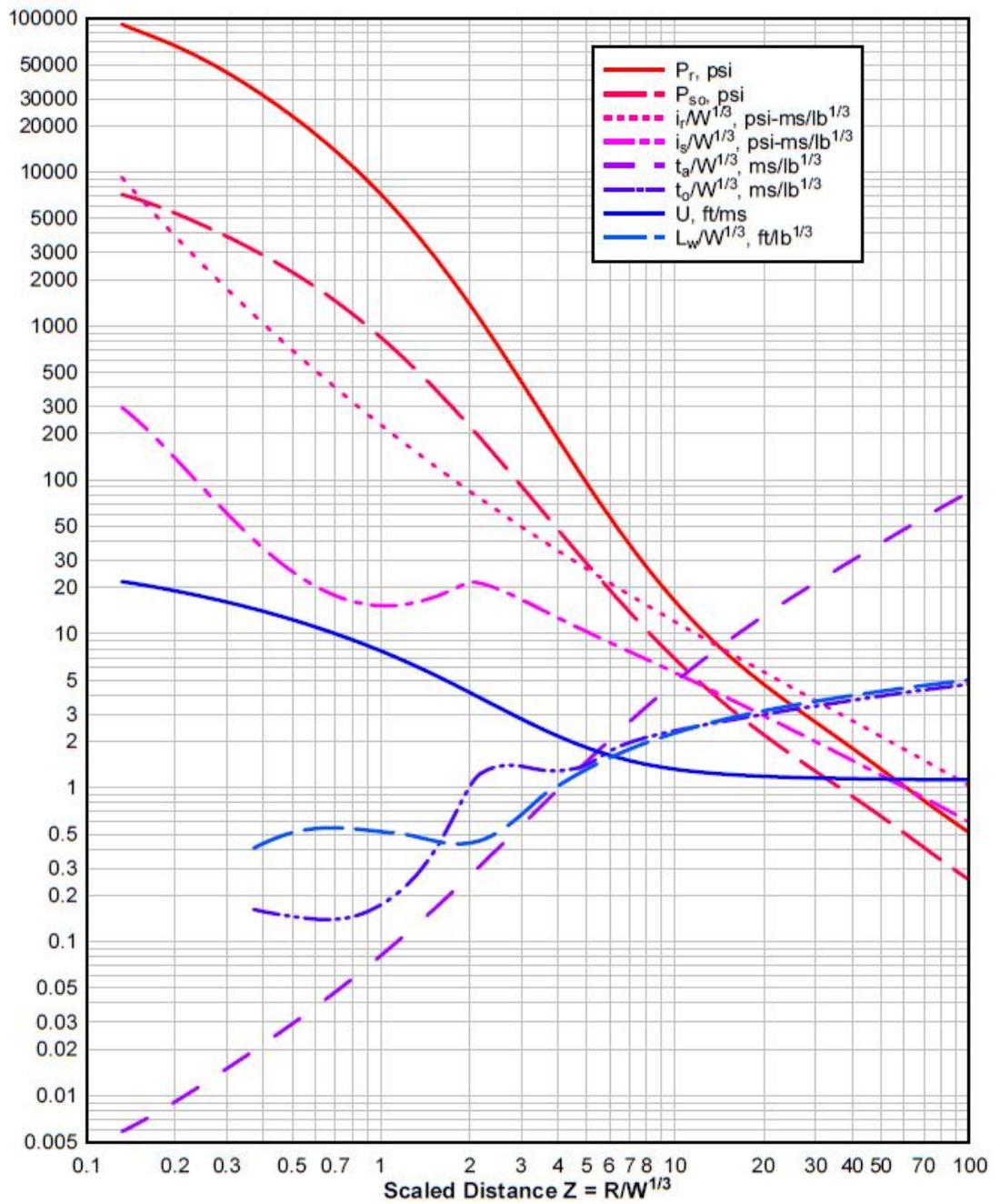


Figura 1.21. Parametri relativi alla fase positiva di un'onda d'urto generata da un'esplosione sferica di TNT in aria libera al livello del mare.

Le curve presentate in questa figura sono state sviluppate da Kingery e Bulmash [2,19], i quali hanno utilizzato tecniche d'interpolazione polinomiale di dati sperimentali, presi sotto reali condizioni e quindi influenzati dagli effetti meteorologici (vento e gradienti di temperatura), per ricavarle. Queste sono ampiamente accettate ed assunte come predizioni ingegneristiche per la determinazione delle pressioni in campo libero e dei carichi agenti su strutture pur considerando l'instabilità del fenomeno. Bisogna prestare particolare attenzione al fatto che in figura 1.21 le unità di misura sono quelle relative al sistema consuetudinario statunitense (o unità inglesi), per cui se si è a conoscenza del peso di esplosivo in kilogrammi e si vuole conoscere ad esempio il picco di pressione a una distanza in metri, si può operare seguendo i punti qui sotto riportati:

1. Calcolare la distanza scalata $z = R/W^{1/3}$ [$m/Kg^{1/3}$];
2. Convertire il valore trovato in feet su pounds alla un terzo [$ft/lb^{1/3}$] in modo da poter entrare nel grafico e incrociare la curva del parametro d'interesse (in questo caso il picco di pressione incedente) come mostra la figura 1.22 e ricavarne il valore sull'asse delle ordinate, che da leggenda è misurato in pound per square inch [psi] ;

Se ad esempio il valore di z in [$m/Kg^{1/3}$] fosse pari a 2 allora:

$$z [ft/lb^{1/3}] \cong \frac{z [m/Kg^{1/3}]}{0.3967} = 5.0416 [ft/lb^{1/3}] \quad (1.8)$$

poiché 1 foot è circa 0,3048 metri e una libbra (o pound) è circa 0,4536 kilogrammi. Entrando con questo valore di z in figura 1.22, otteniamo un valore di pressione massimo P_{s0} di 30 [psi].

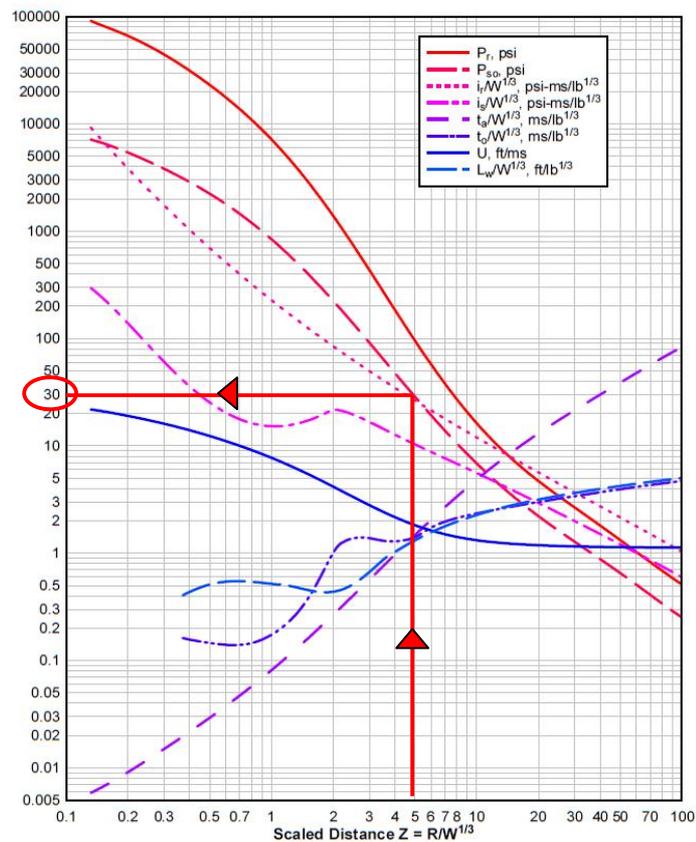


Figura 1.22. Procedura per l'ottenimento dei parametri relativi alla fase positiva di un'onda d'urto generata da un'esplosione di TNT in aria libera al livello del mare.

3. A questo punto, dato che 1 pound per square inch è circa 0,07 bar (10^5 Pascal), basta moltiplicare il valore di pressione intersecato sulle ordinate per questo fattore di conversione e ottenere il valore in bar, per questo esempio pari a 2,1 bar. A questo, essendo un valore di pressione efficace (cioè preso come sovrappressione rispetto al valore atmosferico, quindi come parte marginale risentita in più rispetto alla pressione ambiente), deve essere sommato il valore di pressione atmosferica (1 bar) per ottenere il picco effettivo dell'onda d'urto.

Se si osserva la leggenda di figura 1.21 (o 1.22) si può notare che alcuni parametri sono scalati rispetto ad altri. Questi sono estrapolati sulla superficie di carica e sono visualizzati come curve tratteggiate, le quali rappresentano un limite superiore di dispersione nei dati sperimentali e nelle predizioni teoriche, dando limiti conservatori ai fini progettuali. In alcune situazioni, i parametri che caratterizzano la

fase negativa dell'onda d'urto (figura 1.23) sono necessari per prevedere l'andamento dei carichi di *blast* in funzione del tempo agenti su varie superfici strutturali. Ciò è particolarmente vero nelle strutture di protezione flessibili (solitamente con telaio in acciaio), dove il movimento complessivo della struttura sarà interessato dalla fase dei carichi agenti su esse.

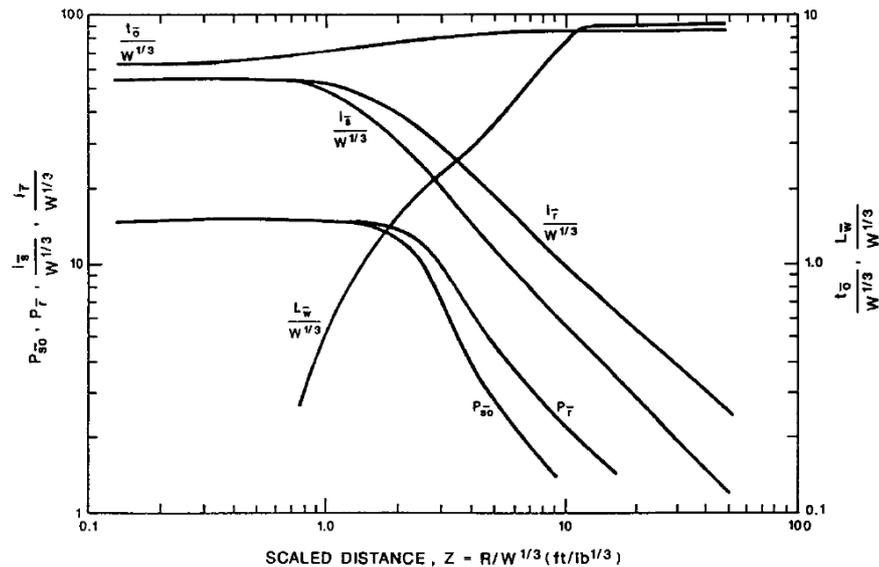


Figura 1.23. Parametri relativi alla fase negativa di un'onda d'urto generata da un'esplosione sferica di TNT in aria libera al livello del mare.

Gli effetti dei parametri relativi alla fase negativa sono generalmente non importanti per la progettazione di strutture più rigide (cemento armato).

Le curve presentate nelle figure 1.21 e 1.23, che danno i parametri di un'onda d'urto come una funzione della distanza scalata, sono limitate da un'estensione massima di z pari a 100 [ft/lb^{1/3}]. Per la maggior parte delle strutture di protezione infatti, o anche strutture leggere, il danno è relativamente superficiale al di là di questa distanza scalata, al massimo consistente in finestre rotte, pannelli di lamiera deformati e pareti gonfiate dal soffio subito. Ma le curve non sono riportate al di là di questo valore anche perché le proprietà dell'onda d'urto iniziano ad essere seriamente influenzate dalle condizioni atmosferiche.

1.7.1.2 Esplosioni ad una certa altezza dal suolo

La cosiddetta “*Air Burst*” è un’esplosione prodotta dalla detonazione di una carica posta ad una certa altezza dalla superficie del terreno e ad una certa distanza dalla struttura di protezione in modo che l’onda d’urto generata, propagando via dal centro dello scoppio, incide sulla superficie del terreno prima di raggiungere la struttura. Mentre l’onda d’urto continua a propagarsi, interagisce con il suolo, generando un fronte anteriore noto come “*fronte di Mach*” (figura 1.24), formato dall’interazione dell’onda iniziale (onda incidente) e l’onda riflessa dalla superficie terrestre.

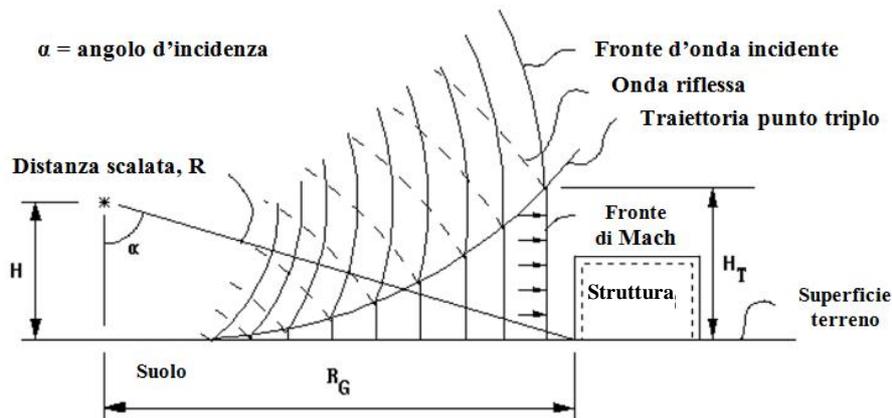


Figura 1.24. Air Burst.

L’onda riflessa è il risultato del rinforzo dell’onda incidente subito dall’impatto con la superficie del suolo. Alcune variazioni di pressione si verificano sopra l’altezza del fronte di Mach, ma per gli scopi progettuali, queste variazioni possono essere trascurate e considerare lo *shock* come un’onda piana su tutta l’altezza del fronte. I parametri esplosivi nel fronte di Mach sono calcolati alla superficie del terreno. La variazione pressione-tempo del fronte di Mach è simile a quella dell’onda incidente eccetto per la grandezza dei parametri, un po’ maggiore nel caso in esame. L’altezza del fronte di Mach aumenta più l’onda d’urto si allontana dalla sorgente. Questo incremento in altezza è indicato, come mostra la figura 1.24, “*traiettoria del punto triplo*” ed è formato dall’intersezione dell’onda iniziale, riflessa e di Mach. Una struttura di protezione è considerata sottoposta a un’onda piana

(pressione uniforme) quando l'altezza del punto triplo supera l'altezza della struttura stessa. L'altezza scalata del punto triplo $H_T/W^{1/3}$ è diagrammata in figura 1.25 in funzione della distanza orizzontale scalata dalla carica $R_C/W^{1/3}$ e dell'altezza scalata della carica dal suolo $H_C/W^{1/3}$.

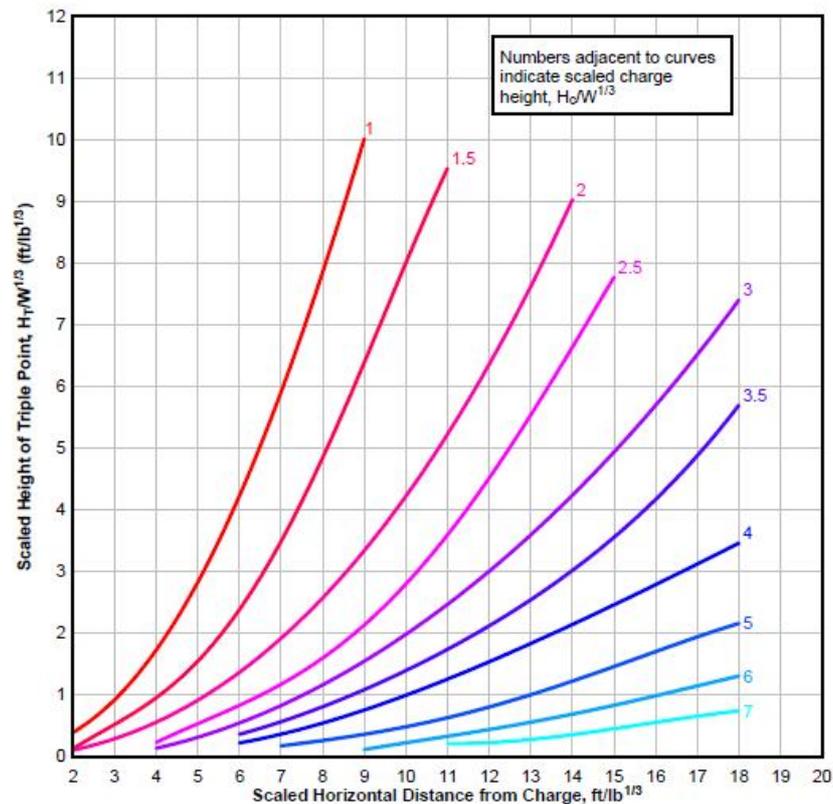


Figura1.25. Altezza scalata del punto triplo.

Se l'altezza del punto triplo non si estende sopra l'altezza della struttura, allora la grandezza dei carichi applicati varierà in funzione dell'altezza del punto considerato sulla parete della struttura. Sopra il punto triplo, la variazione della pressione nel tempo consiste in un'interazione incidente-riflessa della pressione d'urto incedente, che da un andamento diverso da quello dell'onda di Mach, con un'ampiezza di pressione minore di quella che si ha nel fronte di Mach.

Nel determinare l'ampiezza dei carichi esplosivi agenti sulla superficie di una struttura generati dallo scoppio di una carica ad una certa altezza dal suolo, si deve quindi considerare l'interazione del fronte d'urto incedente con il terreno; in particolare il picco di pressione incidente P_{ra} è determinato tramite l'utilizzo della figura 1.26 nota l'altezza scalata

della carica dal suolo $H_c/W^{1/3}$ e l'angolo d'incidenza α . Con una procedura simile, utilizzando la figura 1.27, si determina l'impulso i_{ra} .

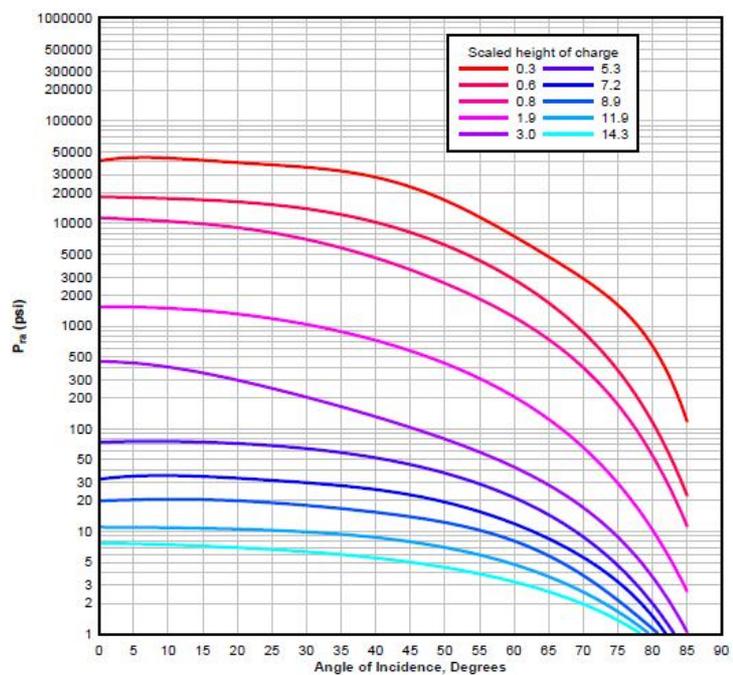


Figura 1.26. Variazione della pressione riflessa in funzione dell'angolo d'incidenza.

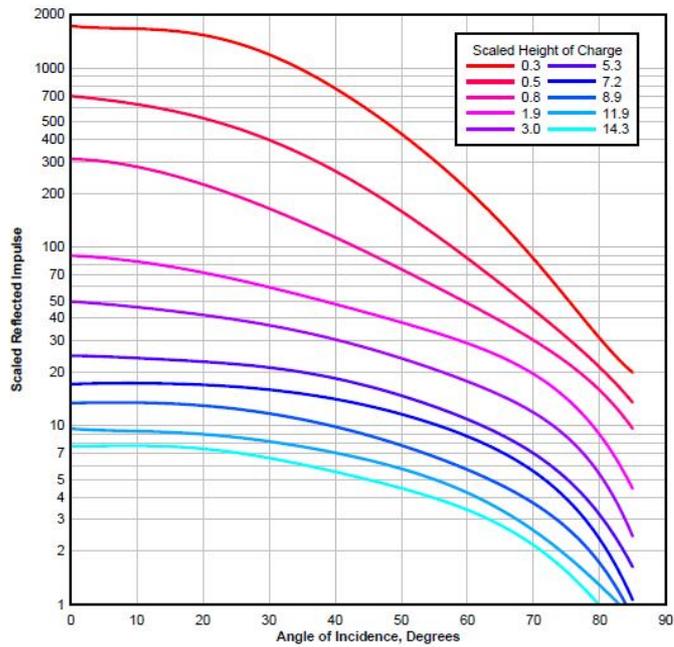


Figura 1.27. Variazione dell'impulso riflesso in funzione dell'angolo d'incidenza

Una stima degli altri parametri caratteristici può essere ottenuta dalla figura 1.21 settando i valori di P_{ra} e i_{ra} uguali a quelli di picco di pressione incidente P_{s0} e impulso incidente i_s , rispettivamente.

1.7.1.3 Esplosioni al suolo

Una carica posizionata su, o molto vicino, alla superficie del terreno è nota come “*Surface Burst*”. L'onda iniziale dell'esplosione viene riflessa e rinforzata dalla superficie del terreno e si genera un'onda riflessa, che a differenza del caso di *Air Burst*, si fonde con l'onda incidente a formare un'onda singola, di nature simile all'onda di Mach ma di forma emisferica, come rappresentato nella seguente figura.

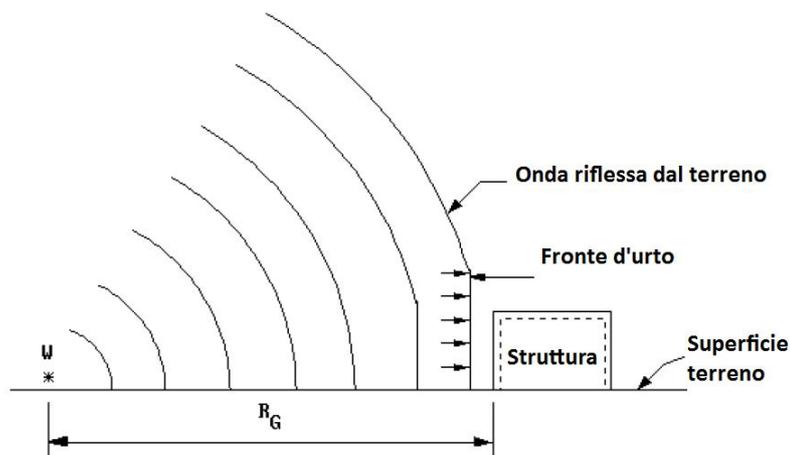


Figura 1.28. Surface Burst.

I parametri relativi alla fase positiva e negativa per un'esplosione emisferica di TNT sono dati da figure analoghe alla 1.21 e 1.23, con la differenza che i parametri riguardanti l'esplosione emisferica sono più grandi rispetto a quelli misurati in aria libera ad una determinata distanza e con stesso peso esplosivo. Come per il caso di *Air Burst*, strutture di protezione sottoposte a carichi di scoppio generati da una *Surface Burst* saranno collocate generalmente nel campo di pressione dove il concetto di onda piana è applicabile.

1.7.2. Esplosioni confinate

1.7.2.1. Effetto del confinamento

Quando un'esplosione avviene all'interno di una struttura, i picchi di pressione associati con il fronte d'urto iniziale (pressioni in aria libera) saranno estremamente più alti e, a loro volta, amplificati dalla loro riflessione con le pareti della struttura stessa. Inoltre, a secondo del grado di confinamento, gli effetti delle alte temperature e l'accumulo di prodotti gassosi generati dal processo chimico coinvolto nell'esplosione eserciteranno ulteriori aumenti di pressione e incrementeranno la durata dei carichi all'interno della struttura. Gli effetti combinati di queste pressioni possono eventualmente distruggere la struttura, meno che essa non sia progettata per sostenere effetti di pressioni interne. La presenza di aperture ventilate (come finestre o porte) ridurrà l'ampiezza e la

durata dei carichi. Strutture con una o più superfici sufficientemente frangibili o aperte all'atmosfera forniranno un certo grado di ventilazione a seconda delle dimensioni delle aperture. L'onda d'urto infatti, trovando una minore resistenza rispetto a quella data dalle pareti, sfiata dalle aperture propagando verso l'esterno e disperdendosi nel mezzo circostante la struttura. Le pressioni che propagano verso l'esterno dalle aperture ventilate vengono spesso definite "*pressioni di dispersione*", mentre le pressioni riflesse e rinforzate all'interno della struttura sono chiamate "*Shock interni*". Le pressioni associate con l'accumulo di prodotti gassosi e incrementi di temperatura sono identificate invece con "*pressioni gassose*". Per la progettazione di molte strutture di tipo cubico completamente ventilate, l'effetto delle pressioni gassose può essere trascurato. Va osservato che l'insorgenza di pressioni gassose non necessariamente coincide con l'inizio di shock interni. Inoltre, è necessaria una certa lunghezza temporale dopo l'insorgenza di pressioni gassose per far sì che la pressione raggiunga il suo valore massimo. Tuttavia questi tempi sono molto piccoli e, ai fini della progettazione di strutture più confinate, essi possono essere assunti istantanei.

Per ridurre quindi l'amplificazione data dal confinamento strutturale, si devono prevedere delle superfici frangibili di opportune dimensioni in grado di far fuoriuscire rapidamente le pressioni generate e ridurre al minimo la riflessione dei carichi con elementi non frangibili della struttura. Prove di scoppio su pannelli di vetro hanno dimostrato che un vero materiale frangibile non esiste e che alcune riflessioni sono comunque verificate, pur se la loro misura è trascurabile rispetto a quella di un elemento strutturale consistente come una parete, ma un elemento che non è considerato frangibile per la pressione d'urto può esserlo per la pressione gassosa.

2 Esplosione di una carica sferica in aria

Quando si verifica una detonazione uniforme di un materiale esplosivo, la conseguente alta pressione e alta temperatura dei gas fanno sì che quest'ultimi si espandano nell'aria ambiente generando un'onda d'urto, la quale in assenza di ostacoli si propaga come una superficie sferica centrata nel centro dell'esplosione. Una carica esplosiva di forma sferica, a differenza di altre forme che per la loro simmetria prediligono determinate direzioni di propagazione, dopo il suo innesco propaga dal punto di detonazione allo stesso modo in tutte le direzioni. L'utilizzo di cariche sferiche è infatti lo standard di scelta di prove sperimentali e simulazioni numeriche per il fine di predire i carichi esplosivi in un punto a una certa distanza dalla sorgente, in cui è posizionato il quantitativo del tipo di esplosivo desiderato, poiché tale simmetria, oltre ad ovviare le possibili casistiche di orientamento della carica, permette di evitare il verificarsi di urti asimmetrici.

2.1 Calcolo scalato

Tutti i parametri che caratterizzano un'esplosione sono principalmente dipendenti dalla quantità di energia rilasciata dalla detonazione sotto forma di onda d'urto e dalla distanza della sorgente. Una descrizione universale normalizzata degli effetti di *blast* può essere data tramite l'utilizzo di un metodo scalato. L'approccio più utilizzato per il calcolo scalato delle onde d'urto è quello formulato indipendentemente da Hopkinson [20] e Cranz [21]. La legge scalata di Hopkinson-Cranz è comunemente descritta come "*cube-root scaling*" (legge della radice cubica scalata), di cui un'esposizione formale, data da Baker [22], è la seguente:

“Onde d'urto simili sono prodotte alla stessa distanza scalata quando due cariche di analoga geometria e dello stesso materiale esplosivo, ma di differente dimensione, sono fatte detonare nelle stesse condizioni atmosferiche”.

Quindi, se le due cariche hanno rispettivamente massa pari a W_1 e W_2 e diametro d_1 e d_2 allora, per lo stesso materiale esplosivo, è chiaro che:

- W_1 è proporzionale a d_1^3
- W_2 è proporzionale a d_2^3

quindi segue che:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3 \quad \text{o} \quad \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \quad (0.1)$$

Pertanto, se i diametri delle due cariche sono in un rapporto $d_1/d_2=\lambda$, allora come indica la figura 2.1 [23], se si vuole avere la stessa sovrappressione p_s dallo scoppio delle due cariche, il rapporto tra le distanze alle quali si sviluppa questa particolare sovrappressione sarà anche λ , e così sarà anche per il rapporto tra le durate della fase positiva e il rapporto tra gli impulsi.

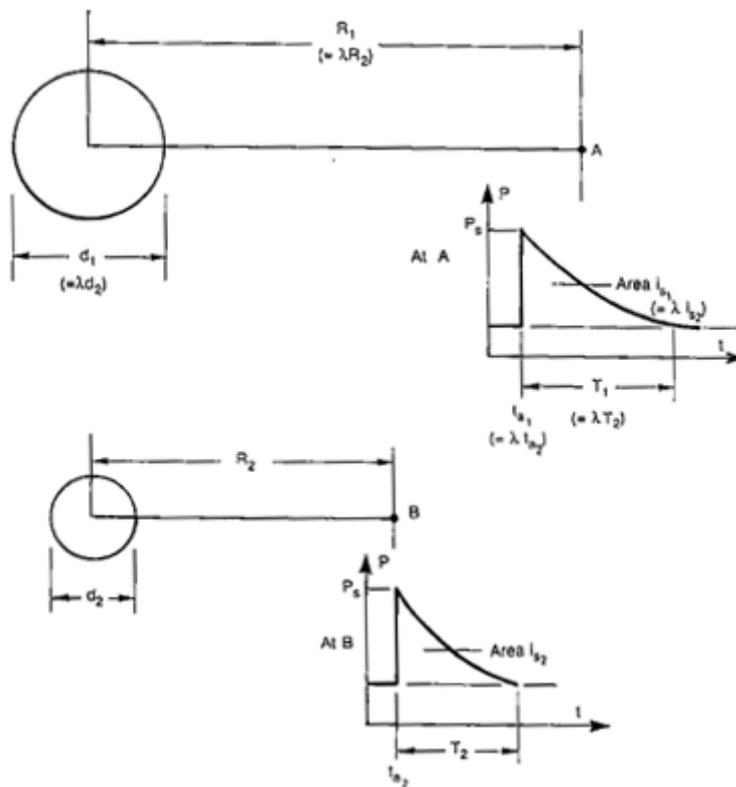


Figura 2.1. Calcolo scalato di Hopkinson-Cranz.

La distanza in cui una data sovrappressione viene prodotta può quindi essere calcolata usando il risultato dell'equazione 2.1. Per esempio:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \quad (0.2)$$

dove R_1 è la distanza alla quale una data sovrappressione è prodotta da una carica di peso W_1 e R_2 è la distanza alla quale la stessa sovrappressione è generata da una carica di peso W_2 .

L'approccio di Hopkinson-Cranz porta facilmente alla spiegazione del concetto di distanza scalata "z" introdotto nel precedente capitolo. È chiaro che z è, in effetti, la costante di proporzionalità nelle equazioni 2.1 e 2.2.

$$\begin{aligned} d_1 &= z W_1^{\frac{1}{3}} \\ R_1 &= z W_1^{1/3} \end{aligned} \quad z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (0.3)$$

Misurando in metri la distanza e in chilogrammi il peso di carica, la distanza scalata avrà, intuitivamente, un'unità di misura scalata [$\text{m/Kg}^{1/3}$], ed è quella che si adotterà per i successivi calcoli. L'uso della distanza scalata, come si è potuto apprendere dalla lettura della sottosezione 1.7.1.1., consente, per mezzo delle combinazioni di diversi quantitativi di esplosivo e diverse distanze, di poter riferire una vasta gamma di situazioni ai dati sperimentali sulle onde d'urto in maniera compatta ed efficiente.

2.2 Modelli empirici

In letteratura trovano spazio diversi autori, che attraverso delle approssimazioni di dati sperimentali sui fenomeni esplosivi, hanno derivato delle formulazioni empiriche per la valutazione dei parametri caratteristici di un'onda d'urto percepita in un punto dopo qualche istante dall'innesco della carica dove è contenuta una determinata quantità di materiale esplosivo (solitamente TNT). I numerosi lavori di ricerca condotti con lo scopo di ricavare equazioni in grado di coniugare ai buoni risultati la semplicità di calcolo, sono stati il *focus* di molteplici studi durante gli anni '50 e '60. I modelli empirici derivati dai diversi autori per il calcolo dei parametri di un'onda d'urto sono basati sul calcolo scalato appena esposto, ovvero sull'idea di predire l'andamento temporale dell'onda di pressione come sola funzione della quantità di materiale esplosivo impiegata e della distanza alla quale si vuole valutare l'effetto prodotto in condizioni atmosferiche ambientali, utilizzando quindi come unica variabile dipendente la distanza scalata, poiché i diversi materiali esplosivi sono ricondotti al tritolo tramite il concetto del TNT equivalente discusso nella sezione 1.5. L'andamento della pressione nel tempo di una generica onda d'urto è stato anticipato nella sezione 1.5 del precedente capitolo, in cui sono stati presentati, in linee generali, i parametri costituenti la forma di un carico di *blast* in aria libera, e la cui descrizione matematica è stata approssimata mediante

l'equazione 1.7 che viene riportata per completezza in questa sezione insieme alla figura 2.2, dove sono evidenziati tutti i parametri necessari per l'ottenimento di un'onda d'urto.

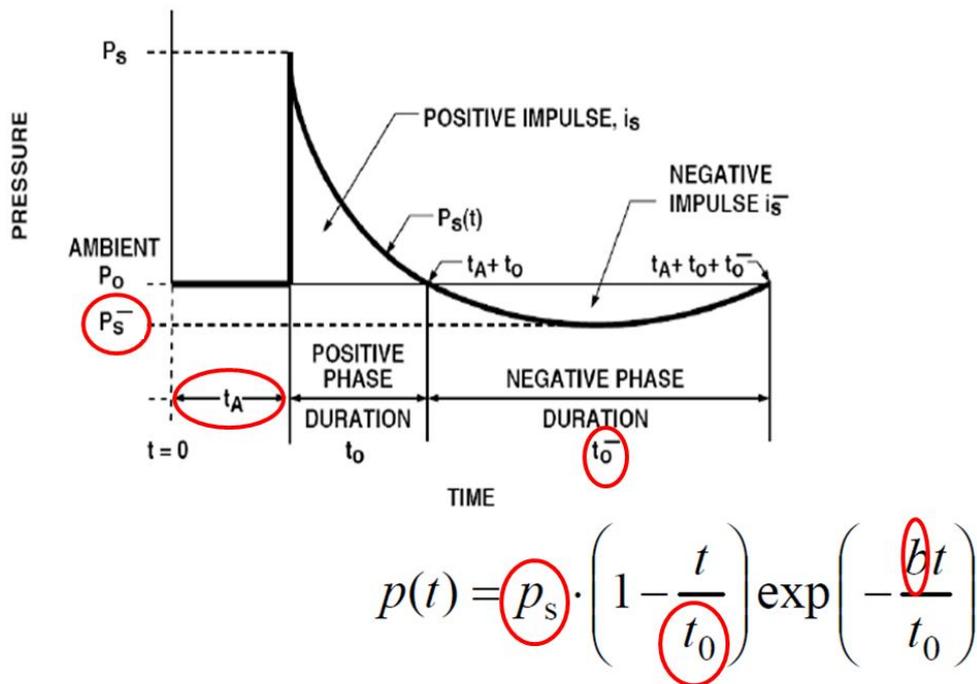


Figura 2. 2. Parametri necessari per diagrammare un'onda d'urto.

Per ognuno di questi parametri verranno presentati i diversi modelli empirici ricavati da letteratura con maggiore ricorrenza, sviluppati su misura a diversi intervalli di z per una maggiore accuratezza e su cui si fondano alcune interfacce grafiche per il calcolo dei carichi di *blast* generati da un'esplosione, che raramente si trovano sulla rete o che non sono molto esaudienti.

2.2.1. Picco di sovrappressione incidente

La massima pressione sviluppata da un'onda d'urto in aria libera alla distanza considerata è il parametro cardine nel progetto di strutture di protezione, poiché ritenuto il maggiore responsabile sugli effetti prodotti dallo scoppio su persone ed edifici. Da questo dipendono infatti, come precedentemente osservato, l'impulso (della fase positiva), che da un'idea dell'energia potenzialmente trasmissibile, e la pressione dinamica (vento sviluppato dietro il fronte d'onda),

che per pressioni di picco incidente elevate può contribuire in maniera rilevante all'azione di carico. Per questo parametro i modelli empirici presenti in letteratura con maggiore ricorrenza sono i seguenti e riportati in bar:

- **Henrych** [18, 23, 24]

$$\begin{aligned}
 p_s &= \frac{14.072}{z} + \frac{5.54}{z^2} - \frac{0.357}{z^3} + \frac{0.0062}{z^4} && \text{per } 0.05 \leq z \leq 0.3 \\
 p_s &= \frac{6.194}{z} - \frac{0.326}{z^2} + \frac{2.132}{z^3} && \text{per } 0.3 \leq z \leq 1 \\
 p_s &= \frac{0.662}{z} + \frac{4.05}{z^2} + \frac{3.288}{z^3} && \text{per } 1 \leq z \leq 10
 \end{aligned} \tag{0.4}$$

- **Brode** [18, 23, 25]

$$\begin{aligned}
 p_s &= \frac{6.7}{z^3} + 1 && \text{per } p_s > 10 \text{ bar} \\
 p_s &= \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019 && \text{per } 0.1 \leq p_s \leq 10 \text{ bar}
 \end{aligned} \tag{0.5}$$

- **Naumyenko e Petrovsky** (la prima), **Sadovsky** (la seconda) [18, 26, 27]

$$\begin{aligned}
 p_s &= \frac{10.7}{z^3} + 1 && \text{per } z \leq 1 \\
 p_s &= \frac{0.76}{z} + \frac{2.55}{z^2} + \frac{6.5}{z^3} && \text{per } 1 \leq z \leq 15
 \end{aligned} \tag{0.6}$$

- **Kinney e Graham** [28, 29, 33]

$$p_s = \frac{808 p_0 [1 + (\frac{z}{4.5})^2]}{\sqrt{[1 + (\frac{z}{0.048})^2] [1 + (\frac{z}{0.32})^2] [1 + (\frac{z}{1.35})^2]}} \tag{0.7}$$

- **Gelfand e Silnikov** [30]

$$\begin{aligned}
 p_s &= [1.7 \cdot 10^3 \cdot \exp(-7.5 \cdot z^{0.28}) + 0.0156] \cdot 10 && \text{per } 0.1 < z < 8 \\
 p_s &= [8 \cdot 10^3 \cdot \exp(-10.7 \cdot z^{0.1})] \cdot 10 && \text{per } z > 8
 \end{aligned} \tag{0.8}$$

- **Mills** [31, 37]

$$p_s = \left(\frac{1772}{z^3} - \frac{114}{z^2} + \frac{108}{z} - 0.019 \right) / 100 \quad (0.9)$$

- **Wei e Dharani** [32, 33]

$$p_s = p_0 \left(\frac{0.696}{z} + \frac{2.1}{z^2} + \frac{4.13}{z^3} \right) \quad (0.10)$$

- **Sadovski** [30, 34]

$$p_s = \frac{0.81}{z} + \frac{2.8}{z^2} + \frac{7.07}{z^3} \quad (0.11)$$

Tutte le formule per il calcolo del picco di pressione appena presentate, sono state illustrate per gli standard esplosivi del tritolo, pertanto è possibile che alcuni coefficienti differiscano da quelli rintracciabili in alcuni articoli o documenti, come per esempio quelli del modello di Sadovski, i cui coefficienti sono rilevati per una miscela di TNT-RDX 50/50 che a differenza di quelli presentati nella 2.11, in letteratura [34] per la miscela sono: 0.85 anziché 0.81, 3 anziché 2.8 e 8 anziché 7.07.

2.2.2. Tempo di arrivo

Il tempo di arrivo di un'onda d'urto è definito come l'intervallo di tempo trascorso tra l'iniziazione del detonatore, quindi dall'accensione delle carica, al momento di arrivo del fronte d'urto alla distanza considerata. Pertanto, in esso è compreso anche il tempo impiegato per la detonazione del materiale esplosivo. Essendo un parametro di minore rilevanza per la previsione di misure di protezione, ha una scarsissima reperibilità in termini di formulazioni matematiche. L'unica espressione empirica è stata trovata in [35] e [36], la cui forma è qui di seguito riportata in secondi:

$$t_a = 0.4 \cdot R^{1.2} \cdot W^{-0.2} / a_0 \quad (0.12)$$

in cui R e W sono rispettivamente la distanza e il peso della carica esplosiva, mentre a_0 è la velocità del suono nell'aria al livello del mare pari a circa 343 metri al secondo.

2.2.3. Durata della fase positiva

La durata della fase positiva è definita come l'intervallo di tempo tra l'arrivo dell'impulso di pressione positiva associato al fronte d'urto e la sua fine, ovvero quando si ha un ritorno momentaneo alla pressione ambiente prima che si venga a creare la depressione. Insieme al picco di pressione incidente, è un parametro descrittivo del potenziale di un'onda di pressione e può essere usato per stimare l'impulso energetico associato con l'urto. Le seguenti relazioni ottenute da diversi autori per questa particolare caratteristica riportano la durata scalata relativa alla fase positiva di un'onda d'urto:

- **Henrych** [18, 24]

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \frac{(0.107 + 0.44 \cdot z + 0.264 \cdot z^2 - 0.129 \cdot z^3 + 0.0335 \cdot z^4)}{1000} \quad (0.13)$$

- **Kinney e Graham** [28, 33, 38]

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \left(\frac{980 \left[1 + \left(\frac{z}{0.45} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{z}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{z}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{z}{6.9} \right)^2}} \right) / 1000 \quad (0.14)$$

- **Wei e Dharani** [32, 33]

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \left(24.44 \cdot z^{1/5} - \frac{0.0316}{z} - 40.99 \right) / 1000 \quad (0.15)$$

- **Sadovsky** [39]

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = 1.2 \cdot z^{0.5} / 1000 \quad (0.16)$$

La durata della fase positiva scalata presentata in queste equazioni (2.13...2.16) è misurata in secondi scalati, cioè $[s/Kg^{1/3}]$. È chiaro che, per calcolare la durata effettiva di una data quantità di esplosivo, basta moltiplicare entrambi i membri per la massa di esplosivo alla un terzo, in modo tale da ottenere la durata in secondi.

2.2.4. Coefficiente di decadimento della pressione nel tempo

Il coefficiente di decadimento o di forma b nell'equazione di Friedlander (figura 2.2) descrive il decadimento della curva di pressione nel tempo. Questo parametro è decisivo per l'estensione della fase negativa nella distribuzione esponenziale della pressione nel tempo. Ci sono diversi metodi per il calcolo di questo parametro adimensionale:

1. Utilizzando l'impulso della fase positiva [29], si opera approssimando e interpolando la curva ricavata dall'equazione di Friedlander, e si ottiene in funzione della distanza scalata l'equazione 2.17:

$$b = 5.2777 \cdot z^{-1.1975} \quad (0.17)$$

2. Utilizzando il rapporto assoluto tra la minima e la massima pressione [40]. Manipolazione matematiche dell'equazione di Friedlander portano ad ottenere b in funzione del valore assoluto p_s^-/p_s , la cui interpolazione quadratica restituisce:

$$b = z^2 - 3.7z + 4.2 \quad (0.18)$$

In letteratura [33, 39] è possibile trovare un'altra espressione per questo esponente di decadenza data da Wei e Dharani, che è la seguente:

$$b = -0.0697 \cdot z - \frac{9.63}{z} + \frac{15.9}{z^2} - \frac{5.65}{z^3} + 2.735 \quad (2.19)$$

Vedremo successivamente quali sono le differenze nell'utilizzo di questi diversi fattori caratteristici, quali sono i loro andamenti in funzione della massa di esplosivo e della distanza dalla sorgente esplosiva e quali si attengono con maggiore precisione alle curve derivate dalle prove sperimentali di Kingery e Bulmash [2,19] presentate in figura 1.21 del precedente capitolo.

2.2.5 Parametri caratteristici della fase negativa

L'onda d'urto, una volta che i gas nella loro espansione hanno raggiunto il valore di pressione atmosferica, viene accompagnata da un'onda di rarefazione

caratterizzata da pressione inferiore al valore ambiente di riferimento. Questa fase, com'è possibile osservare in figura 2.2, è caratterizzata essenzialmente da due parametri: il picco di depressione e la durata, per la quale si estende prima che, a causa del risucchio, il valore di pressione si riporti in condizioni ambientali. La consistenza della fase negativa dipende, come si è potuto constatare dalla figura 1.23, dalla distanza scalata e quindi come sopra detto dal coefficiente di decadimento che caratterizza la fase positiva. Una prima formulazione per qualificare i parametri che la costituiscono è stata proposta da Smith [23, 40], il quale ha presentato la seguente espressione per il calcolo della massima pressione negativa:

$$p_s^- = \frac{0.35}{z} \text{ [bar]} \quad \text{per } z > 1.6 \quad (0.20)$$

e l'equazione 2.21 per stimarne la durata:

$$t_0^- = 0.00125 \cdot W^{1/3} \text{ [s]} \quad (2.21)$$

Un'altra possibilità per ottenere questi parametri è stata offerta da Krauthammer [41, 42], grazie al quale la limitazione data dalla restrittività di z sull'equazione 2.20 viene superata:

$$\begin{aligned} p_s^- &= \frac{0.35}{z} \text{ [bar]} & \text{per } z > 3.5 \\ p_s^- &= 0.1 \text{ [bar]} & \text{per } z < 3.5 \end{aligned} \quad (2.22)$$

La durata della fase negativa, utilizzando il diagramma di Krauthammer [42], può essere descritta invece con la funzione seguente:

$$\begin{aligned} t_0^- &= 0.0104 \cdot W^{1/3} \text{ [s]} & \text{per } z < 0.3 \\ t_0^- &= (0.003125 \cdot \log(z) + 0.01201) \cdot W^{1/3} \text{ [s]} & \text{per } 0.3 \leq z \leq 1.9 \\ t_0^- &= 0.0139 \cdot W^{1/3} \text{ [s]} & \text{per } z > 1.9 \end{aligned} \quad (2.23)$$

La differenza tra la durata della fase negativa di Smith e Krauthammer è abbastanza visibile dal confronto della 2.23 con la 2.21. Smith cita infatti un documento relativamente vecchio di Brode, il quale utilizza una delle prime macchine computazionali per il calcolo della fase negativa, dove per altro non

viene descritta l'unità di misura utilizzata; pertanto il valore per la durata della fase negativa dovrebbe essere utilizzato con cautela. Il valore della durata presentato da Smith risulta infatti troppo piccolo rispetto ai valori sperimentali. Al contrario, quello dato da Krauthammer sembra essere a volte troppo grande, ma comunque ritenuto di maggiore affidabilità in quanto definito per diversi *range* di z e maggiormente utilizzato in molti lavori. In questa tesi si utilizzerà dunque quest'ultimo modello per il calcolo della durata associata alla fase negativa e del picco di depressione, anche se il valore effettivo mostrato dai diagrammi della curva caratteristica sarà influenzato, come anticipato nella sezione 1.5, dal coefficiente di decadimento della pressione e quindi risulterà diverso dai valori attesi calcolati, e che per la scarsa importanza della fase negativa nel progetto strutturale, saranno comunque ritenuti accettabili.

2.3 Ottimizzazione

Al cospetto dell'elevato numero di modelli presentati nelle precedenti sezioni, sono state eseguite diverse prove per verificare quali di queste formulazioni matematiche ubbidisca con maggiore precisione ad un criterio di valutazione scelto per ogni singolo parametro. Come anticipato, i parametri di maggiore interesse per il progetto di strutture di protezione sono il picco statico di pressione incidente, ossia il massimo carico risentito alla distanza considerata quando si ha l'arrivo del fronte d'urto, e la durata della fase positiva che maschera l'impulso energetico associato con l'urto, dando quindi un'idea dell'energia trasmissibile su una struttura o su una persona che potrebbe trovarsi in quel raggio d'azione. Sarà su questi quindi che si concentrerà l'attenzione principale.

Prendendo come carica di prova una sfera di TNT di raggio uguale a 20 centimetri, quindi di 54,62 chilogrammi di tritolo (visto che la densità di questo esplosivo, come mostra la tabella 1-5, è di 1630 chilogrammi al metro cubo), sono state collaudate le varie formulazioni per il picco di pressione che si sarebbe sviluppato a 5 metri di distanza dallo scoppio, quindi a una distanza scalata pari a 1,3178 metri su radice cubica di chilogrammo. È chiaro che, se si considera un esplosivo diverso dal tritolo, tramite il concetto di TNT equivalente ci si può comunque ricondurre ai calcoli e alle curve mostrate in questa trattazione. I valori osservati forniscono, come mostra la figura 2.3, risultati simili per alcuni modelli e molto differenti per altri.

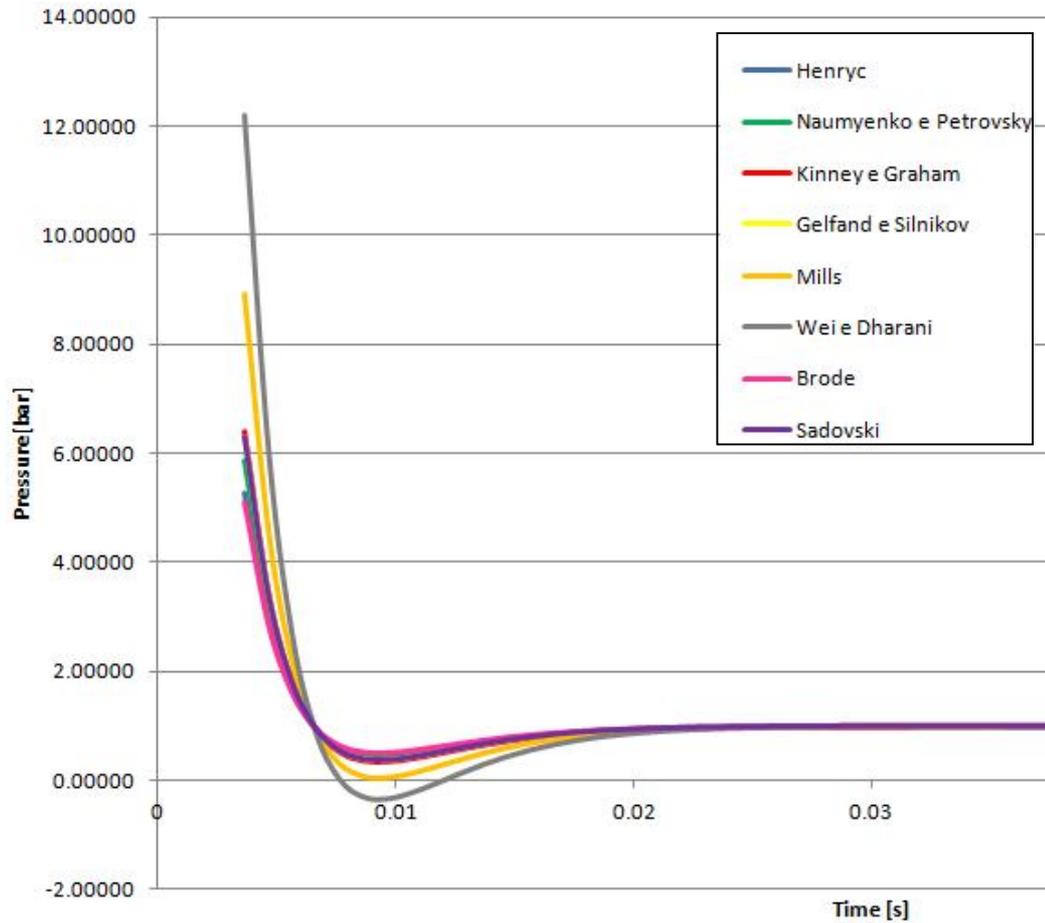


Figura 2.3. Modelli empirici.

Per maggiore chiarezza, dato l'elevato numero di curve, si riporta uno zoom della figura 2.3 nella figura 2.4, dove si mettono in evidenza i picchi di pressione relativi ai vari autori e dove si può osservare un certo scostamento tra i valori di picco calcolati.

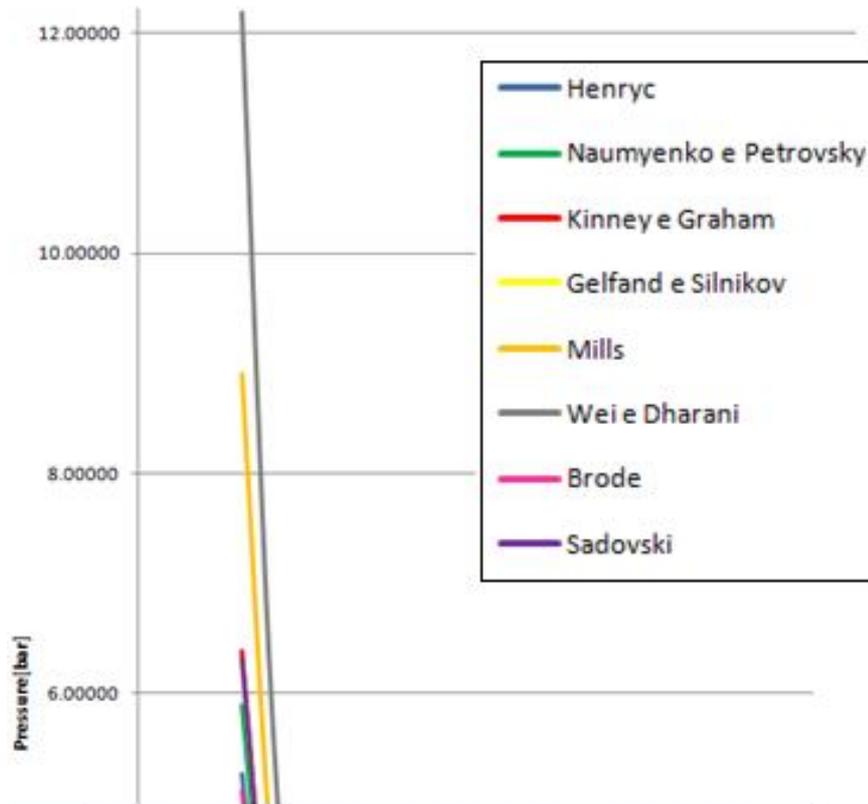


Figura 2.4. Zoom picco di pressione.

Le curve presentate in figura 2.3, e di conseguenza in 2.4, sono state ottenute a 5 metri con una carica di 54,62 chilogrammi di TNT, mantenendo costanti anche tutti gli altri parametri: tempo di arrivo, coefficiente di decadimento, durata della fase positiva, durata della fase negativa e picco di depressione, dove questi ultimi due sono stati calcolati con il modello di Krauthammer precedentemente accertato. Variando il peso della carica di TNT, quindi il raggio, e/o la distanza alla quale si vuole rilevare l'andamento temporale della pressione, mantenendo fissi tutti gli altri parametri, si è constatato che lo scostamento rilevato tra il picco di pressione di un modello rispetto ad un altro con i 54,62 chili a 5 metri varia.

Si è pensato allora, visto che le grandezze di *input* (peso di TNT e distanza dallo scoppio) sono le componenti della distanza scalata, di diagrammare tutti i modelli empirici per il calcolo del picco di pressione in funzione di z e confrontare il loro andamento con quello dato dalla curva sperimentale di Kingery e Bulmash di figura 1.21 relativa al picco di pressione e riportata in nero nella seguente figura con le unità di misura convertite in metri su radice cubica di chilogrammo.

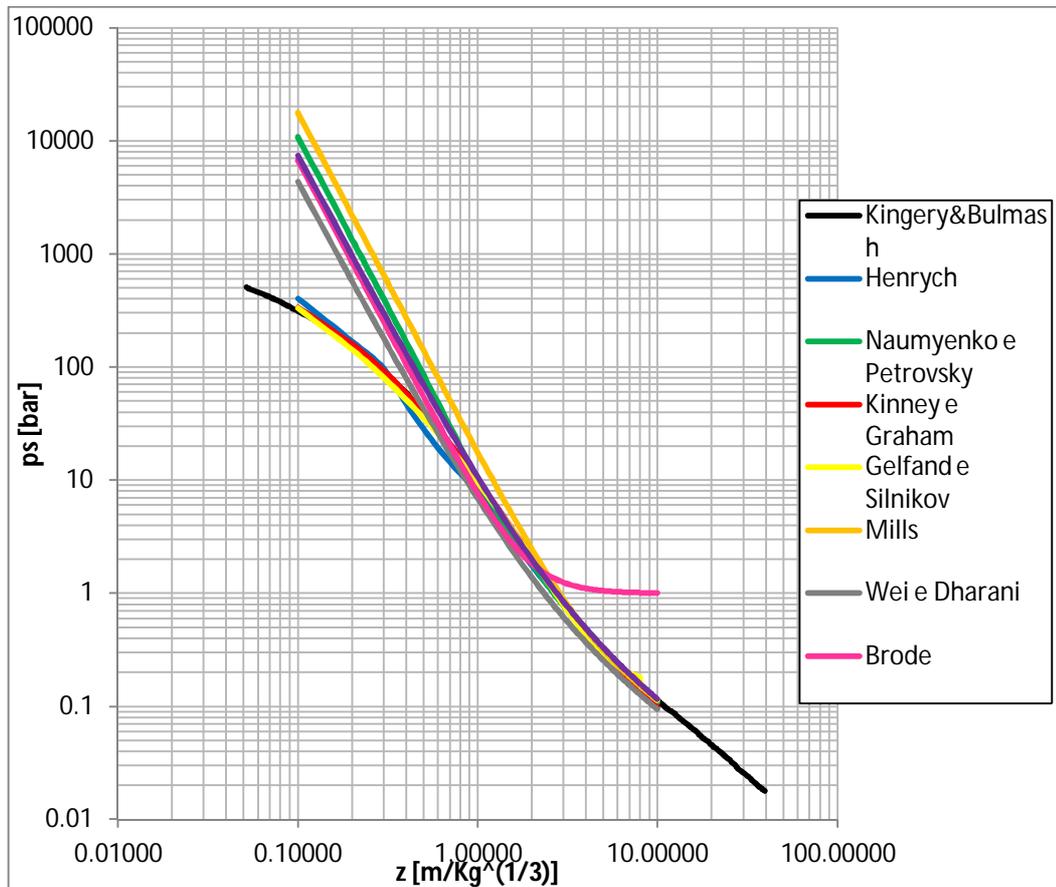


Figura 2.5. Andamento del picco di pressione in funzione della distanza scalata.

Dalla figura 2.5 è possibile osservare come alcuni modelli, quello di Henrych, Kinney e Graham, Gelfand e Silnikov, rispettino molto bene l'andamento del picco di pressione dato da Kingery e Bulmash al variare della distanza scalata in tutto il suo *range*, mentre altri, come quello di Naumyenko e Petrovsky, Mills, Wei e Dharani, Brode e Sadovski, specialmente per piccoli valori di z , presentano valori di picco non coerenti con la curva di riferimento.

Avendo considerato la curva di Kingery e Bulmash come criterio di giudizio per qualificare i diversi modelli presentati per il calcolo del picco di pressione, anche per la durata della fase positiva, altro parametro d'interesse per le misure di sicurezza, si è ragionato in modo analogo in modo da vedere come si comportano i quattro modelli presentati nelle equazioni 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16, dove la durata è scalata e quindi confrontabile direttamente con quella del diagramma sperimentale anch'essa scalata.

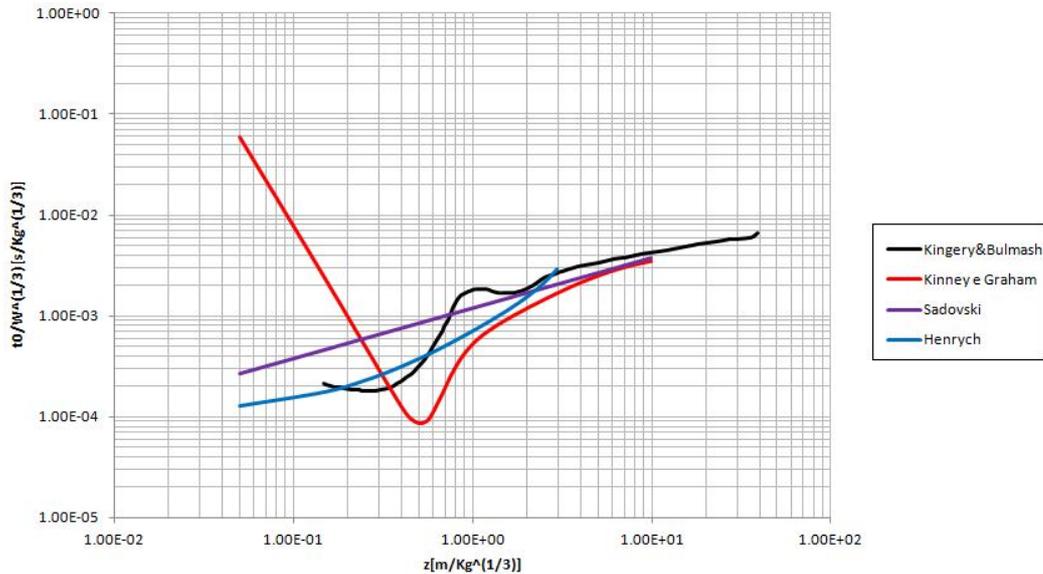


Figura 2.6. Andamento della durata della fase positiva in funzione della distanza scalata.

Nella figura 2.6 non è stato riportato l'andamento dato da Wei e Dharani (equazione 2.15) perché, per alcuni valori di distanza scalata, si ottenevano valori negativi di durata, quindi accantonato a priori. Qui, a differenza della figura 2.5 riportante il *trend* del picco di pressione, nessuno dei restanti modelli empirici approssima bene l'andamento della curva nera, pur se l'intervallo in cui restano compresi i valori di durata scalata sono comunque dello stesso ordine di grandezza di quelli in essa rintracciabili.

2.3.1 Idea del modello ibrido per la sovrappressione statica di picco e la durata della fase positiva

Nell'osservare le figure 2.5 e 2.6 si può notare che, per certi *range* definiti di distanza scalata, un modello risulta più rigoroso rispetto ad un altro al cospetto dei dati sperimentali. Nasce, quindi, l'idea di combinare più modelli in modo tale da derivare un modello unico che approssimi con maggiore precisione l'andamento della curva ricavata da Kingery e Bulmash in tutto il campo circoscritto di distanza scalata. Si è pensato, perciò, di analizzare *ad hoc* gli andamenti delle curve attraverso ingrandimenti, per scovare quali di queste rispettavano meglio il riferimento, rilevando l'intervallo di distanza scalata nel quale la curva empirica coincide con quella sperimentale. Riportando singolarmente gli andamenti per la sovrappressione di picco di Henrych, Kinney e Graham, Gelfand e Silnikov con la solita curva (figura 2.7, 2.8 e 2.9 rispettivamente), si può evidenziare come il modello di Kinney e Graham sia molto preciso per valori di z compresi tra 0,1 e 3,5 metri su radice cubica di

chilogrammo, e come il modello di Henrych approssimi bene l'andamento di Kingery e Bulmash per valori di distanza scalata superiori a 3,5.

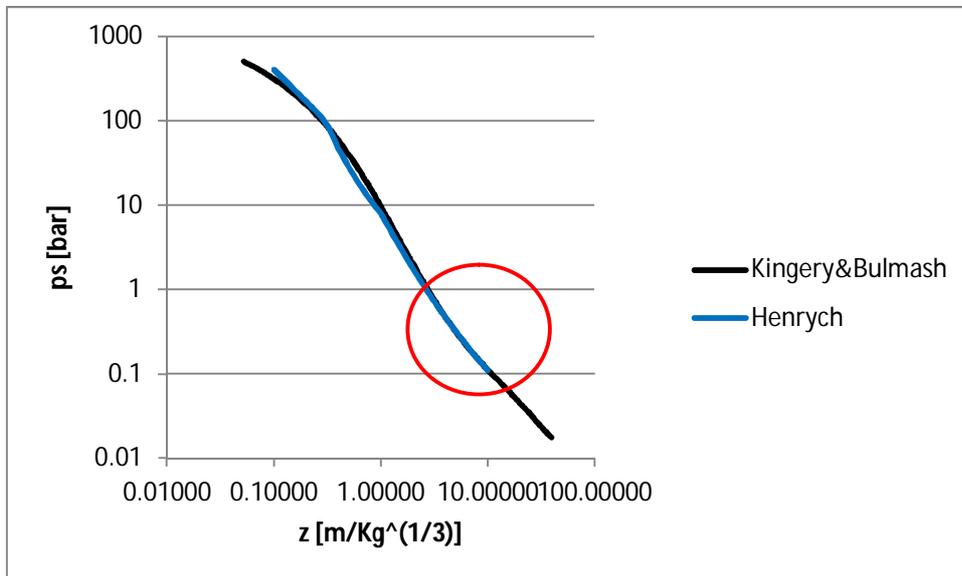


Figura 2.7. Henrych vs Kingery e Bulmash.

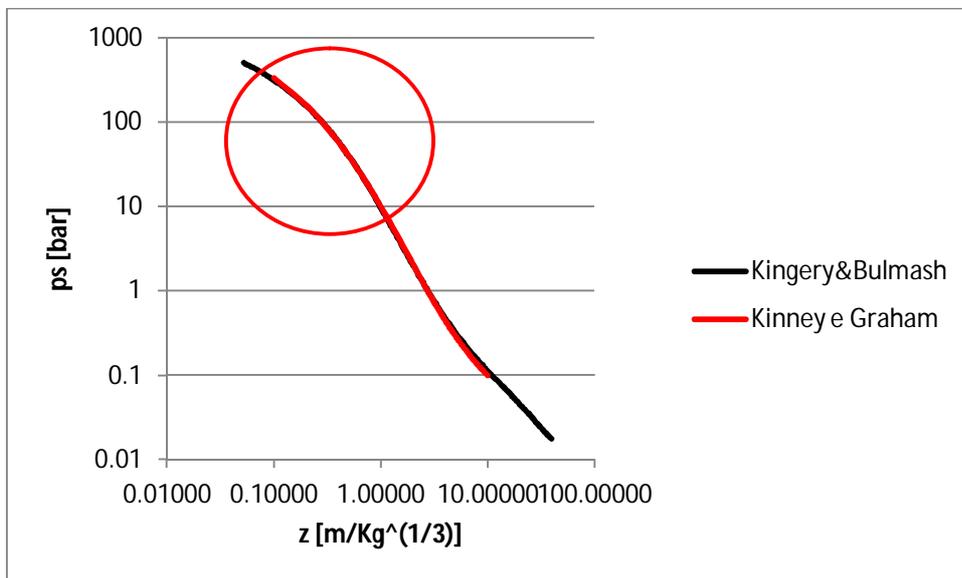


Figura 2.8. Kinney e Graham vs Kingery e Bulmash.

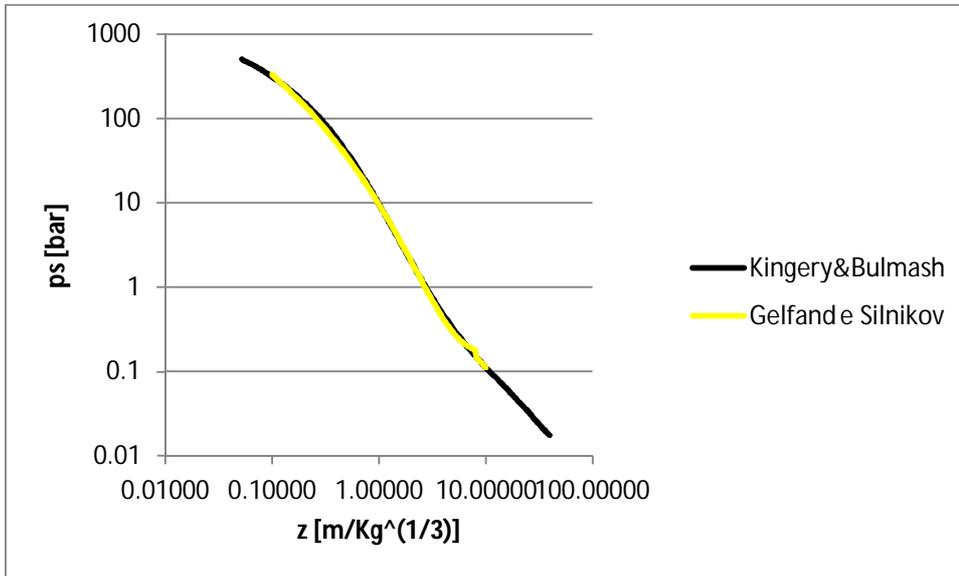


Figura 2.9. Gelfand e Silnikov vs Kingery e Bulmash.

Combinando quindi i modelli di Henrych e Kinney e Graham secondo quanto detto e mostrato nelle figure 2.7 e 2.8, si ottiene un modello ibrido, denominato “Hybrid”, la cui funzione per il calcolo del picco di pressione in bar è data dall’equazione 2.24 e il cui andamento, a confronto con la curva di Kingery e Bulmash, è visualizzato nella figura 2.10.

Hybrid (p_s)

$$p_s = \frac{808 p_0 [1 + (\frac{z}{4.5})^2]}{\sqrt{[1 + (\frac{z}{0.048})^2] [1 + (\frac{z}{0.32})^2] [1 + (\frac{z}{1.35})^2]}} \quad \text{per } 0.1 \leq z \leq 3.5 \quad (2.24)$$

$$p_s = \frac{0.662}{z} + \frac{4.05}{z^2} + \frac{3.288}{z^3} \quad \text{per } z > 3.5$$

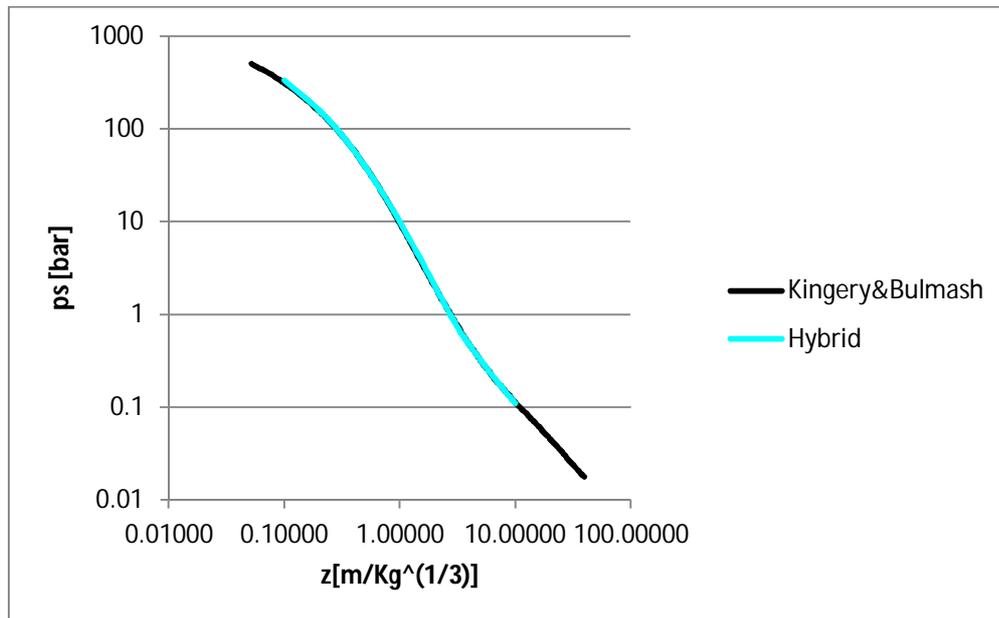


Figura 2.10. Hybrid(p_s) vs Kingery e Bulmash.

Da questa è possibile osservare come, la definizione del modello mediante l'equazione 2.24, dia risultati ottimali per il calcolo della sovrappressione del fronte d'urto in tutto il campo di definizione di z .

Ragionando allo stesso modo per la durata della fase positiva, dal diagramma di figura 2.6 si può derivare una funzione ibrida composta, per una parte dal modello di Henrych, fino a un valore di distanza scalata pari a 0,6 e per la restante parte dal modello di Sadovski. Così, riprendendo le equazioni 2.13 e 2.16 che descrivono la durata scalata della fase positiva in secondi e in funzione di z rispettivamente per i due autori appena menzionati, è possibile ricavare la funzione ibrida data dalla 2.25.

Hybrid (t_0)

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \frac{(0.107 + 0.44 \cdot z + 0.264 \cdot z^2 - 0.129 \cdot z^3 + 0.0335 \cdot z^4)}{1000} \quad \text{per } z \leq 0.6$$

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = 1.2 \cdot z^{0.5}/1000 \quad \text{per } z > 0.6$$

(2.25)

Utilizzando questo modello per diagrammare l'andamento della durata scalata relativa alla fase positiva in funzione di z , si ottiene il confronto con la curva derivata dai dati sperimentali di Kingery e Bulmash:

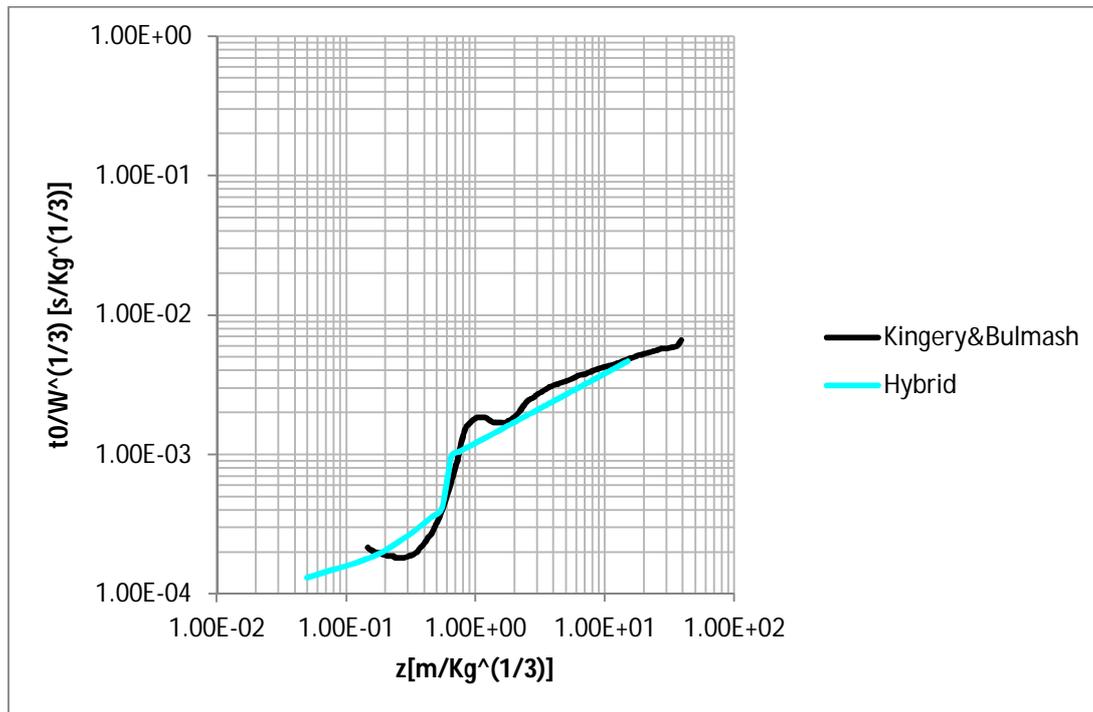


Figura 2.11. Hybrid(t_0) vs Kingery e Bulmash.

Qui, anche se il modello *Hybrid* per il calcolo della durata positiva non rispetta perfettamente l'andamento della curva di Kingery e Bulmash, come succedeva per il picco di pressione, i valori di durata ottenibili dall'utilizzo della curva azzurra sono comunque molto prossimi a quelli della curva nera, per cui si può ritenere qualitativamente buono e soddisfacente il modello ricavato.

2.3.2 Scelta dei restanti parametri

Una volta sistemate le pressioni di picco e le durate delle fasi positiva e negativa dell'onda di *shock*, bisogna analizzare i restanti parametri e, mediante un criterio di confronto, scegliere quale tra i modelli presentati sia il più affidabile per la loro predizione. I due termini caratteristici, necessari ai fini di ottenere l'andamento temporale della pressione in un punto a seguito della detonazione di una carica sferica non ancora esaminati, sono il tempo di arrivo che impiega il fronte d'urto per raggiungere la distanza di rilevamento e il coefficiente b di decadimento della pressione evidenziato nell'equazione descrittiva dei carichi di *blast* o di Friedlander.

Per quanto riguarda il tempo di arrivo t_A del fronte d'onda, riprendendo quanto detto nella sezione 2.2.2., l'unica formulazione empirica rintracciata in manuali e articoli è quella data dall'equazione 2.12. Per avere una visione completa dei

valori calcolati con questa espressione, avendo notato che nel diagramma di Kingery e Bulmash di figura 1.21 è presente una curva sperimentale di tempo di arrivo, si è pensato di riportare in funzione della distanza scalata entrambe le curve in unico grafico in modo tale da confrontarne gli andamenti. Ma, bisogna fare attenzione che la curva tratteggiata di colore viola di figura 1.21 non esibisce il tempo di arrivo vero e proprio, ma il suo valore scalato. Quindi, per confrontare questa con la funzione empirica soprascritta nell'equazione 2.12, che invece riporta il tempo di arrivo effettivo, bisogna moltiplicare tutti i suoi valori tempo scalati per la radice cubica della quantità di carica di tritolo considerata. Fatto ciò quindi, è possibile rappresentare in un diagramma doppio logaritmico le due funzioni di tempo t_A , quella data dall'equazione empirica (il cui diagramma è ottenuto facendo variare la distanza R e il peso W , visto che nella funzione non è presente z) e quella di Kingery e Bulmash moltiplicata per il peso di esplosivo alla un terzo, il cui risultato è mostrato in figura 2.12.

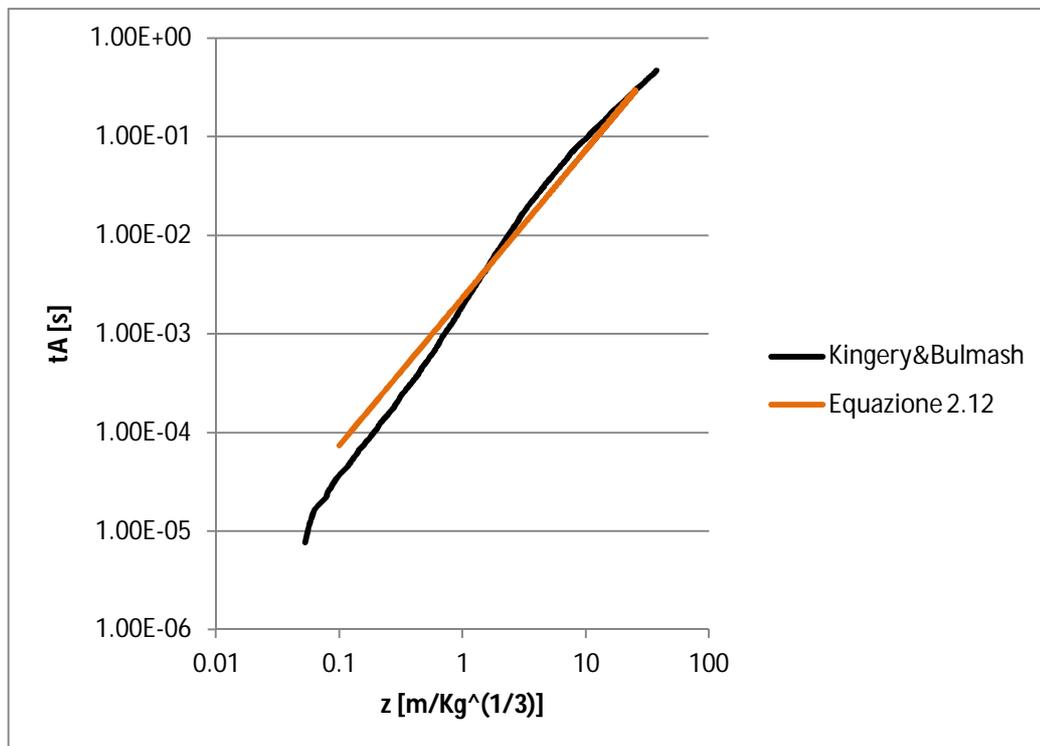


Figura 2.12. Eq.2.12 vs Kingery e Bulmash per il tempo di arrivo.

Si osserva come l'andamento dato dall'equazione 2.12 non sia esattamente quello seguito dalla curva di riferimento, anche se in buona parte l'approssimazione è complessivamente buona tranne che per bassi valori di distanza scalata, per cui lo scostamento tra le due curve aumenta un poco. Tuttavia, a parte per la scarsa importanza di questo parametro per il progetto di

strutture di protezione, il risultato ottenuto dall'utilizzo della funzione empirica è ritenuto globalmente accettabile e quindi utilizzabile per diagrammare la curva caratteristica di un'onda d'urto nelle successive sezioni.

Il coefficiente di decadimento della pressione nel tempo, invece, a differenza di tutti gli altri parametri finora trattati, non è presente nelle curve derivate dalle prove sperimentali di Kingery e Bulmash, quindi bisogna trovare un criterio di valutazione diverso da quello fin'ora utilizzato per capire quale dei modelli elencati rispetti meglio gli andamenti ideali. Nella sezione 2.2.4 sono state riportate tre fonti diverse per la valutazione di questo parametro: la prima derivata dall'impulso associato alla fase positiva (equazione 2.17), la seconda dal rapporto tra la minima e la massima pressione dell'onda d'urto (equazione 2.18) e la terza dall'espressione empirica formulata da Wei e Dharani. Osservandone la forma, si può notare che tutte e tre sono funzioni di z , per cui è possibile rappresentare in un diagramma il loro andamento al variare di questa grandezza, proprio come si è fatto finora per gli altri parametri con cui si aveva però il confronto sperimentale. Le figure 2.13, 2.14 e 2.15 rappresentano la forma data dai tre modelli di cui sopra per il coefficiente di decadenza della pressione.

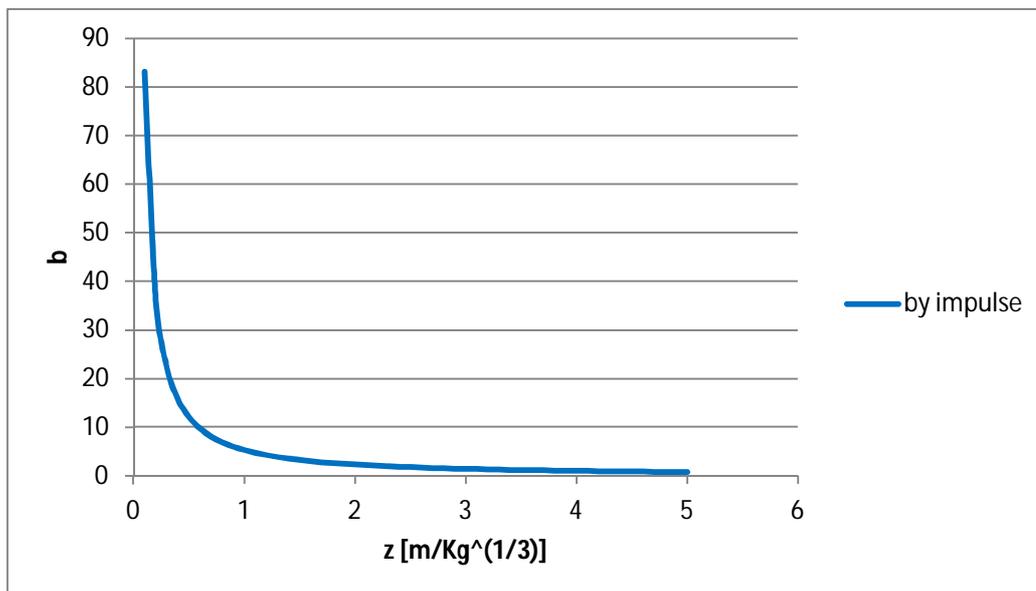


Figura 2.13. Coefficiente di decadenza derivato dall'impulso.

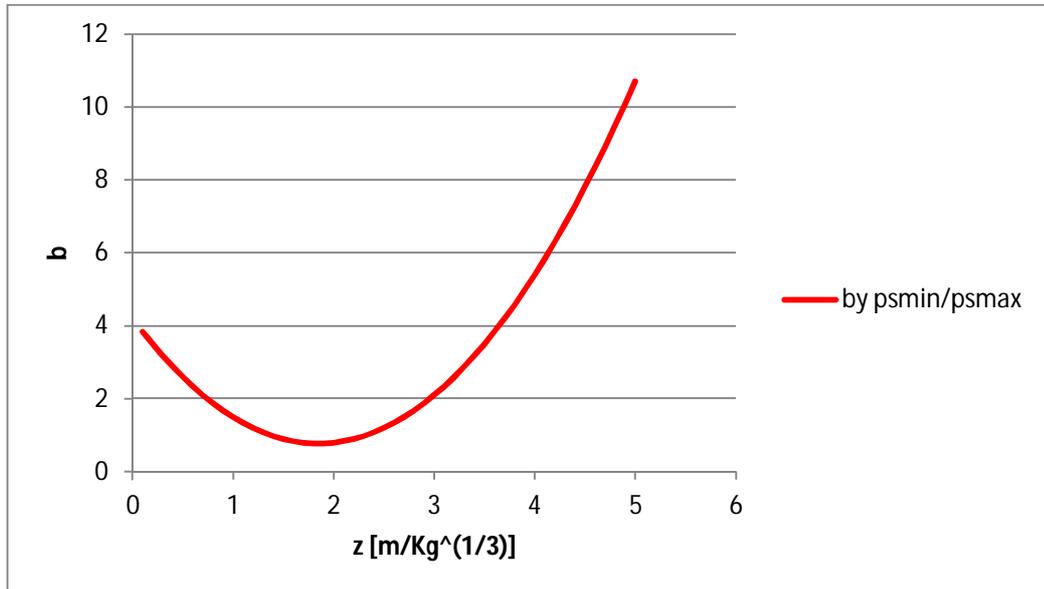


Figura 2.14. Coefficiente di decadenza derivato dal rapporto tra la minima e la massima pressione.

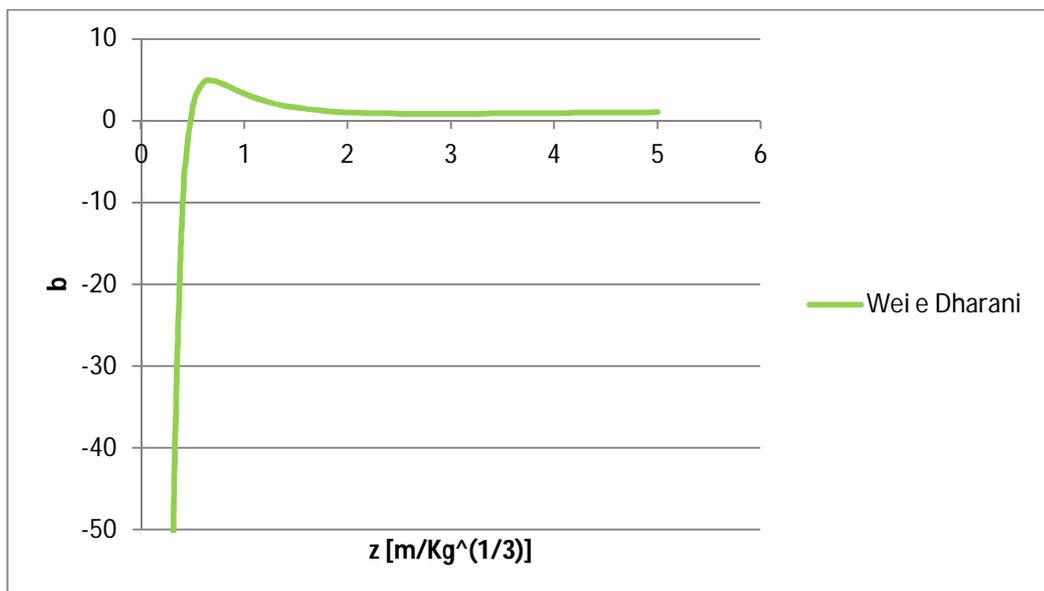


Figura 2.15. Coefficiente di decadenza di Wei e Dharani.

Da questi grafici si evince che la forma del coefficiente di decadimento della pressione, e quindi il suo valore in funzione di z , risulta differente a seconda di quale modello viene considerato per calcolarlo. Quindi, avendo già scelto le funzioni da adoperare per tutti gli altri parametri caratteristici e necessari per

l'ottenimento della pressione generata da un'esplosione, ed essendo b l'ultimo coefficiente da inserire nell'equazione di Friedlander per completarne il *set*, nelle seguenti tre figure si diagramma l'andamento temporale della pressione prodotta da una carica sferica di 20 centimetri di TNT (54,62 chilogrammi di tritolo) che si avrebbe a 5 metri di distanza dal punto di detonazione, rispettivamente per il valore di b calcolato dall'impulso, dal rapporto p_s/p_s e dalla relazione proposta da Wei e Dharani

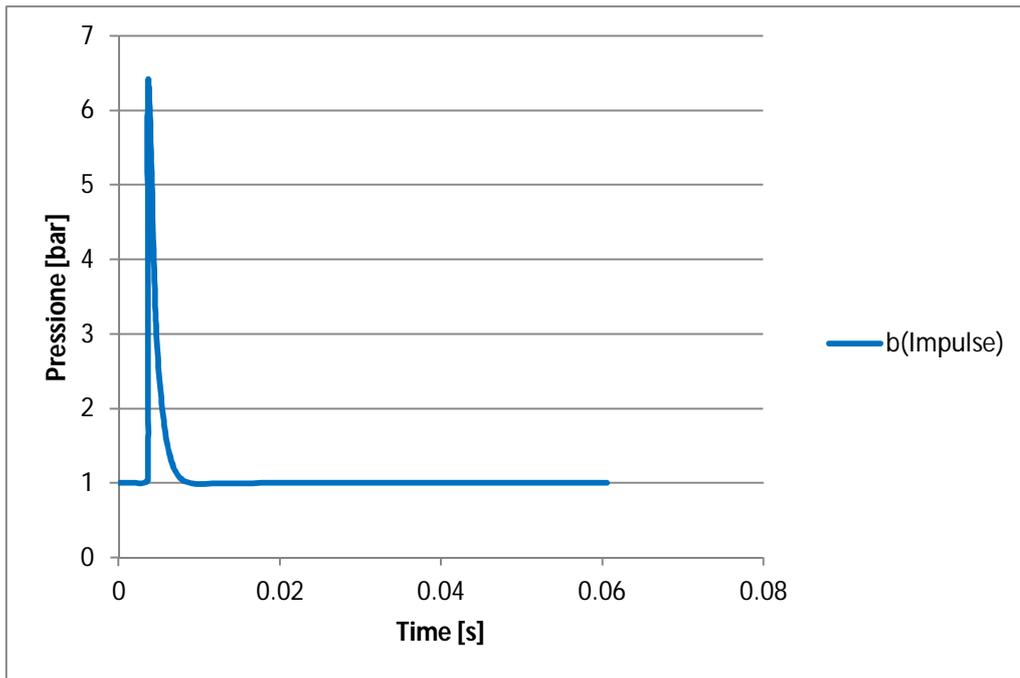


Figura 2.16. Andamento pressione-tempo con coefficiente di decadenza derivato dall'impulso.

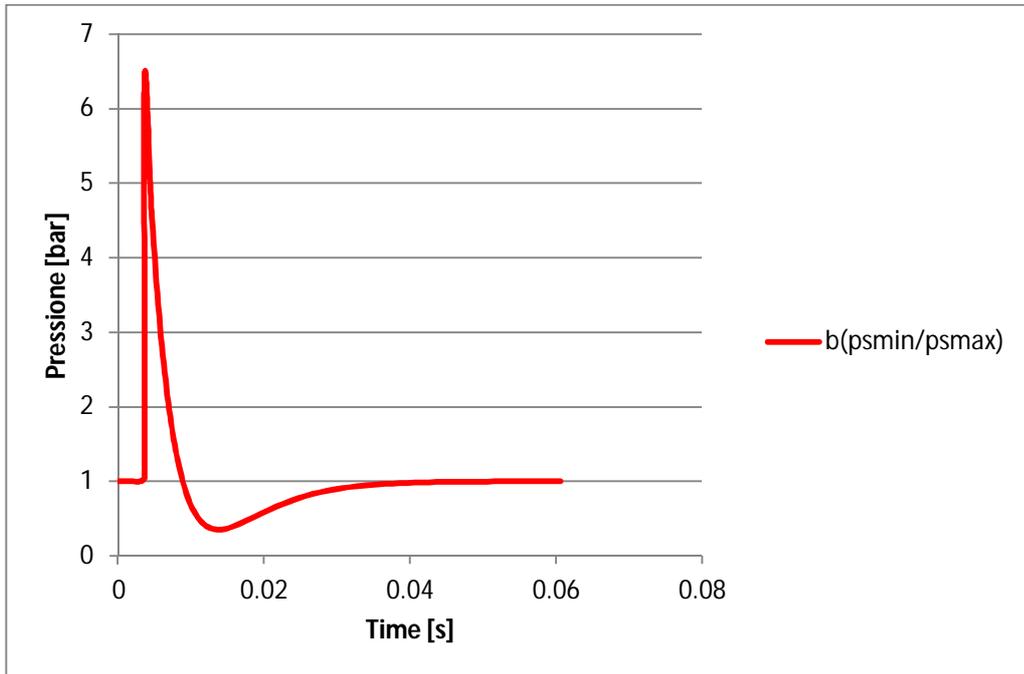


Figura 2.17. Andamento pressione-tempo con coefficiente di decadenza derivato dal rapporto p_s/p_s .

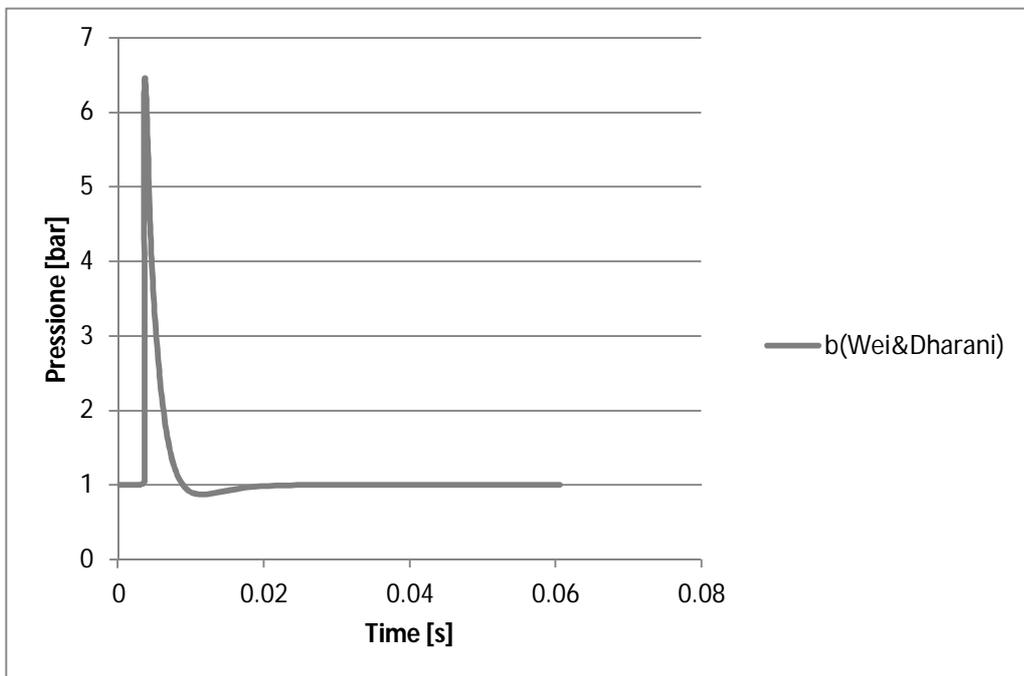


Figura 2.18. Andamento pressione-tempo con coefficiente di decadenza di Wei e Dharani.

Dall'analisi dei risultati di figura 2.16, 2.17 e 2.18, ottenute mantenendo costanti tutti i parametri esposti e scelti secondo i criteri descritti nelle precedenti sezioni variando solamente il coefficiente b di decadimento della pressione, si può subito scartare l'andamento della figura 2.16 relativa al b calcolato mediante l'utilizzo dell'impulso associato alla fase positiva, poiché questa non realizza la fase di depressione che segue lo spostamento d'aria provocato dal fronte di *shock*. Il risultato di figura 2.17 e 2.18 invece, realizza sì la depressione, ma il picco di pressione e la durata associati alla fase negativa, nel caso considerato, risultano diversi nei due grafici. La figura 2.17 infatti, a confronto con la figura 2.18, mostra un picco di depressione e una durata superiori, proprio perché il b , per la distanza scalata di 1,3178 metri su radice cubica di chilogrammo, risulta inferiore se calcolato utilizzando il rapporto p_s/p_s . Eseguendo diversi tentativi, modificando cioè la distanza scalata, si è osservato che per valori di z inferiori a 0,5 (in cui il coefficiente di figura 2.15 presenta valori negativi), il diagramma pressione-tempo calcolato con il coefficiente di Wei e Dharani subiva una distorsione non consona alle aspettative di forma. Si conclude, quindi, che il coefficiente di decadimento della pressione da selezionare per completare il *set* di parametri necessari per diagrammare empiricamente un carico di *blast* generato da una carica sferica fatta detonare in aria, è quello ricavato dal rapporto tra il picco minimo e massimo di pressione.

2.4 Modello numerico

In passato la modellazione numerica di problemi dinamici transitori complessi, ha coinvolto, oltre allo sforzo di esperti e ricercatori, una grande quantità di tempo computazionale e costi finanziari. Con il progresso e la straordinaria versatilità di pacchetti software per l'esecuzione di simulazioni numeriche, oggi sono stati sviluppati codici di calcolo in grado di stimare anche i parametri di un'esplosione. In questa sezione si vuole sviluppare un modello numerico in grado di simulare l'esplosione di una carica sferica di TNT, che dopo la sua detonazione propaga in aria senza alcun ostacolo. Le simulazioni numeriche effettuate, saranno svolte attraverso un risolutore multi-materiale di Eulero dell'idro-codice ANSYS AUTODYN, ritenuto più appropriato per la risoluzione di problemi dinamici non lineari. AUTODYN è infatti un codice agli elementi finiti esplicito particolarmente indicato per la risoluzione di problemi di transitorio veloce e *multiphysics* che implicano l'uso simultaneo ed integrato di metodi FE, CFD e "*mesh free*". È leader nel settore FSI nell'analisi dinamica transitoria di solidi, fluidi, gas e loro interazioni. Con AUTODYN si possono simulare, ad esempio, onde d'urto su edifici, penetrazione nel cemento armato, frammentazione di testate di guerra e il loro effetto su strutture aeronautiche in compositi. Per questo, in letteratura sono presenti diverse *paper* o *tutorial* [43, 44, 45] che riguardano le simulazioni di onde d'urto sviluppate attraverso questo software. In questo lavoro si farà riferimento a queste referenze per modellare l'esplosione sferica in aria libera con lo scopo di ricavare la curva caratteristica dell'onda d'urto generata a una certa distanza dallo scoppio. I risultati numerici saranno perciò utilizzati per verificare l'attendibilità del modello empirico precedentemente ricavato.

2.4.1 Analisi 2D assial-simmetrica

Data una carica sferica, la cui porzione di volume può essere individuata attraverso un cono indefinito con vertice sul suo centro, si può passare da un problema tridimensionale a un bidimensionale se si considera per la simmetria un qualunque piano passante per il suo centro, ottenendo la situazione di figura 2.19.

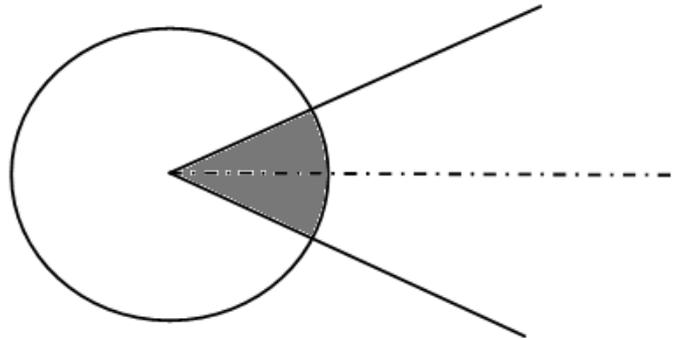


Figura 2.19. Simmetria sferica.

Da questa si può osservare che se si prende in considerazione l'asse di simmetria (linea tratteggiato) si può ulteriormente ridurre la griglia di modellazione e quindi i tempi di calcolo computazionale, passando ad un'analisi 2D assial-simmetrica che corrisponde ad una griglia monodimensionale con propagazione sferica. La simulazione monodimensionale, viene eseguita in AUTODYN attraverso una forma definita "wedge", di cui l'utente può solo impostarne la lunghezza e il programma ne da automaticamente l'angolo. Si può quindi, dopo aver caricato dalle librerie disponibili in AUTODYN i materiali necessari per la modellazione, quindi l'aria e il TNT, riempire il *wedge* di tritolo fino alla lunghezza corrispondente al raggio di carica e per il resto di aria, come rappresentato dalla figura 2.20.

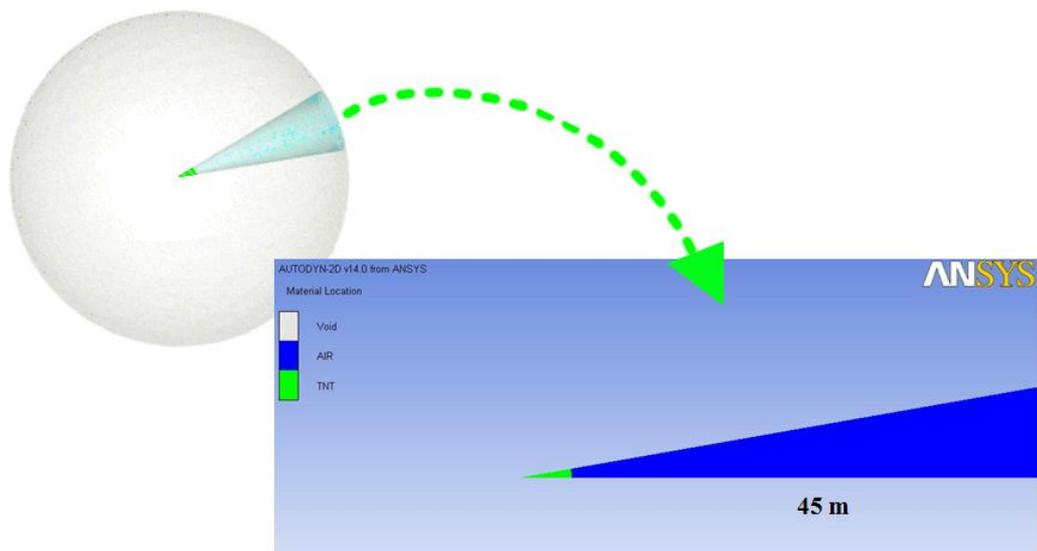


Figura 2.20. Posizione dei materiali nel modello numerico.

Nella figura 2.20 è possibile distinguere in verdino la carica esplosiva di TNT e in blu l'aria. Per il *wedge* si è impostata una lunghezza di 45 metri, in modo tale che l'onda non raggiunga nella sua propagazione l'estremità destra e quindi non si verifichino riflessioni, anche se, come mostra la figura 2.21, in questa parte sarà imposta una condizione al contorno di "*flow out*" (flusso uscente). Il punto di detonazione sarà infatti posizionato sul vertice della parte, corrispondente al centro della sfera esplosiva, da cui partirà la detonazione e successivamente propagherà l'onda di *shock*. La carica in verdino inizialmente modellata è la stessa considerata finora per il modello empirico, quindi con un diametro di 20 centimetri corrispondente a 54,62 chilogrammi di tritolo. L'equazione impostata nelle librerie del codice per l'aria è l'equazione di stato (EOS) dei gas perfetti riportata qui di seguito nella 2.26.

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (2.26)$$

In questa equazione, γ è il coefficiente di dilatazione adiabatica, ρ la densità ed e la sua energia interna. Nella tabella 2-1 vengono riportate le proprietà fisiche dell'aria.

Tabella 2-1. Proprietà dell'aria (EOS).

Variabile	Valore	Unità di misura
Densità	1.225	Kg/m ³
Coefficiente adiabatica	1.4	-
Temperatura di riferimento	288.200012	K
Calore specifico	717.599976	J/(Kg K)

In questa tabella non è stata riportata l'energia interna dell'aria, poiché questa proprietà viene assegnata alla zona blu come condizione iniziale. Impostando un valore di energia interna di $2,068 \cdot 10^5$ millijoule al millimetro cubo nello step "Initial condition" del "setup" di AUTODYN, si genera nella zona riempita con aria la pressione ambiente di 101,325 kiloPascal. Per quanto riguarda la carica di TNT invece, l'equazione di "default" utilizzata nelle librerie del programma, è l'equazione di stato di Jones-Wilkins-Lee (JWL) [46], la cui espressione è descritta nell'equazione 2.27.

$$p = A \left[1 - \frac{W}{R_1 v} \right] e^{-R_1 v} + B \left[1 - \frac{w}{R_2 v} \right] e^{-R_2 v} + \frac{W e}{v} \quad (2.27)$$

dove A, B, R_1, R_2 e W sono delle costanti, v è il volume specifico del tritolo ed e la sua energia interna. La seguente tabella mostra le proprietà della carica di TNT preimpostate nel programma e assegnate alla carica esplosiva per la detonazione.

Tabella 2-2. Proprietà TNT (JWL).

Varibile	Valore	Unità di misura
densità	1630	Kg/m³
Parametro A	3.7377e+008	KPa
Parametro B	3.7471e+006	KPa
Parametro R₁	4.15	-
Parametro R₂	0.9	-
Parametro W	0.35	-
Velocità di detonazione	6.93e+003	m/s
Energia/unità di volume	6e+006	KJ/m³
Pressione di detonazione	2.1e+007	KPa

Sulle proprietà del materiale esplosivo caricato dalle libreria bisogna settare anche l'auto-conversione in gas ideale in modo tale che dopo un'espansione del materiale superiore a 10 volte il suo volume iniziale l'equazione di stato JWL sia convertita in quella di un gas ideale [47].

La storia temporale della pressione sarà registrata a tre distanze di acquisizione dal punto di detonazione, rispettivamente di 2, 5 e 8 metri mediante il posizionamento di punti di rilevamento detti "gauges". La figura 2.21 mostra la configurazione del modello in cui, oltre al punto di detonazione (punto rosso) e ai gauges (punti rosa), viene evidenziata la condizione al contorno sull'estremità destra del *wedge* di flusso uscente.

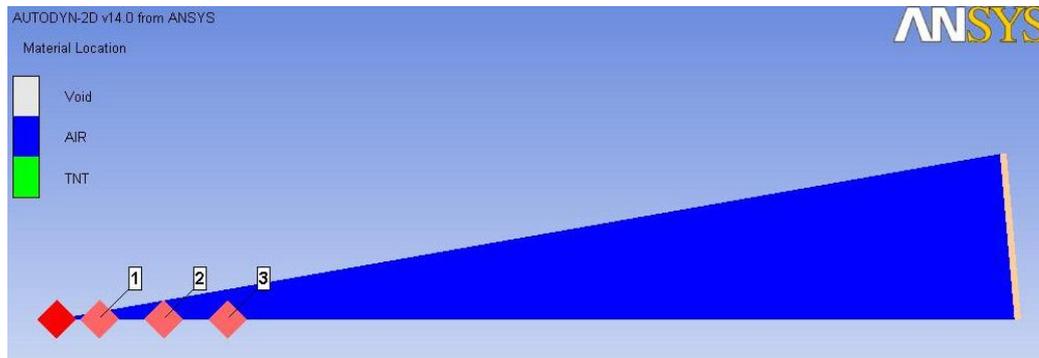


Figura 2.21. Punto di detonazione, gauges e condizione al contorno.

La griglia di partenza utilizzata per la prova, consta di 450 elementi su 45 metri di lunghezza del *wedge*, il che vuol dire che la dimensione di un elemento è pari a 100 millimetri. La forma degli elementi che costituiscono la griglia viene impostata automaticamente da AUTODYN a seconda della forma della parte. Per il *wedge* gli elementi sono di forma rettangolare, di base pari al rapporto tra la lunghezza della parte e il numero di elementi selezionato dall'operatore, mentre l'altezza è definita in automatico dal programma in funzione dell'angolo del *wedge*, che a sua volta dipende dalla lunghezza impostata.

L'ultimo *step* prima di lanciare il modello, è quello di settare il tempo di simulazione, che nel caso in esame è stato scelto pari a 54,1 millisecondi in modo tale che la pressione abbia il tempo necessario per portarsi alla pressione atmosferica dopo aver creato la depressione per tutti i *gauges*.

Le figure 2.22, 2.23 e 2.24 mostrano la propagazione dell'onda d'urto per tre diversi istanti temporali.

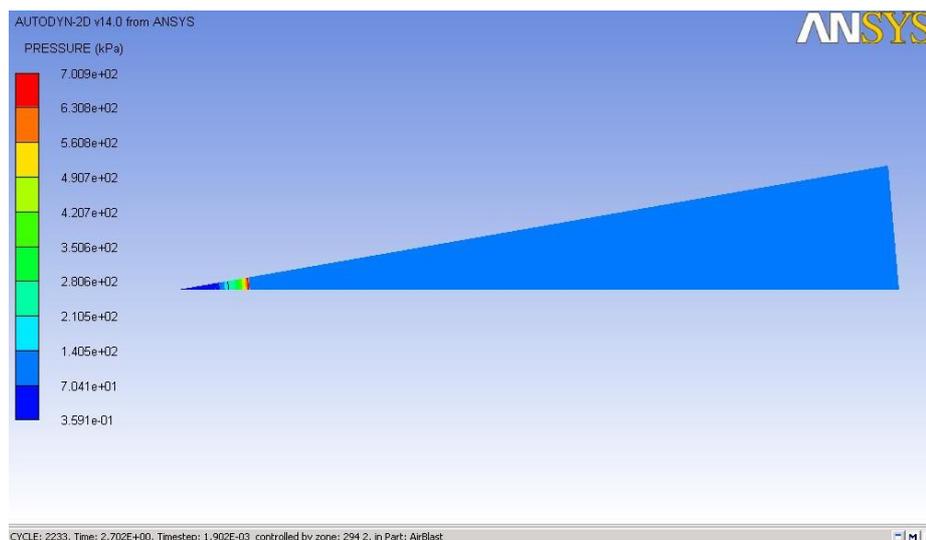


Figura 2.22. Propagazione dell'onda d'urto dopo 2,7 millisecondi.

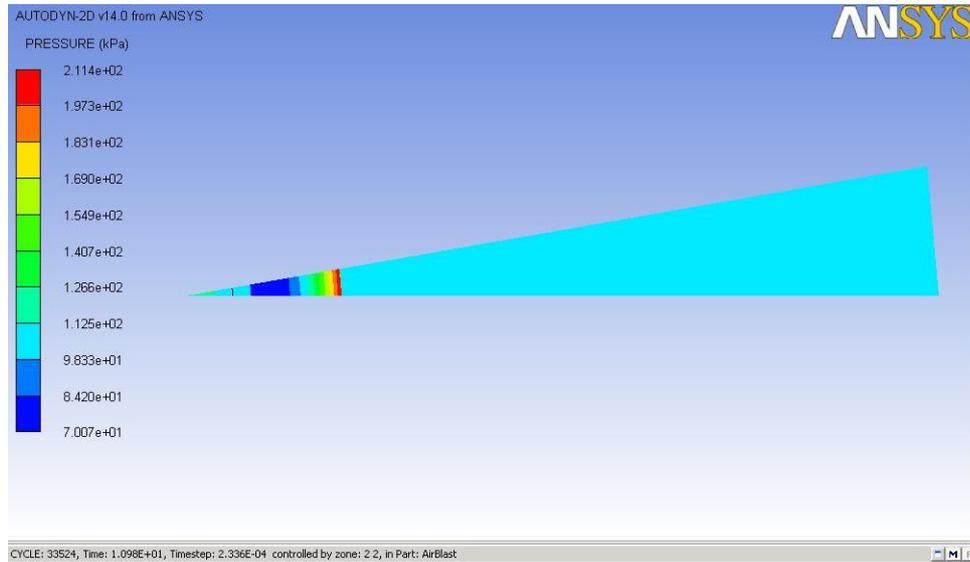


Figura 2.23. Propagazione dell'onda d'urto dopo 11 millisecondi.

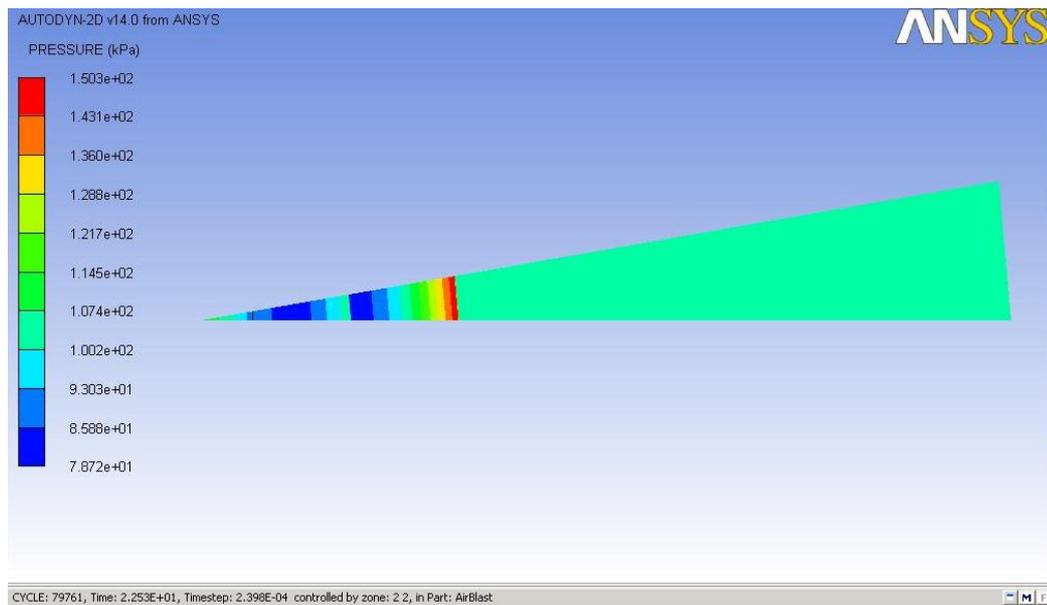


Figura 2.24. Propagazione dell'onda d'urto dopo 22,53 millisecondi.

In queste figure è possibile notare, oltre al tempo e al ciclo di simulazione, la scala cromatica della pressione in kiloPascal, che mostra come il picco di pressione decresca all'aumentare della distanza, la depressione che si genera dopo il passaggio del fronte d'urto e il valore di pressione atmosferica nella zona non ancora disturbata dal passaggio dell'onda.

Il tempo di computazione impiegato dal calcolatore per lo svolgimento di questa simulazione, in cui è stata selezionata una *Mesh* con 450 elementi, è stato molto breve. I picchi di pressione ottenuti, inoltre, alle tre distanze considerate sono risultati di 18,4 bar a 2 metri, 4,2 bar a 5 metri e di 2,21 bar a 8 metri. Confrontando il picco di pressione ottenuto a 5 metri con quello dato dal modello empirico, in cui il picco di pressione a 5 metri con la stessa carica sferica di 54,62 chilogrammi di TNT risultava pari a 6,39 bar, ha destato il sospetto che la *Mesh* selezionata fosse troppo grossolana per ottenere una buona precisione nei risultati.

2.4.2 Mesh refinement

Si è pensato quindi di infittire la *Mesh* per cercare di capire cosa succedesse al risultato ottenuto dalla simulazione precedente, in cui era stata selezionata una griglia di 450 elementi su 45 metri. Nel provare ad aumentare il numero di elementi sulla lunghezza del *wedge*, ripetendo esattamente gli stessi passaggi visti sopra, si è potuto constatare che il picco di pressione aumentava avvicinandosi quindi a quello calcolato con la modellazione empirica. Sono state eseguite allora diverse prove, dove a ogni test successivo veniva aumentato il numero di elementi finiti, riducendone quindi la loro dimensione, sulla lunghezza del *wedge* con lo scopo di raggiungere un valore costante di picco che confermasse così l'attendibilità dei risultati. Si riporta in figura 2.25, 2.26 e 2.27 l'andamento del picco di pressione ottenuto con l'aumentare del numero di elementi sulla lunghezza del *wedge* di 45 metri con la carica sferica di TNT finora considerata rispettivamente a 2, 5 ed 8 metri di distanza.

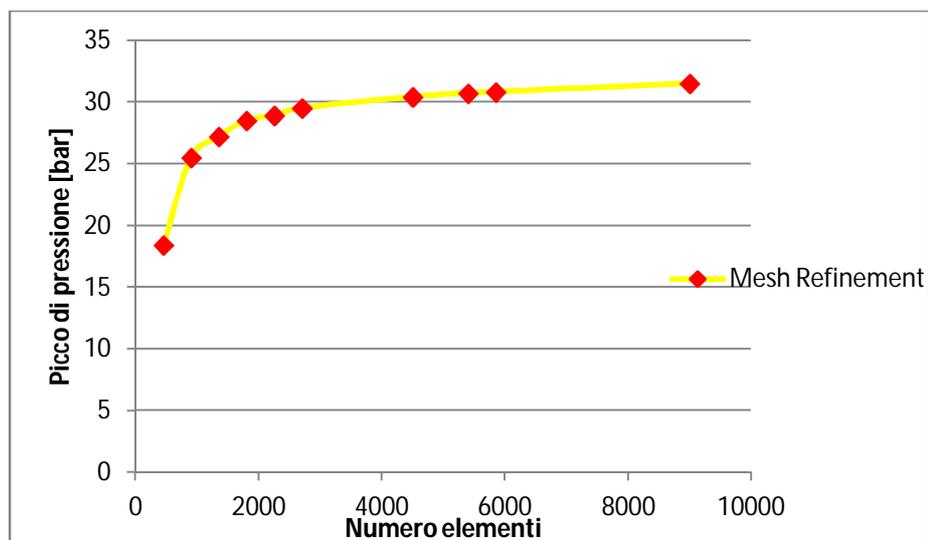


Figura 2.25. Picco di pressione a 2 metri vs numero elementi.

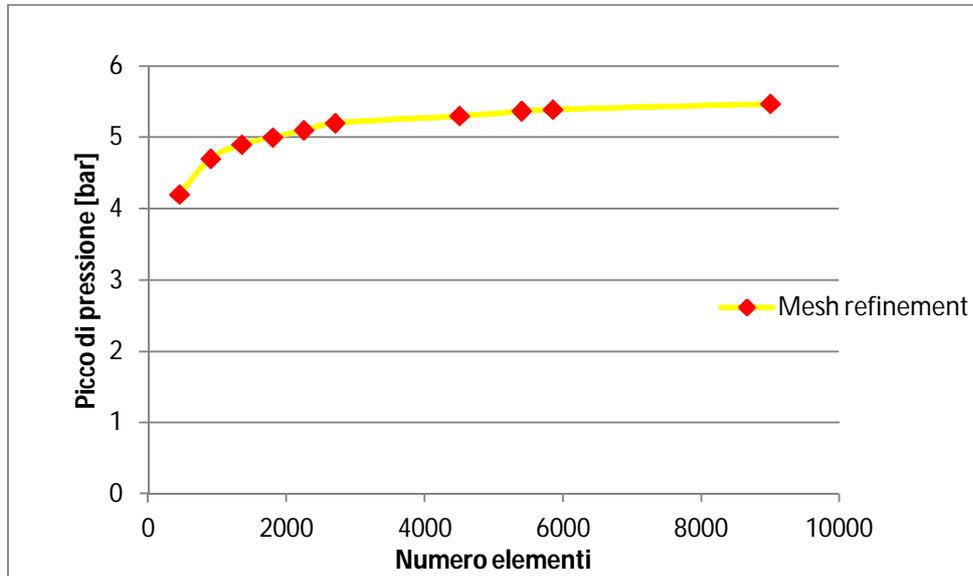


Figura 2.26. Picco di pressione a 5 metri vs numero elementi.

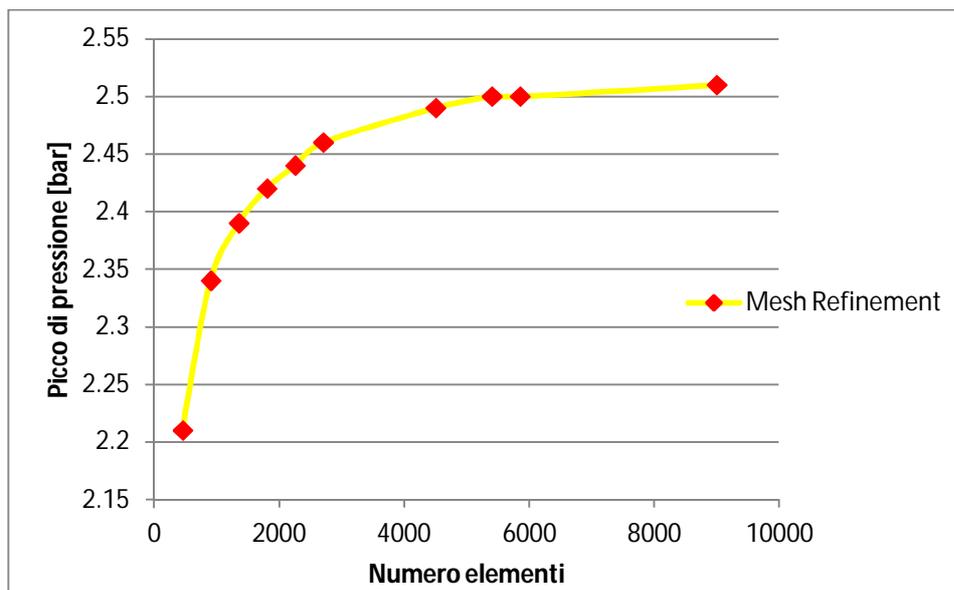


Figura 2.27. Picco di pressione a 8 metri vs numero elementi.

Le tre figure precedenti mostrano che all'aumentare del numero di elementi il picco di pressione aumenta fino alla convergenza. Lo scarto negli ultimi due punti infatti è relativamente basso al cospetto dell'enorme aumento impartito alla *Mesh*. La stessa cosa può essere mostrata diagrammando l'andamento del picco di pressione in funzione della dimensione degli elementi che, come detto,

diminuisce all'aumentare del numero di celle inserite nella lunghezza del *wedge*. Le figure 2.28, 2.29 e 2.30 mostrano come il picco di pressione aumenti al diminuire della dimensione degli elementi che costituiscono la *Mesh* alla distanza di 2, 5 e 8 metri dallo scoppio.

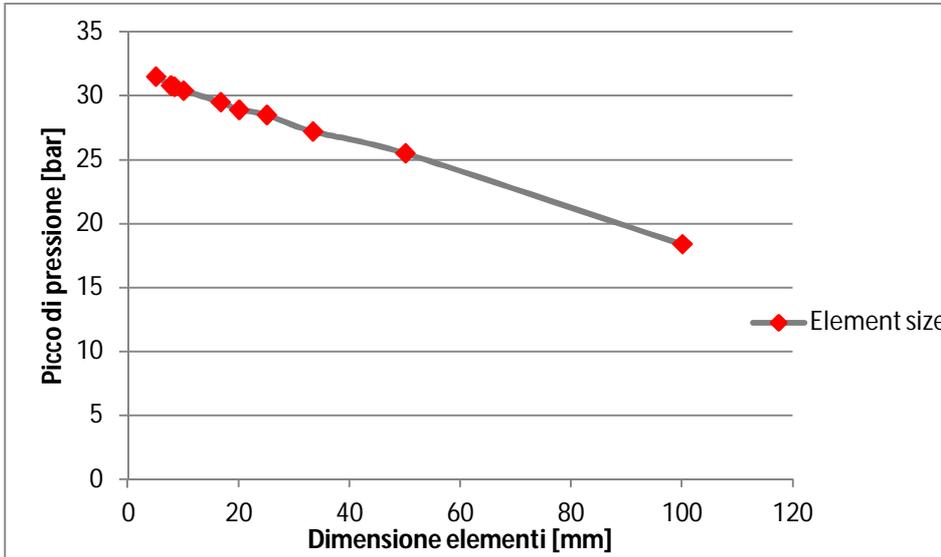


Figura 2.28. Picco di pressione a 2 metri vs dimensione elementi.

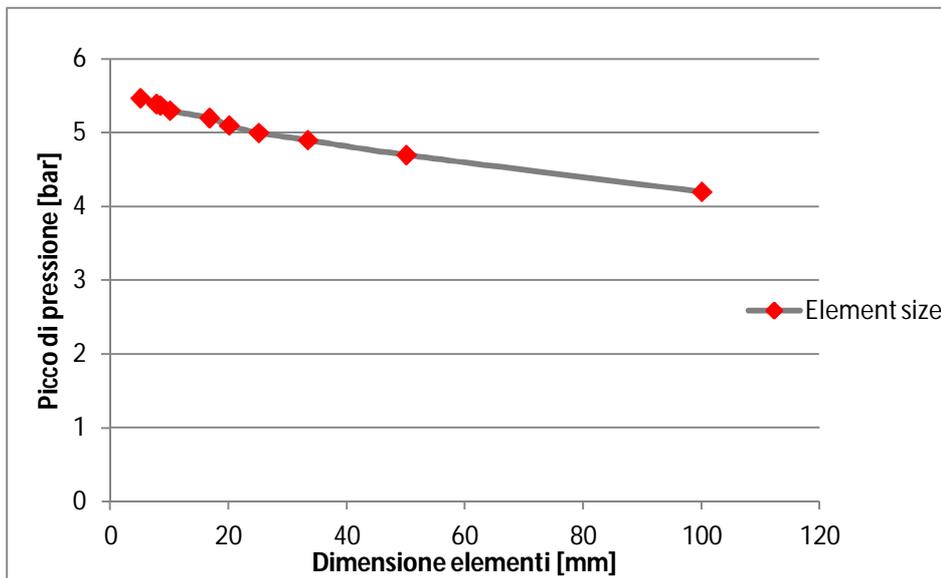


Figura 2.29. Picco di pressione a 5 metri vs dimensione elementi.

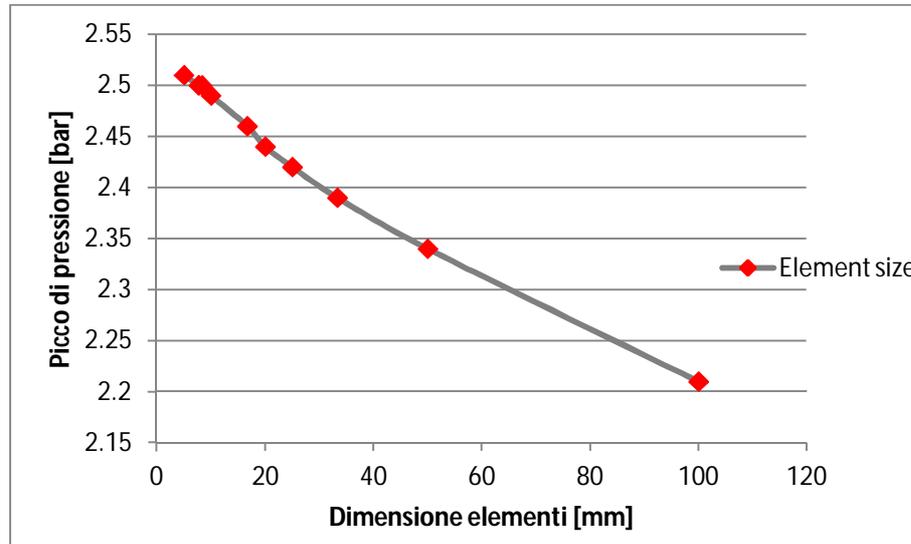


Figura 2.30. Picco di pressione a 8 metri vs dimensione elementi.

Da queste figure pur se l'andamento del picco di pressione potrebbe sembrare crescente e quindi non convergere ad un valore costante, come invece mostravano le figure a esse corrispondenti in funzione del numero di elementi, si può notare che, al diminuire della dimensione, i punti rappresentanti il valore di picco sono quasi sovrapposti e quindi provano la convergenza anche in questo caso. Naturalmente con l'infittire la *Mesh*, aumentando cioè il numero di elementi finiti, il tempo di calcolo computazionale cresce drasticamente come mostra la figura 2.31, in cui viene rappresentato l'andamento temporale in minuti all'aumentare del numero di elementi.

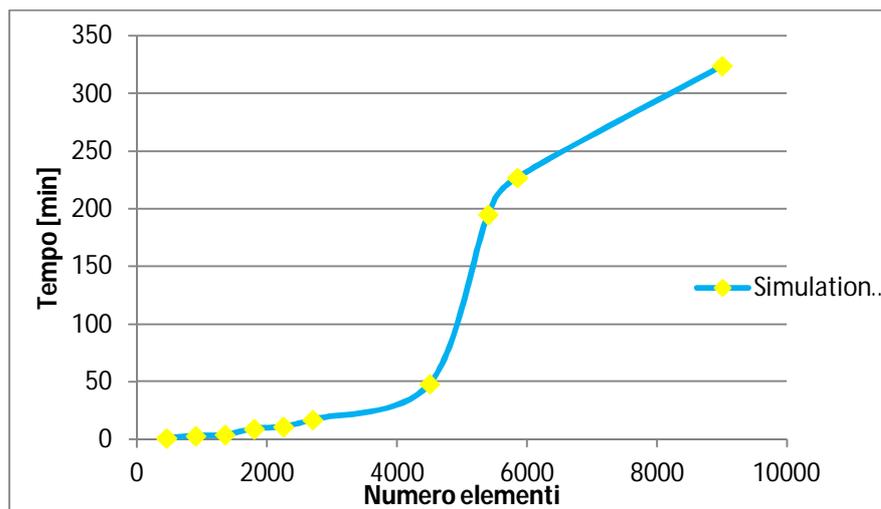


Figura 2.31. Tempo computazionale vs numero elementi.

Bisogna dunque trovare un “*trade off*” tra la precisione dei risultati, ottenuta infittendo la *Mesh*, e l’aumento dei tempi di simulazione. Dall’analisi delle figure presentate in questa sezione, visti i risultati del modello empirico precedentemente ricavato, si è scelto il penultimo punto come compromesso tra il tempo di calcolo e la buona approssimazione numerica dei risultati. La *Mesh* selezionata ha perciò 5850 elementi su 45 metri di lunghezza del *wedge*, dunque una dimensione degli elementi di 7,7 millimetri, la cui griglia è mostrata nella sottostante figura e alla quale corrisponde un tempo di calcolo di circa 227 minuti.

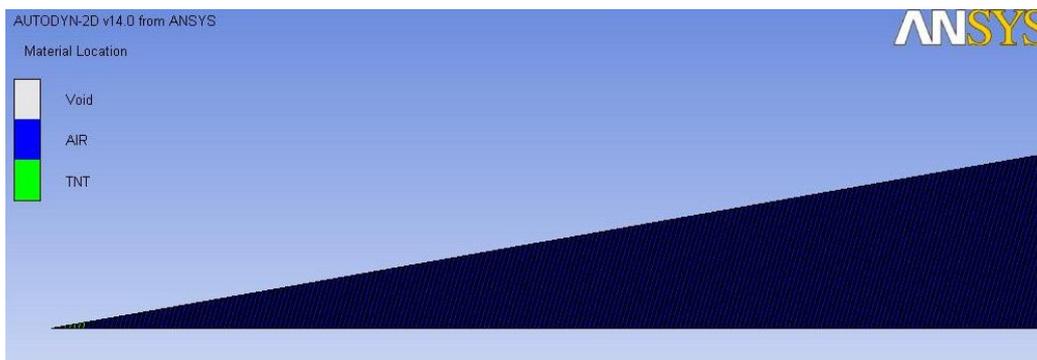


Figura 2.32. Mesh selezionata.

2.4.3 Risultati e commenti

Considerando la *Mesh* selezionata con 5850 elementi sulla lunghezza della parte, è stata eseguita la simulazione numerica per la solita carica sferica di TNT con un raggio di 20 centimetri corrispondente a 54,62 chilogrammi di tritolo. I picchi di pressione ottenuti con questo accorgimento sui punti di rilevamento sono rispettivamente di 30,8 per il *gauges* a 2 metri, di 5,39 per quello a 5 metri e di 2,5 per quello a 8. Si assiste dunque ad un effettivo avvicinamento al picco di pressione precedentemente considerato a 5 metri con la modellazione empirica pari a 6,39 bar, rispetto a quello che si era calcolato inizialmente con una *Mesh* di 450 elementi. Questo risultato mostra come al diminuire della dimensione degli elementi aumenta l’accuratezza dell’analisi e contemporaneamente il tempo di soluzione. Calcolando il valore di picco generato dal fronte d’urto a una distanza di 2 e 8 metri con il modello empirico *Hybrid* si ottengono i valori rispettivi di 36,9 bar e 2,81 bar. Dal confronto con i picchi di pressione ottenuti mediante la simulazione numerica, si può notare in tabella 2-3 come lo scostamento tra il modello empirico e quello numerico aumenta più ci si avvicina al luogo in cui è avvenuta l’esplosione.

Tabella 2-3. Scostamento Empirico-Numerico a 5 metri per il picco di pressione.

Modello Empirico P_s [bar]	Modello Numerico P_s [bar]	Scostamento
36.9	30.8	6.8
6.39	5.39	1
2.81	2.5	0.31

Ciò è imputabile al fatto che in campo vicino probabilmente, a causa della complessità dei processi di flusso coinvolti nel formare l'onda d'urto, si ha un'influenza dei gas esplosivi sui risultati difficilmente quantificabile.

Per il confronto empirico-sperimentale dei restanti parametri si riportano nelle figure 2.33, 2.34 e 2.35 gli andamenti temporali della pressione dell'onda d'urto, rilevati alle distanze considerate, calcolati con la modellazione empirica e numerica.

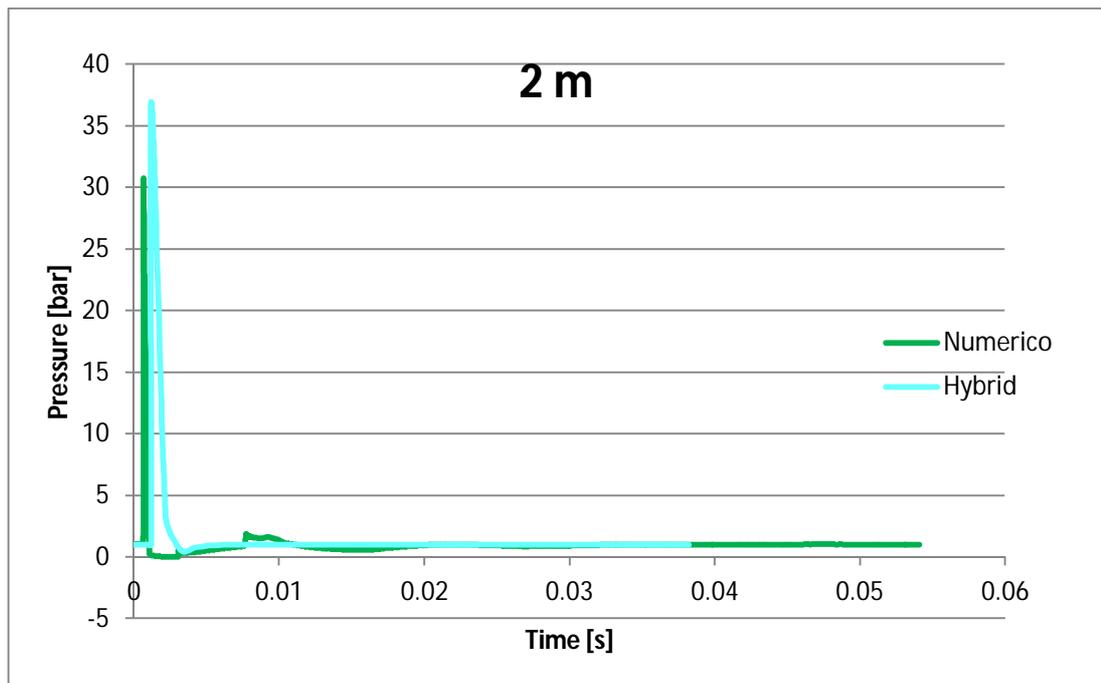


Figura 2.33. Confronto empirico-numerico a 2 metri.

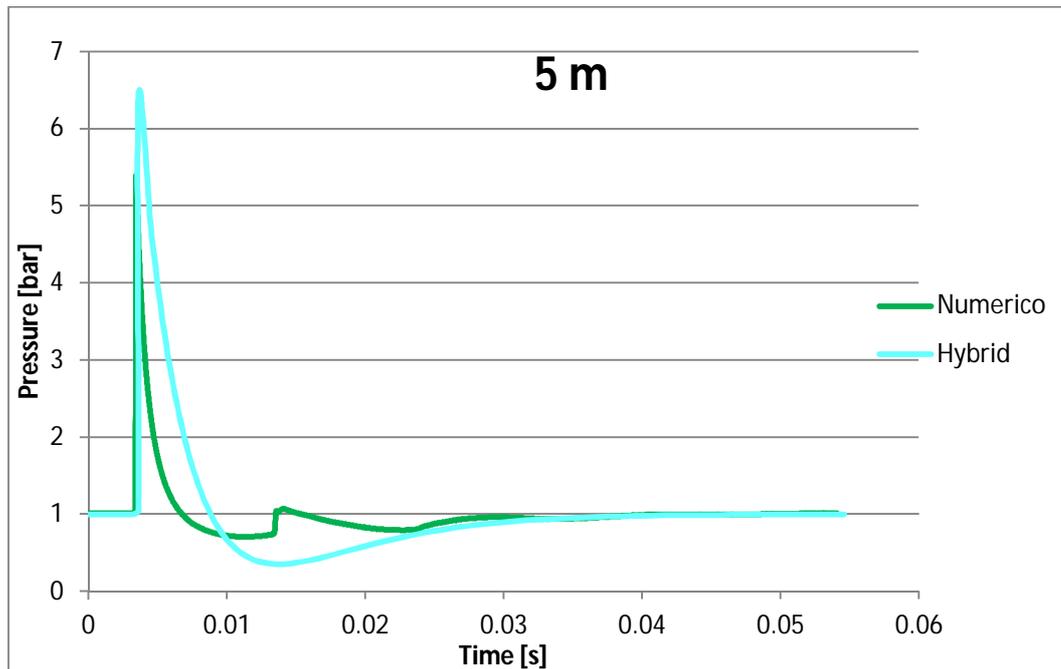


Figura 2.34. Confronto empirico-numerico a 5 metri.

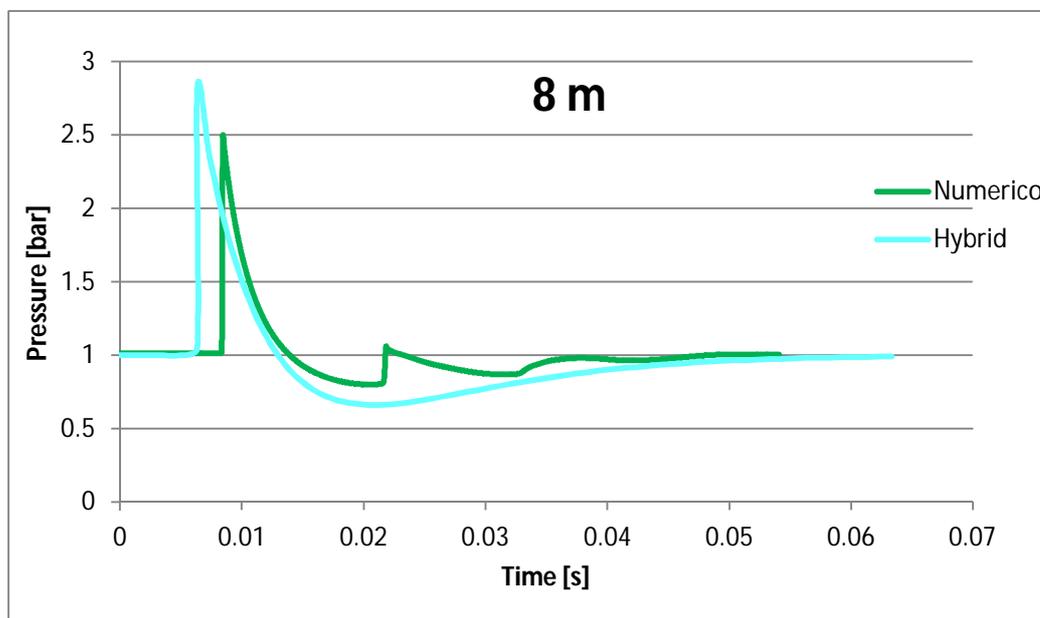


Figura 2.35. Confronto empirico-numerico a 8 metri.

Il picco secondario dato dal modello numerico in tutte e tre le figure è dovuto al risucchio generato dalla depressione formata dopo il passaggio del fronte

d'urto spiegato nella sezione 1.5 del precedente capitolo, di cui non tiene conto la modellazione empirica. Dall'analisi delle figure 2.33, 2.34 e 2.35 si può notare quanto detto a riguardo dello scostamento del picco di pressione a pagina 93 per l'intera forma d'onda. Più ci si allontana dal punto di detonazione e più la soluzione si presenta simile a quella ottenuta con la modellazione empirica. Il modello numerico comunque sottostima la durata associata alla fase positiva, mentre, come è meglio mostrato in figura 2.35, approssima bene la durata della fase negativa, quindi il coefficiente di decadimento della pressione avrà funzioni diverse per i due modelli. Anche il picco di depressione migliora con la distanza dall'esplosione. Osservando in sequenza le tre figure è possibile osservare infine che, il tempo di arrivo è diverso alla stessa distanza per i due modelli, infatti, a 2 metri il modello numerico giunge con un tempo minore (quindi con maggiore velocità), ma successivamente, a 5 ed 8 metri, viene raggiunto e superato dal modello empirico.

Tutti i calcoli svolti per la carica di 20 centimetri di TNT sono stati identicamente eseguiti per una carica di 35 centimetri, corrispondente a 292,74 chilogrammi di tritolo, con cui si sono ottenuti risultati di valori diversi ma di uguali considerazioni e comportamento.

Nel progetto di strutture di protezione dai carichi derivanti da un'esplosione, come si è spesso ribadito, i parametri d'interesse per il dimensionamento sono il picco di pressione e la durata della fase positiva. Considerando quindi il modello empirico per la costruzione di un'interfaccia grafica utente, visto che i picchi di pressione e le durate calcolate sono simili ma superiori a quelle ottenute con la modellazione numerica, ci si pone in condizioni di sicurezza per i fini progettuali di ricerca per resistere a un carico di *blast*.

3 Graphical User Interface

3.1 GUI Matlab

Un'interfaccia grafica utente (GUI) è un *display* grafico in una o più finestre contenente diversi controlli, che consentono ad un utente di eseguire attività interattive. Si tratta cioè di una finestra di dialogo tra l'utente e il programma.



Figura 3.1. GUI.

L'utente della GUI non ha bisogno di conoscere lo *script* o il tipo di comandi scritti in esso per utilizzarla. Quindi, a differenza dei programmi di codifica per eseguire le operazioni, non è necessario che l'utente di un'interfaccia grafica sia a conoscenza dei dettagli su come vengono eseguite le attività impostate sulla finestra. Una GUI, creata usando il *tools* Matlab, può eseguire diverse attività, tra cui: svolgere calcoli, leggere e scrivere dati, comunicare con altre interfacce e visualizzare dati come tabelle o grafici.

Creare una GUI significa quindi:

- Costruire l'interfaccia
Occorre progettare e realizzare l'aspetto grafico della GUI e quindi definire quali oggetti inserire e come disporli.
- Programmare ogni oggetto
Per ogni oggetto occorre definire l'azione (sequenza di comandi), chiamata *callback*, che deve essere eseguita quando l'oggetto viene attivato.

Matlab mette a disposizione un ambiente grafico, GUIDE, GUI Design Environment (ambiente di progettazione interfacce grafiche utente), che rappresenta un semplice strumento per la realizzazione d'interfacce grafiche.

Al momento dell'avvio, Matlab genera in modo automatico due file:

- un Fig-file (file con estensione *.fig*) che contiene la completa descrizione grafica della GUI e,
- un M-file che contiene le funzioni che avviano e gestiscono la GUI e le *callbacks* relative a tutti i controlli inseriti nella finestra. In particolare per ogni controllo è presente l'intestazione della funzione che si deve avviare quando si genera l'evento relativo al comando in esame. Il programmatore non deve fare altro che inserire il codice voluto all'interno delle *callbacks*.

GUIDE si avvia dal *prompt* dei comandi cliccando su START, portandosi su MATLAB e quindi su GUIDE (GUI builder). All'avvio GUIDE, come mostra la figura 3.2, mette a disposizione quattro diversi modelli di GUI che l'utente può modificare a suo piacimento per creare la propria interfaccia grafica.

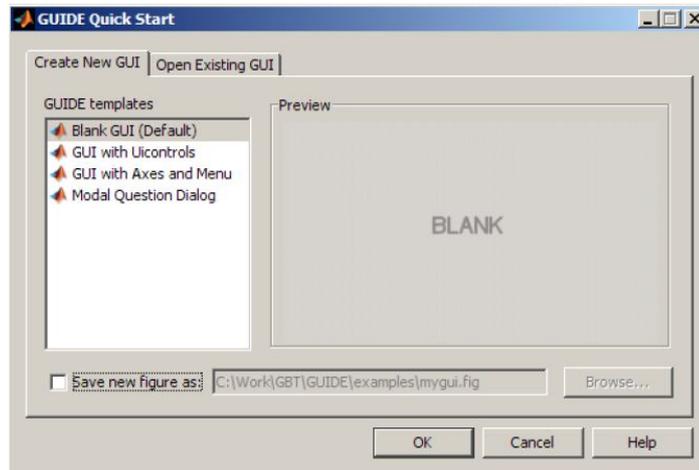


Figura 3.2. GUIDE Quick Start.

Una volta selezionato il modello si avvia il *tool* riportato nella seguente figura, dove sono state evidenziate le funzioni principali per operare nella costruzione della finestra di dialogo.

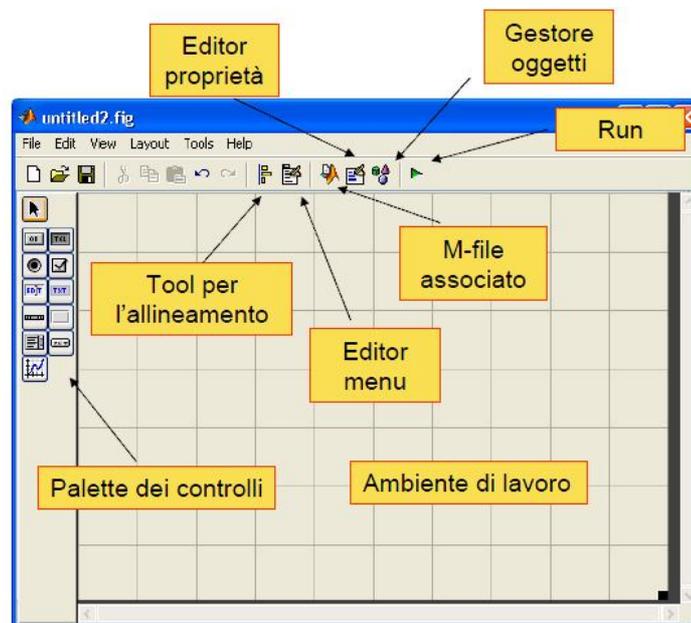


Figura 3.3. Layout Editor GUIDE.

Il *Layout Editor* di figura 3.3 permette di selezionare i componenti attraverso le palette dei controlli presenti sul suo fianco sinistro e di costruire in modo grafico il *layout* della GUI. Gli oggetti che possono essere inseriti nell'ambiente di lavoro per costruire l'interfaccia, raccolti nelle palette dei controlli, sono:

- Push Button;
- Slider;
- Radio Button;
- Check Box;
- Edit Text;
- Static Text;
- Pop-up Menu
- Listbox;
- Toggle Button;
- Axes;
- Panel;
- Button Group.

Il *tool* per l'allineamento consente, invece, di posizionare i vari oggetti in modo adeguato e può essere avviato dalla barra di comando, evidenziata nella figura 3.3, oppure dal menù in alto cliccando su "Tools".

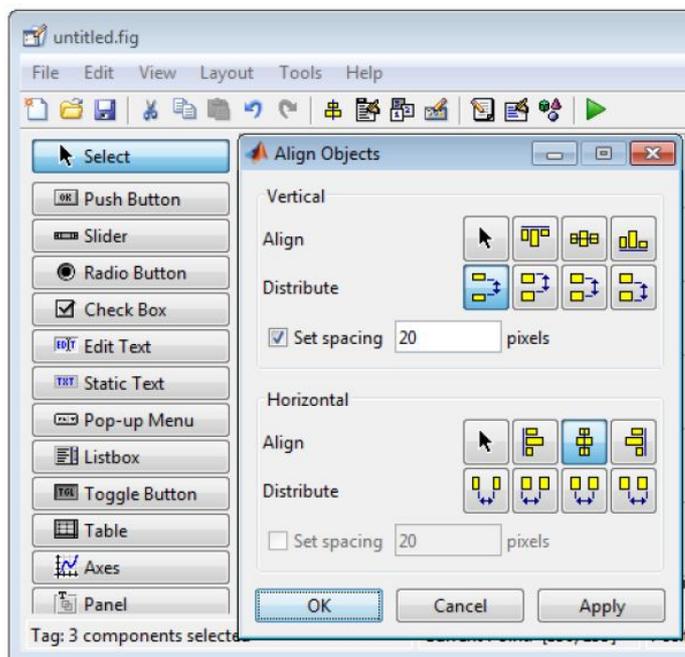


Figura 3.4. Tool per l'allineamento.

Ogni oggetto inserito nell'ambiente di lavoro ha un proprio *Property Inspector*, che permette di accedere alle sue proprietà e di modificarle. Si avvia, come mostra la figura 3.3, dalla barra di comando selezionando l'icona "Editor Proprietà" oppure cliccando due volte o con il tasto destro del mouse sull'oggetto, o anche dal menù.



Figura 3.5. Property Inspector.

Ogni oggetto possiede un certo numero di proprietà, che possono essere esaminate proprio nel *Property Inspector*. Tutte le proprietà sono modificabili e acquisibili in fase di progettazione della GUI, oppure anche durante il suo funzionamento con le funzioni *get* e *set*. *Get*, la cui sintassi è riportata nell'equazioni 3.1, permette di acquisire il valore di una proprietà, mentre *set* permette di impostare il valore di una proprietà attraverso la 3.2.

$$var = get(puntatore_oggetto, 'proprietà') \quad (3.1)$$

$$set(puntatore_oggetto, 'proprietà', valore) \quad (3.2)$$

Il puntatore dell'oggetto è una variabile che contiene l'indirizzo di memoria in cui l'oggetto è memorizzato. I puntatori di tutti gli oggetti che compongono la GUI sono memorizzati in modo automatico in una struttura chiamata *handles*, e ad ognuno di essi si deve associare un "campo". Il nome di tale campo coincide con la stringa contenuta nella proprietà *tag* dell'oggetto. Quindi il puntatore di un generico oggetto è sempre contenuto in una variabile definita nel seguente modo:

$$\mathit{handles.stringa_Tag} \quad (3.3)$$

L'icona "*Editor menù*" e quella relativa al "*gestore oggetti*", infine, permettono rispettivamente di creare i menù della GUI e di mostrare la lista di oggetti presenti nell'interfaccia, indicando per ognuno di essi il grado di parentela con gli altri.

Una volta costruito il *layout* della GUI si può accedere all' M-file per poter inserire il codice nelle *callbacks* associate ai vari controlli, che generalmente hanno la seguente intestazione:

$$\mathit{function tag_Callback(hObject, event_data, handles)} \quad (3.4)$$

Si rimanda a [48] per maggiori dettagli sulle GUI e sulla loro costruzione.

3.2 Costruzione di un'interfaccia grafica per la predizione dei carichi di *blast* generati da un'esplosione sferica in aria

Lo scopo ultimo di questo lavoro, è stato quello di costruire un'interfaccia grafica utente pratica da utilizzare e completa per i fini di stimare i carichi esplosivi generati dallo scoppio di una carica sferica a partire da un certo tipo e quantitativo di materiale esplosivo alla distanza di rilevamento che si vuole prendere in considerazione. Si capisce bene quindi che, la finestra di dialogo con cui dovrà interfacciarsi l'utente, dovrà possedere due caselle di acquisizione in cui si potrà inserire il peso di esplosivo che si vuole testare e la distanza alla quale si vuole conoscere l'effetto prodotto dalla sua esplosione.

La costruzione dell'interfaccia grafica è stata realizzata utilizzando il modello empirico descritto e validato nel precedente capitolo, in cui tutti i parametri necessari per diagrammare l'onda d'urto sono funzione della distanza scalata, quindi del peso e della distanza da digitare. Per testare diversi materiali esplosivi si è utilizzato il metodo del TNT equivalente, quindi, una volta inserita la quantità di carica, mediante bottoni (*Radio button*) corrispondenti a tre dei principali e più potenti esplosivi (HMX, RDX e lo stesso TNT), si può selezionare quale tipo di materiale è associato al peso precedentemente digitato e calcolarne quindi l'equivalente in chilogrammi di tritolo (logicamente il calcolo verrà uguale al peso digitato se l'esplosivo selezionato è il TNT). Per spaziare sulla vasta gamma di materiali esplosivi conosciuti, si è aggiunta un'ulteriore casella di acquisizione in cui è possibile digitare il fattore di conversione (Tabella 1-9) per riferire al TNT un qualunque altro esplosivo si voglia esaminare. Il *layout* della GUI, riportato nella figura 3.6, mostra l'impostazione di quanto detto finora in un pannello di *input*, insieme al quale sono mostrati due assi, un pannello di *output* (in cui si otterrà il valore di picco di pressione in bar calcolato con il modello *Hybrid*), e due pulsanti.

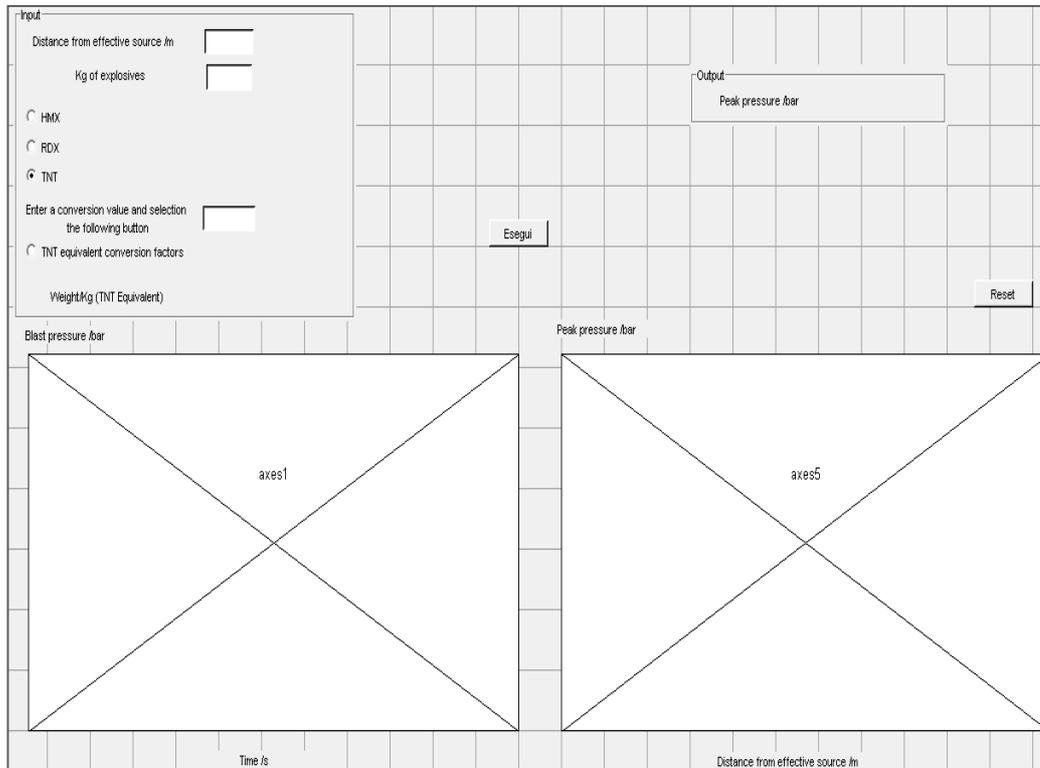


Figura 3.6. Layout GUI *blast*.

Gli assi di figura 3.6 sono, insieme al pannello che contiene l'uscita del picco di pressione generato dagli *input* selezionati, due *output*. L'asse a sinistra da infatti l'andamento temporale della pressione nel tempo dell'onda d'urto, ovvero il carico di *blast* generato alla distanza considerata dallo scoppio del quantitativo di materiale esplosivo testato, mentre l'asse sul fianco destro mostra l'andamento del picco di pressione in funzione della distanza mantenendo costante il quantitativo di carica per dare un'idea di ciò che succede con la stessa massa esplosiva se ci si avvicina o allontana al luogo dell'esplosione rispetto alla distanza considerata. Il pulsante "Esegui" sarà quello in cui, nella relativa *callback*, saranno inserite tutte le azioni che dovranno essere svolte per il calcolo di tutti i parametri, quindi del picco di pressione visualizzato, e per l'ottenimento dei diagrammi nella GUI. Il calcolo del TNT equivalente viene invece eseguito automaticamente dopo aver inserito la massa e la distanza nelle caselle di acquisizione e aver selezionato il tipo di materiale o averne digitato il relativo fattore di conversione (selezionando quindi il bottone "TNT equivalent conversion factor"), senza che sia stato premuto alcun pulsante. Ciò è dovuto al fatto che, per la conversione, le azioni da eseguire per riferire un qualunque esplosivo al TNT, sono state inserite nella funzione relativa al pannello degli *input* e non nella *callback* del pulsante. Infine nella *callback* del pulsante

“Reset” vengono immesse le righe di comando da eseguire per riportare al valore nullo tutte le variabili e cancellare i diagrammi ottenuti dalla prova precedente, per eseguirne una nuova. Terminata la compilazione dell’M-file associato alla GUI, è possibile eseguire lo script per utilizzare l’interfaccia costruita.

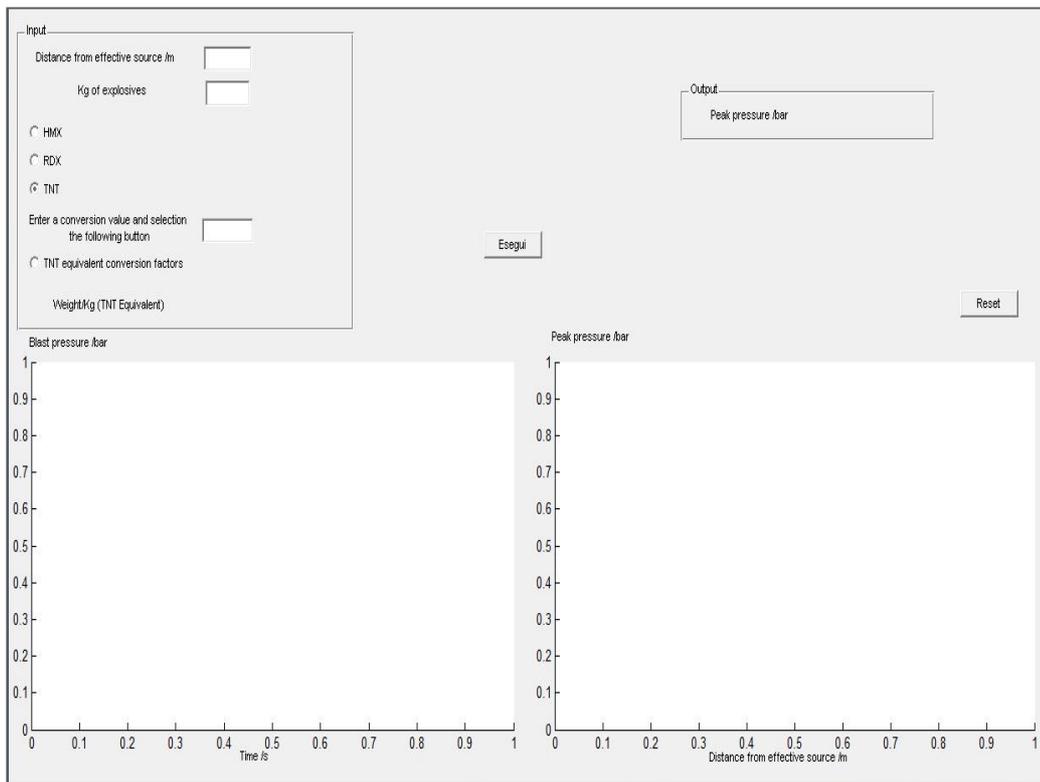


Figura 3.7. GUI blast.

Essendo fondata sul modello empirico, a sua volta definito per certi *range* di distanza scalata, i cui valori estremi sono 0,04 il minimo e 40 il massimo, presenterà un messaggio di errore se il *set* di *input* selezionato non cade all’interno di questo intervallo, poiché al di fuori di esso non è garantita l’affidabilità dei risultati. Inserendo il quantitativo di TNT utilizzato nelle precedenti sezioni, corrispondente ad una carica di 20 centimetri e pari a 54,62 chilogrammi, si può provare, come mostra la figura 3.8, che a 5 metri di distanza il picco e l’andamento temporale della pressione sono gli stessi.

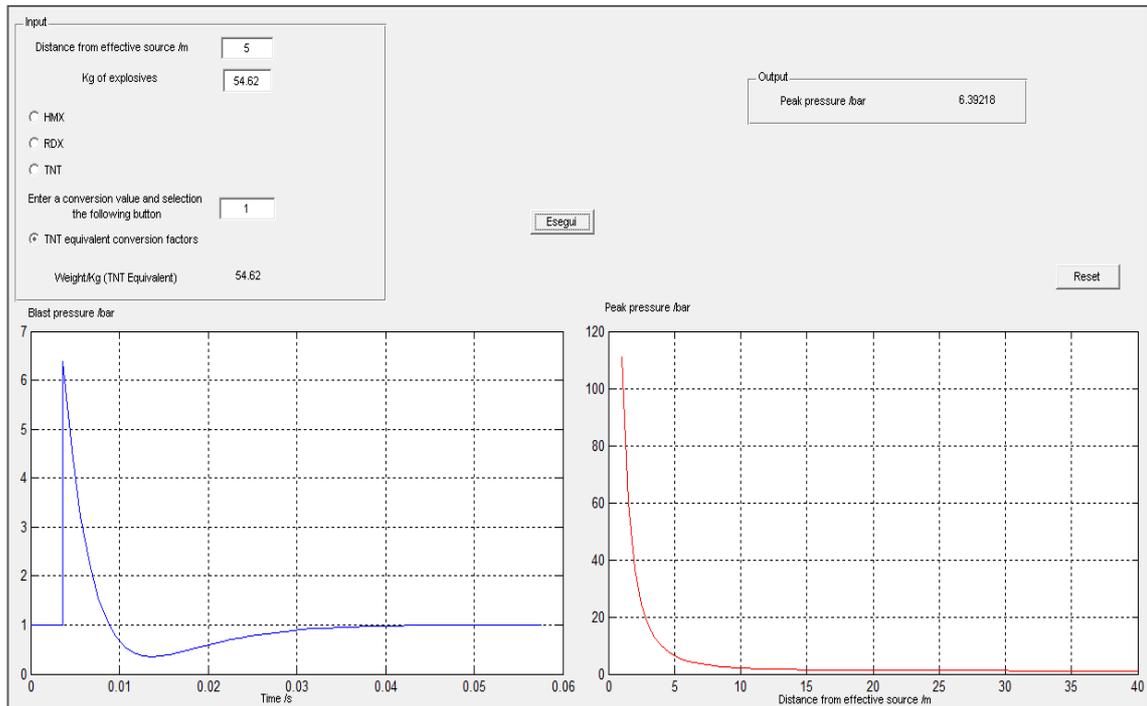


Figura 3.8. Prova GUI blast.

In questa figura è possibile osservare, oltre all'andamento del carico esplosivo nel tempo riportato in blu, il valore del picco di pressione pari a 6,39 bar. Il secondo diagramma (in rosso) mostra invece come, all'aumentare della distanza dalla sorgente esplosiva, il picco di pressione decresca drasticamente, mentre il suo valore aumenta enormemente più ci si avvicina. Affiancando a questo grafico la tabella 1-10 è possibile valutare a quale distanza bisognerebbe trovarsi per essere al sicuro da uno scoppio di 54,62 chili di tritolo in aria libera. Cliccando poi sul pulsante *Reset* si può eseguire una nuova analisi. Attraverso questa GUI si possono quindi predire i carichi di *blast* prodotti a una certa distanza dalla detonazione di una certa quantità di svariati materiali esplosivi in aria libera, senza sapere ciò che sta dietro la sua costruzione, con lo scopo di pianificare misure di sicurezza e progettare strutture di protezione.

4 Conclusioni e sviluppi futuri

4.1 Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro di tesi consiste nell'implementazione di un'interfaccia grafica utente per la predizione dei carichi di *blast* generati dall'esplosione di una carica sferica di materiale esplosivo in aria libera.

L'attività complessiva è stata svolta partendo dallo studio delle caratteristiche principali di un'esplosione, con l'obiettivo di fornire agli ingegneri strutturalisti le conoscenze necessarie per trattare il fenomeno e mantenere le proprietà reali di un materiale esplosivo. In particolare si sono analizzati i modelli di propagazione e sviluppo delle onde d'urto quando l'esplosivo viene fatto detonare senza subire alcuna riflessione prima di arrivare alla distanza considerata e sono stati presentati anche i possibili casi in cui, il fronte di *shock* generato dallo scoppio, interagisce con il suolo prima di raggiungere la distanza alla quale si vogliono rilevare gli effetti prodotti. Si sono dunque descritte le procedure da seguire per la predizione dei carichi esplosivi generati per il caso di esplosione in aria libera, esplosione al suolo ed esplosione ad un certa altitudine rispetto al terreno, che appartengono alla categoria di esplosioni non confinate. È stato poi trattato, in linea generale, l'effetto del confinamento e sono state riportate le tolleranze umane alle pressioni e agli urti, in modo da poter comprendere quale carico sia sopportato dal personale e quale no.

Appoggiandosi ai modelli empirici presenti in letteratura su diversi documenti, è stato derivato un modello ottimo per il calcolo dei parametri di maggiore interesse per il progetto di strutture di protezione, sulla base del quale si è costruita la GUI. Il modello empirico, derivato dalla combinazione di formule già esistenti, è stato successivamente validato dal confronto con un'analisi numerica eseguita attraverso il codice di calcolo ANSYS AUTODYN. Data la complessità e l'instabilità del fenomeno, si può concludere che i risultati ottenuti dal confronto sperimentale-empirico-numerico sono abbastanza buoni per la previsione dei carichi derivanti dallo scoppio di una carica esplosiva in campo aperto. L'affidabilità dei risultati degenera un poco quando si considera una distanza di rilevamento prossima al luogo in cui è avvenuta l'esplosione, poiché in campo vicino, a causa della complessità dei processi di flusso coinvolti nel formare l'onda d'urto, si ha un'influenza dei gas esplosivi sui risultati difficilmente quantificabile. Si è così, sulla base della modellazione empirica derivata, costruita un'interfaccia grafica utente pratica e completa in cui è possibile valutare il carico di *blast* generato dallo scoppio di un dato quantitativo e tipo di materiale esplosivo alla distanza voluta, nel rispetto del campo di

affidabilità e definizione del modello. In questa è possibile, attraverso la lettura di un altro diagramma, leggere cosa succede nell'intorno della distanza considerata con lo stesso quantitativo di esplosivo, senza la necessità di cambiare la distanza e rieseguire i calcoli. L'utente può quindi, senza conoscere ciò che sta dietro la sua elaborazione, interfacciarsi con semplicità e facilità con la GUI costruita in questo lavoro per testare diversi materiali esplosivi, di vario peso e valutarne gli effetti prodotti.

4.2 Sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri riguardano sostanzialmente la modellazione dello scoppio di una carica esplosiva con la presenza del terreno. La complessità del fenomeno aumenta man mano che si considera un'esplosione al suolo e quella ad una certa altitudine da esso, in cui l'onda d'urto generata, a causa della riflessione e della sua continua propagazione, viene rafforzata generando un'onda di Mach. Avvicinarsi alla realtà è dunque un passo non semplice da compiere, e per questo, in letteratura la modellazione empirica scarseggia quando si vogliono valutare gli effetti prodotti da un'onda d'urto generata dalla detonazione di una carica al suolo e ancor più ad una determinata altezza da quest'ultimo. Si potrebbe quindi effettuare una modellazione numerica tridimensionale, in cui inserire il terreno come superficie rigida di riflessione e confrontare i risultati ottenuti con quelli ricavati mediante le procedure spiegate nella sezione 1.7.1 attraverso le curve sperimentali e con i pochi modelli presenti su qualche documento. Naturalmente i tempi di calcolo computazionale per l'esecuzione delle analisi numeriche, avendo a che fare con un'analisi 3D, risulteranno superiori. Si potrà costruire, quindi, un'interfaccia grafica in cui sarà possibile decidere quale dei tre casi (*free air burst*, *surface burst* e *Air burst above ground*) considerare prima di immettere il peso della carica esplosiva, la distanza di rilevamento e il tipo di materiale detonante da testare. Un ulteriore studio potrà essere condotto sull'interazione strutturale, ma riteniamo che le riflessioni e quindi la propagazione dell'onda d'urto generata dallo scoppio, dipendano dalla conformazione dell'edificio e/o dalla configurazione spaziale degli edifici presenti nel luogo investito dal raggio d'azione della perturbazione. Si conclude quindi che la modellazione in cui, oltre al terreno, si vuole inserire un edificio o più strutture, sia una singolarità da valutare caso per caso a seconda della geometria e della planimetria del luogo in cui si è verificata l'esplosione.

Bibliografia

- [1] Remennikov, A., “*The state of the art of explosive loads characterization*”, University of Wollongong, 2007.
- [2] Kingery C.N., Bulmash G., “*Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*”, Technical Report ARBRL-TR-02555, prepared by U.S. Army Research and Development Center, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground Maryland, April 1984.
- [3] Baum F.A., Stanyukovich K.P., Shekhter B.I., “*Physics of an Explosion*”, Russian Book: Fizmatgiz, Moscow 1959.
- [4] Golino L., “*Manuale per l’esame di fochino*”, Bolzano, aprile 2000.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center Technical Report, “*Methodology Manual for the Single-Degree-of-Freedom Blast Effects Design Spreadsheets*”, 2008.
- [6] Pitzalis F., “*Effetto di una esplosione su una piastra in acciaio: analisi e simulazione numerica*”, Dipartimento di ingegneria delle strutture, dei trasporti, delle acque, del rilevamento e del territorio, università degli studi di Bologna, 2009.
- [7] Francesco Zanardi, “*Esplosivi*”, 2011.
- [8] Taylor C.A., Rinkenbach W. H., “*Esplosives - Their material constitution and analysis*”, U.S.A. Bureau of Mines, Bulletin n. 219, 1923.
- [9] Mori E., “*Proprietà degli esplosivi*”, Enciclopedia delle armi, 2012.
- [10] Scaini S., Ruccio A. M., “*Esplosivi e Security*”, EPC Libri.
- [11] Keshavarz M.H., Nazari H.R., “*A simple method to asses detonation temperature without using any experimental data and computer code*”, Department of Chemistry, Malek-ashtar University of Technology, Shahin-shahr P.O. Box 83145/115, Islamic Republic of Iran, Vol. 18, 2005.
- [12] UFC 3-340-02, “*Structures to resist the Effects of accidental Explosion*”, Department of Defense, United States of America, 5 December 2008.
- [13] Sochet I., “*Blast effects of external explosions*” Ecole Nationale Supérieure d’Ingénieurs de Bourges - Institut PRISME – UPRES EA 4229 – 88 bvd Lahitolle – 18020 Bourges cedex – France, 2010.
- [14] Zukas J.A., Walters W.P., “*Explosive Effects and Applications*”, Springer, 2002.

-
- [15]Huntington-Thresher W.K.E., Cullis I.G., “*TNT blast scaling for small charges*” Defence Evaluation and Research Agency, Forth Halstead, Sevenoaks, Kent TN14 7BP UK, 2001.
- [16]Bulson P.S., “*Explosive Loading of Engineering Structures*”, E & FN Spon, UK, 1997.
- [17]Miller P., “*Towards the modeling of blast loads on structures*”, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2004.
- [18]Di Nardo R., “*Comportamento di barriere porose soggette ad Esplosione*”, Dipartimento d’Ingegneria Strutturale, Università degli studi di Napoli Federico II, 2006-2007.
- [19]Michael M. Swisdak Jr., “*Simplified Kingery airblast calculations*”, Indian Head Division/Naval Surface Warfare Center, Silver Spring, MD 20903--5640.
- [20]Hopkinson B., British Ordnance Board Minutes 13565 (1915).
- [21]Cranz C.,” *Lehrbuch der Ballistik*”, Springer-Verlag, Berlin (1926)
- [22]Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A., “*Explosion Hazards and Evaluation*”, Elsevier, Amsterdam (1983).
- [23]Smith P.D., “*Blast and ballistic loading*”, Butterworth-Heinemann Ltd Linacre House , Jordan Hill , Oxford OX2 8DP, 1994.
- [24]Henrych J., “*The Dynamics of Explosion and Its Use*”, Elsevier, Amsterdam (1979).
- [25]Brode, H. L., “*Numerical solution of spherical blast waves*”, Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, New York, 1955.
- [26]Naumyenko I.A and Petrovsky I.G., “*The shock wave of a nuclear explosion*”, BOEH, CCCP, 1956.
- [27]Sadovsky M. A., “*Mechanical effects of air shock waves from explosion according to experiments*”, AH CCCP; Mosca 1952 .
- [28]Kinney G. F. and Graham K. J., “*Explosive Shocks in Air*“, Springer-Verlag, New York, NY, second edition, 1985.
- [29]Larcher M., “*Simulation of the Effects of an Air Blast Wave*”, JRC Technical Notes, PUBSY JRC41337-2007.
- [30]Gelfand B. and Silnikov M., “*Blast effects caused by explosions*”, Translation from Russian to English the book, Final Technical Report, European Research office of the U.S.Army, London, England, April 2004.
- [31]Mills, C. A., “*The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects*”, Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections, Edinburgh, UK, pp. 61-73, 1987.
- [32]Wei J. and Dharani L. R., “*Fracture mechanics of laminated glass subjected to blast loading*”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 44:157.167, 2005.

- [33] Jason R. Florek, “*Study of simplified models of aircraft structures subjected to generalized explosive loading*”, Graduate School-New Brunswick, New Jersey, October 2007.
- [34] David B. Chang and Carl S. Young, “*Probabilistic Estimates of Vulnerability to Explosive Overpressures and Impulses*”, *Journal of Physical Security* 4(2), 10-29 (2010).
- [35] Ing. Onorio Francesco Salvatore, “*Tempo di arrivo dell’onda di blast*”, *Dinamica delle esplosioni VII, L’angolo dell’ingegnere strutturista*, 2012.
- [36] UET Taxila, “*Experimental Evaluation of Impulsive Loading on Concrete Structure*”, Chapter 4, 2009.
- [37] Draganić H., Sigmund V., “*Blast Loading on Structures*”, ISSN 1330-3651, UDC/UDK 624.01.04:662.15
- [38] Hoberecht R.W., “*A Finite Volume Approach to Modeling Injury Mechanisms of Blast-Induced Traumatic Brain Injury*”, University of Washington, 2009.
- [39] Ing. Onorio Francesco Salvatore, “*Diagrammare la curva di pressione*”, *Dinamica delle esplosioni VII, L’angolo dell’ingegnere strutturista*, 2012.
- [40] Nelson L., Pryan M., Tuan N., “*Response Spectrum Solutions for Blast Loading*”, *Electronic Journal of Structural Engineering*, The University of Melbourne, 2004.
- [41] Cabello B., “*Dynamic Stress Analysis of the effect on Air Blast Wave on a Stainless Steel Plate*”, Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, Connecticut, 2011.
- [42] Krauthammer, T.; Altenberg, A., “*Negative phase blast effects on glass panels*”, *International Journal of Impact Engineering*, 24 (1), pp. 1-18; 2000.
- [43] Ansys Autodyn, “*Urban Blast*”, Workshop 5, Ansys, Inc. Proprietary, 2009.
- [44] Izadifard R.A., Foroutan M., “*Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation*”, IK University-Iran, 2009.
- [45] Chapman T.C., Rose T.A., Smith P.D., “*Blast wave simulation using Autodyn2D: A parametric study*”, *Int.J. Impact Engng* Vol.16, No. 5/6, pp.777-787, 1995.
- [46] Lars J., “*Numerical Study of Non-Ideal Explosive Detonations*”, Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Örnsköldsvik, May 2011.
- [47] AUTODN 2D: *Euler Remapping Tutorial*, Century Dynamics Ltd, 12 City Business Centre, Brighton Rd, Horsham, W.Sussex RH13 5BA, 1993.
- [48] Matlab, “*Creating Graphical User Interface*”, COPYRIGHT 2000-2012 by The Math Works, Inc.