

Edoardo Mori

# DOSSIER



**sulle distanze di sicurezza  
da osservare  
nel brillamento  
o disinnescio di bombe  
in base alla esplosivistica e alla  
prassi seguita in Germania.**

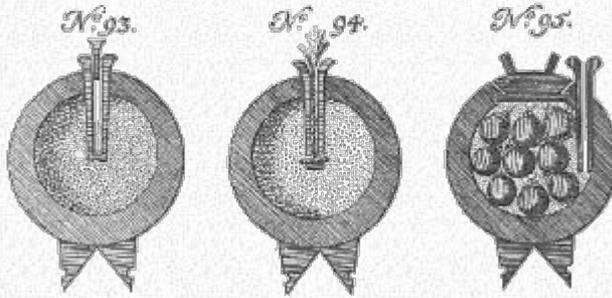
**Testi estratti dal sito**

**[www.earmi.it](http://www.earmi.it)**

**Bolzano 2020**

## INDICE

	Pagina
Mori - Gli esplosivi - Nozione di base.	3 - 24
Mori - Frammenti di bombe o proiettili.	25 - 33
Mori - Bombe ed evacuazioni; come vengono fatte in Italia - Articolo 19 ottobre 2019	34 - 51
Mori - Klimi - La distanza di sicurezza da osservare rispetto alla proiezione di frammenti di bombe.	52 - 80
Programma per il calcolo della gittata dei frammenti.	81 - 86
Programma per il calcolo della gittata di una sfera.	87 -91
Klimi - Mori - Shock Wave of Explosion.	93 -155
Klimi - Mori - Exterior ballistics of fragments: public safe evacuation zone related to munition disposal.	157 - 175
Il documento della Nato usato dall'Esercito Italiano in modo acritico	178-195
Critiche al documento.	195-198
Pagine estratte dal <i>Waffetechnisches Taschenbuch della Rheinmetallfabrick</i>	197-205

**ESPLOSIVI**

L'evoluzione delle materie esplodenti dopo l'invenzione della polvere nera (circa 1250) riprende con Berthollet che nel 1788 scopre il clorato di potassio ed inizia esperimenti per sostituirlo al salnitro nella polvere nera. Poco dopo Howard scopre il fulminato di mercurio (1799) e Brugnatelli (1902) il fulminato d'argento.

Nel 1831 Bickford inventa la miccia a lenta combustione per mine, che sostituisce le cannuce di paglia riempite di polvere nera, usate fino ad allora assieme a corde imbevute di salnitro ed incatramate. Gli esplosivi moderni derivano però dalla scoperta della nitratazione di sostanze organiche ottenendosi il nitrobenzolo (1834), la nitronaftalina (1835) e l'acido picrico (1843). Nel 1846 Sobrero scopriva la nitroglicerina e Schoenbein il cotone fulminante; dalla prima sarebbero derivate le dinamiti a seguito della scoperta di Nobel (1867) che essa poteva essere stabilizzata e resa maneggiabile con un certa sicurezza mescolandola con sostanze inerti quali la farina fossile; dal secondo le polveri senza fumo. Negli anni successive venivano scoperti il tritolo, il tetrile, il T4 e la pentrite. Gli esplosivi si distinguono dalle usuali sostanze combustibili per il fatto che essi contengono, legata nella loro molecola, anche la sostanza comburente (ossigeno). Di conseguenza essi bruciano con altissime velocità di combustione generando altissime pressioni pressoché istantanee.

Gli esplosivi si distinguono in e. deflagranti o da lancio ed e. detonanti; questi ultimi in esplosivi da scoppio o dirompenti e in esplosivi da innesco. La distinzione tra esplosivi da lancio ed esplosivi da scoppio o dirompenti veri e propri non è di sostanza, ma fondata sulla diversa velocità di esplosione. Le polveri da sparo esplodono con velocità da 10 a 1000 mm/s con durata dell'ordine di decimi o centesimi di secondo (deflagrazione); gli esplosivi con velocità da 2.000 a 9.000 m/s e durata dell'ordine di micro o millisecondi; entro certi limiti è possibile ottenere che un esplosivo da lancio esploda e che un esplosivo dirompente bruci. Le materie esplodenti, da un punto di vista tecnico, si distinguono quindi in:

**1 - Esplosivi primari o innescanti.** I normali esplosivi non esplodono per effetto di normali sollecitazioni meccaniche o per effetto del calore, ma bruciano o, al massimo, deflagrano. Per innescare l'esplosione debbono venir impiegati degli esplosivi estremamente sensibili alle azioni esterne e che detonano per effetto del calore o della percussione; essi sono solitamente contenuti in modesta quantità in piccoli tubetti metallici (detonatori). Tra questi esplosivi primari i più usati sono, di solito miscelati fra di loro o con altre sostanze, il fulminato di mercurio, l'azotidrato di piombo o d'argento, lo stifnato di piombo, il tetrazene, il DDNP, ecc. (si legga anche quanto scritto più avanti trattando dei detonatori).

**2 - Esplosivi secondari da scoppio o dirompenti.** Questi esplosivi vengono tradizionalmente distinti in militari e civili in base a varie considerazioni (costo, maneggevolezza, possibilità di lavorarli o fonderli in forme prestabilite, conservabilità, ecc). Non si deve però dimenticare che molti esplosivi militari finiscono poi sul mercato civile come esplosivi di recupero e vengono mescolati fra di loro o con esplosivi civili. Noti esplosivi militari (= destinabili ai militari e non che li usino solo loro!) sono il tritolo (o TNT) l'acido picrico (o Melinite, Ekrasite), la pentrite (PETN), il tetrile (CE, Tetralite), l'esogeno (Hexogene, T4, Cyclonite, C6); essi vengono usati da soli o mescolati tra di loro in vario modo o con altre sostanze (ad es. polvere d'alluminio) che ne migliorano ulteriormente le prestazioni. Quando gli esplosivi vengono mescolati con sostanze plastiche quali vaselina, cere o polimeri sintetici, si ottengono gli esplosivi plastici; quando vengono gelatinizzati si ottengono le gelatine, di consistenza gommosa o pastosa. Proprio in questa categoria si riscontra uno degli esplosivi più potenti e cioè la gelatina esplosiva formata per oltre il 90% di nitroglicerina e per il resto da cotone collodio. Negli Stati Uniti sono noti gli esplosivi plastici a base di T4 e noti con il nome di C (T4 e vaselina, olio minerale), C2 (T4 e nitrocellulosa), C3 (T4, nitrocellulosa, binitrotoluolo e tetrile), in cui la lettera C sta per "compound" o "composition". In campo civile si impiegano esplosivi da mina a base di nitrato d'ammonio o di potassio (specie quali esplosivi di sicurezza per miniera) o gelatina gomma a base di nitroglicerina e cotone collodio, o dinamiti a base di nitroglicerina e sostanze inerti. Più raramente esplosivi a base di clorato di potassio (chedditi). Per lavori di poca importanza si usa ancora la polvere da mina formata da polvere nera in grossi grani. La polvere nera finemente granulata, viene usata ancora in armi ad avancarica e per usi pirotecnici.

Fra tutti gli esplosivi secondari, quelli che possono presentare pericoli nel maneggio e nel trasporto sono le gelatine e le dinamiti contenenti la nitroglicerina poiché questa può trasudare dal composto (specialmente per effetto del gelo) e quindi esplodere anche per urti modestissimi.

**3 - Polveri da sparo senza fumo.** Esse vengono impiegate per il lancio di proiettili in armi leggere e si distinguono in polveri alla nitrocellulosa (a semplice

base) ottenuta dalla nitratazione mediante acido solforico ed acido nitrico di cotone o cellulose o alla nitroglicerina (a doppia base) ottenuta gelatinizzando la nitrocellulosa con la nitroglicerina o altra sostanza. Le polveri più note di questa categoria sono la balistite (nitroglicerina + cotone collodio) e la cordite (nitroglicerina + fulmicotone). Per usi civili vengono ormai usate prevalentemente le polveri alla nitrocellulosa.

### **Cariche esplosive speciali**

Le cariche esplosive si distinguono in *cariche cubiche o concentrate*, in cui l'esplosivo è ammassato in forma più o meno globulare, e in *cariche allungate* che è ogni carica in cui l'esplosivo è disposto in modo che la lunghezza della carica sia almeno quattro volte la sua sezione minore, come ad esempio avviene in un foro nella roccia. Se la base di appoggio di un blocco di esplosivo viene scavata in modo da ricavare una cavità emisferica o parabolica gli effetti dell'esplosione si concentrano, come i raggi di uno specchio parabolico, in corrispondenza della cavità, aumentandone l'effetto distruttivo. Se il blocco è circolare si parlerà di *carica cava circolare*; se il blocco è a forma di parallelepipedo (una specie di coppo), si parlerà di *carica cava allungata*. Le cariche cave vengono utilizzate per operazioni di perforazione e taglio o per scavare buchi. Talvolta l'esplosivo viene confezionato in tubi di acciaio di un metro o due di lunghezza, innestabili l'uno sull'altro, per aprire varchi in reticolati o campi minati o per demolizioni varie (*tubi esplosivi*, bangalore torpedoes) Le cariche possono essere *interne*, se collocate a riempire una cavità del corpo da demolire (foro da mina e camera da mina se vuote, petardo e, rispettivamente, fornello, quando caricate), oppure *esterne* quando vengono semplicemente appoggiate al corpo da demolire. Normalmente sia le cariche interne che quelle esterne vengono *intasate* (cioè con idonei materiali, quale sabbia, terra, coperture, ecc.) si crea una resistenza sul lato opposto a quello su cui deve svolgersi l'opera di demolizione.

### **L'esplosione**

La potenza di un esplosivo ed i suoi effetti dipendono da vari fattori, quali la velocità ed il calore di esplosione, la quantità di gas prodotti, influenzata dalla temperatura di esplosione, e le conseguenti pressioni realizzabili. Esplosivi ad alta velocità di detonazione hanno maggiori effetti distruttivi anche per semplice contatto (effetto brisante), potendo tranciare di netto piastre e sbarre metalliche; esplosivi che producono molto gas sono più idonei in campo civile (cave, gallerie, ecc.) in cui occorre sfruttare l'effetto di distacco. In campo militare si useranno prevalentemente i primi per il caricamento di bombe o di proiettili, sfruttando sia l'effetto dell'onda di pressione iperrapida sviluppata, che gli effetti prodotti dalla schegge, sia per opere di sabotaggio appoggiando direttamente l'esplosivo sul manufatto da distruggere; in campo civile gli esplosivi verranno impiegati con cariche intasate, vale a dire inserite in fori scavati nella roccia o nel terreno. Come

si è detto però gli usi sono in larga parte scambiabili e ogni esplosivo militare potrebbe essere efficacemente usato per lavori civili e viceversa; la stessa polvere da sparo, se opportunamente intasata e compressa in recipienti, può servire per confezionare ordigni esplosivi (vedi sotto).

La prova più usata per determinare la potenza di un esplosivo consiste nel farlo esplodere entro un grosso blocco di biombo (blocco di Trauzl) e nel misurare poi il volume della cavità creatasi. In base ad essa, se si assume che la gelatina esplosiva abbia il valore eguale a 100, si ha la seguente scala di valori per gli altri esplosivi:

Gelatina esplosiva, 100

T4, 90

Pentrite, 80

Tritolo, 50

Fulminato di mercurio, 20

Polvere nera, 7

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

Tritolo, acido picrico, miscele a base di dinamite, gun-cotton, 1

Gelatina esplosiva, 0,7

C2 e C3, T4, pentrite, 0,8

Tetrytol, tritolite, pentrolite, 0,9

Nitroammido, dinamite, 1,2

Esplosivi al nitrato d'ammonio, 1,4

Polvere nera da mina, 2,3

Vale a dire che agli effetti pratici Kg 2,3 di polvere da mina equivalgono a Kg 1 di tritolo (varia ovviamente la velocità di esplosione e quindi l'effetto di *brisanza* dell'esplosione).

Il valore **TNT- equivalente** si può calcolare in vari modi; il più semplice è quello di prendere in considerazione solo il calore di esplosione, trascurando così la velocità di detonazione. Il calore di esplosione del tritolo è di 1,08 e quindi si può assumere che 1 grammo di tritolo sviluppi una caloria. Se si moltiplica il calore di esplosione di un esplosivo per 0,925 (rapporto fra 1,08 e 1) si ottiene il fattore di equivalenza. Ad esempio il calore di esplosione della nitroglicerina è pari a 1,6;  $1,6 \cdot 0,92 = 1,47$  il che significa che un chilogrammo di tritolo corrisponde 0,68 kg di nitroglicerina. Un fattore inferiore ad 1 indica che l'esplosivo è meno potente del tritolo. Ad esempio il nitrato di ammonio ha un fattore di 0,5 e quindi 2 kg di esso corrispondono ad un kg di TNT . Sia chiaro che ciò nulla dice in ordine alla brisanza.

Riporto qui alcune tabelle trovate in letteratura

Table 3. EXPERIMENTAL AND CALCULATED TNT EQUIVALENTS FOR AIR BLAST (data from Ref. 1, calculations by the author)

EXPLOSIVE	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Heat of Explosion (cal/g)	CJ Pressure (GPa)	TNT Equivalence from Experiments (%)	Equivalence Calculated from Heat of Explosion	Equivalence Calculated from energy, PV, CJ state	Difference, PV calculation compared to Experiment (%)
<b>NON-ALUMINIZED</b>							
1. Ammon. Picrate	1.55	800	19.3	85	74	98	15.1
2. Amatol(60/40)	1.50	630	13.3	95	59	69	-26.9
3. Amatol(50/50)	1.51	700	16.4	97	63	84	-13.9
4. Comp A-3	1.59	1100	27.5	109	102	136	25.1
5. Comp B	1.68	1240	26.9	110	113	127	15.3
6. Comp C-3	1.60	1450	24.5	105	134	121	15.0
7. Cyclotol(75/25)	1.71	1230	28.1	111	113	131	18.4
8. Cyclotol(70/30)	1.73	1210	29.1	110	112	134	21.4
9. Cyclotol(60/40)	1.72	1200	27.8	104	111	128	23.4
10. Ednatol(55/45)	1.63	1340	23.0	108	124	112	3.3
11. Pentolite(50/50)	1.66	1220	24.2	105	113	115	9.7
12. Picratol(52/48)	1.63	1090	20.8	100	101	101	0.6
13. PTX-1	1.64	1320	25.2	111	141	121	9.3
14. PTX-2	1.70	1560	28.8	113	145	134	18.6
<b>ALUMINIZED</b>							
15. HIX	1.65	1700	18.8	118	157	90	-23.7
16. HIX-3	1.81	2110	22.3	116	195	98	-15.6
17. MINOL-2	1.68	1620	14.8	113	150	70	-39.2
18. MOX-215	2.00	1470	11.3	102	136	45	-55.8
19. Torpex	1.81	1800	26.1	122	167	113	-5.9
20. Tritonal	1.72	1770	19.3	110	164	89	-18.8

Table 1  
Approximate TNT Conversion Factors for Selected High Explosive

Explosive	Approximate Conversion Factor by Weight for Pressure
TNT	1
Nitromethane	1.1 <sup>1</sup>
Pentolite	1.04 <sup>2</sup>
ANFO	0.3-0.82 <sup>3</sup>
C-4	1.37 <sup>4</sup>
Ammonia Dynamite	0.7-0.9 <sup>4</sup>
Gelatin Dynamite	0.7-0.8 <sup>4</sup>
Nitroglycerin Dynamite	0.9 <sup>4</sup>

<b>EXPLOSIVE</b>	<b>EQUIVALENT WEIGHT</b>	<b>CHANGE IN DISTANCE FOR GIVEN PRESSURE (percent)</b>
TNT	1.0	0
PENTOLITE	1.17	+5
TRITONAL	1.1	+3
H-6	1.31	+9
HBX	1.18	+6
ANFO (94/6)	0.82	-6
NITROMETHANE	1.0	0
DYNAMITES	0.7 to 0.9	-11 to -3

Table 2.1 Conversion Factors for Explosives

<b>Explosive</b>	<b>Mass Specific Energy <math>Q_x</math> (kJ/kg)*</b>	<b>TNT Equivalent <math>Q_x/Q_{TNT}</math></b>
Compound B (60% RDX, 40% TNT)	5190	1.148
RDX (Cyclonite)	5360	1.185
HMX	5680	1.256
Nitroglycerin (liquid)	6700	1.481
TNT	4520	1.000
Pentolite	6012	1.330
60% Nitroglycerin dynamite	2710	0.600
Semtex	5660	1.250

\* Convert to (Btu/lb) by multiplying by 0.43

I volumi di gas prodotto possono essere pari a 10.000 - 30.000 volte quelli iniziali con temperature fino a 3000 gradi e le pressioni raggiungibili arrivano normalmente attorno alle 20.000 atmosfere con picchi di 150.000 atmosfere. L'esplosione dà luogo ad un'onda esplosiva od onda di pressione, con effetti a breve ed a lunga distanza. A lunga distanza si crea un'onda di pressione dipendente dal mezzo circostante (nell'aria si ha lo spostamento d'aria, nell'acqua uno scoppio subacqueo) che si propaga creando una sovrappressione di parecchi bar, seguita da una fase più lunga di depressione (risucchio) che naturalmente non può essere superiore alla pressione atmosferica di un bar. L'onda di pressione che incontra un

oggetto produce delle lesioni che possono poi venir aggravate dall'onda di risucchio; ad esempio un muro può essere lesionato dall'onda esplosiva e poi fatto cadere dall'onda di risucchio o retrograda. Una persona viene scaraventata a terra. E' per tale fenomeno che gli effetti di una bomba possono apparire diversi da quelli dettati dalla comune esperienza; ad esempio l'esplosione di una bomba in una strada può far ritrovare le saracinesche dei negozi e le vetrine sventrate verso l'esterno, le pareti crollate verso la strada ed il tetto scoperchiato verso l'alto. L'onda di risucchio creata dall'aria che ritorna violentemente verso il centro dell'esplosione può dar luogo a una successiva onda rimbalzante all'indietro, ma di non rilevante potenzialità. Quando l'esplosione avviene nel terreno, si creano in esso delle vibrazioni con onde d'urto simili a quelle di un terremoto, che possono cagionare lesioni agli edifici o che possono avere l'effetto di una mazzata su di una persona a contatto con la superficie investita (una bomba che scoppia sotto una nave può provocare lesioni a coloro che si trovano sulla sua tolda per il solo effetto dell'urto). E' per questo motivo che chi si trova a breve distanza da un'esplosione deve stendersi a terra avendo però l'avvertenza di reggersi solo sulle punte dei piedi ed i gomiti: in tal modo evita lo spostamento d'aria, l'ondata di calore e l'onda d'urto trasmessa dal terreno. A breve distanza invece, l'esplosione agisce direttamente con onde d'urto pulsanti che attraversano l'oggetto e vengono riflesse dalle sue superfici libere così che si creano in esso sovratensioni che ne provocano la rottura. Questo effetto viene sfruttato particolarmente nelle granate anticarro in cui una carica di esplosivo viene fatta esplodere contro la blindatura; ciò provoca il distacco di porzioni del lato interno di essa con proiezione devastante di frammenti. All'esplosione segue normalmente una fiammata con possibile proiezione di corpi incandescenti che possono provocare incendi nonché una irradiazione di calore che può essere la causa di ustioni da irradiazioni (ustioni da lampo) e di possibili incendi (può infiammare gli abiti di persone presenti in un certo raggio). Nel caso di esplosivo caricato in contenitori metallici (mine, bombe, proiettili, ordigni esplosivi), o di bombe chiodate create legando grossi chiodi attorno ad un nucleo di esplosivo, vi è l'ulteriore effetto della proiezione di frammenti metallici di varie dimensioni (schegge), ad una velocità che varia dai 1000 ai 1500 m/s; la distanza di proiezione varia naturalmente a seconda delle dimensioni della scheggia, del suo peso e della sua forma. Frammenti minuti ma aventi elevata velocità possono cagionare lesioni più ampie di quelle prevedibili.

L'energia sviluppata da una esplosione è grandissima, ma concentrata in mezzo millesimo di secondo.

Una massa di 2500 kg di esplosivo con un calore di esplosione di 6700 kJ/kg detona in 500  $\mu$ s e libera un'energia (effettua un lavoro) di

$$2500 \text{ kg} * 6700 \text{ kJ/kg} = 16,75 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

e poiché 3,6 kJ sono pari ad un Watt ora (ossia l'energia necessaria a fornire una potenza di un Watt per un'ora)

$$16,75 \cdot 10^6 \text{ kJ} / 3,6 \text{ kJ} = 4653 \text{ kWh}$$

La produzione di energia del mondo nel 1966 fu di  $3,5 \cdot 10^{12}$  kWh e perciò è come se si fossero sviluppate nel corso del 1966 una serie di  $7,53 \cdot 10^8$  esplosioni.

La potenza svolta dall'esplosivo (ossia il lavoro svolto dall'esplosione nell'unità di tempo per cui kWh / h) in 500  $\mu\text{sec}$  ossia  $500 \cdot 10^{-6} \text{ sec} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ sec} = 1,38 \cdot 10^{-7}$  ora è di

$$4650 \text{ kWh} / 1,38 \cdot 10^{-7} \text{ ora} = 3,3510 \text{ kW}$$

La produzione di energia del mondo nel 1966 fu di  $3,5 \cdot 10^{12}$  kWh

Quindi la potenza totale di tutte le centrali del mondo in 360 giorni di 24 ore (quindi 8640 ore) ammontava a

$$3,5 \cdot 10^{12} \text{ kWh} / 8640 \text{ ore} = 4,05 \cdot 10^8 \text{ kW}$$

e quindi la potenza mondiale impegnata nel 1966 risulta il 74,4% dell'esplosione.

## L'ESPLOSIONE

L'esplosione provoca un'onda d'urto che si propaga ad altissima velocità. La velocità di propagazione è costante. Essa può essere calcolata mediante l'equazione chimica relativa ai gas ideali e il calore di esplosione; calcoli da prendere sempre con precauzione perché molti sono i fattori che diminuiscono il rendimento teorico.

Il calcolo teorico dei fenomeni ricollegati ad una esplosione è estremamente complesso ed esula dallo scopo di questo scritto e dalle mie capacità matematiche; però vi sono delle formule empiriche, ricavate dai dati sperimentali, che consentono di farsi una idea delle forze in gioco con una approssimazione sufficiente nella maggior parte dei casi. Esse non vanno confuse con le formule a braccio (Rules of Thumb in inglese, Faustformel in tedesco) che forniscono solo dati orientativi (ad. es, per sapere a quante centinaia di metri è caduto un fulmine, contare i secondi fra il lampo e l'arrivo del suono e moltiplicare per tre).

In materia di esplosioni, ad es., si dice, a braccio, che per esplosivi medi (TNT):

- Un kg di esplosivo sviluppa circa 1000 litri di gas
- Un kg di esplosivo sviluppa circa 1000 Kcal di energia che, se trasformata tutta in calore, porterebbe ad ebollizione 10 litri di acqua.
- I gas prodotti da una esplosione, e prima che inizino ad espandersi, hanno una temperatura di 2000-3000 K e una pressione da 50 a 150 Kbar.

Una approssimazione accettabile si ottiene con le seguenti formule empiriche in cui il quantitativo è indicato per il TNT: per altri esplosivi calcolare il TNT-equivalente

## Fireball

Al momento dell'esplosione si crea anche una sfera di fuoco il cui diametro approssimativo per esplosivi medi (TNT) è dato dalla formula

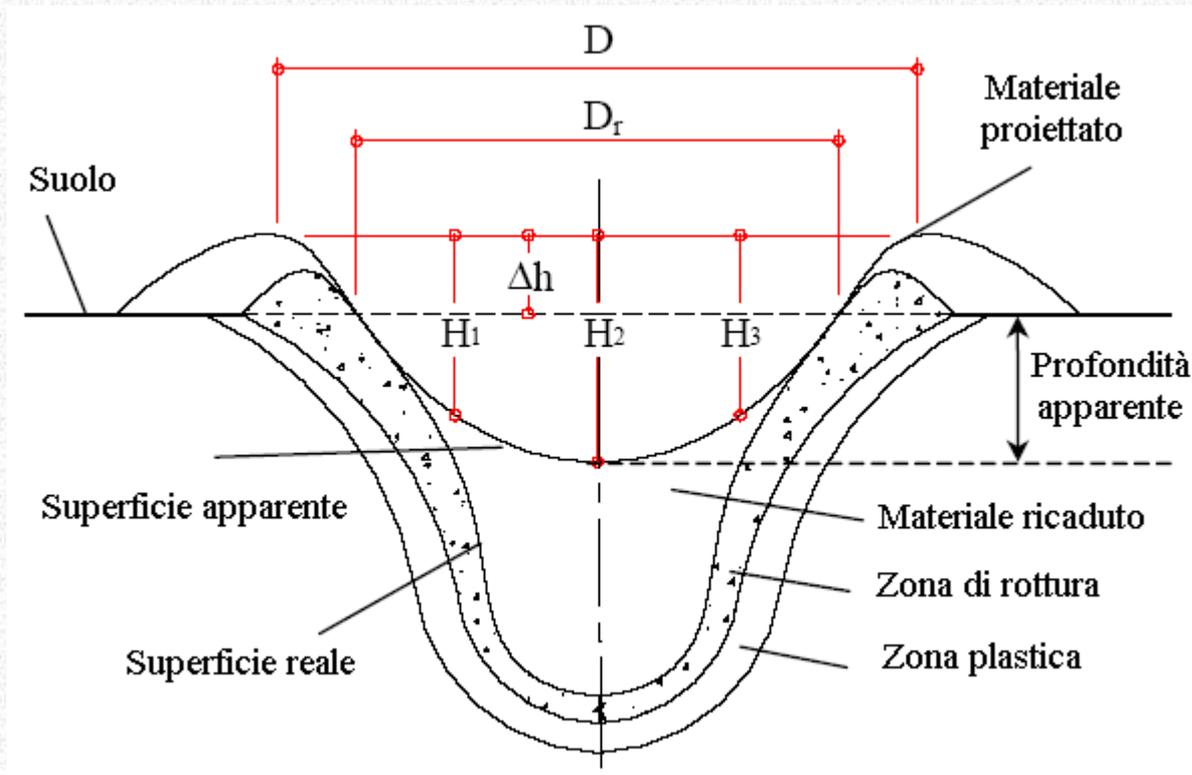
$$D[m] = 3 * \text{Peso}[kg]^{0,3}$$

In altre parole il diametro in metri è dato dalla radice cubica del peso in kg moltiplicata per 3.

Per un peso di un kg di TNT si avrà una sfera fuoco di circa 3 metri.

### Cratere

Il cratere dell'esplosione di un esplosivo appoggiato sul suolo dipende dal tipo di esplosivo e dal tipo di suolo.



In via molto approssimata si ritiene che il diametro D del cratere sia dato dalla formula

$$D[m] = k * 0,4 * P[kg]^{0,333}$$

in cui k è un fattore che varia da 1,7 per suolo molto duro a 6 per suolo molto soffice. Elevare a 0,333 equivale ad estrarre la radice cubica.

Per proiettili di artiglieria che penetrano nel terreno si calcola un diametro del cratere pari a 10 volte il calibro.

Le dimensioni del cratere possono essere molto variabili anche in situazioni apparentemente identiche; le esperienze hanno rilevato scarti normali del 10%, che possono salire anche al 30-40% senza motivo apparente.

Per grandi esplosioni è stata proposta la formula

$$D[m] = 0,8 P[Kg]^{0,333} \text{ con scarti del } 30\%$$

Uno studio sperimentale (D. Ambrosini, B. Luccioni, R. Danesi, *Influence of the soil properties on craters produced by explosions on the soil surface*, 2005) ha

dato i seguenti risultati

Kg di TNT	Diametro del cratere [m]
1	0.58
2	0.74
4	0.84
7	1.48
10	1.56
50	2.10
100	2.52
150	2.62
200	3.06
250	3.10
300	3.20
400	3.40
500	4.22

corrispondenti alla formula

$$D [m] = 0.51 * P[\text{Kg}]^{0,333} [\pm 5\% ]$$

se l'esplosivo è appoggiato sul suolo; se invece è il baricentro ad essere a livello del suolo (esplosivo seminterrato) il coeff. 0,51 sale a 0,65. La differenza di consistenza del suolo comporta variazioni del 5% in più o in meno.

Se l'esplosivo è sollevato rispetto al suolo (ad esempio dentro un veicolo) ogni previsione è aleatoria.

### **Onda di pressione**

In linea di massima si esprime con la formula empirica

$$\text{Pressione (in PSI)} = 4120 / z^3 - 105 / z^2 + 39,5 / z$$

in cui  $z$  indica la distanza reale scalata (misure in piedi e libbre).

Il calcolo viene svolto utilizzando la nozione di TNT-EQUIVALMENTE già vista sopra.

Vediamo di comprendere il concetto di calcolo scalato: Tutti i parametri che caratterizzano un'esplosione sono principalmente dipendenti dalla quantità di energia rilasciata dalla detonazione sottoforma di onda d'urto e dalla distanza della sorgente. È possibile descrivere gli effetti di un'esplosione mediante l'utilizzo di un metodo scalato che si sostanzia da osservazioni di natura empirica ossia che *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.* I parametri caratteristici della fase positiva per un'esplosione sferica di una carica di esplosivo sono dati in funzione della DISTANZA SCALATA, ovvero del rapporto tra la distanza reale  $R$  dal punto di scoppio e il la radice cubica della massa  $M$  della carica esplosiva

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

Quindi per una distanza reale di m 10 e un peso di 5 kg di TNT il valore della distanza scalata da usare per il calcolo è di 5,8 e non 10.

L'uso della distanza scalata consente, combinando diversi quantitativi di esplosivo in funzione delle diverse distanze, di poter rappresentare in maniera compatta una vasta gamma di situazioni rappresentabili in termini di effetti di onde d'urto. Tutti questi studi sono basati ovviamente su modelli empirici costituiti mediante approssimazioni di dati sperimentali dell'onda d'urto percepita dopo l'innescio di una determinata quantità di materiale esplosivo (solitamente TNT).

Sono stati studiati modelli empirici che tengono conto di maggiori variabili (ad es. pressione e temperatura dell'aria), ad es. quelli di Sadovsky.

Approfondiamo il caso di un'esplosione (detonazione) di una carica sferica in aria: quando essa si verifica in maniera uniforme i conseguenti picchi di pressione e temperatura dei gas prodotti si espandano nell'aria ambiente generando un'onda d'urto che, in assenza di ostacoli, si propaga come una superficie sferica avente origine nel centro dell'esplosione. Se la forma della carica esplosiva è sferoidale essa si propaga dal punto di detonazione in tutte le direzioni in maniera uniforme.

La massima pressione sviluppata da un'onda d'urto in aria libera ad una data distanza è il cardine sul quale si basano i modelli empirici più validi (Henrych, Brode, Naumyenko e Petrovsky, Sadovsky, Kinney e Graham, Gelfand e Silnikov, Mills Wei e Dharani). Essi sono fondati sull'idea di predire l'andamento temporale dell'onda di pressione come sola funzione sia della quantità di materiale esplosivo impiegata che della distanza alla quale si vuole valutare l'effetto prodotto (attese particolari condizioni atmosferiche ambientali): vengono, quindi, utilizzate come uniche variabili la DISTANZA SCALATA e i valori standard esplosivi del tritolo o delle miscele o in termini di TNT EQUIVALENTI.

Le formule di Sadovsky ( $m = \text{kg}$ ,  $r = \text{mt}$ ,  $\Delta p_1 = \text{atm}$ ,  $\tau_+ = \text{sec}$ ,  $D = \text{m/s}$ ,  $u_1 = \text{m/s}$ ,  $c_1 = \text{m/s}$   $T_1 = \text{°K}$ ) valgono per sovrappressioni inferiori a 10 atm e per distanze non molto prossime all'origine del fronte d'onda. Nel caso di onda d'urto da esplosione di TNT (in condizioni atmosferiche standard) abbiamo:

sovrappressione in aria senza ostacoli

$$\Delta p_1 = 0,84 \frac{\sqrt[3]{m}}{r} + 2,7 \frac{\sqrt[3]{m^2}}{r^2} + 7,0 \frac{m}{r^3}$$

sovrappressione sulla superficie terrestre

$$\Delta p_1 = 0,95 \frac{\sqrt[3]{m}}{r} + 3,9 \frac{\sqrt[3]{m^2}}{r^2} + 13,0 \frac{m}{r^3}$$

durata della fase positiva

$$\tau^+ = 1,3 \sqrt[6]{m} \sqrt{r} \cdot 10^{-3}$$

velocità del fronte d'urto

$$D = 340 \sqrt{1 + 0,86 \Delta p_1}$$

velocità dei gas dietro il fronte d'urto

$$u_1 = 243 \frac{\Delta p_1}{\sqrt{1 + 0,86 \Delta p_1}}$$

temperatura dei gas nell'onda del fronte d'urto

$$T_1 = 288 \frac{(1 + \Delta p_1)(7 + \Delta p_1)}{7 + 6 \Delta p_1}$$

velocità del suono nell'onda del fronte d'urto

$$c_1 = 340 \sqrt{\frac{(1 + \Delta p_1)(7 + \Delta p_1)}{7 + 6 \Delta p_1}}$$

Le formule sono troppo complesse per essere gestibili con una calcolatrice tascabile e quindi l'amico Dr. Felice Nunziata mi ha preparato [un foglio excel](#) in cui è sufficiente inserire distanza e peso per ottenere i risultati ricercati. Ripeto che essi sono orientativi e che è normale uno scarto del +/- 10% .

### Effetti dell'esplosione

Gli inglesi, molto pragmatici, hanno condotto esperimenti sul "letal action of blast". E' stato accertato che una carica di TNT da 50 lbs (diciamo 24 kg), esplosa in superficie, ha effetto letale fino a circa 4 metri, demolisce un muro isolato a 15 metri e danneggia il tetto di un'abitazione a 40 metri. L'effetto non è direttamente proporzionale alla carica ed inoltre, nel caso di grosse cariche (la classica auto-bomba), non sempre l'innesco è tale da fare esplodere l'intera carica. Numerosi

sono i casi di esplosione parziale.

L'essere umano, in realtà, è straordinariamente resistente alla pressione. Certamente, i timpani non ne godono e nemmeno i polmoni, ma si sopravvive.

Invece la stessa carica, nell'androne di un palazzo, provoca il crollo dell'intera costruzione, ma più per effetto dell'onda retrograda, che per effetto dell'onda diretta. Mi spiego: l'esplosione crea un'onda pressoria che, per un attimo, espelle dal palazzo l'aria e vi crea qualcosa di simile al vuoto. Terminato l'effetto, l'aria vi fa rientro ed esercita una pressione abbastanza prolungata, alla quale le strutture verticali e soprattutto orizzontali, già danneggiate dall'onda esplosiva, non resistono. Basti considerare che la sola pressione atmosferica è di 10 tonnellate per metro quadro e che i solai sono collaudati a 200 kg/mq..

In un locale "confinato" come l'autobus (o, peggio, la metropolitana), l'effetto pressorio viene incrementato dai rimbalzi dell'onda sulle pareti che originano quelli che in acustica si chiamano "battimenti"; proiezioni di metallo e vetri e l'incendio del carburante completano il quadro, come possiamo vedere in TV .

Diverso è il discorso della proiezione di frammenti metallici a cui dedico un apposito capitolo. Nella pratica si rileva spesso che la famigerata "micidiale nail bomb" ( cartuccia di TNT con cintura di chiodoni fissati con nastro adesivo), non perfora una tavola da cm 2,5 ad un metro di distanza: i chiodi si piantano di traverso a non oltre cm 1. I bulloni perdono energia dopo un brevissimo tragitto e, per loro stessa conformazione, non riescono a penetrare del legno e nella carne di manzo (macellato ovviamente) a 2-3 metri. E non importa che la carica sia da un etto o da 15 kg: la velocità iniziale è sempre quella!

### **Effetti sul terreno**

I danni provocati da una esplosione sono estremamente variabili, a seconda dei luoghi, ma da essi si può risalire al quantitativo di esplosivo; si possono distinguere in tre categorie

I) Terreno completamente spazzato, alberi sradicati o troncati a livello del terreno o a meno di due metri dal suolo.

Questi danni si verificano ad una distanza dall'esplosione data approssimativamente dalla formula

$$D[m] = 1.55 * P[kg]^{0,425}$$

in cui D è il diametro della zona e P il peso dell'esplosivo (TNT equivalente)

II) Alberi seriamente danneggiati con rottura di rami principali, fino al limite in cui gli alberi sono integri, ma vengono asportati rametti minori e foglie.

$$D[m] = 2,2 * P[kg]^{0,425}$$

III) Gli alberi hanno perso solo le foglie o esse sono rimaste attaccate al ramo ma ritorte

$$D[m] = 3,3 * P[kg]^{0,425}$$

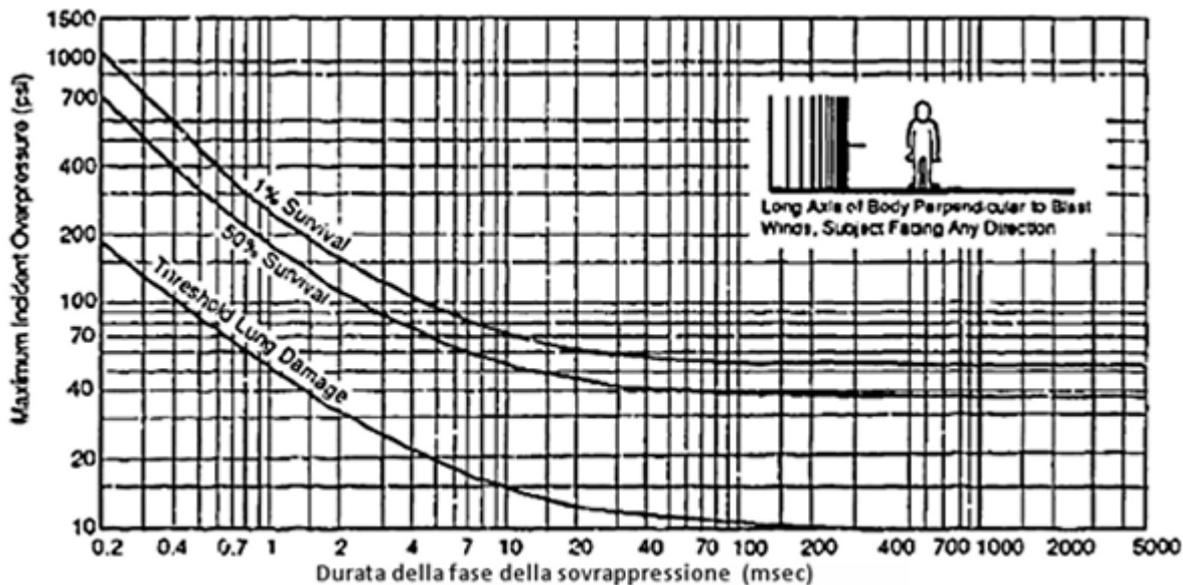
IV) Sottobosco e felci danneggiate e scolorite

$$D[m] = 4,38 * P[kg] ^{0,425}$$

## Effetti sul corpo umano ed edifici

### Livelli di pericolosità in relazione alla pressione

Pericolo elevato di morte	500	mbar
Pericolo medio (1% letalità)	140	mbar
Di solito in frantumi le finestre (tutte le dimensioni)	35-70	mbar
Distorsione cornice di edifici ad intelaiatura d'acciaio	140-170	mbar
Rottura dei serbatoi di stoccaggio di petrolio	210-280	mbar
Edifici ad intelaiatura d'acciaio strappato da fondazioni	210	mbar
Vagoni rovesciati	490	mbar
Completa distruzione di tutti gli edifici non in cemento armato	700	mbar



La curva è riferita ad una persona di 70 kg in piedi. La pressione è indicata in psi

Questi sono gli **effetti sul corpo umano** di un'onda esplosiva osservati in relazione alla pressione a cui viene esposto ( $1 \text{ kg/cm}^2 \sim 1 \text{ atm}$ ):

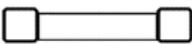
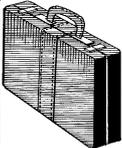
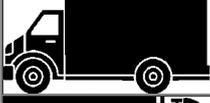
- >  $26 \text{ kg/cm}^2$ . Morte istantanea, disintegrazione del corpo.
- >  $8 \text{ kg/cm}^2$ . Morte istantanea, corpo proiettato all'indietro, parti del corpo disintegrate.
- >  $5 \text{ kg/cm}^2$ . Ferite gravissime con pericolo di morte al 99%, parti del corpo disintegrate, forti danni ai tessuti molli e alle ossa
- >  $3.8 \text{ kg/cm}^2$ . Ferite, pericolo di morte al 75%; in ospedale per almeno due o tre mesi
- >  $2.5 \text{ kg/cm}^2$ . Ferite medie con rischio di morte al 10%; in ospedale per 1-2 mesi.
- >  $2.1 \text{ kg/cm}^2$ . Ferite lievi; in ospedale per 7-15 giorni.
- >  $1.6 \text{ kg/cm}^2$ . Shock, stato di incoscienza.

- > 1.1 kg/cm<sup>2</sup>. Rottura dei timpani.
- > 0.5 kg/cm<sup>2</sup>. Distanza minima di sicurezza per artiglieri e artificieri
- > 0.35 kg/cm<sup>2</sup>. Distanza minima da osservare per evitare rottura dei timpani

Questi gli **effetti sugli edifici**. Si considera che l'edificio sia interamente entro il raggio di rischio

- > 2.5 kg/cm<sup>2</sup>. Distruzione di robuste strutture in acciaio, ponti.
- > 1.75 kg/cm<sup>2</sup>. Distruzione o grave danneggiamento di strutture in cemento armato
- > 1.0 kg/cm<sup>2</sup>. Distruzione delle costruzioni non in cemento armato antisismiche
- > 0.65 kg/cm<sup>2</sup>. Crollo di edifici con intelaiature in acciaio o modernamente rinforzate con cemento armato
- > 0.25 kg/cm<sup>2</sup>. Danni significativi a palazzi di città
- > 0.15 kg/cm<sup>2</sup>. Crollo parziale di edifici.
- > 0.05 kg/cm<sup>2</sup>. Danni lievi agli edifici, rottura dei vetri delle finestre.

### Distanza di sicurezza e di evacuazione da bombe

Contenitore	Contenuto di esplosivo kg	Distanza letale m	Distanza minima m	Distanza consigliata m
 Tubo bomba	2,5	8	20	260
 Valigetta	25	15	50	560
 Berlina piccola	100	20	75	280
 Berlina	230	30	100	320
 Furgone	450	40	120	1350
 Autocarro	1800	60	200	550
 Semiarticolato	20.000	140	430	1600

**Contenuto di esplosivo** è il quantitativo di esplosivo TNT-equivalente che si presume caricabile o nascondibile su di un veicolo.

**Distanza letale** è quell' oltre cui vi sono speranze di sopravvivenza.

**Distanza minima od obbligatoria di sicurezza** è quella che deve rispettare chi non deve intervenire sulla bomba; chi vi si trova deve restare lontano da finestre e pareti esterne.

**Distanza consigliata** è quella entro cui gli edifici devono essere evacuati.

## Distanza di sicurezza per gas liquefatti ( GPL) PG

Contenitore		Massa e volume Kg - litri	Fireball Diametro	Distanza di sicurezza
	Bombola	9 kg 19 l	12 m	50 m
	Bombolone	45 kg 95 l	21 m	100 m
	Bombolone industriale	907 kg 1893 l	56 m	220 m
	Autobotte	3,630 kg 7570 l	89 m	350 m
	Autocisterna	18,144 kg 37.850 l	152 m	600 m

### Esplosione "per simpatia"

Tra i profani è diffusa l'opinione che uno scoppio possa far esplodere spontaneamente esplosivi che si trovino nelle vicinanze. In effetti il fenomeno dell'esplosione per influenza è abbastanza limitato e condizionato dalla distanza tra le due cariche di esplosivo, dalla violenza dell'esplosione e dal mezzo in cui viaggia l'onda d'urto (aria, roccia, metallo), dalla sensibilità dell'esplosivo (ovviamente se la seconda carica è munita di detonatore, o di una spoletta sensibile alle vibrazioni, l'effetto simpatia potrà verificarsi a maggior distanza). Esperimenti eseguiti con cartucce di gelatina esplosiva hanno stabilito, a titolo di esempio, che per aversi effetto simpatia esse debbono essere a non più di 60 cm se appoggiate su di una lastra metallica, a non più di 30 cm se appoggiate su terreno consistente, a non più di 10 cm in acqua. In aria l'effetto simpatia non si ha oltre pochi millimetri. In genere si assume che non vi sia esplosione per simpatia di esplosivi non innescati che si trovino ad una distanza superiore a tanti metri quanti sono i chili di esplosivo del primo scoppio.

### Gli accessori

Nell'impiego pratico degli esplosivi occorre usare anche alcuni mezzi che servono per provocare l'esplosione nei modi e tempi voluti. Già abbiamo visto che solo la polvere nera può essere fatta esplodere per semplice accensione a mezzo di una miccia; per gli altri esplosivi (salvo casi particolari in cui può bastare un forte calore) occorre un mezzo d'innescò che normalmente è il detonatore; esso è costituito da un tubicino metallico chiuso da un lato e contenente una miscela di esplosivi primari. In alcuni casi, specie usando esplosivi poco sensibili, nel detonatore è contenuto, sotto a quello primario, anche uno strato di esplosivo secondario molto potente; in altri casi il detonatore viene collegato ad un separato

detonatore secondario costituito da un quantitativo variabile da pochi grammi fino ad un chilo di esplosivo potente (Pentrite, T4, TNT). I detonatori sono numerati secondo una scala che va da 1 a 10, a seconda della loro forza, calcolata come se essi fossero caricati solo con fulminato di mercurio. Di regola vengono usati detonatori del nr. 8 corrispondenti a 2 gr di fulminato. I detonatori vengono fatti esplodere mediante una miccia, che viene infilata nell'estremità libera e fissata schiacciando il tubicino attorno ad essa con una apposita pinza (qualche "eroe" usa anche i denti!). Altrettanto usati sono i detonatori elettrici in cui l'accensione è provocata da un filamento circondato da una miscela incendiaria e che viene reso incandescente al passaggio di una corrente elettrica. Talvolta il filamento è separato dal detonatore e viene inserito in esso come una miccia (accenditore elettrico). La corrente elettrica viene prodotta da un apposito apparecchio detto esploditore. Per ordigni militari (mine, bombe, proiettili) il detonatore è sostituito dalla spoletta, che contiene, oltre alla carica primaria, meccanismi e dispositivi vari che ne provocano la detonazione al momento voluto. I detonatori sono molto sensibili agli urti e debbono pertanto essere maneggiati con cautela. Essi non vanno mai conservati o trasportati assieme all'esplosivo. Le micce servono per trasmettere a distanza, ad un detonatore o all'esplosivo direttamente, la fiammata oppure l'onda d'urto di accensione. Si distinguono in miccia ordinaria a lenta combustione (miccia lenta) e in miccia detonante. La prima è una specie di corda del diametro di 5 o 6 mm, rivestita di sostanze impermeabilizzanti e contenente un'anima di polvere nera finissima. Accesa ad un estremo essa brucia alla velocità media di 110-130 secondi per metro lineare. Essa viene usata per provocare l'esplosione dopo un certo tempo di ritardo. La miccia detonante contiene, al posto della polvere nera, un'esplosivo secondario ad alta velocità di detonazione. Una volta erano impiegati il tritolo o l'acido picrico, ormai sostituiti dalla pentrite che assicura una velocità di detonazione di 6000-6500 m/s. La miccia detonante non viene accesa, ma fatta esplodere con un detonatore, a sua volta acceso elettricamente o con miccia lenta. Essa serve per far esplodere contemporaneamente più cariche esplosive distanti una dall'altra. Non va confusa con la miccia istantanea o a rapida combustione, usata allo stesso scopo, che è una normale miccia a base di polvere nera che brucia però con una velocità di 50-100 m/s. e trova impiego esclusivamente in campo militare. Gli accendimiccia sono dei normali spezzoni di miccia a lentissima combustione (600 secondi per metro lineare), che emettono un forte dardo di fiamma e consentono di accendere più micce lente, una dopo l'altra e in condizioni meteoriche avverse. Esistono infine accenditori a strappo che si infilano sulla miccia e consentono di accenderla per frizione.

### **Esplosivistica giudiziaria**

I problemi che si presentano al perito esplosivista consistono nell'individuare: - il

tipo di esplosione (*concentrata* da esplosivo, o *diffusa* per altre cause, quali la presenza in un ambiente di miscele gassose o polverulente)

- il tipo di esplosivo impiegato
- il quantitativo di esplosivo impiegato
- il tipo di ordigno
- il sistema usato per provocare l'esplosione
- se una persona abbia maneggiato esplosivo

Nella comune opinione si tende a ritenere che per confezionare un ordigno esplosivo o per commettere un attentato occorran particolari conoscenze tecniche; in effetti non è particolarmente difficile procurarsi dei prodotti esplosivi e le conoscenze tecniche necessarie sono alla portata di qualunque persona che non sia analfabeta; l'unica qualità che veramente occorre è una grande prudenza, per non far la fine di Feltrinelli! Gli esplosivi civili vengono usati in ingenti quantitativi e qualsiasi fuochino, che può eseguire delle volate che impiegano ogni volta anche quintali di esplosivo, non incontra nessuna difficoltà a farne sparire qualche chilo assieme ad alcuni detonatori. Comunque vi sono numerosi prodotti chimici in commercio per fini del tutto leciti e che, con modeste trasformazioni, possono essere usati come esplosivo. Ad esempio l'attività terroristica irlandese si è basata in larga parte su questi prodotti miscelati secondo varie "ricette": clorato di sodio e zucchero, clorato di sodio e nitrobenzene (questo usato nei lucidi da scarpe e nella concia del cuoio), nitrato d'ammonio (concime chimico) e nafta, zucchero e dicloroisocianato di sodio (usato per disinfettare piscine e locali di mungitura), zucchero e clorito di sodio (un candeggiante), zucchero e nitrato di sodio (usato in insaccati) o di potassio (fertilizzante, disinfettante), ecc. Molti di questi prodotti sono venduti con nomi commerciali e talvolta la vera composizione non si ricava dalla confezione. Il nitrato d'ammonio è usatissimo come concime chimico e in Irlanda le Autorità sono giunte a vietare i concimi che ne contenevano più dell'80%. Il clorato di sodio viene venduto come diserbante. Polvere nera e miscele a base di clorato di potassio possono essere recuperate da artigiani pirotecnici; una potente carica di tritolo è contenuta, assieme a polvere nera, nei razzi antigrandine. Con modeste conoscenze di chimica e molta incoscienza, si possono produrre con tutta facilità prodotti detonanti come il fulminato di mercurio, e un tecnico di laboratorio non ha difficoltà a produrre esplosivi potenti quale l'acido picrico; è alquanto facile produrre la nitroglicerina, ma ne è estremamente pericolosa la manipolazione. Facilmente reperibile è poi la polvere da sparo senza fumo, usata per caricare le cartucce; essa può servire per confezionare ordigni esplosivi di scarsa forza dirompente ma pur sempre pericolosi per le persone. Si calcola che la potenza di un ordigno caricato con polvere da sparo sia circa un quinto di quella di un ordigno caricato con esplosivo militare. Una granata confezionata con mezzo chilo di polvere in un recipiente di metallo o di vetro e frammista a chiodi, bulloni,

frammenti metallici, può provocare ferite nel raggio di una decina di metri.

### **1 - Individuazione del tipo di esplosione e di bomba.**

L'individuazione del tipo di esplosione è abbastanza facile per un esperto in quanto in quella diffusa (miscele gassose, polveri) manca il tipico focolaio dell'esplosione; per individuare invece il tipo d'esplosivo e di ordigno occorre repertare nel modo più accurato, provvedendo a setacciare anche il terreno e le eventuali macerie, tutti i frammenti, anche nel raggio di decine di metri, e occorre eseguire prelievi di sostanza nel cratere dell'esplosione. Dai frammenti si potrà risalire alla conformazione della bomba e da essi potranno essere prelevati residui inesplosi di esplosivo, o residui della sua combustione, da sottoporre ad analisi chimiche.

**L'individuazione del quantitativo** di esplosivo usato può essere fatta ad occhio da persone molto esperte, purchè gli effetti di essi consentano di farsi un'idea sulla potenzialità dell'esplosivo usato. Se si conosce approssimativamente il quantitativo di esplosivo necessario per ottenere un certo effetto, si potrà infatti dedurre dai danni cagionati il quantitativo di esplosivo impiegato. Dove esplose una carica di esplosivo si forma necessariamente un cratere di esplosione, molto indicativo; se esso manca vuol dire che vi è stata una esplosione gassosa oppure che la carica esplosiva era sospesa in aria!

Sulla base dei dati forniti dalla letteratura sull'argomento, si possono indicare le seguenti formule che, in relazione al materiale demolito ed alle sue dimensioni, consentono di stabilire approssimativamente il quantitativo C di esplosivo, in grammi, con coefficiente di equivalenza = 1 (vedi sopra), che è stato impiegato in forma di carica esterna. Ovviamente in quei materiali in cui è possibile applicare una carica interna, il quantitativo occorrente è decine di volte minore.

**Travi e pali di legno** (travi sovrapposti si considerano come un unico corpo) Travi con sezione rettangolare e lati "a" e "b" in cm.

$$C = 1,7 ab \text{ (con intasamento)}$$

$$C = 2 ab \text{ (senza intasamento)}$$

Con sezione circolare e diametro "d" in cm

$$C = 1,7 d^2 \text{ (con intasamento)}$$

$$C = 2 d^2 \text{ (senza intasamento)}$$

**Piastre metalliche** ("a" indica la larghezza e "b" lo spessore, assunto sempre superiore a 2)

Piastre semplici

$$C = 4,5 ab^2 \text{ (con intasamento)}$$

$$C = 6 ab^2 \text{ (senza intasamento)}$$

Piastre accoppiate con chiodatura o saldatura)

$$C = 4,5 a(b + 1)^2 \text{ (con intasamento)}$$

$$C = 6 a(b + 1)^2 \text{ (senza intasamento)}$$

**Barre di ferro** tonde o quadrate, posto "d" per indicare il diametro o il lato

$C = 4,5 d^3$  (con intasamento)

$C = 6 d^3$  (senza intasamento)

**Tubi o colonne di ferro** vuote, posto "d" per il diametro esterno e "s" per lo spessore del tubo, assunto sempre superiore a 2)

$C = 15 ds^2$  (con intasamento)

$C = 20 ds^2$  (senza intasamento)

**Funi d'acciaio**, posto "d" per indicarne il diametro

$C = 7 (d + 1)^3$  (senza intasamento)

### **Ferri profilati**

Si applicano le stesse formule viste per le piastre, come se il profilato fosse costituito dall'unione di più piastre semplici; per un ferro ad "L", ad esempio, si calcola il quantitativo di esplosivo occorrente per ogni lato e si somma il tutto.

**Muri**, posto "s" per indicarne lo spessore in cm, la carica per ogni metro lineare di muro (di spessore non superiore al metro) sarà

$C = 60s$  (con intasamento)

### **Cemento armato**

Travi, pilastri

$C = 3ab$  (per sezioni rettangolari, con intasamento)

$C = 3d^2$  (per sezioni circolari, con intasamento)

$C = 4,5ab$  (per sezioni rettangolari, senza intasamento)

$C = 4,5^2$  (per sezioni circolari, senza intasamento)

Solette e muri, posto "a" quale lunghezza delle breccia e "b" lo spessore

$C = 3ab$  (con intasamento)

Tubi, posto "d" per il diametro esterno ed "s" per lo spessore

$C = 10ds$

Si tenga comunque presente che le formule indicate sono alquanto sovrabbondanti in quanto studiate per ottenere un sicuro effetto di demolizione ad opera di militari che non hanno problemi di rifornimento di esplosivi. In pratica un attentatore ridurrebbe il quantitativo anche alla metà. Per chi volesse semplificare ulteriormente il calcolo, si può ritenere che per tranciare un trave di legno con esplosivo militare sistemato su di esso o attorno ad esso, senza intasamento, occorrono tanti grammi di esplosivo quanti sono i centimetri quadrati di sezione del tronco (cioè per un tronco di 20 cm di diametro circa 300 grammi di esplosivo); per sbarre, travi, binari in ferro occorre un quantitativo di circa 20 grammi per ogni centimetro quadrato di sezione; per il cemento armato di circa 4 grammi per ogni centimetro; per abbattere un muro si ritiene occorranò 60 grammi di esplosivo per ogni cm di spessore.

Talvolta si può risalire al quantitativo di esplosivo in base al cratere che l'esplosione ha lasciato sul terreno: la regola approssimativa, per quantitativi non elevati, è che una carica di esplosivo potente fatta esplodere appoggiandola su

terreno normale, vi provoca un cratere ad imbuto la cui profondità è pari ad un cm per ogni 10 grammi di esplosivo (si veda la formula più avanti).

## **2 - Il tipo di esplosivo usato**

Un esperto può individuare il tipo di esplosivo anche sulla base dell'odore che si percepisce sul luogo dell'esplosione. Però solo l'analisi chimica può consentire di individuare gli esplosivi o la miscela di esplosivi usati. Trattasi di analisi chimiche sofisticate, che debbono essere eseguite da esperti in chimica degli esplosivi. Passerà alla storia della criminologia l'analisi effettuata dai laboratori di polizia italiani sulla nave Moby Prince affondata a Livorno al fine di scoprire l'esplosivo usato per un'esplosione che non vi era mai stata: l'analisi, eseguita da incompetenti, portò ad affermare che era scoppiata una bomba composta da una miscela di una diecina (sic!) di esplosivi! Peccato però che nel luogo ove erano stati raccolti i campioni da esaminare, non vi fosse alcun focolaio di esplosione!

## **3 - Il sistema usato per l'accensione**

Salvo che esso possa essere individuato in base a particolari considerazioni logiche (una bomba fatta esplodere al passaggio di una determinata autovettura è probabile che sia stata radiocomandata), solo il reperimento di frammenti utili può consentire di stabilire quale congegno è stato usato: miccia combusta, pezzi di congegni ad orologeria, parti di congegni elettronici. In questo campo non vi è praticamente limite alla fantasia degli attentatori i quali possono partire dai congegni a tempo rudimentali che usano una scatola piena di fagioli che gonfiandosi nell'acqua fanno chiudere un circuito elettrico, o un preservativo che viene perforato lentamente da una miscela corrosiva all'acido solforico, per passare poi ai congegni ad orologeria fatti con una sveglia od un orologio od un contaminuti, fino ai moderni circuiti integrati che consentono di programmare data ed ora dell'esplosione con anticipi di giorni o settimane. L'esplosione può poi essere provocata mediante altri congegni sensibili alle più diverse sollecitazioni e reperibili in ogni negozio di elettronica: sensori ad infrarossi che chiudono il circuito quando una persona si avvicina, altimetri che fanno scoppiare la bomba quando l'aereo supera una certa altitudine (naturalmente purché la bomba non si trovi in un locale pressurizzato), cellule fotoelettriche che reagiscono alla luce, bussole che reagiscono a corpi metallici od a campi magnetici, sensori a pressione od a strappo, termometri che reagiscono alla temperatura, igrometri che reagiscono all'umidità, e così via. Le esplosioni a distanza possono essere provocate mediante cavi elettrici o mediante impulsi radio quali quelli lanciabili con i telecomandi degli aereomodellisti i quali, consentendo la trasmissione di segnali codificati, evitano anche il rischio di esplosioni premature per interferenze radio. Di solito chi usa una bomba a tempo sofisticata, impiega anche un telecomando per attivarla a distanza senza correre il pericolo di essere coinvolto in esplosioni accidentali.

#### **4 - Se una persona abbia maneggiato esplosivo**

La chimica moderna consente delle analisi talmente sofisticate da rasentare l'inverosimile e sono sufficienti particelle infinitesimali per eseguire analisi utili: chi ha maneggiato esplosivo trattiene sicuramente sulla pelle, sugli indumenti, tra i capelli, molecole della sostanza che, con opportune tecniche possono essere prelevate ed individuate. Tracce di esplosivo penetrano anche nel corpo umano ed è possibile evidenziarle anche alcuni giorni dopo il contatto, mediante l'analisi del sangue.

### **Frammenti di bombe o proiettili**

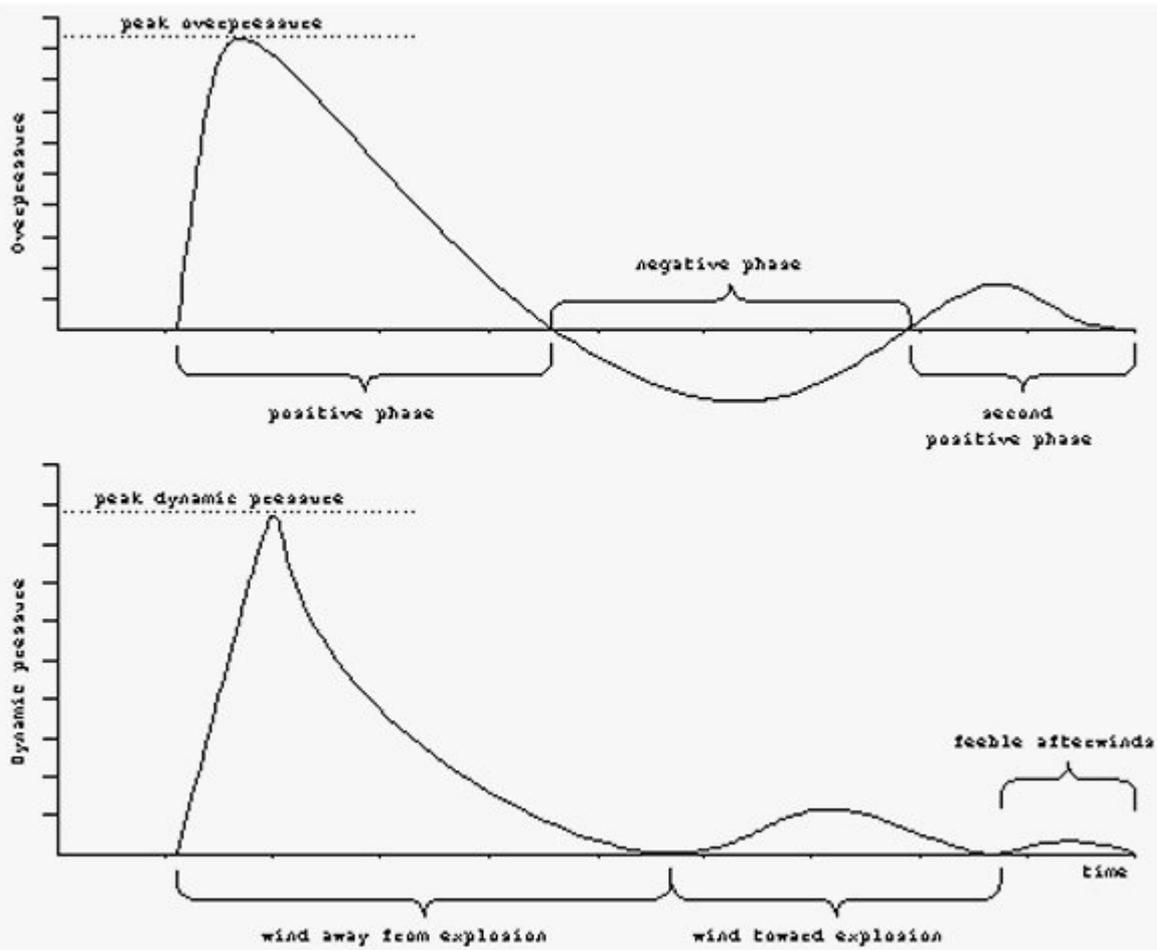
Il problema della proiezione di frammenti ad opera di una esplosione concerne sia i frammenti dell'involucro contenente l'esplosivo (bomba, proiettile, ordigno) sia i frammenti della struttura demolita dall'esplosione.

Le variabili sono troppe perché si possa costruire un modello matematico preciso e si possono dare solo indicazioni di massima per valutazioni orientative. Ogni dato di questo scritto va usato con molto spirito critico, tenendo sempre presente che la mia competenza in materia è limitata!

Gli effetti sono molto variabili anche in relazione alla massa dell'esplosivo.

L'esplosione provoca un'onda d'urto con un elevato picco iniziale che si esaurisce in pochi millisecondi; poi la pressione cala lentamente. Come l'onda passa, la pressione oscilla una o più volte tra fasi positive e negative. Quando la pressione è al di sopra di quella ambientale, l'onda d'urto si dice in fase positiva. La condizione opposta è chiamata la fase negativa. A causa della differenza di pressione all'interno dell'onda d'urto, l'aria viene portata da alta a bassa pressione. Questo crea un vento di esplosione, che può essere di notevole velocità, oltre 160 kmh. La velocità di propagazione è costante (velocità del suono). La pressione riflessa può essere da 2 ad 8 volte quella diretta.

L'onda d'urto è caratterizzata da un fronte di pressione che quando incontra un ostacolo in parte lo attraversa e in parte viene riflessa con un'onda pulsante.



## Onda di pressione

L'argomento è stato ampiamente trattato nella [pagina generale sugli esplosivi](#) a cui si rinvia. Ecco una tabella delle pressioni in bar calcolate per 5 kg di TNT-equivalenti alle varie distanze

Explosives	r (m)				
	5	7.5	10	15	20
TNT	1.42	0.63	0.37	0.19	0.1278
Cyclotol 50/50	1.59	0.69	0.41	0.21	0.1375
Cyclotol 60/40	1.61	0.70	0.41	0.21	0.1386
Octol 90/10	1.78	0.77	0.45	0.23	0.1482
FH 5	1.64	0.71	0.42	0.21	0.1402
FO 3	1.76	0.76	0.44	0.23	0.1471
PPE-01	1.55	0.68	0.40	0.21	0.1353

Per una bomba a mano di 160 gr di TNT-eq si ottiene 320 psi = 22 kg/cmq iniziali. La formula vale per una esplosione libera; se l'esplosivo è a contatto con il suolo il picco di pressione in orizzontale può arrivare a dimezzarsi.

È stato calcolato il livello di pericolosità della sovrappressione sul corpo umano:

1,5 kg/cmq : lesioni minime

2,5 kg/cmq : lesioni modeste

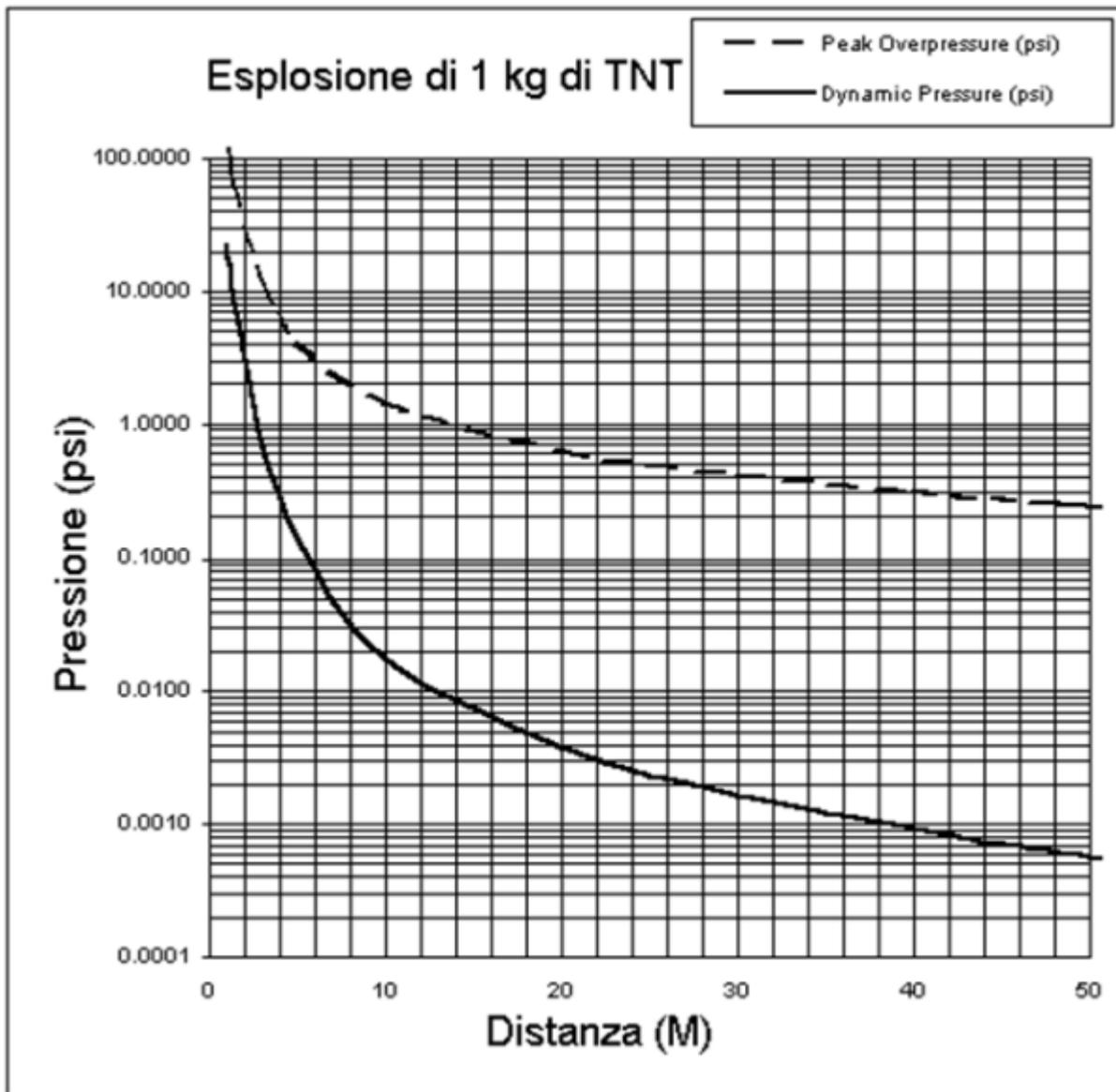
3 kg/cmq : lesioni gravi

10 kg/cmq : lesioni mortali

Una protezione con indumento balistico diminuisce il rischio del 25% .

Questi dati sono intesi per grandi masse di esplosivo, oltre il quintale; infatti a parità di pressione, la lesività decresce se diminuisce il quantitativo di esplosivo in quanto diminuisce il tempo di azione del picco di pressione.

Ecco il grafico che indica il picco di sovrappressione e la pressione dinamica in funzione della distanza dall'origine dell'esplosione di un kg di TNT.



E questi sono i danni prevedibili alle strutture :

Kg/cm	psi	Danni prevedibili alle strutture
0,010 – 0,015	0,15-0,22	Rottura dei vetri di finestre
0,035 – 0,07	0,51-1,1	Piccoli danni in alcuni edifici

0,07 – 0,12	1,1-1,8	Pannelli di metallo deformati
0,12 - 0,20	1,8-2,9	Danni evidenti ai muri
oltre 0,35	oltre 5,1	Demolizione di edifici in legno
0,28 – 0,5	4,0 -7,0	Danni gravi a costruzioni in acciaio
0,40 – 0,61	5,8-8,7	Danni pesanti a edifici rinforzati
oltre 0,7	10-11,6	Demolizione di ogni tipo di edificio

Ricordo che :

1 psi = 6'894,76 Pa = 6,894 kPa = 0,069 bar = 0,703 mH<sub>2</sub>O = 51,715 mmHg = 0,689 N/cm<sup>2</sup> = 0,068 atm = 0,0703 kg/cm<sup>2</sup> = 144 lbf/ft<sup>2</sup> = 2,31 ftH<sub>2</sub>O.

1 km/cm<sup>2</sup> = 14,22 psi

L'esplosione di un ordigno o di una bomba o di un proiettile provoca la proiezioni di frammenti di varie dimensioni. Una grossa bomba d'aereo si frammenta in oltre 2000 pezzi il 50% dei quali va da 1,5 a 10 grammi di peso. Frammenti di artiglieria con peso di 0,3 - 0,5 gr. producono ferite penetranti, anche nel torace, fratturano ossa facciali e tibia se hanno una energia cinetica di 100-120 J/cm<sup>2</sup>. Penetrano nel muscolo per 6-8 cm.

La forma dei frammenti (salvo i casi di involucri preintagliati) è estremamente variabile con bordi frastagliati, come se il materiale fosse stato strappato; quindi sono molto taglienti. Essi raggiungono velocità di 1000-1500 m/s ma, a causa dell'elevata resistenza che oppongono all'aria e quando hanno un peso inferiore a mezzo grammo, non sono più letali dopo 5 metri di volo.

È quasi impossibile individuare un modello matematico della balistica dei frammenti, men che approssimativo.

Esiste una formula (formula di Gurney) che consente di calcolare approssimativamente la velocità iniziale di un frammento

Dati:

**C** – La massa della carica esplosiva

**M** – La massa dell'involucro

**V** – Velocità iniziale dei frammenti

$\sqrt{2E}$  - La Costante di Gurney relativa all'esplosivo usato e che indica il calore di esplosione in J/kg. Essa viene espressa in unità di velocità (ad es. millimetri per microsecondo o chilometri per kg). In via molto approssimativa essa è pari a 1/3 della velocità di detonazione.

Ecco i valori della costante per alcuni esplosivi:

Esplosivo	Costante
Composition B	2770
Composition C-3	2680
Cyclotol 75/25	2790

HMX	2800
LX-14	2970
Octol 75/25	2800
PBX 9404	2900
PBX 9502	2377
PETN	2930
RDX	2830
Tetryl	2500
TNT	2440
Tritonal	2320

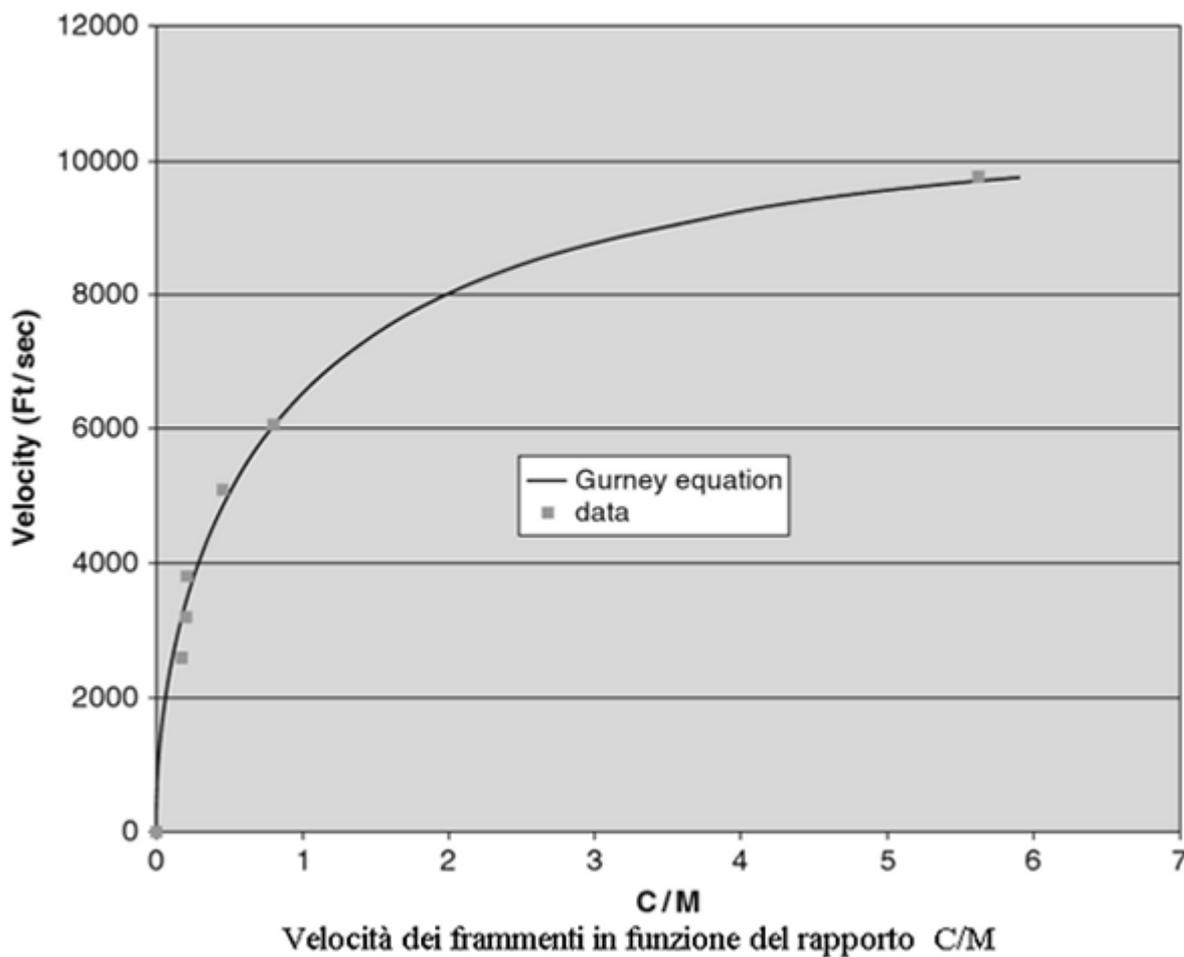
Se la carica ha forma di cilindro, come in bombe o proiettili esplosivi , la formula da usare è

$$\frac{V}{\sqrt{2E}} = \left( \frac{M}{C} + \frac{1}{2} \right)^{-1/2}$$

Se la carica è sferica

$$\frac{V}{\sqrt{2E}} = \left( \frac{M}{C} + \frac{3}{5} \right)^{-1/2}$$

La velocità massima iniziale che sia assume raggiungibile da un frammento è di 4600 m/s



Esempio: trovare la velocità iniziale di frammenti di una bomba a mano M-61

La M-61 utilizza 185 g di Comp-B (costante di Gurney = 2770 m/s) e l'involucro pesa 210 g. Il rapporto fra carica e metallo è

$$M/C = 210/185 = 1,135$$

Utilizzando il fattore per oggetti di forma sferica  $K = 3 / 5$  si ha

$v_o = 2100$  m/s ; in realtà i frammenti di una bomba a mano non superano i 1500 m/s e sono innocui dopo 250 metri circa.

Ecco i dati sperimentali per i frammenti di una bomba a mano russa:

Peso/grammi	Vo m/s
0,116	1570
0,168	819
0,195	1430
0,198	1074
0,200	972
0,300	840

La seguente tabella sperimentale per un proiettile da 105-mm M1 dà una indicazione realistica sul comportamento dei frammenti. La distanza massima raggiunta dal frammento più pesante e più veloce è 590 m. Il raggio di rischio è di circa 100 metri, ma con un calo drastico di probabilità di colpire un avversario

oltre i 25 m. dal punto di impatto. La bomba è considerata sicuramente letale entro i 5 m. In genere nei proiettili il rapporto esplosivo involucro è di 0,1 – 0,2.

Peso Kg	Vo m/s	Dist max m
0,093	1235	591
0,070	1484	569
0,039	1577	484
0.043	1225	471

Un'altra formula consente di valutare la perdita di velocità del frammento dopo un certo percorso è la seguente:

$$v_s = v_0 e^{\frac{-\rho C_d A S}{2m}}$$

In cui  $\rho$  è la densità dell'aria (1,2 Kg/mc)

$C_d$  è il coeff. aerodinamico

A l'area sezionale del frammento

S la distanza in metri

M il peso del frammento in kg

Sia ad esempio da trovare la velocità a 100 metri dalla scoppio di un frammento di M61. Se:

$V_0 = 2100$  m/s

$A = 1$  cmq

$C_d = 0,5$

$m = 2$ g

$\rho = 1,2$

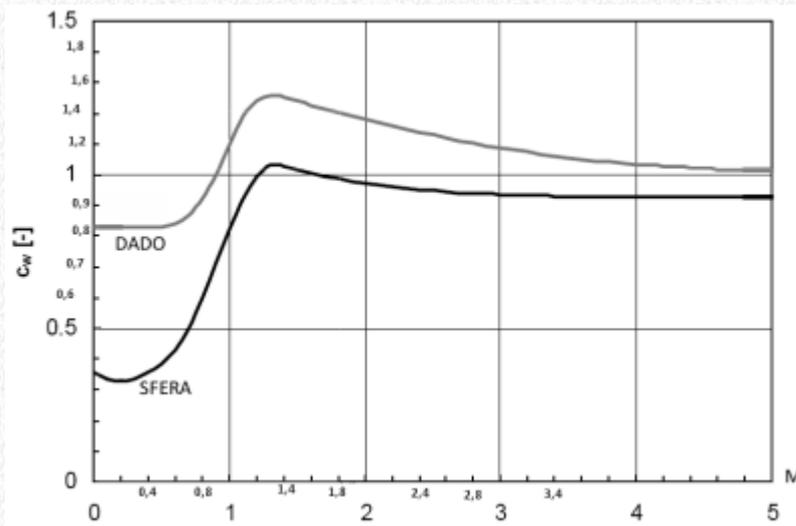
si avrà

$$V_s = 2150 e^{\frac{-1,2 \times 0,5 \times 0,0001 \times 100}{2 \times 0,002}} = 468 \frac{m}{s}$$

A 6 m  $V_s$  sarebbe di 1920 m/s, a 10 metri 1800 ms; a 20 m 1555.

Il problema è ovviamente di stabilire il coeff. aerodinamico da impiegare; 0,5, come suggerito nell'esempio sopra riportato, è il  $c_x$  per un proiettile ideale che viaggia a 6 Mach, con variazione possibile fra 0,4 e 0,6; ma un frammento rotante presenta una resistenza infinitamente maggiore (anche 7 volte). Se si assimila il frammento ad un dato si ha un  $c_x$  di 0,8 per velocità subsoniche e di 1,5 - per

velocità ultrasoniche, con buoni risultati:



Il calcolo può comunque essere fatto con qualunque programma di balistica /ad es. Winballit) utilizzando un coefficiente aerodinamico pari ad 1,5 se si assume un comportamento del frammento simile a quello di una sfera e pari a 2 se si assume che esso opponga la stessa resistenza all'aria di un cilindro.

Questo appare essere il coefficiente più realistico considerando che il frammento viaggia con un movimento rotatorio vorticoso e con una forma e superficie continuamente variabili. Quando la velocità del frammento scende sotto la velocità del suono il  $C_x$  va assunto pari a 0,8 - 1.

In pratica il frammento oppone, istantaneamente, al flusso d'aria relativo, un'area (superficie proiettata) durante il volo a causa del tumbling o della rotazione. In prima approssimazione il frammento può essere concepito come collocato con diversi orientamenti nel flusso d'aria, in un intervallo temporale discreto, nel quale si possa definire un particolare numero di Mach uguale in tutto l'intervallo temporale di riferimento. Se si mediassero nell'intervallo tempo considerato, tutte le variabili fluidodinamiche associate allora potremmo utilizzare un coefficiente aerodinamico pari ad 1,5 (comportamento del frammento simile a quello di una sfera) o pari a 2 (comportamento del frammento simile a quello di un cilindro): quest'ultimo appare essere il coefficiente più realistico considerando che il frammento (assimilabile ad un parallelepipedo) viaggia con un movimento rotatorio vorticoso proiettando sempre una differente superficie nel flusso d'aria relativo. Quando la velocità del frammento scende sotto la velocità del suono il  $C_x$  andrebbe assunto, nelle ipotesi di partenza, pari a 0,8 - 1. Ma i coefficienti che ho indicato sopra a naso, corrispondono abbastanza agli studi teorici.

Per il brillamento di proiettili, per il caso in cui sia non possibile una proiezione tale da non consentire di raggiungere la massima gittata, si consiglia una distanza di sicurezza, assolutamente sovrabbondante, data dalla formula:

$D = 370 * \text{Peso}/\text{kg}^{1/5}$ , nel caso di un solo proiettile e di

$D = 650 * \text{Peso}/\text{kg}^{1/5}$ , nel caso di proiettili accatastati.

## Bombe ed evacuazioni

NB: Si veda ora, 10 febbraio 2020, lo scritto conclusivo LA DISTANZA DI SICUREZZA DA OSSERVARE RISPETTO ALLA PROIEZIONE DI FRAMMENTI DI BOMBE con calcoli matematici, programma di calcolo, regole generali sulla bonifica da bombe.

Domani 20 ottobre 2019, a Bolzano si procederà ad una evacuazione di mezza città per una bomba d'aereo da 250 kg, rinvenuta in centro durante uno scavo. Nella scala delle bombe della II GM (che va da circa 100 kg a 2.000 kg, ma si è arrivati anche a 10.000 kg!), è ad un livello basso.

Resto sempre molto stupito dalle regole che l'esercito italiano stabilisce per il disinnescamento di bombe d'aereo.

Leggo, ad esempio, che secondo le loro tabelle, con una bomba da 250 kg lordi (140 kg di esplosivo) l'onda d'urto e le schegge possono essere letali fino a quasi 2 km di distanza (per l'esattezza 1830 m.)

Sarei proprio curioso di sapere su quali basi scientifiche è stata creata quella tabella. Ho letto e studiato decine di libri sull'argomento e non ho mai trovato nulla di simile.

In Germania, dove trovano oltre 5000 ordigni inesplosi ogni anno, hanno stabilito ufficialmente nella legge sugli esplosivi, che il raggio di sicurezza è al massimo di mille metri, anche per le bombe più potenti.

Il testo più vasto sulle bombe della II GM (Hampe, *Der zivile Luftschutz im Zweiten Weltkrieg, Dokumentation und Erfahrungsberichte über Aufbau und Einsatz*, 1963) scrive che con una bomba da 500 kg di esplosivo, netti, si danneggia gravemente un edificio a 50 metri di distanza, ma che per danneggiarlo a 100 metri occorre un quantitativo sei volte maggiore.

Basta una breve ricerca in Internet sui più recenti disinnescamenti in Germania per vedere quali siano le zone di sgombero, tenendo presente che si parla di zona di evacuazione per la zona da cui si allontana ogni persona, e di zona di sicurezza in cui le persone vengono consigliate di restare con un tetto sulla testa. Si assume, a braccio, che la zona di sicurezza deve avere un raggio doppio a quella di evacuazione.

Kiel (12-10-2019)	bomba da 250 kg	250+250 m
Colonia (14-10-19)	bomba da 500 kg	500+500 m
Bielefeld (07-10-2019)	bomba da 500 kg.	500 + 500 m
Gladbeck (31-1-2029)	bomba da 250 kg	250+250 m
Dortmund (20-5-2019)	bomba da 250 kg	250+250 m
Münster (6-3-2019)	bomba da 500 kg	500 + 500 m

NB: La zona di sicurezza è eventuale e dipende dall'infossamento della bomba e dalla possibilità di contenere le schegge con protezioni.

Si può quindi concludere che in Germania (dove il disinnescamento viene affidato a ditte private, assicurate per ogni rischio, e il padrone del terreno paga tutte le spese), per una bomba da 250 kg si considera normalmente sufficiente lo sgombero in un raggio di 250 metri, oltre ad altri 250 metri in cui si deve solo evitare di restare all'aperto se vi è concreto pericolo di caduta pericolosa di frammenti.

Il metodo più usato e sicuro è quello del taglio della bomba con un getto di acqua e sabbia a 3000 bar di pressione, capace di tagliare fino a 12 cm di acciaio. Esso viene telecomandato da distanza di sicurezza dagli artificieri.

Queste regole corrispondono all'analisi scientifica del problema, con cui si è giunti a stabilire formule matematiche affidabili per calcolare gli effetti dell'esplosione di una bomba (formula di Gurney per i frammenti, formule di Sadovski per l'onda d'urto, ecc.)

I danni e pericoli derivano dall'onda d'urto o di pressione dello scoppio che, a breve distanza, può distruggere un edificio, e dalla proiezione di frammenti e pietre.

L'onda d'urto, che può essere paragonata ad un'onda di pressione, ad un vento o ad suono, diminuisce rapidamente all'aumentare della distanza dall'origine ed è fermata o deviata da ogni ostacolo o barriera.

Secondo le formule di Sadovski, universalmente riconosciute come valide, una bomba da 250 kg lordi provoca a 100 m una pressione di circa 0,5 at che corrisponde alla distanza minima da osservare dagli artificieri stessi e che provoca gravi danni ad un edificio.

L'esplosione della stessa bomba danneggia le foglie di un albero fino a 30 m.

Se l'esplosione avviene all'interno di un edificio l'effetto è spesso molto maggiore perché è noto che gli effetti più distruttivi li provoca

l'onda retrograda, di ritorno, cioè quella che riempie il vuoto lasciato dopo il passaggio dell'onda d'urto.

È chiaro perciò che se vi è una fila di edifici, quelli che fronteggiano la bomba sono ad alto rischio di distruzione, ma quelli che sono dietro di essi rischiano ben poco. Perciò la distanza di 250 metri usata in Germania è rassicurante perché, anche se vi è uno spazio libero di 250 metri fra bomba e persona, l'onda d'urto si riduce a 0,2 at, pressione, a cui resistono persino i timpani!

Circa la proiezione di frammenti o pietre si considera assolutamente tranquillizzante la distanza di 900 metri. Questa è la distanza indicata in ogni manualetto per la disattivazione di proiettili.

Questo però nel caso che la bomba sia appoggiata sul terreno così che i frammenti possano partire anche raso terra a velocità altissima. Ma se la bomba è sprofondata sotto terra e attorno ad essa vi è una buca, i frammenti possono partire solo verso l'alto e quindi ricadono ad alcune centinaia di metri con scassa capacità lesiva. L'esperienza fatta in attentati terroristici commessi riempiendo un'auto con esplosivi, dimostra che con 230 kg di esplosivo si hanno effetti letali a 30 m., che la distanza minima da osservare è di 100 m e che la distanza tranquillizzante è di 320 m.

Valori questi compatibili con le regole tedesche.

Si vedano in Internet i miei scritti

<http://www.earmi.it/balistica/esplosivi.htm>

<http://www.earmi.it/balistica/frammenti.html>

[http://www.earmi.it/balistica/Klimi-Mori\\_%20Shockwave.html](http://www.earmi.it/balistica/Klimi-Mori_%20Shockwave.html)

(in inglese)

Il bello è che questi dati sono confermati persino dalle norme ufficiali italiane!

Il Regolamento al T.U. della Legge di Pubblica Sicurezza stabilisce che un deposito di 200 kg di tritolo richiede una distanza di sicurezza di 215 m. e, per 300 kg, di 260 m. Alla distanza di due chilometri, previsti per la bomba di Bolzano, la legge consente di depositare 30 tonnellate di tritolo.

Analogamente le regole internazionali di evacuazione per attentati commessi caricando un veicolo con esplosivi prevedono che nel caso di un autotreno con 30 tonnellate di esplosivi si sgomberi il terreno per un raggio di 1600 metri (si veda Paul Tasca, *Bombs, IEDs, and Explosives: Identification, Investigation, and Disposal Techniques* 2016).

Credo, a questo punto, che sia doveroso, per il Ministero della Difesa, spiegare quale sia il fondamento scientifico delle tabelle di sgombero che impiegano.

Questo, naturalmente, se vogliono allontanare da loro il diffuso sospetto che i valori delle tabelle sono stati quadruplicati solo per garantire l'assoluta sicurezza dei burocrati, senza tenere in alcun conto danni, disagi, spese cagionati alla popolazione.

Ma io un fondato sospetto ce lo avrei; se si considera lo strano valore di 1830 metri che indicherebbero le tabelle usate dalle Forze Armate e si ipotizza che le tabelle fossero espresse in piedi e non in metri, si ottiene un valore di poco superiore a quello corretto di 500; è noto che questi valori sono approssimativi e perciò nelle tabelle inglesi la distanza che noi approssimiamo in 550 m. sia approssimata in 1800 piedi. Il che potrebbe voler dire che le Forze Armate hanno usato una tabella americana o inglese senza accorgersi che i valori erano espressi in piedi e non in metri!

Capisco che in caso anche di minino incidente si trova sempre un pubblico ministero fuori controllo, pronto ad indagare tutti, da Roma al Brennero (hanno persino indagato chi non aveva previsto un terremoto!), e che i militari temono più la giustizia che le bombe, ma questo è il destino di chi svolge attività pericolose in Italia ove da tempo il buon senso è calpestato. Basti pensare ai medici costretti alla "medicina difensiva" per non dover passare più tempo in tribunale che in ospedale, eppure un *modus vivendi* si è trovato. Se il Ministero della difesa avesse il coraggio di scrivere nero su bianco quali sono le regole da osservare in questi casi secondo criteri scientifici e secondo la prassi internazionale (in medicina si chiamano *linee guida*), chi opera sul campo avrebbe molto meno da temere dalla giustizia.

19 ottobre 2019

### **Appendice 1:**

Il 28 agosto 2012 a Monaco di Baviera, quartiere di Schwabing una bomba da 250 kg è stata fatta brillare sul posto perché non poteva essere disattivata. La bomba è stata coperta con un autreno di balle di paglia. Sono state evacuate circa 2500 persone per un raggio di 300 metri. Nessuna zona di sicurezza, Diciassette case attorno alla esplo-

sione sono state danneggiate, le finestre sono state sfondate anche dietro la prima fila di case, frammenti di paglia infuocata hanno provocato piccoli principi di incendio, non vi sono stati feriti (<https://www.thelocal.de/20120828/44617>).





Va detto che la ditta che ha eseguito i lavori è stata criticata per l'uso della paglia troppo leggera e che ha fatto una vampa molto superiore al previsto: in effetti c'era di meglio.

Però gli esempi riportati dimostrano che non vi è ragione di non seguire l'esperienza tedesca; e se qualcuno non fosse ancora convinto, lo invito a rispondere con fatti scientifici e con esempi concreti, e non chiacchiere!

**Appendice 2:**

20 novembre 2011. A Coblenza viene rinvenuta una mina aerea inglese (*Luftmine*) tipo HC 4.000 LB mit 15.000 kg di esplosivo Torpex (T4). Zona di evacuazione di 1800 metri

[https://de.wikipedia.org/wiki/Evakuierung\\_in\\_Koblenz\\_am\\_4.\\_Dezember\\_2011](https://de.wikipedia.org/wiki/Evakuierung_in_Koblenz_am_4._Dezember_2011))

Secondo gli operatori l'esplosione della bomba avrebbe distrutto gli edifici nel raggio di 30 metri; oltre tale distanza e fino a 1000 m danni lievi ai tetti alti e alle finestre.

24 maggio 1999 a Coblenza. Bomba di 18 quintali. Raggio di evacuazione 1800 metri

<http://archiv.rhein-zeitung.de/on/99/05/24/topnews/koblenz.html>

### **Appendice 3**

Questa è un capolavoro tragicomico!

Battipaglia 8 settembre 2019; una bomba con 30 kg di esplosivo deve essere disinnescata nell'abitato. La zona di evacuazione viene stabilita in 1600 metri! Quasi 37.000 persone spostate. In Germania avrebbero evacuato forse un raggio di 100 metri.

Ma la cosa ancora più tragicomico è il comunicato del Ministero dell'Interno intriso di tronfia soddisfazione:

" Disinnescata alle 18.05 di ieri la bomba d'aereo della II Guerra mondiale ritrovata durante i lavori di scavo in un'azienda privata a Battipaglia, provincia di Salerno.

Effettuata dagli **artificieri** del 21° Reggimento Genio guastatori della Brigata bersaglieri "Garibaldi" di Caserta, unità specializzata dell'Esercito italiano, l'operazione ha coinvolto 500 operatori di Forze dell'ordine, Croce rossa, prefettura di Salerno, che le ha coordinate, e comune di Battipaglia, più altri 500 volontari della protezione civile regionale.

Ancora in buone condizioni, **la bomba** conteneva 30 kg di esplosivo per 124 di peso, e presentava un congegno anti-rimozione che ne impediva il trasporto. **Per questo motivo il brillamento è stato effettuato nella stessa sede del ritrovamento**, con l'adozione di una serie di misure di sicurezza - tra queste delle fortificazioni per delimitare l'area - e l'evacuazione di 36000 persone. Sospeso, inoltre, per tutta la durata delle operazioni, il traffico sull'autostrada A2, in entrambe i sensi di marcia, sulla tratta Pontecagnano - Eboli.

Il comune ha allestito 3 **strutture di accoglienza** con punti ristoro considerata la lunga durata delle operazioni seguite e coordinate dal

centro coordinamento soccorsi (Ccs) presieduto dalla prefettura, attivo dalle 5 di ieri mattina nella sede della protezione civile comunale di Battipaglia.

Un foro praticato sulla bomba, poi la "lisciviatura", ovvero lo svuotamento dell'esplosivo attraverso un getto d'acqua, la sua bonifica tramite combustione libera e, infine, il brillamento della spoletta con l'aiuto di una carica esplosiva.

Queste le fasi dell'intervento, riuscito con successo grazie alla «preziosa collaborazione di tutte le componenti», ha detto al termine delle operazioni il prefetto di Salerno **Francesco Russo**: per la competenza degli artificieri, l'impegno delle Forze dell'ordine, per l'azione del comune, con gli operatori in campo e il sindaco presente nel Ccs, della protezione civile regionale e dell'azienda sanitaria locale, e per la collaborazione dei cittadini evacuati, rientrati nelle loro abitazioni solo dopo le 18.30, quando l'area è stata riaperta."

Altro che soddisfazione: non hanno capito nulla, credono che la bomba sia stata fatta brillare sul posto ed invece è stata un normalissimo disinnescamento con lavaggio dell'esplosivo; poi la spoletta, come normale, è stata fatta esplodere sul posto! Cosa che si fa in tutta sicurezza perché basta coprirla con un apposto telone e non vi è proiezione di schegge.

Sembra che i responsabili in questi casi facciano a gara a chi evacua più persone e chiude più strade e ferrovie. Sembra che la regola sia "meglio rompere le balle e far danni di milioni a 40.000 persone, meglio spendere i soldi pubblici purché nessuno ci possa mai accusare della minima colpa!" Sono cose da indagine penale e contabile, non da elogio. Non so se ciò deriva da protagonismo, dal desiderio di magnificare le attività delle FFAA (che amo e rispetto e che vorrei non offrissero il fianco a sospetti), dalla possibilità di raggranellare qualche straordinario, dalla possibilità di far guadagnare qualche soldo a persone di cui si potrebbe fare a meno, ma il tutto si evirerebbe se facessero ciò si fa in tutti gli altri paesi del mondo, come ampiamente dimostrato dai casi che riporto in appendice.

Si badi che la bomba era al margine dell'abitato e che da un lato vi erano terreni agricoli verso i quali poteva e doveva essere deviata l'eventuale onda esplosiva:



Inoltre la bomba era stata infossata in una enorme buca circondata da enormi cassoni di rete riempiti di terra, tale da contenere anche un'esplosione di quintali di esplosivo



Questa era la zona di evacuazione



e questo un ingrandimento da Google Earth



in cui si vede che la bomba (cerchietto nero) era ad almeno 150 metri da abitazioni, salvo i capannoni; quindi in pratica serviva una evacuazione modestissima perché l'onda d'urto sarebbe andata verso l'alto. E l'autostrada era a 1200 e nessuna regola al mondo considera in pericolo chi si trova in tale zona, salvo raccomandare di restare al coperto; ma chi viaggia in auto è al coperto!

Va a finire che la gente la prossima volta li manda ed evacuare da un'altra parte!

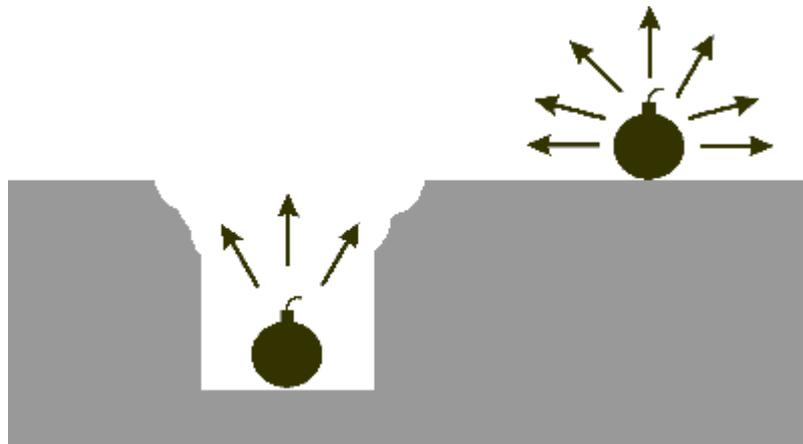
#### **Appendice 4**

Ho scoperto da dove deriva la distanza di evacuazione di 1830 m. Non vi è stata confusione fra piedi e metri, come avevo ipotizzato. Ma è vero che gli esperti della difesa continuano a citare testi Nato Stanag come fonte del loro sapere. Ma questi atti Stanag contengono solo dei semplici rinvii ad altre disposizioni che nessuno ovviamente si è mai andato a studiare, altrimenti citerebbero dati tecnici e non letterari!

Tale distanza deriva dalla formula empirica

**Distanza =  $976,4 + 172,5 * \ln(C)$**  in cui C è il peso dell'esplosivo espresso in unità equivalenti di TNT.

La formula è nota, ma è valida in ben altre situazioni; essa è stata studiata misurando la proiezione di frammenti di bomba appoggiata al suolo, sulla roccia o, persino sospesa a qualche metro da terra. Dovrebbe essere ovvio per tutti, anche per chi non è Pico de Paperis, che la formula non ha senso quando la bomba è sprofondata dentro una buca e bastano pochi ripari, pochi sacchi di sabbia per trattenere i frammenti con maggior gittata. Si veda <http://www.earmi.it/varie/depositi.htm>.



## Appendice 5

Brindisi, 15 dicembre 2019.

Scrivono i giornali:

" si tratta della **più grande evacuazione mai effettuata in Italia in tempi di pace**: 54 mila persone su un totale di 87 mila abitanti, più del 60% della popolazione. Il motivo della vastità dell'operazione è semplice: **la bomba è stata danneggiata** in uno dei due congegni di attivazione, e **il rischio di esplosione è più alto** rispetto ai ritrovamenti più «tradizionali».

... La bomba, di fabbricazione inglese, **pesa 500 libbre**, è **lunga un metro e contiene 40 chili di tritolo**. È stata sganciata, presumibilmente, nel **1941**. La spoletta è stata danneggiata durante il ritrovamento.

... Evacuazione dell'intera zona rossa (un'area dal raggio di 1.617 metri dal luogo in cui trova l'ordigno bellico)".

Non è la più grande operazione, ma la più grande bufala, L'esercito italiano non ci fa certo una bella figura. È ridicolo dire che la zona

di rischio è più ampia perché è maggiore il rischio di esplosione in quanto la spoletta è danneggiata. La zona di sicurezza viene fissata in base al pericolo di danni, non in base al pericolo di esplosione. È un dato scientifico, non una ipotesi. Il pericolo di esplosione è presunto e temuto sempre; altrimenti la bomba verrebbe portata via su di un furgone. E comunque era una bomba di piccole dimensioni.

Ecco che cosa mio ha scritto il giorno 16 un Ammiraglio americano (email tradotta da me):

*Egregio sig. Edoardo Mori*

*Le porgo le mie congratulazioni per il suo chiaro e illuminante articolo sul disinnescamento degli ordigni bellici.*

*In qualità di ammiraglio della Navy, sono veramente sconvolto nell'aprendere dai giornali la inettitudine dei militari italiani, gente indegna di indossare la uniforme che rappresenta lo stato italiano, e ovvio che per noi al Pentagono non è cosa nuova ritrovarci a confrontarsi con parigrado italiani di cui la preparazione è inqualificabile, ma molto evidenti i benefici ed emolumenti che ricavano dalla loro uniforme.*

*Una persona del suo calibro sarebbe accolta con entusiasmo nei nostri ranghi e servizi in America a differenza dell'Italia dove se la avessero consultata non avrebbe avuto a far soffrire alla cittadinanza di Brindisi cotanti disagi, con soldi del contribuente sperperati.*

*Un rinnovato elogio per i suoi lavori.*

Il 13 dicembre a Potsdam è stata disinnescata una bomba da 100 kg : zona di sicurezza di 800 metri senza evacuazione di persone perché non vi erano case nelle immediate vicinanze.

Il 12 dicembre a Oranienburg bomba da 500 kg: zona di evacuazione di 1000 m, evacuate 5.000 persone.

Come dire: In Germania la zona rossa sarebbe stata di 200 metri con un migliaio di evacuati!

#### **Appendice 6 - Come si lavora in Renania - Articolo di giornale**

<https://web.de/magazine/regio/rheinland-pfalz/kampfmittelraeumer-50-bomben-35-tonnen-munition-34302308> (non più attivo)

Fino a poco prima di Natale, il servizio di eliminazione degli ordigni (KMRD) ha reso innocua la Renania-Palatinato circa 50 bombe più grandi, come ha riferito il responsabile Marco Ofenstein all'agenzia di stampa tedesca. "Gran parte è stata disarmata e alcune sono state rimosse anche perché, ad esempio, mancavano i detonatori". In

totale, i 15 impiegati maschi KMRD hanno smaltito quasi 35 tonnellate di munizioni a livello nazionale quest'anno.

Fu solo nella notte del 20 dicembre che i disinnescatori di ordigni nella città del Palatinato di Germersheim fecero esplodere una pericolosa bomba al fosforo del peso di 50 chilogrammi. Circa 2.000 residenti hanno dovuto lasciare le loro case nella zona pericolosa per motivi di sicurezza. Il dispositivo esplosivo più pesante disarmato nel 2019 pesava 1000 chilogrammi. Per lavorare alla bomba degli Stati Uniti a giugno, circa 600 residenti hanno dovuto lasciare le loro case intorno al sito vicino a Dattenberg nel distretto di Neuwied. Un ricercatore di reperti autorizzato aveva scoperto l'ordigno inesplosivo. "Stava cercando oggetti d'antiquariato e ha trovato un oggetto d'antiquariato completamente diverso. Era abbastanza spaventato", dice Ofenstein.

Quest'anno, l'8 dicembre, la maggior parte dei residenti è stata colpita da un disinnescamento: a Coblenza, i cacciatori di ordigni hanno reso innocua una bomba da 250 chilogrammi - circa 4.000 cittadini hanno dovuto lasciare un raggio di 500 metri attorno all'ordigno inesplosivo.

Il numero di ritrovamenti riportati quest'anno sono stati attorno a 1000. "Ma c'erano anche dei falsi, per esempio qualcuno pensava che un blocco per ombrellone nel Reno fosse qualcosa di pericoloso." Le denunce non sono diminuite. "Alcune persone sono diventate più sensibili, anche a causa dell'estrema bassa marea del Reno nel 2018", afferma il responsabile del gruppo.

Secondo Ofenstein, sette decenni e mezzo dopo la seconda guerra mondiale, ci sono naturalmente pochissimi riferimenti a ordigni inesplosivi. "Se le informazioni si riferiscono solo a 20 o 30 metri quadrati, controlliamo. Naturalmente, se si tratta di un'intera area urbana, non è possibile."

Ofenstein prevede: "Gli ordigni inesplosivi continueranno ad accompagnarci per diverse generazioni". Gli esperti stimano che circa un decimo delle bombe sganciate sulla Germania non esplose durante la seconda guerra mondiale. Secondo il KMRD, i detonatori a volte si ghiacciano quando lasciati cadere da un'altezza di diverse migliaia di metri, così che il dispositivo di sicurezza si blocca. O le bombe con detonatori solo sulla testa o sul bordo cadono male e non esplodono. La precisione del bersaglio era comunque scarsa.

A Coblenza, il KMRD Renania-Palatinato ha un deposito temporaneo per le munizioni trovate. Di solito questo viene portato alla società di proprietà federale per lo smaltimento di agenti di guerra chimica e rifiuti di armamenti (Geka) a Munster, Bassa Sassonia. Il Geka riporta: "Le armi chimiche e convenzionali perdono il loro orrore qui in processi di disattivazione altamente specializzati". La sede principale del KMRD Renania-Palatinato è Coblenza e la sede amministrativa è Treviri. C'è anche una posizione in Worms.

#### **Appendice 7 - Evacuazione a Dortmund**

[https://www.dortmund.de/de/leben\\_in\\_dortmund/sicherheit\\_und\\_recht/evakuierung\\_klinikviertel\\_12\\_januar/start\\_evakuierung/index.html](https://www.dortmund.de/de/leben_in_dortmund/sicherheit_und_recht/evakuierung_klinikviertel_12_januar/start_evakuierung/index.html)

12 gennaio 2020 - Disinnesco riuscito!

Due bombe inesplose nel distretto ospedaliero vengono disinnescate: l'area di evacuazione viene riaperta.

È stata delle più grandi evacuazioni nel dopoguerra: domenica 12 gennaio, oltre 14.000 residenti a Dortmund hanno dovuto dovettero lasciare il distretto ospedaliero. Il servizio di smaltimento degli ordigni ha disinnescato due bombe da 250 kg, che sono state trovate in quattro punti sospetti.

Una bomba britannica da 250 kg è stata trovata in Luisenstrasse. Una bomba americana da 250 kg in Beurhausstrasse.

Nell'area del distretto ospedaliero di Dortmund, negli ultimi mesi sono state condotte indagini sullo smaltimento degli ordigni da parte dell'esperto servizio di smaltimento degli ordigni del governo distrettuale di Arnsberg. I progetti di costruzione attuali e futuri hanno reso necessario questo lavoro preparatorio. Durante l'indagine, sono state anche identificate le cosiddette anomalie, che indicano possibili ordigni inesplosi della seconda guerra mondiale. Può essere accertato solo scavando se sono davvero ordigni.

L'evacuazione interesserà circa 13.000 residenti, pazienti delle due cliniche, ospiti dell'hotel e oltre 200 residenti di due case di riposo.

Le due sospette bombe si trovano in Beurhausstrasse, Luisenstrasse, all'incrocio tra Rheinische Strasse e Westentor, e nell'area del giardino dell'ospedale St. Johannes. Un raggio di 500 metri è stato tracciato attorno a tutti e quattro i punti sospetti per l'evacuazione, che si applica per un peso complesso di bombe per 500 kg.

#### **Appendice 8**

Dal sito <https://web.de/magazine/regio/rheinland-pfalz/kampfmittelraeumer-50-bomben-35-tonnen-munition-34302308> - Aggiornato il 28 dicembre 2019.

### **Appendice 9**

8 febbraio 2020 - A Stahnsdorf nel Brandenburgo, vicino a Potsdam, una bomba da 500 kg è stata fatta esplodere sul posto perché non si poteva disinnescare. Raggio di evacuazione 500 m. Rottura di molti vetri e due tetti scoperti dall'onda di pressione. Altre case attorno abitabili, ma con danni minori.

**Articolo: Coblenza (dpa / lrs) - Rischiano la vita per proteggere il grande pubblico: circa 75 anni dopo la fine della seconda guerra mondiale, gli addetti alle pulizie nella Renania-Palatinato hanno rimosso anche molti siti esplosivi contaminati nel 2019.**

Fino a poco prima di Natale, il servizio di smaltimento degli ordigni (KMRD) ha reso innocua la Renania-Palatinato circa 50 bombe più grandi, come ha riferito il responsabile della colonna Marco Ofenstein all'agenzia di stampa tedesca. "Gran parte è stata disarmata e alcune sono state rimosse anche perché, ad esempio, mancavano i detonatori". In totale, i 15 impiegati maschi KMRD hanno smaltito quasi 35 tonnellate di munizioni a livello nazionale quest'anno.

Fu solo nella notte del 20 dicembre che esplosivi espulsori di ordigni nella città del Palatinato di Germersheim fecero esplodere una pericolosa bomba al fosforo del peso di 50 chilogrammi. Circa 2.000 residenti hanno dovuto lasciare le loro case nella zona pericolosa per motivi di sicurezza. Il dispositivo esplosivo più pesante disarmato nel 2019 pesava 1000 chilogrammi. Per lavorare alla bomba degli Stati Uniti a giugno, circa 600 residenti hanno dovuto lasciare le loro case intorno al sito vicino a Dattenberg nel distretto di Neuwied. Un driver di sonda con approvazione ufficiale aveva scoperto l'ordinanza inesplosa. "Stava cercando oggetti d'antiquariato e ha trovato un oggetto d'antiquariato completamente diverso. Era abbastanza spaventato", dice Ofenstein.

Quest'anno, l'8 dicembre, la maggior parte dei residenti è stata colpita da un disinnescamento: a Coblenza, i cacciatori di ordigni hanno reso innocua una bomba da 250 chilogrammi - circa 4.000 cittadini hanno dovuto lasciare un raggio di 500 metri attorno all'ordigno inesplosa.

Il numero di record riportati quest'anno è una fornace attorno a 1000. "Ma c'erano anche rivetti, per esempio qualcuno pensava che un piede da parasole nel Reno fosse qualcosa di pericoloso." I rapporti di ricerca non sarebbero meno: "Alcune persone sono diventate più sensibili, anche a causa dell'estrema bassa marea del Reno nel 2018", afferma il responsabile della colonna. A quel tempo, un certo numero di armi della seconda guerra mondiale erano venute alla luce.

Secondo Ofenstein, sette decenni e mezzo dopo la seconda guerra mondiale, ci sono naturalmente pochissimi riferimenti a ordigni inesplosi. "Se le informazioni si riferiscono solo a 20 o 30 metri quadrati, daremo un'occhiata. Naturalmente, se si tratta di un'intera area urbana, non è possibile."

Il KMRD Renania-Palatinato non ha sistematicamente valutato le fotografie aeree storiche dal 2014, come spiega l'ordinatore. "Non abbiamo comunque tutte le foto. Lo faremo al massimo per le nostre indagini."

Ofenstein prevede: "Gli ordigni inesplosi continueranno ad accompagnarci per diverse generazioni". Gli esperti stimano che circa un decimo delle bombe sganciate sulla Germania non esplose durante la seconda guerra mondiale. Secondo il KMRD, i detonatori a volte si ghiacciano quando lasciati cadere da un'altezza di diverse migliaia di metri, in modo che il dispositivo di sicurezza non funzioni. O le bombe con detonatori solo sulla testa e sul colpo posteriore in modo da non far esplodere. La precisione del bersaglio era comunque scarsa.

A Coblenza, il KMRD Renania-Palatinato ha un deposito temporaneo per le munizioni trovate. Di solito questo viene portato alla società di proprietà federale per lo smaltimento di agenti di guerra chimica e rifiuti di armamenti (Geka) a Munster, Bassa Sassonia. Il Geka riporta: "Le armi chimiche e convenzionali perdono il loro orrore qui in processi di sterminio altamente specializzati". La sede principale del KMRD Renania-Palatinato è Coblenza e la sede amministrativa è Treviri. C'è anche una posizione in Worms.

Edoardo Mori - 20 gennaio 2020

AGGIUNTA: Ad Usedom, Swinemünde, Polonia, è stata rinvenuta una bomba inglese Tallboy lunga sei metri del peso di 5 tonnellate, caricata con 2,5 tonnellate di esplosivo. Era stata lanciata contro la corazzata Lützow nel 1945. Per la disattivazione è stato stabilito un raggio di evacuazione di 3 km.  
<<https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/Usedom-Tonnenschwere-Tallboy-Bombe-wird-entschaerft,bombe3618.html>> - 12-10-2020

## LA DISTANZA DI SICUREZZA DA OSSERVARE RISPETTO ALLA PROIEZIONE DI FRAMMENTI DI BOMBE

**Sommario:** a) *La fisica dei frammenti.* b) *Aspetti tecnici delle bombe e della bonifica di quelle inesplose.* c) *I tipi di bombe.* d) *Vari tipi di granate.* e) *Bombe di aereo.* f) *Bombe-mina.* g) *Spolette a scoppio ritardato.* h) *Danni.* i) *Effetti della esplosione di una bomba all'aperto.* l) *Tipi di bomba impiegati da americani e inglesi.* m) *Profondità della bomba.* n) *Contenuto d'acqua nel terreno di impatto.* o) *Ambiente locale.* p) *Aree di sicurezza per l'esplosione di bombe.* q) *Quadro dei documenti ufficiali sulla bonifica.* r) *Elenco dei testi consultati*

- Appendice 1 - Istruzioni sull'uso dei files bas. Con esempi.

- Appendice 2 - Osservazioni al testo *Scientific technical evaluation of explosive effects and consequences - safety distances (qd) and risk analysis* per un simposio tenuto dall'Esercito italiano nel novembre 2016.

- Allegato 1: Pagine su numero e dimensioni dei frammenti, estratte dal *Waffentechnisches Taschenbuch* della Rheimetall del 1977, tradotto in inglese.

- Allegato 2: Testo della *Scientific technical evaluation*, oggetto delle osservazioni in Appendice 1.

### a) La fisica dei frammenti

Nel file [http://www.earmi.it/balistica/Klimi-Mori\\_%20Shockwave.html](http://www.earmi.it/balistica/Klimi-Mori_%20Shockwave.html) ho presentato lo studio del prof. Klimi, per tutta la parte matematica, e mio, per la parte storico-tecnica, sugli effetti delle onde d'urto esplosive.

Avevamo già in cantiere lo studio circa i pericoli dei frammenti di bombe da temere in caso di scoppio accidentale della bomba o in fase di disinnescamento (casi fortunatamente rari, che nulla tolgono al merito e al fegato degli artificieri incaricati) quando è nata un po' di polemica per le esagerate zone di evacuazione ordinate dai militari in Italia, pari al quadruplo di quelle disposte altrove e non basate su nessuna evidenza scientifica. Si veda, come necessario complemento, il problema, esposto ampiamente con numerosa casistica, alla pagina <http://www.earmi.it/balistica/evacuazioni.html>, e abbiamo quindi deciso di portare a termine lo studio che è stato pubblicato su [Researchgate.net](http://Researchgate.net) con il titolo *Exterior Ballistics of Fragments: Public Safe Evacuation Zone Related to Munition Disposal*.

L'articolo è corredato da due listati in QBASIC che consentono di calcolare, il primo la gittata massima di oggetti sferici, il secondo quella di frammenti o schegge informi. Siccome questi frammenti naturali sono pezzi del guscio della bomba, oltre un certo peso sono necessariamente corpi piatti.

Allego una ampia esposizione su numero e forma dei frammenti tratta dal *Waffentechnisches Taschenbuch* della Rheimetall del 1977, tradotto in inglese.

Per le nozioni generali sugli esplosivi e sui frammenti si vedano le mie pagine

<http://www.earmi.it/balistica/esplosivi.htm>

<http://www.earmi.it/balistica/frammenti.html>

Il problema da risolvere è quello della gittata massima di quei frammenti che possono ricadere al suolo con una energia sufficiente a ledere; è noto che una palla di piombo da 10 g, in caduta libera, ricade al suolo con una velocità di circa 70 m/s e che provoca quindi solo una contusione.

Il problema è alquanto complicato dal punto di vista teorico perché il frammento è un corpo irregolare che ruota in modo disordinato così che offre una superficie sempre diversa al fronte dell'aria; si è cercato di assimilarlo ad un corpo o ad un cilindro o ad una superficie piana ottenendo coefficienti di forma di forma da 2 a 5. Si consideri quindi che alle elevate velocità iniziali di un frammento (in media 1000 m/s, ma si può arrivare anche a 1500 m/s), il frammento subisce un brusco rallentamento che lo riporta a velocità inferiori ad 1 Mach; perciò percorrerà il secondo tratto del suo percorso, e per un tempo di volo più lungo, avendo un coefficiente. di forma che meno si discosta da quello, ad esempio, di un proiettile poco aerodinamico come una sfera.

Nei calcoli di esempio abbiamo adottato  $i = 1,2$  per la sfera; è un valore con ampio margine di sicurezza visto che nel diagramma di Burgless-Coxe si indica

$$I = 2 \text{ per } v = 200 \text{ m/s}$$

$$i = 1,7 \text{ per } v = 300 \text{ m/s}$$

$$i = 1,4 \text{ per } v = 400 \text{ m/s}$$

Se perciò si assume che un frammento abbia lo stesso coefficiente balistico di una sfera, **la sua gittata effettiva sarà sicuramente inferiore a quella della sfera.**

Nel calcolo della gittata del frammento abbiamo introdotto un ulteriore margine di sicurezza attribuendogli un coff.  $i = 2$  contro il valore  $i = 3$  ricavato in alcuni esperimenti.

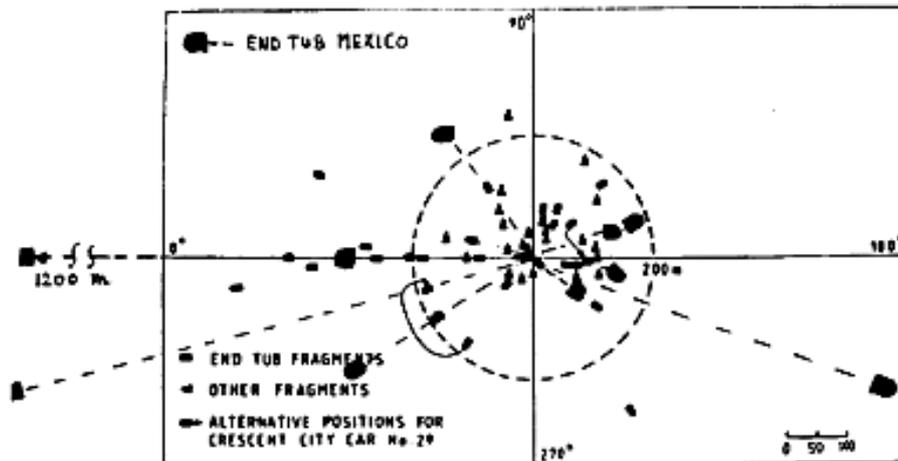
Paragonando le varie ipotesi di sfere e frammenti di **acciaio** si ottiene quindi la seguente tabella

<b>Coff forma</b>	<b>Sfera 50 g</b>	<b>Sfera 200 g</b>	<b>Sfera 300 g</b>	<b>Frag 50 g</b>	<b>Frag 200 g</b>	<b>Frag 300 g</b>
<b>1,2</b>	1025	1528	1700	512	707	891
<b>2</b>	656	983	1105	319	490	555
<b>3</b>	460	690	776	220	337	300

Da essa è facile concludere che un frammento ha una gittata massima di circa la metà della sfera di pari massa e che i valori adottati dalla prassi tedesca (300+300 metri per bomba da 250 kg) sono adeguati.

Riporto come curiosità il caso della enorme e disastrosa esplosione di Mexico City nel 1984 quando esplose un deposito con oltre 10.000 m<sup>3</sup> di GPL (quindi con pressioni e velocità iniziali inferiori a quelle della esplosione di tritolo) causando oltre 500 morti e 7000 feriti.

I frammenti si distribuiscono come da immagine



Per la maggior parte sono entro i 20-400 metri. Solo un cilindro e un serbatoio sferico che contenevano il gas arrivarono rispettivamente al 400 e 700 m, ma si deve considerare che avevano acquisito forme adatte a planare. I frammenti di bomba sono invece piuttosto piccoli e perciò i due tipi non sono confrontabili.

Si può quindi concludere, in modo del tutto ragionevole, con il conforto della scienza e della prassi, che una distanza di sicurezza di 400 metri di evacuazione totale + 400 metri di zona in cui è bene restare al coperto (casa, veicoli) è del tutto prudenziale per una bomba da 250 kg lordi (meno di 150 kg. di tritolo o esplosivo equivalente); la prassi ha dimostrato che con 300+300 metri di distanza di sicurezza non si sono mai verificati incidenti. Si tenga presente che

1) anche una eventuale maggiore velocità iniziale dei frammenti incide relativamente in quanto la maggiore resistenza dell'aria li frena ancor più bruscamente.

2) Solo i frammenti con una certa massa giungono a distanze elevate.

3) Le formule matematiche sono state elaborate per frammenti che vengo proiettati in uno spazio libero senza ostacoli rispetto al terreno (emisfero di 180 gradi) cosa che in realtà non DEVE avvenire mai. La bomba è normalmente interrata e deve essere liberata da terra il meno possibile (lo stretto spazio necessario agli artificieri e loro macchine per lavorare in sicurezza). I margini della buca devono essere rialzati e vanno sistemati appositi schermi ferma schegge sui lati in cui le schegge potrebbero essere pericolose.

4) In tutti i casi in cui si deve far esplodere la bomba, e quindi senza artificieri presso di essa, un adeguato riempimento della buca con terra o con altro prodotti (ad es. sacchi di acqua) assicura che i danni saranno limitati agli edifici e contenuti entro i 100 metri.

## **b) Aspetti tecnici delle bombe e della bonifica di quelle inesplose**

Il problema della bonifica di un territorio da bombe inesplose è stato vissuto in modo drammatico dalla Germania.

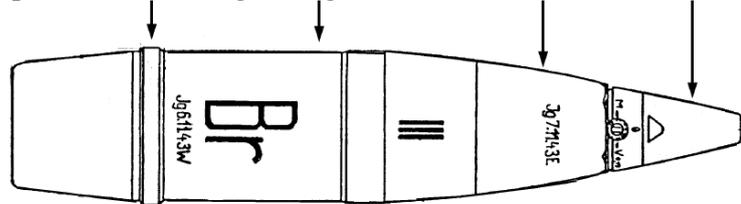
I dati che riporto sono contenuti in uno studio di fattibilità della bonifica di Oranienburg fatta nel 2008 dall'ing. Wolfgang Spyra. Il lavoro è stato poi utilizzato nel 2009 per la tesi di laurea del suo collaboratore Michael Katsch nonché nei testi elencati come fonti.

Gli alleati occidentali lanciarono un totale di circa 1,4 milioni di tonnellate di bombe sull'impero tedesco durante la seconda guerra mondiale, più o meno equamente diviso tra la RAF britannica e gli USAAF degli Stati Uniti. A tal fine l'aviazione delle Forze Alleate effettuò circa 1,4 milioni di decolli tra il 1940 e il 1945 e 21.000 aerei furono persi. Si consideri, ad esempio, che solo nella una zona industriale di Oranienburg, appena a nord di Berlino, su una superficie di 40 kmq caddero circa 10.000 bombe e vi sono state oltre 500 operazioni di disinnescamento su una superficie di circa il 15% del territorio. In Germania ogni anno vi sono circa 5.000 segnalazioni di ritrovamenti nel corso di lavori di scavo. In Germania quindi vi sono stati studi teorici sulle misure di sicurezza da adottare, ma che poi hanno potuto essere concretamente adattati ed applicati ai casi concreti, tenendo conto ogni volta delle specifiche situazioni.

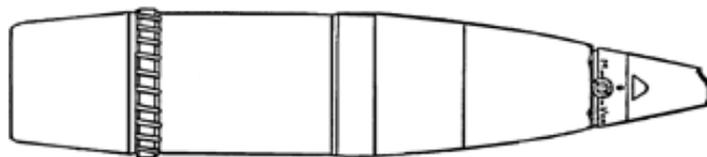
### c) I tipi di bombe

Si parla volgarmente di "bombe" perché le bombe di aereo sono quelle con maggior contenuto di esplosivo e quindi atte a produrre maggiori danni se esplodono. In effetti i problemi si pongono anche per le granate lanciate mediate artiglierie. Ecco un esempio di tipologie.

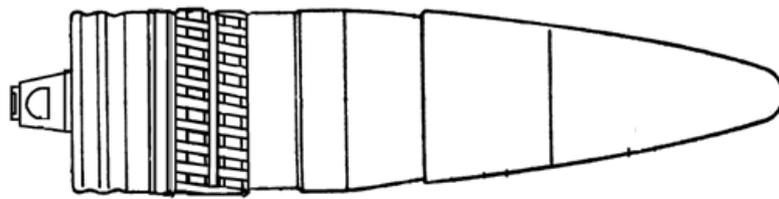
Granata non sparata (mancano gli intagli sull'anello di forzamento)



Granata sparata (con intagli)



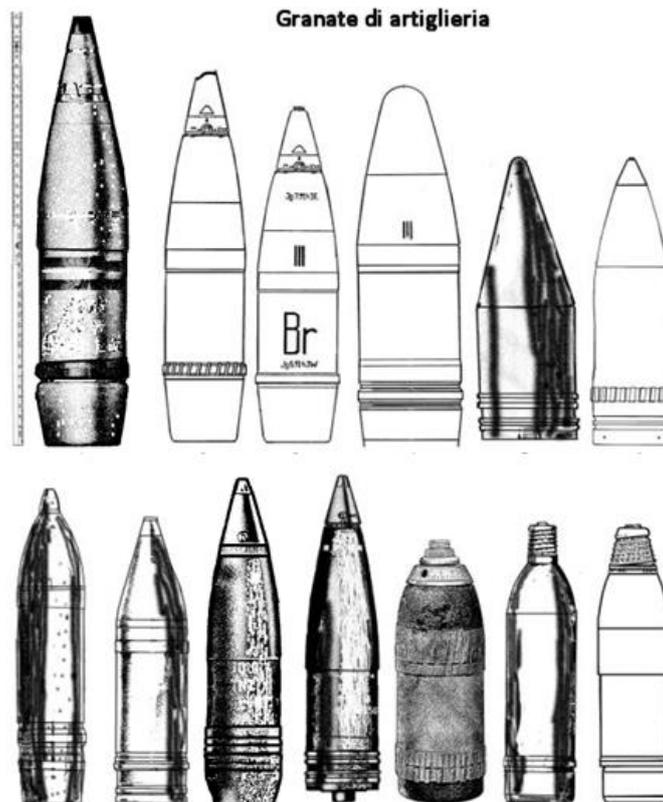
Granata perforante



Spoletta sulla base

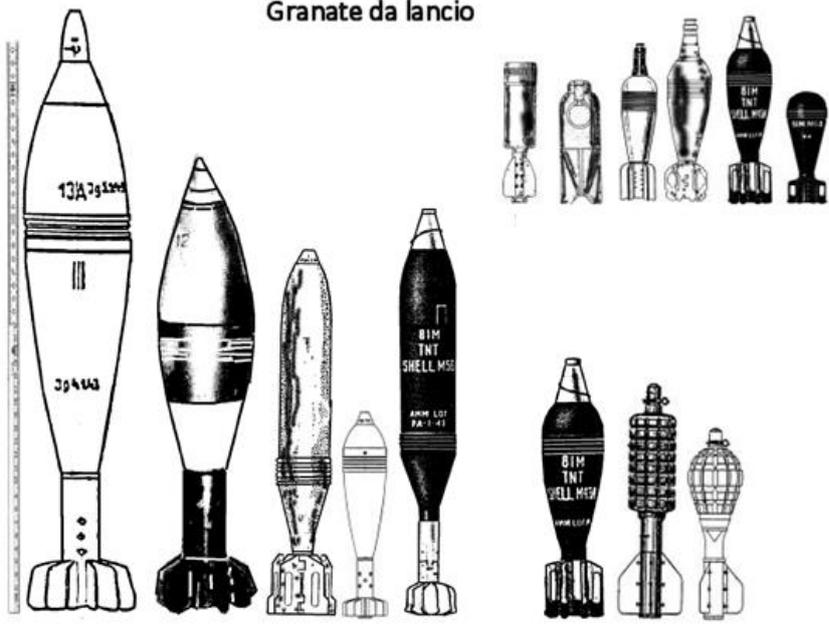
Si noti il doppio anello di forzamento

**d) Vari tipi di granate**



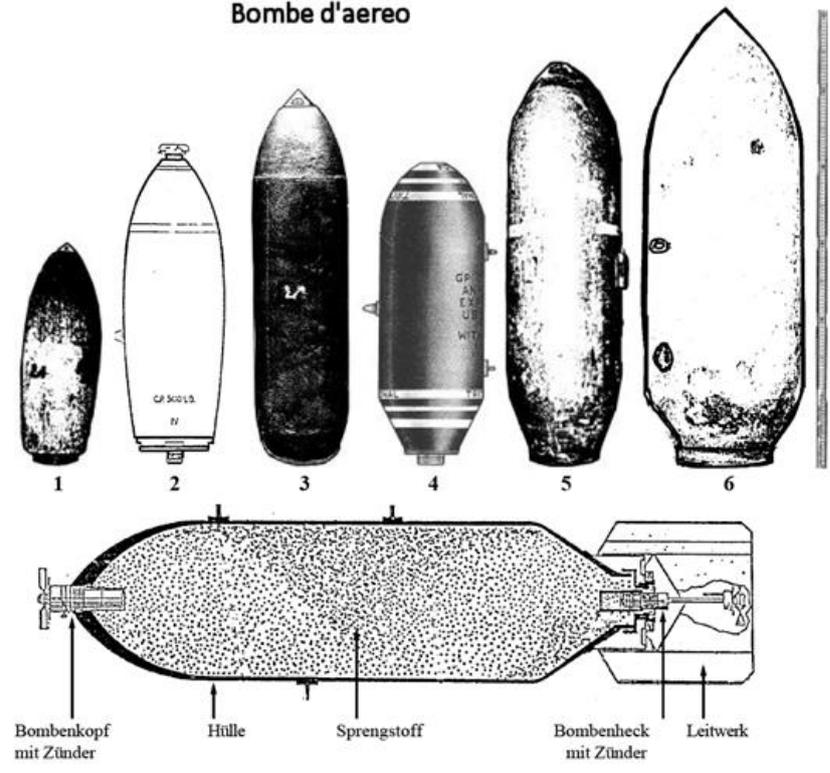
Granate per mortaio o lanciagranate

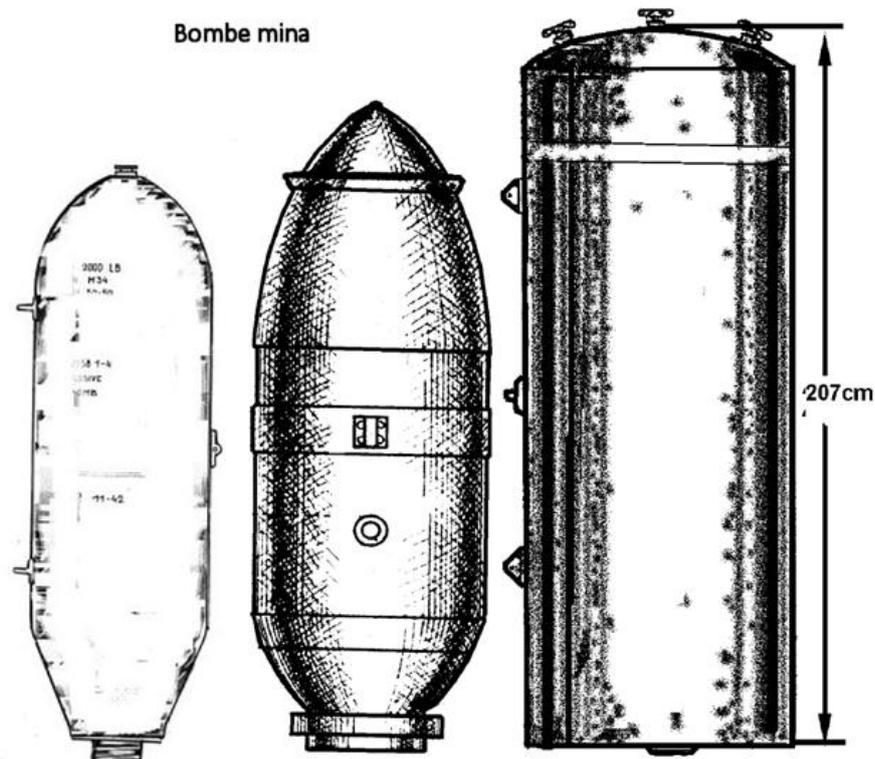
Granate da lancio



e) Bombe d'aereo

Bombe d'aereo





#### f) Bombe-mina

Le mine aeree ( blockbuster ) furono utilizzate nella guerra aerea contro le città durante la seconda guerra mondiale dalle forze aeree tedesche, britanniche e statunitensi. Le mine aeree non vengono fatte esplodere - come suggerirebbe il nome - nell'aria, ma soprattutto a terra, innescate da detonatori ad impatto. Una mina aerea fatta esplodere direttamente nell'aria, tuttavia, ha un effetto distruttivo ancora maggiore perché la schermatura dagli edifici vicini è ridotta al minimo e l'onda di pressione è aumentata dalla riflessione obliqua. Però gli accenditori a distanza necessari a ciò non erano ancora utilizzati in quel momento.

Le mine aeree pesano diverse centinaia di chilogrammi fino a diverse tonnellate e sono state riempite fino all'80% del loro peso totale con esplosivi altamente esplosivi. Rispetto alle normali bombe multiuso, erano di solito considerevolmente più grandi: parecchi metri di lunghezza e fino a un metro di diametro, ma ricoperte da un guscio relativamente sottile, motivo per cui il guscio d'acciaio rappresenta solo una proporzione relativamente piccola in peso. Tuttavia, a causa di questo involucro debole e dell'elevato peso, c'era il rischio che la mina esplodesse a terra prima che il detonatore di impatto rispondesse. Per questo motivo, hanno sempre avuto più detonatori. In rari casi, le mine aeree sono state persino lanciate con paracadute. Quindi avrebbero potuto teoricamente, essere dotati di un timer.

A causa della sottile guaina d'acciaio, le mine aeree cadevano verticalmente, ma non potevano penetrare in profondità negli edifici o nel terreno, cosa voluta. I crateri di esplosione erano quindi relativamente piatti o addirittura completamente assenti e anche l'effetto di frammentazione di queste bombe era relativamente basso.

L'ondata di pressione, che molto più forte di quelle delle bombe convenzionali, era devastante. L'onda di pressione falcia intere file di case e distrugge tutti gli edifici convenzionali in un raggio di 100 metri, strappa porte e infissi in aree aperte, fino a un chilometro di distanza e frantuma i vetri delle finestre a una distanza di due chilometri. Se tali bombe esplodessero specificamente sulle aree residenziali, agirebbero sui tetti entro un raggio di diverse centinaia di metri. Per questo motivo, le mine aeree sono state anche utilizzate per fornire alle bombe incendiarie un buon accesso a soffitte e mobili facilmente infiammabili e per accendere grandi incendi; se i vetri delle finestre vengono distrutti a una distanza maggiore, il fuoco si diffonde ancora meglio perché le scintille possono entrare nei locali e accendere tessuti o carta. L'obiettivo sono tempeste di fuoco autosostentanti. Le strade sono diventate impraticabili per i soccorritori a causa dei detriti risultanti. Le vittime dirette delle mine aeree muoiono a causa delle elevate pressioni.

Vi erano di due dimensioni:

Da 12.000 lb, che furono nominate GP 12.000 lb dagli inglesi e HC 12.000 lb dagli americani, e che differivano solo leggermente l'una dall'altra; sono state variati in modo diverso nel tempo.

Il primo GP 12.000 lb fu lasciato cadere nella notte dell'8-9 febbraio 1944.

Da 22.000 lb, ancora una volta chiamati il GP britannico 22.000 lb e dagli americani HC 22.000 lb. Nella forma e nella struttura, assomigliavano ai 12.000 lb e differivano nelle loro dimensioni. Non si sa nulla del loro primo utilizzo.

Il disinnescamento di una di queste bombe da 1,8 tonnellate ha avuto luogo nel 2011 a Coblenza. Venne ritenuto che rottura di vetri e caduta di frammenti potessero verificarsi fino a 1800 m; stranamente si prevedono danni agli edifici solo fino a 30 metri. Il costo totale dell'operazione fu di oltre 1,2 milioni di euro!



Immagine di bombe con il loro peso in lb

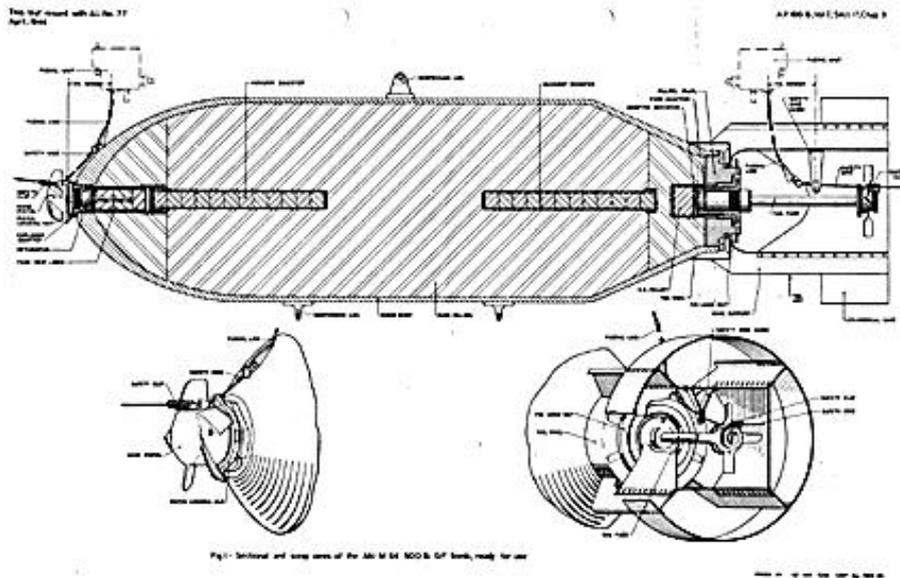


Figura 13: Disegno tecnico di una bomba da 250 kg di tipo AN-M64

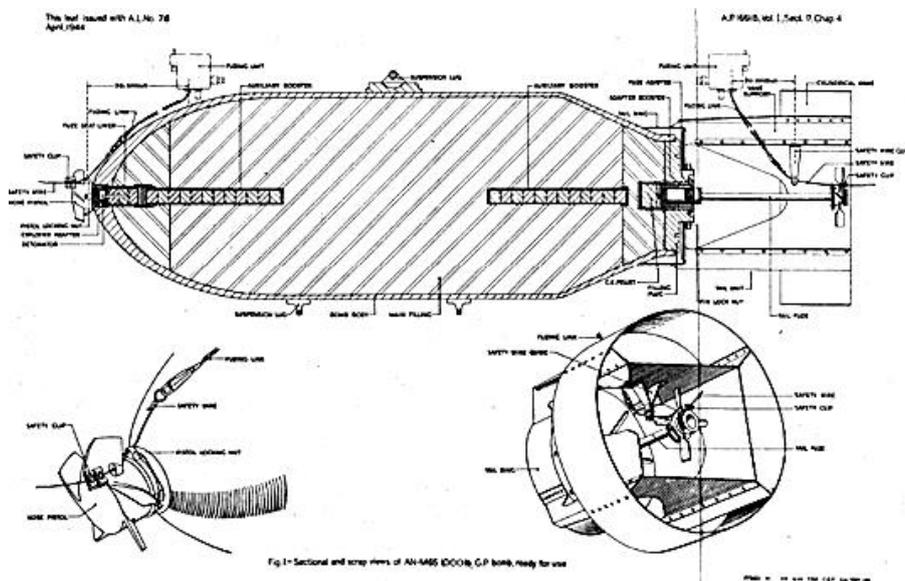


Figura 14: Disegno tecnico di una bomba da 500 kg di tipo AN-M65

Vennero impiegati principalmente i seguenti tipi di bombe

- 250 kg ( 500 lb) General Purpose AN-M64,
- 500 kg (1,000 lb) Demolition o GP AN-M44 e
- 500 kg (1,000 lb) General Scopo AN-M65

Il contenuto di esplosivo è pari la 50 - 60%

Questi tipi di bombe sono stati sviluppati come bombe di uso generale e utilizzati contro vari obiettivi. Le bombe sono state progettate per caricare tipi di bombardieri americani e britannici. A tal fine erano dotati di imbragature per appenderle sia ad

aerei americani che britannici; l'unità di coda era intercambiabile per adattarsi ai diversi tipi di aeromobili. Le designazioni di tipo M44, M65 ecc., per bombe della stessa massa, descrivono l'equipaggiamento della bomba con diversi adattatori di detonatori, spolette o tipi di collegamenti a vite.

Precise informazioni storiche sui tipi di bombe usate si trovano nel volume ufficiale di Erich Hampe, *Der zivile Luftschutz im zweiten Weltkrieg*, Bundesanstalt für zivilen Luftschutz, 1963, pagg. 537 e seguenti, in cui si scrive che per le bombe-mina si calcolava un raggio di distruzione totale di 80 metri e, con maggior precisione, a seconda del peso:

HC - Bombe mina	Peso esplosivo	Distanza
2 000 Lb	620 kg	60 m
4 000 Lb	1300 kg	80 m
8 000 Lb	3200 kg	100 m
12 000 Lb	3700 kg	110 m

L'esplosivo era formato da una miscela di tritolo e nitrato di ammonio in percentuale variabile (50/50, 60/40 e talvolta 80/20). Chiaro è che la prima fila di case investire schermava dall'onda di pressione quelle dietro ad esse.

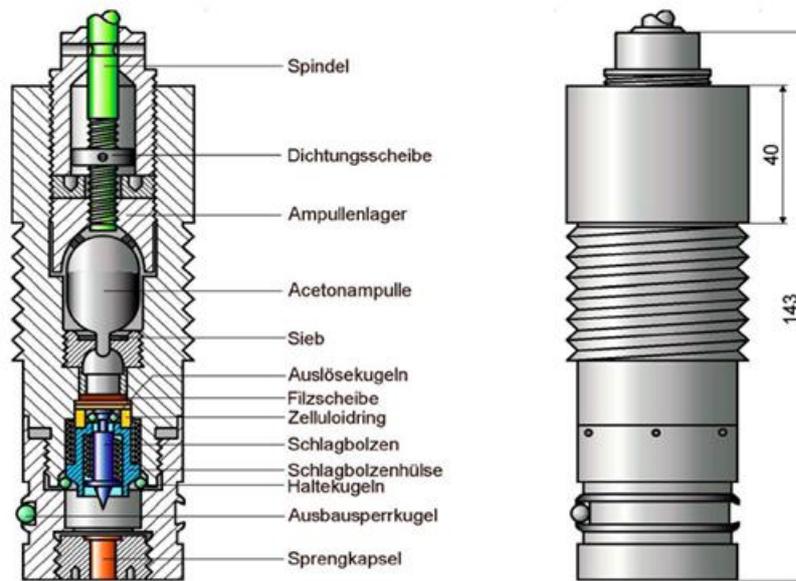
#### **g) Spolette a scoppio ritardato**

Vi sono poi bombe con spolette a scoppio ritardato (M101, M102, M103) o ad accensione chimica ritardata (M124, M125). In combinazione con la bomba esplosiva da 250 kg, i detonatori ad impatto con un ritardo era considerati come molto efficaci negli attacchi contro l'industria e gli edifici commerciali.

Le spolette con ritardo avrebbero dovuto in linea di principio essere utilizzate con una quota del 5% del carico totale di bombe, indipendentemente dal fatto che fossero incendiarie o esplosive. L'obiettivo era quello di ostacolare le misure antincendio. La metà delle bombe fatte esplodere con ritardo dove essere dotata di ritardo di 15 o 30 minuti, l'altra metà con una mescolanza di ritardo da 1 a 12 ore. L'uso di queste spolette mirava a ritardare il più possibile la ripresa del lavoro negli impianti di produzione perché ogni bomba rinvenuta doveva essere trattata prima come una bomba a ritardo.

La spoletta chimica funziona in base alla decomposizione chimica di un anello di celluloidi nel detonatore, che viene utilizzato per bloccare il percussore a molla. L'anello di celluloidi potrebbe essere rinforzato con dischi di celluloidi al fine di prolungare il ritardo o prolungare il tempo di funzionamento dell'accenditore. La decomposizione chimica della serratura del percussore inizia quando la bomba viene sganciata a seguito della rottura di una fiala di vetro riempita di acetone. Un corpo aspirante sopra il blocco del percussore dovrebbe assorbire l'acetone e metterlo in contatto con i dischi o l'anello di celluloidi. Una volta che il processo di decomposizione chimica della celluloidi è progredito a tal punto che il blocco del percussore non può più resistere alla tensione della molla, il percussore si aggancerà al detonatore. L'innesco accende e trasferisce l'energia alla carica di trasferimento, che avvia l'accensione della carica principale della bomba.

Non ne trattiamo ulteriormente perché le bombe con spoletta a ritardo non sembra siano state impiegate sul territorio italiano.



**Spoletta M123 americana a ritardo chimico**

#### **h) Danni**

Per stimare il danno che può verificarsi quando viene fatta esplodere una bomba, è necessario considerare i possibili effetti dello scoppio della bomba sui beni da proteggere.

È difficile quantificare la gamma degli effetti dannosi della esplosione della bomba perché dipende da una varietà di fattori. In pratica, tuttavia, ci sono una serie di regolamenti che specificano le distanze di sicurezza e le aree pericolose per la manipolazione e la distruzione di munizioni.

#### **i) Effetti della esplosione di una bomba all'aperto**

L'effetto distruttivo di una esplosione di una bomba è costituito dagli effetti improvvisi dell'onda di pressione e dall'effetto di scheggia.

L'effetto di frammentazione di una, cioè l'effetto locale dipende, da :

- le dimensioni e la forma della bomba
- il tipo di esplosivo
- la brisanza degli esplosivi
- la profondità a cui è posta o penetrazione nel terreno
- le condizioni atmosferiche
- la natura della superficie del terreno ecc.

Inoltre, gli effetti della esplosione delle bombe dipendono dall'ambiente locale, cioè da quanto localmente la quantità e misura degli edifici o altri ostacoli assorbono, riducono o intensificano l'effetto delle schegge o l'effetto di pressione.



La figura mostra l'effetto della esplosione della bomba come un diagramma schematico. Al centro della esplosione agiscono l'onda di pressione, i frammenti del guscio accelerati e terra o rocce proiettati.

Al margine di questa zona centrale di azione diretta l'onda di pressione è indebolita. Tuttavia, schegge e altri materiali accelerati dal sito di scoppio possono causare lesioni e danni. Un edificio massiccio vicino al luogo dell'esplosione può assorbire o riflettere l'onda di pressione. Frammenti e materiali volanti vengono catturati, in modo da creare una zona d'ombra dietro l'edificio. Solo la caduta di materiale che è stato accelerato verso l'alto può avere un effetto distruttivo in quest'area.

Non trattiamo dell'onda sismica prodotta dall'esplosione perché essa è stata studiata per l'esplosivistica civile e per il caso di fornelli di mina entro il terreno, casi in cui si può studiare in anticipo la situazione geologica. Poco vi è sugli effetti di una bomba interrata; se però la bomba è stata isolata dal terreno circostante gli effetti sono inferiori a quelli dell'onda esplosiva.

L'effetto dello scoppio di una bomba per quanto riguarda l'effetto dell'onda di pressione e il volo di schegge sull'ambiente dipende quindi da

- a) il tipo di bomba (tipo, massa e massa esplosiva netta)
- b) la profondità della bomba
- c) il contenuto d'acqua della copertura terrestre
- d) l'ambiente locale (sviluppo)

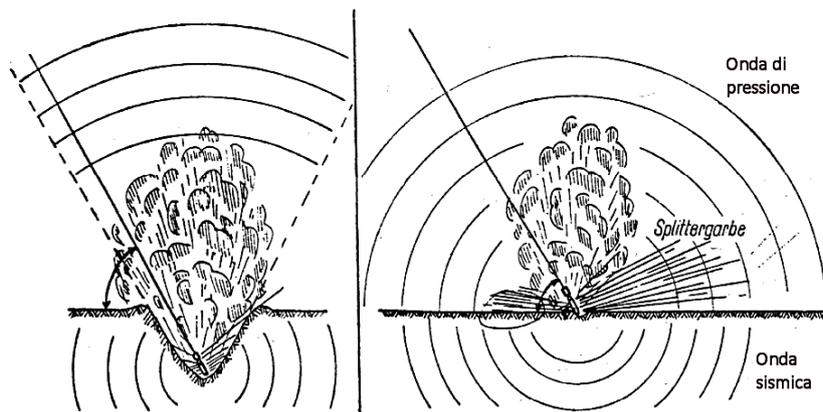
### 1) Tipo di bomba impiegati da americani e inglesi

Le bombe inesplose trovate in Germania sono in gran parte bombe con una massa di 250 kg o 500 kg o bombe-mina (bombe pesanti). La percentuale di esplosivi nelle bombe è approssimativamente dal 50% al 60%. Gli involucri delle bombe sono realizzati in acciaio trafilato. L'uso di questi tipi di bombe era principalmente finalizzato alla distruzione di edifici locali da parte dell'onda di pressione. L'effetto di frammentazione di queste bombe è un effetto secondario, ma a causa del raggio d'azione delle schegge rappresenta anche un pericolo.

In misura molto minore, sono state utilizzate bombe a frammentazione, in cui l'effetto di frammentazione è significativamente maggiore. A causa della percentuale inferiore di esplosivi, tuttavia, c'è meno pressione.

### m) Profondità della bomba

La misura in cui l'onda di pressione e le schegge possono diffondersi spazialmente durante una esplosione dipende dalla profondità a cui si trova la bomba. La forma e le dimensioni del cratere derivano dall'effetto pressione della bomba e dalla resistenza di quanto le sta sopra, che a sua volta è decisivo per la portata effettiva e la direzione effettiva dell'onda di pressione e delle schegge. La esplosione di una bomba molto in profondità può, ad esempio, portare alla formazione di grotte nel sottosuolo senza che sia rilevabile un effetto di pressione e schegge sulla superficie. Quando vengono fatte esplodere, le bombe appoggiate sulla superficie del terreno creano un imbuto di proiezione o portano a una pressione su ambito maggiore e ad un maggior effetto di scheggia. In questo contesto si dovrebbe menzionare anche l'espulsione della terra causata dall'onda di pressione. I materiali per la protezione della terra, i materiali da costruzione o gli oggetti che ricoprono la bomba sono notevolmente accelerati, il che può anche causare danni dai corpi proiettati. Gli effetti della profondità di una bomba sulla sua esplosione sulla pressione e l'effetto scheggia sono illustrati nella figura



Nel primo caso, la bomba che esplosa si trova sotto la parte superiore del terreno e crea un imbuto di espulsione, il cui angolo di apertura determina l'effetto spaziale dell'onda di pressione e del fascio di schegge. Nel secondo caso, sul lato destro della figura, viene mostrata l'esplosione di una bomba che giace sulla superficie. L'onda di pressione e il fascio di schegge possono diffondersi senza ostacoli. Il tipo di sedimento che ricopre la bomba e lo spessore della copertura giustificano anche la resistenza meccanica che la copertura dell'onda di pressione oppone a una esplosione.

#### **n) Contenuto d'acqua nel terreno di impatto**

Il contenuto d'acqua del terreno (saturo, insaturo) influenza anche la resistenza meccanica del suolo. Fondamentalmente, la resistenza meccanica di un terreno aumenta con il suo contenuto di acqua; di conseguenza, il contenuto idrico di un suolo gioca un ruolo importante nel calcolo del cratere e quindi sull'effetto dell'esplosione. Maggiore è il contenuto d'acqua del sedimento circostante e quindi la sua coesione, minore è il campo di impatto dell'onda di pressione superficiale e l'effetto di scheggia nelle immediate vicinanze. D'altro canto, lo scoppio di una bomba nell'area del suolo saturo (negli strati sotterranei che portano le acque sotterranee) può causare danni a grande distanza, che inizialmente non sembrano essere collegati alla esplosione. Ciò

deriva dal fatto che l'onda di pressione in una falda acquifera può diffondersi su grandi distanze senza grandi perdite di energia, poiché l'acqua è un mezzo incompressibile.

#### **o) Ambiente locale**

La densità e tipo delle costruzioni e la loro presenza nelle vicinanze gioca un ulteriore ruolo decisivo per l'effetto a maggiore distanza di una esplosione. A seconda dell'altezza degli edifici e della loro vicinanza al sito di scoppio all'imbuto di espulsione, un edificio assorbe o riduce la pressione e l'effetto di frammentazione di uno scoppio di una bomba a diversi livelli. In determinate circostanze, tuttavia, l'onda di pressione può anche essere riflessa da un edificio, il che può aumentare localmente il suo effetto. Le proprietà materiali delle strutture strutturali sono decisive nella misura in cui possono resistere agli effetti meccanici di una esplosione.

La figura qui sotto mostra un esempio del cratere dopo l'esplosione una bomba rinvenuta sotto una stazione di servizio a Salisburgo nel 1965; la distruzione nell'area di proiezione è chiaramente visibile. Inoltre, ci sono gli effetti dell'onda di pressione e del volo delle schegge sull'ambiente, che danneggiano le persone e le proprietà. Fu un'auto-detonazione di una bomba americana da 250 kg con una spoletta chimica a lungo tempo. Oltre alla distruzione visibile, vi furono un morto e sette feriti.



Un altro esempio attuale dell'impatto della esplosione di una bomba si è verificato sull'autostrada A3 il 23 ottobre 2006. Una bomba inglese da 250 kg è esplosa durante dei lavori di costruzione. Lo scoppio è stato causato dall'uso di una fresatrice stradale utilizzata nell'area della bomba. Il conducente della fresatrice è stato ucciso dallo scoppio, i veicoli nelle immediate vicinanze sono stati danneggiati.

Inoltre, l'esplosione di una bomba esplosiva da 250 kg con spoletta chimica a lungo tempo sull'isola di Schweines e ad Amburgo il 14 gennaio 2008 ha mostrato che l'impatto dell'ondata di pressione di una bomba non deve essere sottovalutato. I vetri delle finestre si sono rotti ad una distanza di oltre 800 m dal sito di scoppio.

#### **p) Aree di sicurezza per l'esplosione di bombe**

Esistono una serie di regolamenti nel settore militare, nonché nell'esplosivistica civile e per la bonifica di ordigni bellici, che definiscono le zone di pericolo e le distanze di protezione per la gestione e la distruzione degli ordigni, nonché di analoghi manufatti di acciaio. Queste zone possono essere utilizzate per la valutazione dell'area pericolosa in caso di scoppio di bombe e definire le aree in cui si possono prevedere danni alla vita e alla salute di persone e cose in caso di esplosione. D'altra parte, al di fuori delle zone di pericolo o delle distanze protettive, non si prevedono generalmente danni alla vita e alla salute di persone o cose. La tabella qui sotto mostra una panoramica delle normative e delle distanze di protezione e delle zone di pericolo ivi definite, purtroppo ben poche uniformi. La normativa antinfortunistica tedesca BGV C24 richiede una distanza di sicurezza di 1.000 m per la tranciatura di corpi di acciaio; va tenuto presente che, contrariamente allo scoppio di bombe esplosive, la tranciatura viene generalmente eseguita con cariche di taglio, ad es. nelle demolizioni. In questo caso l'esplosivo non è circondato da un guscio d'acciaio. Si può quindi presumere che la distanza di volo delle schegge sia significativamente più breve. Il regolamento del servizio militare HDv 183/100 ne tiene conto. Qui viene mostrata una zona pericolosa di 1.250 m per lo scoppio di dispositivi o mine esplosive con un rivestimento metallico con una massa totale fino a 30 kg. La linea guida IMAS 10.20 delle Nazioni Unite (International Mine Action Standard) richiede una distanza di sicurezza di 1.000 m per far esplodere una granata con un calibro di 160 mm (circa 7 kg di esplosivo). Queste aree di pericolo designate si riferiscono ad esplosioni sulla superficie, cioè senza fosse di scoppio o pareti protettive, che possono ridurre le distanze di volo.

Per ragioni di sicurezza ed economiche, le esplosioni necessarie di bombe rinvenute, di solito avvengono nelle fosse in cui sono state trovate. Le distanze di sicurezza possono essere ridotte in determinate circostanze. Ciò dipende dalla profondità dello strato e dall'uso di attrezzature tecniche aggiuntive per smorzare l'onda di pressione e ridurre la rosata di schegge. Gli edifici nelle vicinanze possono anche assorbire i possibili effetti della esplosione.

Numerosi studi sono già stati condotti sulla diffusione e la riduzione dell'effetto di frammentazione spaziale di proiettili e bombe. Ad esempio, sabbia, torba, sacchi di acqua, balle di paglia, laminati o schiuma sono stati utilizzati in test esplosivi per ridurre proiezione di schegge.

**Quadro di varie distanze di protezione e delle aree pericolose suggerite in caso taglio di acciaio e durante la manipolazione o distruzione di munizioni in Germania fino al 2008 (sono quindi generiche e non specifiche per bombe).**

Regolazione sorgente	Descrizione	Distanza di sicurezza o zona pericolosa
BGV C24 BGV C24	Norme antinfortunistiche per associazioni professionali con istruzioni per l'implementazione, qui: secondo §§ 34 e 65 area di sabbiatura o barriera per sabbiatura di ferro e acciaio	1.000 m

Bundeswehr HDv 183/100	Regolamenti di attuazione per la distruzione di munizioni, qui aree di pericolo nella distruzione di munizioni da esplosioni in superficie, ordigni esplosivi e mine con un involucro metallico fino a 30 ka	1.250 m
Bundeswehr ZDv34 / 230	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oggetti in cui le persone sono permanentemente o temporaneamente</li> <li>• Oggetti che servono la fornitura o la sicurezza del pubblico</li> <li>• Percorsi di traffico pubblico ad alta densità di traffico)</li> </ul> Nota: riguarda la manipolazione, non la sabbiatura con / delle sole munizioni a prova di manipolazione	400 m
Servizio internazionale di azione contro le mine delle Nazioni Unite (UNMAS) Standard internazionale sulle azioni contro le mine IMAS 10.20	Linea guida IMAS 10.20 "Sicurezza e salute sul lavoro - sminamento sul posto di lavoro" degli International Mine Action Standards delle Nazioni Unite. Distanza minima di protezione per il brillamento di granate di calibro superiore a 160 mm	1.000 m
	Distanza minima di protezione per il brillamento di munizioni sepolte con un peso esplosivo di 10 kg (per ogni ulteriore 10 kg di peso esplosivo, la distanza di protezione deve essere estesa di 100 m) secondo la tabella C.3.2.	500 m
Fonte storica: Wehrmacht L. Dv. 764 H.Dv. 412 M. Dv. 872	Regolamenti ufficiali della Wehrmacht qui: brillamento di bombe esplosive superiori a 40 kg in fosse di scoppio	1.000 m
	Qui: brillamento di bombe superiori a 40 kg senza pozzi	2000 m

Esempio di danni dovuti allo scoppio di una grande bomba a Oranienburg:  
 Quando una bomba di 500 kg fu fatta esplodere vicino alla scuola Havel il 12 marzo 1997, furono trovati frammenti di bomba a 435 m di distanza e furono trovati lievi danni agli edifici fino a 150 m di distanza. Tuttavia, va notato che la diffusione di schegge di pressione è stata mantenuta strutturalmente piccola con l'uso di un doppio schermo.

### **Regole per far esplodere la bomba sul sito di rinvenimento**

Nel sito di scoperta, gli esplosivi e le bombe esplosive possono essere distrutti se il pericolo per le persone è escluso in ogni circostanza e se l'oggetto inesplosivo è così lontano dagli edifici e dalle strutture che devono essere protetti da non causare danni significativi.

Bombe ed ordigni inesplosi che sono penetrati nel terreno e che devono essere distrutti sul posto devono essere scoperti solo quanto basta per poter applicare che la carica esplosiva al guscio. Quindi il cratere viene riempito di terra e viene creato sopra di esso un cumulo di terra in modo tale che ci sia almeno 2,00 m di terra sopra la bomba. Questo tipo di procedura può essere eseguito per far esplodere le bombe

- fino a circa 100 kg di peso e almeno 20 m di spazio libero
- fino a circa 300 kg di peso e almeno 40 m di spazio libero
- oltre 300 kg di peso ed almeno 60 m di spazio libero,

lontano da edifici vicini o altre strutture in pericolo e se il cratere risultante non presenta ulteriori svantaggi, ad es. portare ostacoli sostanziali al traffico, alla distruzione delle reti sotterranee della città, ecc.

Se, a causa di circostanze particolari, ordigni inesplosi devono essere distrutti nel luogo di scoperta, e se si devono prevedere danni agli edifici vicini e altri sistemi che devono essere protetti, occorre prendere tutte le precauzioni per limitare i danni causati dall'esplosione. A tale scopo, il sito di deve essere circondato da muri di terra protettivi, pareti a doppio strato ben ancorate con terra pressata fra i due strati e altri dispositivi di schermatura a seconda della posizione. Se necessario, gli edifici in pericolo devono essere preventivamente rinforzati con strutture in legno. Tutte le finestre dell'edificio in pericolo possono essere aperte e bloccate. I principali dispositivi di intercettazione delle linee di gas, acqua ed elettricità devono essere chiusi. L'area intorno al dispositivo esplosivo deve essere mantenuta libera dalle persone chiudendolo accuratamente. Devono essere disponibili interventi (ad es. Vigili del Fuoco) per combattere i danni che possono derivare dall'esplosione. L'esplosione può essere effettuata solo quando tutti i rapporti sui preparativi per la sicurezza sono stati ricevuti dal responsabile delle operazioni.

#### **r) Elenco dei testi consultati**

*(N.B: non vuole essere una bibliografia, e non ne ha né la forma, né la sostanza, ma solo un elenco di testi alla buona per coloro che volessero utilizzarli a loro volta. Ho messo le indicazioni che consentono di trovarli in Internet.)*

A model for the Determination of flyrock range as a function of Shot conditions.  
Prepared for United states department of the interior. Bureau of mines, Pittsburgh,  
Pennsylvania 1979

Flyrock riskaJanuary 2007 TN LITTLE, Researchgate.  
net/publication/265303310\_flyrock\_risk

A manual for the Prediction of blast and fragment loadings on structures,  
Department of energy Albuquerque operations office 1980

The Scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor Volume III, Aerodynamics and  
the mechanics of Projectiles and explosions Edited by G. K. Batchelor, . Trinity  
college, Cambridge 1963

Brl. Report no. 4055, The initial velocities of fragments from bombs, shells, and grenades By Ronald r. Gurney, 1943

Measurement and analysis of blast fragmentation Editors Jose a. Sanchidrién Crc press 2013

A guide for explosion and Bombing scene investigation. Written and approved by the Technical working group for bombing scene investigation 2000

Journal of battlefield technology, vol 6, no 2 July 2003. A method for predicting natural fragmentation of warheads Joanna Szmelterl

G0-02 Natural resources Canada. Guidelines for quantified risk assessments at ports And wharves

Explosives regulatory division Explosives safety and security branch 2000

A model for injury from fragments generated by the explosion of Munitions Department of chemical engineering, Loughborough university of Technology, ,loughborough, Leicestershire

International IATG 01. 80 (2° ed. 2015) Ammunition technical Guideline Formulae for ammunition management

ARL-TR-127,1 Army research laboratory An efficient technique for , the collection and analysis of Fragment mass distributions. From fragmenting munitions By j. Terrence Kloplic, 1996

ARL-TR-2220, Benchmark tests and analyses for ordnance fragmentation and propagation models by John Starkenberg and Warren W. Hillstrom 2000

SC~4205(TR), Maximum missile ranges from Cased explosive charges By ' R. H. Bishop-, July 1958

The experimental study of the blast from bombs and bare charges Author(s): g. Grime and h. Sheard Source: proceedings of the Royal Society of London. Series a, mathematical and physical Sciences, vol. 187, no. 1010 (nov. 1946 357—380

Blast effects of high explosive charges detonating in cylindrical Steel tubes Manfred Held TDW-Gesellschaft für Verteidigungstechnische Wirksysteme) Propellants, explosives, pyrotechnics 25, 307—311 (2000)

Faculty of Engineering. Univrsity of f wollongong year 2003, A review of methods for predicting Bomb blast effects on buildings A. M. Remnikov

AD- B007-377, Memorandum report no, 2509 Calculations or fragment velocities . from 'naturally fragmenting munitions R. Karpp w. W. Predebon 1975'

International journal of advanced and applied sciences. Prediction of aerodynamic coefficients for irregularly shaped body using Numerical simulations Alan Catovic \*, Elvedin Kljuno 2018

-AD~784 978, Computation of weight, velocity, and angular distributions of fragments from naturally fragmenting weapons H. M. Sternberg Naval ordnance laboratory 1974

Updated blast effects and consequence models in defense technology Robert t. Conway, naval facilities engineering and expeditionary warfare -Brandon Ffymann, 2018

Blast effects on buildings Second edition. Edited by David Connie, 1995

Prediction of primary fragmentation characteristics of cased munitions Michelle m. Crull, Army engineering & support center, Huntsville 1992 ?

Debris throw model for accidental explosions in a complex Industrial environment Malte von Ramin, Alexander Stolz [Chemical engineering transactions](#) 2016

Determination of fragment impact sensitivity prediction methods Edmund Swider Hyla Napadensky Edward Hahn IIT research institute 1983

Enhanced fragmentation modeling Peter Rottinger, Richard Pong, -Picatinny arsenal, s. d.

Charron Yves, Estimation of velocity distribution of fragmenting warheads using a Modified gurney method 1979

Evaluation of the debris throw from the 1992 Explosion in the Steingletscher installation in Switzerland *Journal of hazardous materials* 56 (1997) 149—167 Peter Kummer , 1996

Sandia report Unlimited release Printed august 1993

Experimental and numerical studies of High-velocity impact fragmentation M. E. Kipp. D. E. Grady. J. W. Swegle

DOE explosives safety Manual 2008

AD-A013 634, Fragment and debris hazards T. A. Zaker Department of defense explosives safety board Washington, d. C. July 1975

AD-PO05 363, Fragment hazard investigation program: Prediction of quantity distance requirements for Mass-detonating ammunition using a Monte Carlo simulation Model W. D. Smith, Naval surface weapons center

AD-772 480 Fragment weight distributions from naturally fragmenting cylinders Loaded with various explosives H. M. Sternberg Naval ordnance laboratory White oak, Maryland 12 october 1973

REPORT NO. DPS/TW-200/3 J. T. Dempsey, Infantry and aircraft weapons division v Report on Fragmentation of shell, 115-mm, 1960

Picatinny arsenal Dover New jersey. Testing manual Subject: fragmentation testing procedures 1950

An efficient adaptive procedure for three-dimensional fragmentation simulations A. Pandolfi and m. Ortizi 2001

Modelling and simulation for ballistic protection Adrian Rotari u, Eugen na Military technical academy Bucharest, Romania s. d.

Technical paper no. 12 - fragment and debris hazards. Department of defense explosives safety board 1975

Swedish , Fast calculation of risk in eod operations Staffan Harling & Johan Pelo Swedish defence research agency, Se-164 90 Stockholm Sweden 2008 ?

AD-A965 255, Fragment hazard study Edward B. Ahlers 1969

Explosive weapon effects – final report, GICHD, Geneva, 2017

AEDC-TR-70 291, Free-flight measurements of sphere drag 5 at subsonic, transonic, supersonic, and hypersonic speeds for continuum, transition, and near-free-molecular flow conditions. A. B. Bailey, and J. Hiatt 1971

Primary fragment characterization tools: a ddesb technical paper 16 update Susan hamilton, pe; us army engineering and support center; huntsville, al 2013 ?

Jimmie c. Orley,. Improvised explosive devices: pipe bombs 2001

Journal of geophysical research vol. 72, no. 6 Effect of air drag on particles ejected during explosive cratering A. E. Sherwood 1967

IOP conf. Series: journal of physics: conf. Series 1009 (2018) analysis of the high speed gas flow over a sphere in the range Of mach numbers 2—12 Nakharchenkols, makotovl

JRC TECHNICAL NOTES Simulation of the effects of an air blast wave Martin larcher 2007

Lees' loss prevention in the process industries: hazard Identification (Messico) 1990?

Doe/tic-11268 A manual for the Prediction of blast And Fragment loadings On structures 1980

AD- P005 364, Drag. coefficients For Irregular fragments By Frank Heccieakey . Naval surface Heapon center Dahlsren. -1980 ?

Drag coefficient measurements for Typical bomb and projectile fragments Miles . Miller U. 8. Army research, development and engineering center Aberdeen 1990

Pergamon international journal of impact engineering 24 (2000) 171—201 Model for ballistic fragmentation and behind-armor debris A. I. Yarin. Roisman 1998

Projected area and drag coefficient of high velocity irregular fragments That rotate or tumble John f. Moxnes Norwegian defence research establishment. 2017

Nasa technical memorandum 109015 f 'i l Aerodynamics of a sphere and an oblate spheroid For mach numbers from 0. 6 to 10. 5 including some effects of test conditions M. Leroy spearman And Dorothy o. Braswell August 1993

-Ulrika Nystrom, Kent Gylltoft . Numerical studies of the combined effects of blast and frag -Ment loading. International journal of impact engineering, . 2009.

Pergamon international journal of impact engineering 26 (2001) 443~452 Numerical study on hypervelocity acceleration of Flyer plates by overdriven detonation Of high explosive Zhi-yue liu', Shiro Kubota and Shigeru Itoh' 2001

OP 1458, Fragmentation data On Bombs and projectiles 1945

Explosion hazards And evolution W. e. Baker 1983

Pergamon international journal of impact. Engineering 28 (2003) 11292 Relation of fragment with air shock wave intensity for Explosion in a. Shell Qi zhanga', Chang-qing miaoa, Da-chao lina'b, Chun-hua baia 2003

Safety distance calculations for Multi-liem fragmenting munitions D. a. Jones and g. Kemister 1997

Aedc-tr-66-59, Sphere drag measurements in an Aeroballistics range at high velocities and low Reynolds numbers A. B. Bailey 1966

Bericht nr. 1486 3602 Thun, 10-juni 1999 Splitterballistik Und Splitterwundballistik Autor: b. P. Kneubuehl The future of safer science and Integration of ddesb's risk-based explosives siting tool withess 2010 ill

Pad-783 941, The Gurney formula: variations on a Theme by Lagrange Sigmund j. Jacobs Naval ordnance laboratory White Oak, Nmaryland, june 1974

The drag coefficient of very high velocity Sphere-3\* A. I. Hodges“ New Mexico institute of mining and technology 1957

TNMA TECHNICAL NOTE 10. 20 I 01 Version 2. 0 Amendment1, 2, july 2013  
Estimation of explosion Danger areas 2013

ORDNANCE AND EXPLOSIVES TOOLBOX: Safety technologies for oe programs. Michelle Crull and Joseph Serena . . Us army engineering & support center, Huntsville. 1992

Varhead performance calculations for threat hazard assessment. Andrew c. Victor. Victor technology. San Rafael, California. 199 7?

Trajectory programming for maximum range. George Leitmann

Maximum horizontal range of volcanic ballistic projectiles ejected during explosive eruptions at Santorini caldera, K. i. Kkonstantinou 2015

Der zivile Lutschutz im zweiten Weltkrieg. Dokumentation und Erfahrungsberichte über Aufbau und Einsatz. Bearbeitet von -Erich Hampe, -Präsident der Bundesanstalt für zivilen Luftschutz. 1963

AD-A013 634, Fragment and debris hazards, -T. A. Zaker, -Department of defense , -Washington, 1975

Journal of hazardous materials, Analysis of the LPG disaster in Mexico city, C. M. Pietersen, 1988

Michael Katzsch .Methodik zur systematischen Bewertung von Gefahren aufgrund von Bombenblindgängern aus dem Zweiten Weltkrieg am Beispiel der Stadt Oranienburg, Cottbus 1009

Wolfgang Spyra, Mittel- und langfristige Konzeption der Kampfmittelräumung in Oranienburg – Begutachtung zur Abwehr von Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung unter Berücksichtigung der Aspekte Wirtschaftlichkeit und Verhältnismäßigkeit, Oranienburg 2008

U.S. Department of Justice, A Guide for Explosion and Bombing Scene Investigation. 2000.

## APPENDICE 1

### ISTRUZIONI SULL'USO DEI FILES BAS

#### Con esempi

I due programmi per il calcolo su oggetti sferici e su frammenti, listati entro l'articolo, sono stati programmati in Qbasic e recano perciò l'estensione BAS. Questi spesso vengono bloccati dai servizi di posta elettronica, ma sono file di testo e possono essere rinominati in TXT.

Essi non sono più direttamente eseguibili da Windows 10, ma occorre ricreare l'ambiente virtuale DOS.

Il programma di più comodo impiego per tale scopo è QB64 scaricabile da <https://www.portal.qb64.org/>

Si installa in una cartella e si copiano i file BAS entro la stessa cartella.

Si lancia il programma cliccando sul file **qb64.exe** e si apre la finestra blu.

Cliccare su FILE e poi su OPEN e appare l'elenco dei file BAS eseguibili.

Si clicchi su quello desiderato in modo che compaia il listato e poi su RUN e su START.

I file sono allegati anche in formato EXE, eseguibili direttamente in Windows 10 e il programma

**qb64** ha il comando per creare un file EXE da un file BAS

Inserire i dati richiesti; **non usare la virgola ma solo il punto.**

Coordinate initial  $x_0 = 0$  ,  $y_0 = 0$

Departure velocity = m/s

Departure angle (la gittata massima si ha fra i 20-35°)

Form Coefficient  $i = 1.21$  (Table 1). Per la sfera si può assumere pari a 1,2; per i frammenti almeno pari a 2

Mass of Fragment in kg =

Density of fragment = kg 7800 per acciaio e 11000 per piombo

ICAO atmosphere:

Temperature of air = 15 Celsius,

Propellant temperature =15 Celsius

Pressure = 750 mm Hg;

Humidity (50 %) = 0.5

Range wind 0 m/s

Cross wind 0 m/s

Integration Step = da 1 a 10; basta inserire 1 poiché influisce poco sulla precisione.

```

74 IF (xxc - xx1) <= .001 THEN
75   xc = xxc
76   yc = y0
77   Tc = w0
78   ac = (180 / 3.141592654#) * ATN(z0)
79   uc = y0 / COS(ATN(z0))
80 END IF
81
82 IF x0 > 10 AND v0 <= .005 THEN
83   'Display Resultst
84   menu cog, cof, 6, 20, 22, 72, "RESULTS:"
85
86   menu cog, cof, 6, 20, 22, 72, "RESULTS:"
87
88   LOCATE 11, 25: PRINT "Horizontal Range [m] = "; INT((x0 + w0 * wind - v0 / z0) *
89   LOCATE 12, 25: PRINT "Coresponding y-Coord [m] = "; (v0 - v0)
90   LOCATE 13, 25: PRINT "Departure Angle [Deg.] = "; INT((a) * 10000 + .5) / 10000

```

Palla di piombo 10 mm V 400  $i = 1.2$

### DATI

Initial x-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Initial y-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Departure Angle [Degree]	= ? 25
Departure Speed [m/s]	= ? 400
Temperature of Air [C] at firing site	= ? 15
Propellant Temperature[C]	= ? 15
Pressure [mm] at the firing site	= ? 750
Humidity of Air at Site in % [decimal #]	= ? 0.5
Form Coefficient	= ? 1.2
Mass of Fragment [kg]	= ? 0.0058
Density of Fragment [kg/m <sup>3</sup> ]	= ? 11000
Range Wind	= ? 0
Cross Wind	= ? 0
Integration Step, 10, or 1, 0.5, 0.1	= ? 1

### RISULTATO

Horizontal Range [m]	= 512.81
Coresponding y-Coord [m]	= 0
Departure Angle [Deg.]	= 25
Time of Flight [s]	= 9.73
Terminal Speed [m/s]	= 38
Terminal Angle [Deg.]	= -69.9003
Cross-Wind Deflection	= 0
Trajectory Vertex [m]	= ( 0 , 0 )
Ballistic Coefficient BC	= 20.79634

## Palla di piombo 5,8 g vel 1000 m/s

### DATI

Initial x-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Initial y-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Departure Angle [Degree]	= ? 25
Departure Speed [m/s]	= ? 1000
Temperature of Air [C] at firing site	= ? 15
Propellant Temperature[C]	= ? 15
Pressure [mm] at the firing site	= ? 750
Humidity of Air at Site in % [decimal #]	= ? 0.5
Form Coefficient	= ? 1.2
Mass of Fragment [kg]	= ? 0.0058
Density of Fragment [kg/m <sup>3</sup> ]	= ? 11000
Range Wind	= ? 0
Cross Wind	= ? 0
Integration Step, 10, or 1, 0.5, 0.1	= ? 1

### RISULTATO

Horizontal Range [m]	= 685.19
Corresponding y-Coord [m]	= 0
Departure Angle [Deg.]	= 25
Time of Flight [s]	= 11.92
Terminal Speed [m/s]	= 40
Terminal Angle [Deg.]	= -77.4568
Cross-Wind Deflection	= 0
Trajectory Vertex [m]	= ( 0 , 0 )
Ballistic Coefficient BC	= 20.79634

## Palla di acciaio da 100 g V. 1000 m/s i = 102

### DATI

Initial x-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Initial y-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Departure Angle [Degree]	= ? 25
Departure Speed [m/s]	= ? 1000
Temperature of Air [C] at firing site	= ? 15
Propellant Temperature [C]	= ? 15
Pressure [mm] at the firing site	= ? 750
Humidity of Air at Site in % [decimal #]	= ? 0.5
Form Coefficient	= ? 1.2
Mass of Fragment [kg]	= ? 0.1
Density of Fragment [kg/m <sup>3</sup> ]	= ? 7800
Range Wind	= ? 0
Cross Wind	= ? 0
Integration Step, 10, or 1, 0.5, 0.1	= ? 1_

### RISULTATO

Horizontal Range [m]	= 1281.41
Corresponding y-Coord [m]	= 0
Departure Angle [Deg.]	= 25
Time of Flight [s]	= 15.91
Terminal Speed [m/s]	= 56
Terminal Angle [Deg.]	= -74.7186
Cross-Wind Deflection	= 0
Trajectory Vertex [m]	= ( 0 , 0 )
Ballistic Coefficient BC	= 10.12345

## Palla di piombo da 100 g a 1000 m/s $i = 1,2$

### DATI

Initial x-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Initial y-coordinate of Fragment [m]	= ? 0
Departure Angle [Degree]	= ? 25
Departure Speed [m/s]	= ? 1000
Temperature of Air [C] at firing site	= ? 15
Propellant Temperature [C]	= ? 15
Pressure [mm] at the firing site	= ? 750
Humidity of Air at Site in % [decimal #]	= ? 0.5
Form Coefficient	= ? 1.2
Mass of Fragment [kg]	= ? 0.1
Density of Fragment [kg/m <sup>3</sup> ]	= ? 11000
Range Wind	= ? 0
Cross Wind	= ? 0
Integration Step, 10, or 1, 0.5, 0.1	= ? 1

### RISULTATO

Horizontal Range [m]	= 1561.18
Corresponding y-Coord [m]	= 0
Departure Angle [Deg.]	= 25
Time of Flight [s]	= 17.45
Terminal Speed [m/s]	= 62
Terminal Angle [Deg.]	= -73.7867
Cross-Wind Deflection	= 0
Trajectory Vertex [m]	= ( 0 , 0 )
Ballistic Coefficient BC	= 8.050009

## Frammento Peso 100 g i = 2

### DATI

Initial x-coordinate of fragment	= ? 0
Initial y-coordinate of fragment	= ? 0
Departure Angle [Degree]	= ? 25
Departure Speed [m/s]	= ? 1000
Temperature of Air [C] at firing site	= ? 15
Propellant Temperature[C]	= ? 15
Pressure [mm] at the firing site	= ? 750
Humidity of Air % [decimal #]at site	= ? 0.5
Form Coefficient	= ? 2
Mass of Fragment [kg]	= ? 0.1
Density of Fragment [kg/m <sup>3</sup> ]	= ? 7800
Range Wind [m/s]	= ? 0
Cross Wind [m/s]	= ? 0
Integration Step, 10, 1, or 0.5, 0.1	= ? 1

### RISULTATO

Horizontal Range [m]	= 405.27
Corresponding y-Coord [m]	= 0
Departure Angle [Deg.]	= 25
Time of Flight [s]	= 11.24
Terminal Speed [m/s]	= 24
Terminal Angle [Deg.]	= -87.3573
Cross-Wind Deflection	= 0
Trajectory Vertex [m]	= ( 0 , 0 )
Ballistic Coefficient BC	= 16.87241

## Frammento Peso 500 g i = 2 corr

### DATI

Initial x-coordinate of fragment	= ? 0
Initial y-coordinate of fragment	= ? 0
Departure Angle [Degree]	= ? 25
Departure Speed [m/s]	= ? 1000
Temperature of Air [C] at firing site	= ? 15
Propellant Temperature[C]	= ? 15
Pressure [mm] at the firing site	= ? 750
Humidity of Air % [decimal #]at site	= ? 0.5
Form Coefficient	= ? 2
Mass of Fragment [kg]	= ? 0.5
Density of Fragment [kg/m <sup>3</sup> ]	= ? 7800
Range Wind [m/s]	= ? 0
Cross Wind [m/s]	= ? 0
Integration Step, 10, 1, or 0.5, 0.1	= ? 1_

### RISULTATO

Horizontal Range [m]	= 668.72
Corresponding y-Coord [m]	= 0
Departure Angle [Deg.]	= 25
Time of Flight [s]	= 13.61
Terminal Speed [m/s]	= 31
Terminal Angle [Deg.]	= -86.0377
Cross-Wind Deflection	= 0
Trajectory Vertex [m]	= ( 0 , 0 )
Ballistic Coefficient BC	= 9.867045

# Programma per il calcolo della gittata dei frammenti irregolari di bomba

```
'
'                                     QBasic PC Program
'                                     Irregular Fragments
'
'
'FIND : Range, and other Elements of the Trajectory, etc.
'GIVEN: Departure Velocity, Departure Angle, Form Factor, Mass
of Fragment, Density of Fragment

'-----

' Control DATA
' Input:
' ICAO atmosphere; x0 = y0 = 0, Departure velocity = 1000,
departure angle 20 degree,
' Form Coefficient i = 2, Mass of Fragment m = 0.09, Density
of fragment = 7800 (Iron)
' Temperature of air = 15 Celsius, Propellant temperature 15
C, Pressure = 750 mm Hg; Humidity 50 %=0.5,
' Range wind 0 m/s, Cross wind 0 m/s. Integration Step = 1

' Results: Range = 401.5 m, Time of Flight = 9.21 s,
'           Terminal Speed = 23 m/s, Terminal Angle = - 84
Degree
'           Cross wind deflection, 0 m;
'           BC = 17.48
'
'-----
-----

'Functions & Subs.

DECLARE SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1,
wind, ys, yy, pa, ta1, TE, De, m, Pr)
DECLARE SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea,
tp, ta1, pa1, xx1, voo, vol, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m,
atm, G, GA)
DECLARE SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h,
h0, k, L, r, q)
DECLARE SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)
DECLARE SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)
DECLARE SUB c (koef)

'Variables

DIM m(4, 4), v(4)
rendi = 4
cog = 7: cof = 0
```

```

'Zgjdhja
CLS

fillimi:

menu cog, cof, 3, 10, 21, 70, "INITIAL DATA"
InfHyres x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, tal, pal,
xx1, voo, vol, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m, atm, G, GA, Tc
c koef

F:
FOR nk = 1 TO rendi
    NPxyzvw nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k,
L, r, q

    ylz1vlw1 x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pal, wind,
ys, yy, pa, tal, TE, Pr
    NPkoef k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1
    m(nk, 1) = k: m(nk, 2) = L
    m(nk, 3) = r: m(nk, 4) = q
NEXT nk

'Calculation

FOR i = 1 TO rendi
    v(i) = 1 / 6 * (m(1, i) + 2 * m(2, i) + 2 * m(3, i) + m(4,
i))
NEXT i

'New Data

x0 = x0 + h: y0 = y0 + v(1): z0 = z0 + v(2)
v0 = v0 + v(3): w0 = w0 + v(4)

IF ABS(z0) < .0001 THEN
    ymax = v0
    xmax = x0 + wind * w0
END IF

xxc = x0 + wind * w0
IF (xxc - xx1) <= .001 THEN
    xc = xxc
    yc = v0
    Tc = w0
    ac = (180 / 3.141592654#) * ATN(z0)
    vc = y0 / COS(ATN(z0))
END IF

IF x0 > 10 AND v0 <= .005 THEN

    'Display Resultst

```

```

        menu cog, cof, 6, 20, 22, 72, "RESULTS:"

        LOCATE 11, 25: PRINT "Horizontal Range [m]      = "; INT((x0
+ w0 * wind - v0 / z0) * 100 + .5) / 100
        LOCATE 12, 25: PRINT "Coresponding y-Coord [m] = "; (v0 -
v0)
        LOCATE 13, 25: PRINT "Departure Angle [Deg.]    = "; INT((a)
* 10000 + .5) / 10000
        LOCATE 14, 25: PRINT "Time of Flight [s]       = "; INT((w0)
* 100 + .5) / 100
        LOCATE 15, 25: PRINT "Terminal Speed [m/s]     = "; INT((y0
* (1 + z0 ^ 2) ^ .5) + .5)
        LOCATE 16, 25: PRINT "Terminal Angle [Deg.]     = ";
INT((ATN(z0) * 180 / 3.141593) * 10000 + .5) / 10000
        LOCATE 17, 25: PRINT "Cross-Wind Deflection    = "; INT((cw
* (w0 - x0 / (voo * COS(a * 3.14159265# / 180)))) * 1000 + .5) /
1000
        LOCATE 18, 25: PRINT "Trajectory Vertex [m]     = "; "(";
INT((xmax) * 10 + .5) / 10; ", "; INT((ymax) * 100 + .5) / 100;
")"
        LOCATE 19, 25: PRINT "Ballistic Coefficient BC = "; koef
        ELSE
            GOTO F:
        END IF
        END
        END

        SUB c (koef)
            koef = koef
        END SUB

        SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, tal,
pal, xx1, voo, vol, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m, atm, G,
GA, Tc)

            TE = 288.15: Pr = 760: Tc = 21
            CLS
            GOTO 400:

            400
            LOCATE 5, 13: INPUT "Initial   x-coordinate of fragment
= "; x0
            LOCATE 6, 13: INPUT "Initial   y-coordinate of fragment
= "; y0
            LOCATE 7, 13: INPUT "Departure Angle [Degree]           =
"; z0
            LOCATE 8, 13: INPUT "Departure Speed [m/s]             =
"; y0
            LOCATE 9, 13: INPUT "Temperature of Air [C] at firing site
= "; ta
            LOCATE 10, 13: INPUT "Propellant Temperature[C]
= "; tp
            LOCATE 11, 13: INPUT "Pressure [mm] at the firing site
= "; pa

```

```

LOCATE 12, 13: INPUT "Humidity of Air % [decimal #]at site
= "; ea
LOCATE 13, 13: INPUT "Form Coefficient           =
"; koef
LOCATE 14, 13: INPUT "Mass of Fragment [kg]           =
"; m
LOCATE 15, 13: INPUT "Density of Fragment [kg/m^3
= "; De
De = 1.241 * (m / De) ^ (1 / 3) 'Diameter of Cross Section
[m]
koef = koef * De ^ 2 * 1000 / m 'BC

LOCATE 16, 13: INPUT "Range Wind [m/s]           =
"; wind
LOCATE 17, 13: INPUT "Cross Wind [m/s]           =
"; cw

LOCATE 18, 13: INPUT "Integration Step, 10, 1, or 0.5,
0.1 = "; h0
vv = v0: a = z0: voo = y0
ta = ta + 273.15
IF ta > 273.16 AND ta <= 327.15 THEN
ea = ea * 7.50187 * EXP(19.04 * (1 - 280.07 / ta))
END IF
IF ta > 255.15 AND ta < 273.15 THEN
ea = ea * 7.50187 * EXP(22.024 * (1 - 279.24 / ta))
END IF

pa1 = ta / (1 - .3785 * ea / pa)
vo1 = (voo - .4 * voo * (dm / m) + .0014 * voo * (tp - Tc))
y0 = SQR(vo1 ^ 2 + wind ^ 2 - 2 * vo1 * wind * COS(a *
3.141592654# / 180))
y0 = y0 * COS(a * 3.141592654# / 180)
z0 = TAN(a * 3.141592654# / 180)
z0 = z0 / (1 - wind / (vo1 * COS(a * 3.141592654# / 180)))
CLS
END SUB

SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)

COLOR cog, cof
LOCATE xf - 1, yf: PRINT t$

LOCATE xf, yf: PRINT "É" + STRING$(yfu - yf, 205) + "»";

FOR i = xf + 1 TO xfu
LOCATE i, yf: PRINT "°" + SPACE$(yfu - yf) + "°";
NEXT
LOCATE xfu + 1, yf: PRINT "È" + STRING$(yfu - yf, 205) +
"¼";
END SUB

```

```

SUB NPkoeff (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)

    k = h * y1: L = h * z1
    r = h * v1: q = h * w1
END SUB

SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k,
L, r, q)

    IF nk = 1 THEN
        x = x0: y = y0: z = z0
        v = v0: w = w0: h = h0
        GOTO fund:
    END IF

    IF nk = 2 OR nk = 3 THEN
        x = x0 + (.5 * h): y = y0 + (.5 * k)
        z = z0 + (.5 * L): v = v0 + (.5 * r)
        w = w0 + (.5 * q)
        GOTO fund:
    END IF

    IF nk = 4 THEN
        x = x0 + h: y = y0 + k: z = z0 + L
        v = v0 + r: w = w0 + q
    END IF

    fund:
END SUB

SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pal, wind,
ys, yy, pa, tal, TE, Pr)

    tal = (TE / pal) ^ .5
    yy = y * SQR(1 + z ^ 2)

    IF yy > 550 THEN

        y1 = -1 * koef * .865 * 4.732 ^ -4 * (1 + 50 / yy) *
yy

    ELSEIF yy > 150 AND yy <= 550 THEN

        y1 = -1 * koef * 4.723 * 10 ^ -4 * (1.49 + 0.51 *
SIN(860 * 3.14159 / 180 - 350 * LOG(yy) * 3.14159 / 180)) ^ -1 *
yy

    ELSEIF yy < 150 THEN

        y1 = -1 * koef * 4.73210 ^ -4 * 0.5 * yy

    END IF

    z1 = -9.80665 / y ^ 2

```

```
v1 = z  
w1 = 1 / y
```

```
END SUB
```

## Programma per il calcolo della gittata di frammenti sferici

```
'
'                               QBasic PC Program
'                               Spherical Fragment
'

'FIND : Range, and other Elements of the Trajectory, etc.
'GIVEN: Departure Velocity, Departure Angle, Form Factor, Mass
of Fragment (Sphere), Density of Fragment

'-----

' Control DATA
' Input:
'   ICAO atmosphere; x0 = y0 = 0, Departure velocity = 1000,
departure angle 20 degree,
'   Form Coefficient i = 1.21 (Table 1), Mass of Fragment m =
0.09, Density of fragment = 7800 (Iron)
'   Temperature of air = 15 Celsius, Propellant temperature 15
C, Pressure = 750 mm Hg; Humidity (50 %) = 0.5,
'   Range wind 0 m/s, Cross wind 0 m/s. Integration Step = 1

' Results: Range = 1228 m, Time of Flight = 13.56 s,
'           Terminal Speed = 53 m/s, Terminal Angle = - 69
Degree, Vertex (892, 263)
'           Cross wind deflection, 0 m; BC = 10.57
'
'-----
-----

'Functions & Subs.

DECLARE SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1,
wind, ys, yy, pa, ta1, TE, De, m, Pr)
DECLARE SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea,
tp, ta1, pa1, xx1, voo, vol, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m,
atm, G, GA)
DECLARE SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h,
h0, k, L, r, q)
DECLARE SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)
DECLARE SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)
DECLARE SUB c (koef)

'Variables

DIM m(4, 4), v(4)
rendi = 4
cog = 7: cof = 0
```

```

'Zgjdhja
CLS

fillimi:

menu cog, cof, 3, 10, 21, 70, "INITIAL DATA"
InfHyres x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, tal, pal,
xx1, voo, vol, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m, atm, G, GA, Tc
c koef

F:
FOR nk = 1 TO rendi
    NPxyzvw nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k,
L, r, q

    ylz1vlw1 x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pal, wind,
ys, yy, pa, tal, TE, Pr
    NPkoef k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1
    m(nk, 1) = k: m(nk, 2) = L
    m(nk, 3) = r: m(nk, 4) = q
NEXT nk

'Calculation

FOR i = 1 TO rendi
    v(i) = 1 / 6 * (m(1, i) + 2 * m(2, i) + 2 * m(3, i) + m(4,
i))
NEXT i

'New Data

x0 = x0 + h: y0 = y0 + v(1): z0 = z0 + v(2)
v0 = v0 + v(3): w0 = w0 + v(4)

IF ABS(z0) < .0001 THEN
    ymax = v0
    xmax = x0 + wind * w0
END IF

xxc = x0 + wind * w0
IF (xxc - xx1) <= .001 THEN
    xc = xxc
    yc = v0
    Tc = w0
    ac = (180 / 3.141592654#) * ATN(z0)
    vc = y0 / COS(ATN(z0))
END IF

IF x0 > 10 AND v0 <= .005 THEN

    'Display Resultst

```

```

        menu cog, cof, 6, 20, 22, 72, "RESULTS:"

        LOCATE 11, 25: PRINT "Horizontal Range [m]      = "; INT((x0
+ w0 * wind - v0 / z0) * 100 + .5) / 100
        LOCATE 12, 25: PRINT "Coresponding y-Coord [m] = "; (v0 -
v0)
        LOCATE 13, 25: PRINT "Departure Angle [Deg.]    = "; INT((a)
* 10000 + .5) / 10000
        LOCATE 14, 25: PRINT "Time of Flight [s]       = "; INT((w0)
* 100 + .5) / 100
        LOCATE 15, 25: PRINT "Terminal Speed [m/s]     = "; INT((y0
* (1 + z0 ^ 2) ^ .5) + .5)
        LOCATE 16, 25: PRINT "Terminal Angle [Deg.]     = ";
INT((ATN(z0) * 180 / 3.141593) * 10000 + .5) / 10000
        LOCATE 17, 25: PRINT "Cross-Wind Deflection    = "; INT((cw
* (w0 - x0 / (voo * COS(a * 3.14159265# / 180)))) * 1000 + .5) /
1000
        LOCATE 18, 25: PRINT "Trajectory Vertex [m]     = "; "(";
INT((xmax) * 10 + .5) / 10; ", "; INT((ymax) * 100 + .5) / 100;
")"
        LOCATE 19, 25: PRINT "Ballistic Coefficient BC = "; koef
ELSE
        GOTO F:
END IF
END

SUB c (koef)
        koef = koef
END SUB

SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, tal,
pal, xx1, voo, vol, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m, atm, G,
GA, Tc)

        TE = 288.15: Pr = 760: Tc = 21
        CLS
        GOTO 400:

        400
        LOCATE 5, 13: INPUT "Initial  x-coordinate of Fragment [m]
= "; x0
        LOCATE 6, 13: INPUT "Initial  y-coordinate of Fragment [m]
= "; y0
        LOCATE 7, 13: INPUT "Departure Angle [Degree]          =
"; z0
        LOCATE 8, 13: INPUT "Departure Speed [m/s]             =
"; y0
        LOCATE 9, 13: INPUT "Temperature of Air [C] at firing site
= "; ta
        LOCATE 10, 13: INPUT "Propellant  Temperature[C]
= "; tp
        LOCATE 11, 13: INPUT "Pressure [mm] at the firing site
= "; pa

```

```

LOCATE 12, 13: INPUT "Humidity of Air at Site in % [decimal
#]= "; ea
LOCATE 13, 13: INPUT "Form Coefficient                =
"; koef
LOCATE 14, 13: INPUT "Mass of Fragment [kg]           =
"; m
LOCATE 15, 13: INPUT "Density of Fragment [kg/m^3]
= "; De
De = 1.241 * (m / De) ^ (1 / 3) 'Diameter of Cross Section
koef = koef * De ^ 2 * 1000 / m 'BC

LOCATE 16, 13: INPUT "Range Wind                    =
"; wind
LOCATE 17, 13: INPUT "Cross Wind                    =
"; cw

LOCATE 18, 13: INPUT "Integration Step, 10, or 1, 0.5,
0.1 = "; h0
vv = v0: a = z0: voo = y0
ta = ta + 273.15
IF ta > 273.16 AND ta <= 327.15 THEN
ea = ea * 7.50187 * EXP(19.04 * (1 - 280.07 / ta))
END IF
IF ta > 255.15 AND ta < 273.15 THEN
ea = ea * 7.50187 * EXP(22.024 * (1 - 279.24 / ta))
END IF

pa1 = ta / (1 - .3785 * ea / pa)
vo1 = (voo - .4 * voo * (dm / m) + .0014 * voo * (tp - Tc))
y0 = SQR(vo1 ^ 2 + wind ^ 2 - 2 * vo1 * wind * COS(a *
3.141592654# / 180))
y0 = y0 * COS(a * 3.141592654# / 180)
z0 = TAN(a * 3.141592654# / 180)
z0 = z0 / (1 - wind / (vo1 * COS(a * 3.141592654# / 180)))
CLS
END SUB

SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)

COLOR cog, cof
LOCATE xf - 1, yf: PRINT t$

LOCATE xf, yf: PRINT "É" + STRING$(yfu - yf, 205) + "»";

FOR i = xf + 1 TO xfu
LOCATE i, yf: PRINT "°" + SPACE$(yfu - yf) + "°";
NEXT
LOCATE xfu + 1, yf: PRINT "È" + STRING$(yfu - yf, 205) +
"¼";
END SUB

SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)

```

```

    k = h * y1: L = h * z1
    r = h * v1: q = h * w1
END SUB

SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k,
L, r, q)

    IF nk = 1 THEN
        x = x0: y = y0: z = z0
        v = v0: w = w0: h = h0
        GOTO fund:
    END IF

    IF nk = 2 OR nk = 3 THEN
        x = x0 + (.5 * h): y = y0 + (.5 * k)
        z = z0 + (.5 * L): v = v0 + (.5 * r)
        w = w0 + (.5 * q)
        GOTO fund:
    END IF

    IF nk = 4 THEN
        x = x0 + h: y = y0 + k: z = z0 + L
        v = v0 + r: w = w0 + q
    END IF

    fund:
END SUB

SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind,
ys, yy, pa, ta1, TE, Pr)

    ta1 = (TE / pa1) ^ .5
    yy = y * SQR(1 + z ^ 2)

    y1 = -1 * koef * (pa / Pr) * ta1 * ((pa1 - .006328 * v) /
pa1) ^ 4.4 * 2.7189 * 10 ^ -4 * (yy) ^ 2 / yy
    z1 = -9.80665 / y ^ 2
    v1 = z
    w1 = 1 / y

END SUB

```

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/334001772>

# Shock Wave of Explosion

Preprint · June 2019

DOI: 10.13140/RG.2.2.19915.44328

---

CITATIONS

0

---

READS

302

2 authors, including:



Edoardo Mori

[www.earmi.it](http://www.earmi.it)

7 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Shock Wave of Explosion [View project](#)



Exterior Ballistics of Fragments Public Safe Evacuation Zone Related to Munition Disposal [View project](#)

# Shock Wave of Explosion

Edoardo Mori, Esq., George Klimi

June 11, 2019

Edoardo Mori, Esq. (Retired)

Doctor at Law.

Examining Magistrate, & Hoplologist, Italy

<http://www.earmi.it/>, e-mail: [e.mori@armi.it](mailto:e.mori@armi.it)

George Klimi, PhD (Retired)

Math Department,

NYC College of Technology & Pace University, New York.

e-mail: [iven24@aol.com](mailto:iven24@aol.com) , [gklimi@pace.edu](mailto:gklimi@pace.edu)

## Acknowledgment

We are grateful to our good friend Andrea Allemandi (Italy) for his thoughtful technical review of our project paper.

## INDEX

### Shock Wave of Explosion

Introduction	3
1. Detonation of Explosives	3
1.1 Detonation Shock Wave	4
1.2 Detonation Velocity	5
1.3 Thermal Energy of Detonation Products. TNT Equivalent Charge	6
1.4 Expansion of Detonation Products	8
1.5 Spherical Standard TNT Charge and Its Radius	9
1.6 Instantaneous Detonation	11
2. Shock Wave in Free Air (Airburst)	12
2.1 Quantitative Characteristics of Shock Wave	12
2.2 Maximum Overpressure	13
2.3 Another Set of Experimental Equations	16
2.4 Lethal Range (Large Explosions, 50% casualties)	19
2.5 Shock Wave Scaling Rule	20
2.6 Parameters at the Front of SW	21
3. Ground Surface Explosion	
3.1 Maximum Overpressure of SW Produced by Ground Explosion	22
3.2 Long Explosive Charge, Bangalore Torpedo	29
4. Reflected Shock Wave	
4.1 Reflection of Vertical SW	33
4.2 Regular and Irregular Reflection of Shock Wave. Mach wave	36
4.2 Parameters of the Reflected SW and Mach Wave	37
5. Injury from Shock Wave	
5.1 Injury or Damage Criteria	44
<i>Primary Action of SW.</i>	
5.2 Lethal Action of Explosives on Human Being	49
Some Observations Related to "Little Man" Graph	50
Estimating Incapacitation Probability, $P_r(i)$ . Ground Surface Explosion	51
a) Fifty Percent Incapacitation Probability	
b) Fifty Percent Incapacitation Probability, $\Delta P_H > 10 \text{ KG/cm}^2$ .	
5.3 Total Incapacitation Probability	57
Bibliography	63

## Introduction

The personnel is the most important objective of exploding ammunitions and the primary target of military actions.

Blast ammunitions and explosive charges are constructed to incapacitate a large number of personnel (soft targets) and hard targets (constructions, armament, guns, shelters, etc.) by means of blast wave of explosive charges, artillery and aviation projectiles, etc.

The blast ammunitions have a relatively large explosive charge (TNT, RDX, C-4, etc.) necessary to fragment the metallic shell and create the blast needed to incapacitate the military personnel and hard targets through the destruction action of **shock wave** (SW). In general, for blast ammunitions with metallic shells, the lethal range of SW of the explosive charge is relatively larger compared to the lethal range of the fragments delivered by the same blast ammunition.

For more information, the reader can see [2].

## 1. Detonation of Explosives.

The process of expansion of chemical reactions that transforms the chemical explosive charge into gaseous products of high density, temperature and pressure is called detonation, or detonation wave. The detonation of a high explosive charge, HE, in each direction, is result of the shock wave which, after initiation by a detonator, keeps the chemical reaction to flow, without interruption, with a constant supersonic velocity.

The detonation wave is practically a shock wave (SW) which travels with high velocity in all directions, compressing vigorously the solid explosive and triggering the chemical reactions in the solid explosive charge.

The velocity of detonation for a given kind of explosive is constant, some thousand meters per second. As result of that high velocity, at the end of detonation the gaseous products occupy almost the same volume as the explosive charge (see Instantaneous Detonation, p.10). The detonation velocity does not depend on the characteristics of the surrounding atmosphere, other constructions, projectile shell, etc. The detonation wave ends at the time when all the explosive charge is transformed in gaseous products of high pressure, temperature and density. Gaseous products expanding in stationary air create the air shock wave (blast wave).

To study the SW in air (gas, explosive charge, solid body, water, etc.) the Gasdynamics/Hydrodynamics considers the physical model of a tube with a fast-moving

piston.

Note that, the Gasdynamics theory is not object of this paper. The theoretical outcomes are presented without demonstrations, but are illustrated mostly with examples.

To simplify the study of air shock wave in Gasdynamics it is used the simplified Physical model of instantaneous detonation, i.e. we assume that the explosive charge is transformed instantly in gaseous products at the moment the chemical reactions initiate at the location of a detonator.

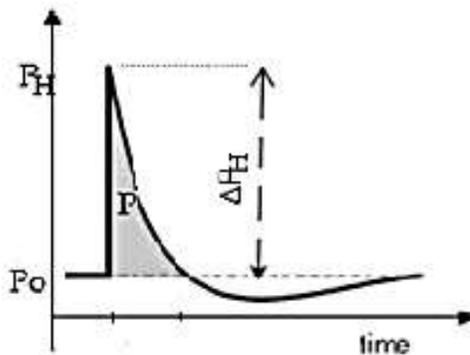
### 1.1 Detonation Shock Wave

Important characteristics of detonation are the parameters of detonation (pressure, density, velocity of particles) at the front of detonation SW. They can be estimated using respectively the corresponding approximate formulae:

$$P_H = \rho_0 \cdot D^2/4, \quad \rho_H = (4/3) \cdot \rho_0, \quad u_H = D/4, \quad (1.1)$$

where  $\rho_0$  is the density of explosive charge,  $D$  is the velocity of detonation (Fig. 1).

The above formulas can be used, with a good approximation, to solve practical problems.



At the front of SW of detonation, the pressure, density and temperature jump quite instantly. Behind the front there is a thin layer where chemical reactions create the gaseous products that move behind the front of SW.

In Fig. 1 it is shown the detonation wave, at a certain distance  $r$  from the center of explosion.

Detonation wave is composed by the positive pressure phase (compressed zone) and the negative one (rarefaction zone). At positive pressure phase the gas particles move after the front of the SW. In rarefaction part of the SW the particles of gases move in the opposite direction.

At the front of the detonation shock wave the pressure jumps almost immediately from the value of the atmospheric pressure  $P_0 = P_{atm}$  to the maximum pressure  $P_H$ . The difference  $\Delta P_H = P_H - P_0$  is the maximum overpressure (pick overpressure).

The parameters at the front of detonation shock wave are given in formulae (1.1).

## 1.2 Detonation Velocity

The detonation velocity of an explosive charge with a given density greater than 1000 kg/m<sup>3</sup> can be calculated using the experimental formula of M. A. Kuk [1, p. 132]:

$$D = D_0 + M(\rho - \rho_0) \quad (1.2)$$

where  $D$  and  $\rho$  are respectively the velocity of detonation and the density of explosive mass, while  $D_0$  is the velocity of detonation that corresponds to the density  $\rho_0$  of the explosive charge, and  $M$  is a coefficient that depends on the characteristics of explosive (see Table 1).

Thus, for example, using formula (1.2) and the data from table 1, for the TNT charge with density  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ , we find the detonation velocity,

$$D = D_0 + M(\rho - \rho_0) = 5010 + 3.225 \cdot (1550 - 1000) = 6784 \text{ m/s}.$$

Thus, for example, for the TNT explosive charge with density  $\rho = 1617 \text{ kg/m}^3$ , we find that the detonation velocity is:

$$D = 5010 + 3.225 \cdot (1550 - 1000) = 7000 \text{ m/s} ,$$

Table 1.

	$\rho_0 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$D_0 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$M \left[ \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) / \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \right]$
TNT	1000	5010	3.225
TEN	1000	5550	3.950
PENTOLIT 50/50	1000	5480	3.100
TETRYL	1000	5600	3.225
Hexogen -TNT 64/36	1600	7540	3.080

**Note** that the detonation velocity depends on the density of explosive. A higher density of a given unit of HE charge generates a higher amount of energy than the same explosive of unit charge of smaller density.

For that reason, to have a standard TNT charge, it is considered as reference the density  $\rho_0 = 1600 \text{ kg/m}^3$ .

For such high velocities of detonation, i.e. high velocities of expansion of chemical

reactions, at the time when the detonation process comes to an end, the gaseous products practically have the same volume as the volume of explosive charge itself.

As result of the very small volume of the high-density gases, the pressure is very large, and so, the gases expand rapidly acting powerfully on the surrounding environment.

**Note** that density of gases at the instant of detonation is the same as the density of explosive charge; for the TNT standard charge the density is  $\rho_0 = 1600 \text{ kg/m}^3$ .

During the detonation process, the energy that is delivered by the chemical reactions allows, without interruption, the development of chemical reactions in all the volume of explosive. The high velocity of detonation practically does not let the gaseous products to expand before the detonation ends (see examples below).

### 1.3 Thermal Energy of Detonation Products. TNT Equivalent Charge

During the detonation, the chemical reactions of molecules of explosive release thermal energy,  $Q$ .

If we denote  $e$  the specific thermal energy that is generated during the detonation of one unit mass of the explosive charge, then the TNT mass  $m$  of the given explosive charge, which generates the thermal energy  $Q$  (Joule), is obtained by the equation

$$Q = m \cdot e. \quad (1.3)$$

To estimate the thermal energy of detonation products obtained from a standard TNT charge, it is considered that 1 kg of TNT generates an energy

$$e = 4.18 \times 10^6 \text{ J / kg}$$

Substituting  $e$ , we obtain the energy generated by the detonation of a TNT explosive charge of mass  $m$  (in kg), i.e.

$$Q = 4.18 \times 10^6 \cdot m. \quad (1.4)$$

TNT equivalent mass of a given high explosive is the mass of that TNT charge that will produce an energy equal to the energy released by the explosive under consideration.

To convert a mass  $m$  of any explosive charge to a TNT equivalent mass, we refer to Table 2.1, [2].

For example, let's assume a mass of TNT explosive charge,  $m_{TNT}$ . It produces an energy of

$$Q_{TNT} = 4.18 \times 10^6 \cdot m_{TNT}.$$

For the explosive charge HMX with mass  $m_{HMX}$  that produces the same energy as the standard TNT mass ( $m_{TNT}$ ) we can write

$$Q_{HMX} = 5.68 \times 10^6 \cdot m_{HMX},$$

where  $e_{HMX} = 5.68 \times 10^6 J$  is the energy delivered by 1 kg HMX, [2].

Since we consider  $Q_{HMX} = Q_{TNT}$  from the above equations we have:

$$5.68 \times 10^6 m_{HMX} = 4.18 \times 10^6 \cdot m_{TNTeq}.$$

Hence, the TNT equivalent charge of HMX is

$$m_{TNTeq} = (5.68 \times 10^6 / 4.18 \times 10^6) \cdot m_{HMX} = 1.36 m_{HMX}.$$

Table 2 - Conversion Factors for Explosives

Explosive	Mass Specific Energy $Q_x$ (kJ/kg)*	TNT Equivalent $Q_x/Q_{TNT}$
Compound B (60% RDX, 40% TNT)	5190	1.148
RDX (Cyclonite)	5360	1.185
HMX	5680	1.256
Nitroglycerin (liquid)	6700	1.481
TNT	4520	1.000
Pentolite	6012	1.330
60% Nitroglycerin Dynamite	2710	0.600
Semtex	5660	1.250

\* Convert to (Btu lb.) by multiplying by 0.43

In the same way we find a general formula for the TNT equivalent mass ( $m_{TNTeq}$ ) of any high explosive of mass  $m_e$ , i.e.

$$m_{TNTeq} = \left( \frac{Q_e}{4.18 \times 10^6} \right) \cdot m_e. \quad (1.5)$$

Note. There is a difference between the standard specific energy  $e = 4.18 \times 10^6 J / kg$  and the specific energy 4520 KJ/kg given in table 2. This is as result of the fact that the detonation velocity depends on the density of the HE explosive charge. Thus,

the conversion factor of TNT equivalent mass, given in table 2, with respect to the standard TNT charge is

$$m_{TNTeq} = \left( \frac{Q_e}{4.18 \times 10^6} \right) \cdot m_e = \left( \frac{4520,000}{4.18 \times 10^6} \right) \cdot m_e = 1.08 m_e.$$

while the density of the TNT in table 2 is  $\rho_{01} = 1.08 \cdot 1600 = 1728 \text{ kg/m}^3$  (See exercise below to understand how we find the density  $\rho_{01} = 1728$ ).

**Example 1.**

Find the standard TNT equivalent mass of a TNT explosive charge with density  $m = 1617 \text{ kg/m}^3$ .

Solution:

Since the energy released during the detonation of an explosive charge is proportional to the density, we can write:

$$m_{TNTeq} = \left( \frac{1617}{1600} \right) \cdot m_e = 1.01 \text{ kg}.$$

**1.4 Expansion of Detonation Products**

To have an idea on the quantity of gaseous products of detonation, let's consider 1 kg. TNT charge with standard density  $\rho_0 = 1600 \text{ kg/m}^3$ , which occupies the volume of

$$V_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{1600} = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \tag{1.6}$$

In general, if the mass of the explosive charge is **m** then the volume is

$$V = m/\rho. \tag{1.7}$$

where  $m$  and  $\rho$  are respectively the mass and the density of the explosive charge.

As we mention before, at the end of detonation process, the gaseous products (mass 1 kg, or mass **m** kg) will occupy almost the same volume as the explosive charge does. The pressure of detonation products, concentrated in such a small volume, is very high.

At the end of detonation process, **the average pressure  $p_{av}$**  of the products of detonation, can be calculated using the following formula from the hydrodynamic theory of detonation:

$$p_{av} = P_H/2 = \rho_0 \cdot \frac{D_0^2}{8}. \quad (1.8)$$

Thus, for the TNT explosive charge with detonation velocity 6780 m/s, we have

$$p_{av} = \rho_0 \cdot \frac{D_0^2}{8} = 1600 \cdot \frac{6780^2}{8} = 9.19 \times 10^9 Pa = 9.38 \times 10^4 KG/cm^2.$$

The Equation of State of the gaseous products, obtained during detonation, is

$$p \cdot V^3 = p_0 V_0^3 = constant \quad (1.9)$$

It can be written as well as

$$p/\rho^3 = p_0/\rho_0^3 = constant \quad (1.10)$$

The expansion of the gaseous products of detonation practically will “end” when the average pressure of expanding gases will fall till it becomes equal to the normal atmospheric pressure. In normal atmospheric conditions, pressure  $p = 1 atm = 1.013 \cdot 10^5 Pa = 1.033 KG/cm^2$ , temperature zero degree Celsius, the gaseous products

( volume  $V_0 = 6.25 \cdot 10^{-4} m^3$ , pressure  $p_0 = 1.013 \cdot 10^5 Pa$  ) will expand to have a large volume of

$$V = V_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{p_{av}}{p_0}} = 6.25 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{\frac{9.20 \cdot 10^9}{1.013 \cdot 10^5}} = 0.0281 m^3 \quad (1.11)$$

It means that high density gaseous products of detonation will expand to occupy a volume that is 46 times the volume  $V_0 = (6.25 \cdot 10^{-4} m^3)$ , of the undetonated explosive.

### 1.5 Spherical Standard TNT Charge and its Radius

Experiments show that the products of detonations of any concentrated explosive charge in any form, cube, sphere, rectangular, expands in the same way as a spherical charge of the same mass. That is not valid for a long cylindrical charge. Long linear explosive charge (LEC) is the one where one length is at least 4 times longer than the other lengths (E. Mori, [2]).

We can estimate the radius of the expansion of detonation products till the pressure will become equal to atmospheric value.

To simplify the solution of problems related to high explosive charges (HE), and to standardize those, we consider:

The mass  $m$  of a TNT spherical charge has the density  $1600 \text{ kg/m}^3$ . As we demonstrated above, the expansion of gases is “interrupted” when the average pressure of detonation gases become equal to the atmospheric pressure. At this moment, the SW, created as result of expansion of gases beyond the initial spherical explosive charge with radius  $r_0$ , separates itself from the detonation gases, though for inertia, the expansion of gases stops till around  $20r_0$ .

Let's estimate  $r_0$ .

Consider the mass  $m$  of a TNT spherical charge, radius  $r_0$ . We can write:

$$m = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \cdot \rho_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \cdot 1600 \quad (1.12)$$

since the density of TNT,  $\rho_0 = 1600 \text{ kg/m}^3$ .

From the last equation, we find that the radius of the spherical charge, before initiation of detonation is

$$r_0 = \left(\frac{3}{4\pi \cdot 1600} m\right)^{1/3} = 0.053 \sqrt[3]{m}. \quad (1.13)$$

For example, a TNT charge of mass  $m = 1 \text{ kg TNT}$  has the radius

$$r_0 = 0.053 \sqrt[3]{1} = 0.053 \text{ m}.$$

This value appears in many writings on SWs of explosion.

### Example 1.

For a mass  $m_{RDX}=2.5 \text{ kg}$  of an explosive charge of RDX find the TNT equivalent mass of given RDX charge and the radius  $r_0$ , of the spherical charge.

Solution:

On Table 2.1 (E. Mori), is given that unit energy,  $e_{RDX} = 5.36 \times 10^6 \text{ J/kg}$ . The TNT equivalent mass of RDX, i.e.  $m_{TNTeq}$ , is

$$m_{TNTeq} = \left(\frac{5.36 \times 10^6}{4.18 \times 10^6}\right) \cdot m_{RDX} = 1.282 m_{RDX} = 3.206 \text{ kg TNT}$$

Radius of the spherical RDX charge is

$$r_0 = 0.053 \sqrt[3]{m_{TNT}} = 0.053 \sqrt[3]{3.206} = 0.0782 \text{ m}.$$

The expansion of the detonation products of a spherical charge continue till it “stops” when the average pressure becomes equal to the atmospheric pressure  $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  and the density equal to the density of air  $\rho = 1.2929 \text{ kg/m}^3$ .

Let's estimate the distance where the detonation products stop expanding. Because the detonation products at the normal atmospheric condition are spherical, we can write

$$m = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot 1.2929 \quad (1.14)$$

Since the mass of undetonated TNT explosive charge and the mass of gases of explosion are the same (no loss of mass), from two equations, (1.12) and (1.14), we have:

$$\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot 1.2929 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \cdot 1600$$

Hence,

$$r = \sqrt[3]{1600/1.2929} \cdot r_0 = 10.74r_0 \approx 11r_0 \quad (1.15)$$

Substituting (1.13) in (1.15), we find that the distance from the center of the explosive charge, where the detonation gases stop expanding is

$$r \approx 0.58 \cdot \sqrt[3]{m} \quad (1.16)$$

For an explosive charge of mass  $m = 8 \text{ kg TNT}$  we find that the distance to the point where the SW is detached from the detonation gases is

$$r \approx 0.58 \cdot \sqrt[3]{8} = 1.16 \text{ m}$$

from the center of spherical charge.

Note that the separation distance  $r$  of the blast wave from the detonation gases can as well be easily found dividing equation (1.16) and (1.13), i.e.

$$r \approx 0.58 \cdot \sqrt[3]{m} \text{ and } r_0 = 0.053 \sqrt[3]{m} :$$

$$\frac{r}{r_0} = \frac{0.58 \cdot \sqrt[3]{m}}{0.053 \cdot \sqrt[3]{m}} = 10.94 \approx 11$$

Hence

$$r = 10.94 r_0 \approx 11 r_0.$$

## 1.6 Instantaneous Detonation

Considering the detonation velocity  $D = 7000 \text{ m/s}$ , and a TNT charge of 1kg we find that the time when the detonation process ends is

$$t = r_0/D \approx 0.053 \cdot 1/7000 = 7.57 \times 10^{-6} \text{ sec.},$$

i.e. detonation occurs practically instantly at the time it is ignited.

That's why, as we mentioned above, in the hydrodynamic theory of shock waves, it is considered the model of instantaneous detonation of an explosive charge. The detonation gases at high pressure, and as result, at high density and high temperature, at the end of detonation process, have practically the same volume as that of the undetonated spherical explosive charge with radius  $r_0 = 0.053\sqrt[3]{m}$ .

**Note:** Shock wave in air and shock wave of detonation are different. The first one does not have the thin layer of chemical reaction; the velocity decreases continuously with the distance from center of explosion till it becomes sound wave; The SW deteriorate into a sound wave (there is no input of energy from any other source). On the other side, the velocity of SW of detonation is constant since the energy of chemical reactions keep the detonation velocity stable.

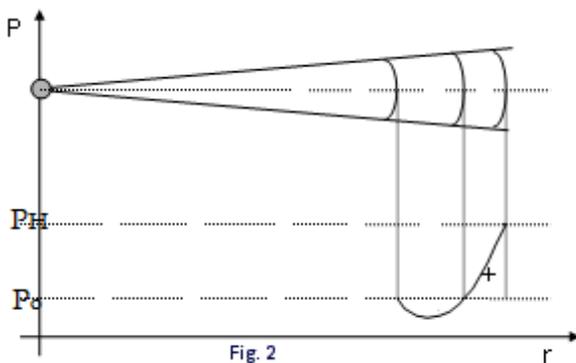
## 2. Shock Wave in Free Unconfined Air (Airburst)

### 2.1 Quantitative Characteristics of Shock Wave

The shock wave in air (blast wave), created as result of expansion of detonation gaseous, separates from the detonation products at the distance  $r \approx 0.58 \cdot \sqrt[3]{m} = 11r_0$  from the center of the spherical charge. Because of the inertia, gaseous products continue to expand radially, from the center of the spherical charge, till at the distance  $20r_0$ . At this point, the gaseous products move backwards.

The blast wave, that is composed by the compressed phase of air and rarefaction phase (fig 2), travels with supersonic velocity  $D$ , which slows down to the speed of sound in air as result of energy loss. Note that at the rarefaction phase the pressure is below atmospheric pressure.

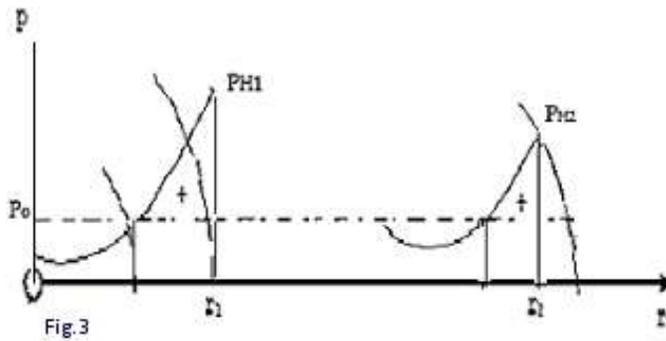
As the blast wave goes away from the center of explosion, part of energy of SW is



dispersed over bigger and bigger spherical or semispherical surfaces. As result the specific energy diminishes. At the same time, the SW compresses and heats the atmospheric air in front of SW and as result it loses another part of energy. Thus, gradually, the velocity SW as well as all parameters of SW, become smaller and smaller. The SW degenerates to a sound wave, SW in air ceases to exist.

In other words, the energy that the SW transports along any direction decreases with the increases of distance  $r$  from center (figure 3). The parameters at the front and in the positive pressure zone of the SW decrease with travel distance  $r$ .

The characteristics of SW are the parameters of air at the front of SW (pressure, temperature, density, velocity of particles of air), that change by jumping respectively from the values of stationary air  $P_0, T_0, \rho_0, u_0$  to the values of compressed air, i.e. to the maximum (pick) values  $P_H, T_H, \rho_H, u_H$ .



As a matter of fact, the front of SW is a narrow zone through which occurs the change (jump) of values of parameters.

The thickness,  $\Delta X$  [in cm], of the front of SW can be estimated by the formula

$$\Delta X = \frac{4 \times 10^{-5}}{\Delta P_H},$$

where  $\Delta P_H = P_H - P_0$  is the hydrostatic overpressure at the front of SW measured in atmosphere.

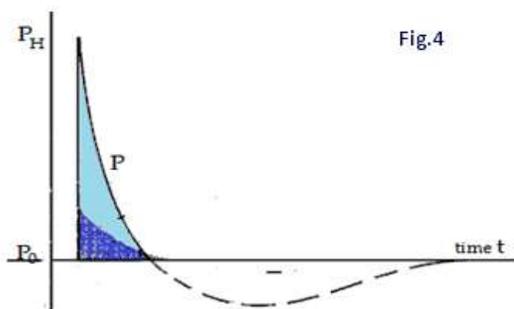
Thickness  $\Delta X$  is of the order of the free range of molecules. Since that zone is too small the SW is treated as a dimensionless area where is realized the instantaneous change of parameters.

At this small zone the pressure increases from  $P_0$  to  $P_H$ .

The time-interval  $\tau$  of the positive phase is called the time-period of SW.

## 2.2 Maximum Overpressure

The lethal and destructive effects of an explosion, due to the shock wave, can be estimated using the static overpressure of SW, which is the difference of hydrostatic pressure  $P$  at a certain time  $t$  (Fig.4) and the pressure of atmospheric air, i.e.



$$\Delta P = P - P_0.$$

An indicator of the strength of the shock wave, that also serves to evaluate

the level of injuries and devastating effects of blast on hard targets, is the Maximum Hydrostatic Overpressure at the front of shock wave (Fig. 4),

$$\Delta P_H = P_H - P_0$$

At a given distance  $r$  from the center of explosion, the overpressure,  $\Delta P = P - P_0$ , and the period  $\tau$  (positive time-interval, or time-duration of SW, in seconds) can be estimated respectively by the formulas

$$\Delta P = \Delta P_H \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{-t/\tau}, \quad (2.1)$$

and

$$\tau = 0.00115 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r}, \quad (2.2)$$

where  $t$  is the time,  $0 \leq t \leq \tau$ ,  $m$  is the mass of explosive charge, and  $r$  is the distance of SW from the center of explosion.

Equation (2.1), shows that SW overpressure, at a certain distance  $r$  from the center of the explosive charge, decreases with time from the value of the peak overpressure  $\Delta P_H$  (at time zero) to zero (when  $t = \tau$ ).

Equation (2.2) shows that the time-interval  $\tau$  of the positive phase, increases with the distance, while the peak overpressure decreases (see equations below).

The maximum overpressure  $\Delta P_H$  (in MPa), at a distance  $r$  (meter) from the center of explosion in atmospheric air of a TNT charge with mass  $m$  (in kg), can be estimated using Sadovsky's experimental formula [4, page 478],

$$\Delta P_H = 0.87 \cdot \frac{\sqrt[3]{m}}{r} + 2.753 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 7.138 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3, \quad (2.3)$$

where the maximum overpressure is expressed in  $KG/cm^2$ .

The max overpressure in (2.3) is valid for the explosion in unconfined atmospheric air when the peak-overpressure satisfies the condition:

$$0.1 \text{ KG}/cm^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG}/cm^2 \text{ or } 1 \text{ m}/KG^{1/3} \leq r/\sqrt[3]{m} \leq 10 \text{ m}/KG^{1/3}. \quad (2.4)$$

(We consider that  $10.2 \text{ kG}/cm^2 = 1 \text{ MPa}$ ).

**The results obtained by Sadovsky's equation (2.3) are overrated.**

A more accurate experimental formula to estimate  $\Delta P_H$ , similar to Sadovsky's, is [4],

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3, \quad (2.6)$$

valid for the pick overpressure that satisfies the condition:

$$0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2,$$

According to Orlenko, the equation (2.6) is valid for **any TNT explosive charge of mass  $m$** .

The specific hydrostatic impulse of the positive phase of SW can be estimated by the formula:

$$i = \int_0^\tau \Delta P \cdot dt = 168 \sqrt[3]{m^2} / r. \quad (2.8)$$

(SI unit  $P_a \cdot s = N \cdot s/m^2$ ).

Another important quantity of SW is the dynamic impulse of the flux of particles of air moving behind the front of SW, ((translational movement of gaseous particles).

It can be estimated using the practical equation:

$$j = \int_0^\tau \rho u^2 dt = 221 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{2.5} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}). \quad (2.8a)$$

#### Note

- The equations/formulas we have used to estimate the max-overpressure and other important characteristics of SW are mainly those shown in references [2], [4].
- Equations (2.7), (2.8) and (2.8a) can be modified for surface ground explosion by substituting (2m) instead of (m), (see equations (3.9), (3.10) and (3.11)).

#### Example 1.

An explosive charge of mass  $m = 1 \text{ kg}$  TNT explode in air. Find the time-interval  $\tau$  at a distance  $r = 2 \text{ m}$  from the center of explosion as well as the impulse of the positive phase  $i$  and the dynamic impulse  $j$ .

Solution

Using (2.7), (2.8) and (2.8a), we find:

$$\tau = 0.00115 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.00115 \sqrt[6]{1} \cdot \sqrt[2]{2} = 0.0016 \text{ sec.}$$

$$i = 168\sqrt[3]{m^2}/r = 168\sqrt[3]{1^2}/2 = 84 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

$$j = 221 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{2.5} = 221 \cdot \sqrt[3]{1} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{1}}{2}\right)^{2.5} = 39.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

### 2.3 Another Set of Experimental Equations

- $\Delta P_H = 25000 \left(\frac{r_0}{r}\right)^3,$  (2.8b)

valid for large strong SW. ( $r_0 = 0.053 \sqrt[3]{m}$ )

$$\Delta P_H = 6.9 \cdot \left(\frac{m}{r^3}\right) + 1,$$
 (2.9)

valid for  $\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

- $\Delta P_H = 0.976 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 1.50 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 6.04 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 - 0.0196$  (2.10)

valid for  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

We can use this equation when the mass of explosive charge is also  $m \leq 100 \text{ kg}$ . [4].

**Note:** According to John M. Dewey, 5% of the detonation products is lost as radiation [5].

#### Example 1.

Estimate the maximum overpressure at the front of the shock wave at a distance 30 meter from the center of explosion in air of a TNT explosive charge with mass:

1.  $m = 30 \text{ kg}$ .
2.  $m = 200 \text{ kg}$ .

Solution:

1.  $m = 30 \text{ kg}, r = 30 \text{ m}$

(a) Using Sadvosky's formula (2.5)

Substituting in (2.5),  $m = 30, r = 30$ , we find:

$$\Delta P_H = 0.86 \cdot \frac{\sqrt[3]{30}}{30} + 2.75 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right)^2 + 7.14 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right)^3 = 0.127 \text{ KG/cm}^2.$$

(b) Using modified equation (2.6):

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right)^3 = 0.116 \text{ KG/cm}^2.$$

(c) Using (2.10), we have

$$\Delta P_H = 0.976 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right) + 1.500 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right)^2 + 6.04 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{30}}{30}\right)^3 - 0.0196 = 0.104 \text{ KG/cm}^2.$$

**Note** that  $0.1 < \frac{\sqrt[3]{m}}{r} = \frac{\sqrt[3]{30}}{30} = 0.104 < 10$ .

2.  $m = 200\text{kg}$ ,  $r = 30\text{m}$ .

(a) Using Sadovsky's formula (2.5). Substituting  $m = 200$ ,  $r = 30$ , we find:

$$\Delta P_H = 0.86 \cdot \frac{\sqrt[3]{200}}{30} + 2.75 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^2 + 7.14 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^3 = 0.325 \text{ KG/cm}^2.$$

(b) Using equation (2.6):

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^3 = 0.298 \text{ KG/cm}^2.$$

(c) Using (2.10), we have:

$$\Delta P_H = 1.007 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right) + 1.503 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^2 + 6.043 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^3 - 0.0196 = 0.278 \text{ KG/cm}^2.$$

We see that the condition  $0.1 < \frac{\sqrt[3]{m}}{r} = \frac{\sqrt[3]{200}}{30} = 0.195 < 10$  is satisfied.

**Note:** The examples show that the Sadovsky's formula gives **overrating outcomes**.

### Example 2.

Use the outcome of example 1, ( $m = 200\text{kg}$ ,  $r = 30\text{m}$ ) to find:

- Time - interval  $\tau$  (period of SW),  $\tau = 0.00115 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r}$ .
- The specific hydrostatic impulse  $i$ ,  $i = \int_0^\tau \Delta P dt = 168 \sqrt[3]{m^2} / r$ .
- Dynamic impulse,  $j = \int_0^\tau \rho \cdot u^2 dt = 221 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{2.5}$
- Total impulse,  $I = i + j$ , impact force of the SW on the unit of area.

Solution:

Substituting in the above formulae we find:

- Time - interval,  $\tau = 0.00115 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.00115 \sqrt[6]{200} \cdot \sqrt[2]{30} = 0.015 \text{ sec.}$
- Specific hydrostatic impulse,  $i = 168 \sqrt[3]{m^2}/r = 168 \sqrt[3]{200^2}/30 = 191.52 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Dynamic impulse,  $j = 221 \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{2.5} = 221 \cdot \sqrt[3]{200} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{200}}{30}\right)^{2.5} = 21.70 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Total Impulse,  $I = i + j = 191.52 + 21.70 = 213.21 \text{ Pa} \cdot \text{s} .$

### Example 3.

A reactive projectile explodes in air at a distance  $r = 15 \text{ m}$  meters from a military jet. Estimate the maximum overpressure  $\Delta P_H$  at the front of the shock wave created by explosion in air of a TNT equivalent explosive charge with mass  $m = 50 \text{ kg}$ .

Solution:

Substituting in formula (2.10),  $m = 50 \text{ kg}$  and  $r = 15 \text{ m}$ , we find that

$$\Delta P_H = 1.007 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{50}}{15}\right) + 1.50 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{50}}{15}\right)^2 + 6.04 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{50}}{15}\right)^3 - 0.0196 = 0.408 \text{ KG/cm}^2.$$

### Example 4.

Estimate the mass of TNT spherical charge that needed to explode in unconfined air in order that at a distance  $r = 20 \text{ m}$  from the center of explosion the maximum overpressure will be  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

First, we substitute in formula (2.6),  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$ , we have:

$$0.35 = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3$$

Solving the above third-degree equation with respect to  $(\sqrt[3]{m}/r)$ , (using a graphing calculator, or any other Math software), we obtain:

$$(\sqrt[3]{m}/r) = 0.215.$$

Hence, substituting  $r = 20$ , we find:

$$m = (0.215 \cdot r)^3 = (0.215 \cdot 20)^3 = 79.51 \text{ kg TNT}$$

**Example 5.**

Estimate the distance  $r$  from the center of a TNT spherical charge with mass  $m = 1000 \text{ kg}$ , that is needed to explode in air in order that the maximum overpressure should be  $\Delta P_H = 0.50 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

First, we substitute in equation (2.6),  $\Delta P_H = 0.50 \text{ KG/cm}^2$ . We have:

$$0.50 = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3$$

Solving above equation with respect to  $(\sqrt[3]{m}/r)$  we find:

$$(\sqrt[3]{m}/r) = 0.263.$$

Hence

$$r = 3.64\sqrt[3]{m} = 3.64\sqrt[3]{1000} = 38 \text{ m}.$$

**Example 6.**

Find the peak overpressure at the distance  $r = 11r_0$  from the center of a TNT explosive charge of mass  $m$  detonated in air.

Solution:

Substituting in (2.8b) we find:

$$\Delta P_H = 25000 \left(\frac{r_0}{11r_0}\right)^3 = 18.78 \text{ KG/cm}^2$$

**2.4 Lethal Range** (Very large Explosions and Nuclear Explosions; 50% casualties)

For the personnel, the lethal range, due to large/nuclear air blast, is the distance from the center of explosion of a TNT charge, where the maximum overpressure is  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2 \approx 5 \text{ Psi}$ .

Let's estimate the lethal range for a mass  $m$ . Substituting  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$  in equation (2.6), we have

$$0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 = 0.35 \quad (2.11)$$

Solving the above equation with respect to  $(\sqrt[3]{m}/r)$ , we have

$$(\sqrt[3]{m}/r) = 0.215. \quad (2.12)$$

Hence, we find the radius of the lethal range

$$r = 4.66\sqrt[3]{m}. \quad (2.13)$$

For example, the lethal range of an explosion obtained from the explosion of an atomic device of a TNT equivalent charge of  $m = 1 \text{ KT} = 1,000,000 \text{ kg}$  is

$$r = 4.66\sqrt[3]{m} = 4.66\sqrt[3]{1,000,000} = 466 \text{ m}.$$

## 2.5 Shock Wave Scaling Rule

The solution (2.12), of equation (2.11) shows that for a given value of  $\Delta P_H$  the ratio  $(\sqrt[3]{m}/r)$  is a constant. Applying (2.12), for two different masses  $m_1, m_2$  and their corresponding radiuses  $r_1, r_2$ , we can write

$$(\sqrt[3]{m_1}/r_1) = (\sqrt[3]{m_2}/r_2) \quad (2.14)$$

The equation (2.14) is called the scaling rule.

Scaling rule is valid for the Ground Surface Explosion as well.

The scaling rule can be applied also for other parameters. For example, for the air-burst altitude  $h$ :

$$(\sqrt[3]{m_1}/h_1) = (\sqrt[3]{m_2}/h_2).$$

### Example 1 (Application of Scaling Rule).

Let' assume that the pick overpressure of a SW, created by a TNT charge with mass  $m = 1,000 \text{ kg}$ , at the distance  $r_1 = 46.60 \text{ m}$  is  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$ . What is the distance  $r_2$  from the TNT explosive charge where we expect to have the same pick overpressure if the exploding mass is  $m_2 = 10,000 \text{ kg}$ ?

Solution:

Substituting in equation (2.14), we can write:

$$(\sqrt[3]{1000}/46.60) = (\sqrt[3]{10000}/r_2)$$

Hence, we find that  $r_2 = 100 \text{ m}$ .

## 2.6 Parameters at the Front of SW

At the front of SW in air, the characteristics parameters, speed of SW, pressure, velocity of air particles, density, temperature, speed of sound, change instantly from the respective values in the stationary air to the corresponding values at the front of SW.

Once we know the maximum overpressure at the front of SW, using the following equations we are able to find all the remaining parameters, i.e.

- Speed of SW,  $D$ :

$$D = 340(1 + 0.857\Delta P_H)^{\frac{1}{2}} \quad (214a)$$

Speed of air particles,  $u_H$ :

$$u_H = 243 \cdot \frac{\Delta P_H}{(1+0.857\Delta P_H)^{1/2}} \quad (214b)$$

- Density of air,  $\rho_H$ :

$$\rho_H = 1.26 \cdot \frac{6\Delta P_H + 7}{\Delta P_H + 7} \quad (214c)$$

Temperature of air,  $T_H$  :

$$T_H = 288 \frac{(7+\Delta P_H)(\Delta P_H+1)}{6\Delta P_H+7} \quad (214d)$$

- Speed of sound,  $c_H$  :

$$c_H = 340 \cdot \frac{[(1+\Delta P_H) \cdot (7+\Delta P_H)]^{1/2}}{(6\Delta P_H+7)^{1/2}} \quad (213e)$$

or

$$c_H = 20.05\sqrt{T_H} \quad (214f)$$

**Note** that the above formulas are valid also when we have a SW, produced by a ground explosion, or we have a reflected SW.

### Example 1.

The max overpressure of a SW is  $\Delta P_H = 0.2 \text{ KG/cm}^2$ . Find the parameters at the front of SW.

Solution:

Substituting, in the formulas 2.14a -2.14e, we find:

$$D = 368 \text{ m/s}, \quad u_H = 45 \text{ m/s}, \quad \rho_H = 1.435 \text{ kg/m}^3, \quad T_H = 303.4 \text{ }^\circ\text{K}, \quad c_H = 349 \text{ m/s}.$$

**Example 2** (Arrival time of SW).

An explosive charge of mass  $m = 100 \text{ kg}$  TNT detonates on air. Find the time  $t$  of arrival of the shock wave at a distance  $r = 60 \text{ m}$  from the center of explosion.

Solution:

Since the velocity  $D$  of the front wave of SW changes with the maximum overpressure  $\Delta P_H$ , and so with the distance  $r$ , we will consider an average constant velocity  $\bar{D}$ , that is equal to the velocity of SW at half of distance, i.e.  $r/2 = 60/2 = 30 \text{ m}$ .

Substituting in (2.6), we have:

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{30}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{30}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{30}\right)^3 = 0.207 \text{ KG/cm}^2.$$

Using (2.14a), we find the velocity of SW, at  $30 \text{ m}$  is

$$\bar{D} = 340(1 + 0.857 \cdot 0.207)^{1/2} = 369 \text{ m/s}.$$

Time of arrival of SW at  $r = 60 \text{ m}$  is approximately

$$t = r/\bar{D} = 60/365.83 = 0.16 \text{ sec}.$$

**Note:** The estimated time is something greater than the real time.

### 3. Ground Surface Explosion

#### 3.1 Maximum Overpressure of SW Produced by a Ground Explosion

The explosion of an explosive charge of mass  $m$  on surface of an absolutely rigid ground, or on any other hard surface, is accompanied by a shock wave, which expands along the hemisphere centered on the ground surface. Because the energy of

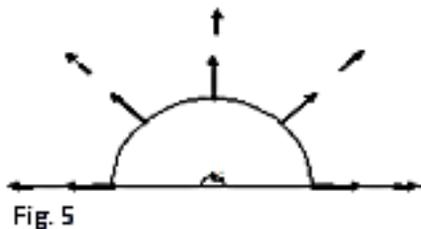


Fig. 5

the shock wave is distributed over half of the sphere, the parameters of the ground shock wave, at a distance  $r$  from the center of explosive charge, are the same as the parameters of air shock wave (at same distance  $r$ ), but created by the explosion of a double mass ( $2m$ ) of explosive charge.

Thus, the maximum overpressure in the front of the ground shock wave can be estimated substituting in equations (2.6), the mass  $2m$  instead of  $m$ . For the maximum overpressure of the ground shock wave we obtain

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{2m}}{r}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{2m}}{r}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{2m}}{r}\right)^3, \quad (3.1)$$

valid for the pick overpressure that satisfies the condition

$$0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2, \quad (3.2)$$

and for any mass  $m$  of TNT charge.

Equation (3.1) can be written:

- $\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3, \quad (3.3)$

valid for  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

In a similar way, from equations (2.9), (2.10) we obtain:

- $\Delta P_H = 13.84 \cdot m/r^3 + 1, \quad (3.4)$

valid for  $\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

- $\Delta P_H = 1.27 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.40 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.10 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 - 0.0196 \quad (3.5)$

valid for  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

The equation (3.3), as well as formulae (3.4), (3.5), need corrections since, in general, the surface of the target (surface of the ground, façade of the wall, or water) is not absolutely rigid, but they can be deformed or damaged during the ground explosion. Part of the energy of explosion is used to deform, or damage the non-absolutely rigid surface. For that reason, in formulas (3.3), (3.4), (3.5) we introduce a non-rigidity factor  $\beta$ , which multiplies mass  $m$ . The values of  $\beta$  are given in Table 3 [4, p. 479].

In general, if the factor  $\beta$  is unknown, it can be considered equal to 0.80, i.e.  $\beta = 0.80$  [6], [7].

Thus, for the max overpressure on the front of shock wave of a ground explosion we have the corrected formulae:

$$\bullet \Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3, \quad (3.6)$$

$$\bullet \Delta P_H = 13.84 \cdot \left(\beta \frac{m}{r^3}\right) + 1, \quad (3.7)$$

valid for  $\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

$$\bullet \Delta P_H = 1.27 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 2.40 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 21.10 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 - 0.0196 \quad (3.8)$$

Table 3.

Type of Ground Surface	Steel	Iron - Concrete	Concrete, Rocky ground	Dense loam, Clay	Average dense ground, vegetable soil	Water
$\beta$	1	0.95 - 1	0.85 - 0.9	0.7 - 0.8	0.6 - 0.65	0.55 - 0.6

For ground explosion, we can write:

The time-interval of positive phase, i.e., period  $\tau$  (sec) of SW is given by the formula

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r}. \quad (3.9)$$

Since the SW of explosion is result of the detonation on a rigid ground of a mass of explosive charge 2 times greater than the explosive mass of the airburst, in (2.2), we introduced a factor (2) that multiplies the mass  $m$  in order to get (3.9). We did the same to get the impulses  $i$  and  $j$  using (2.8) and (2.8a) respectively.

If the surface is not an absolutely rigid one, we multiply the explosive mass the non-rigidity factor  $\beta$  in the respective formulas.

Thus, from (2.8), for the specific hydrostatic impulse of the positive phase of SW we can write:

$$i = \int_0^\tau \Delta P \cdot dt = 266.68 \sqrt[3]{(\beta m)^2} / r. \quad (3.10)$$

(SI unit of impulse is  $P_a \cdot s = N \cdot s/m^2$ ).

Another important quantity of SW is the dynamic impulse of the particles of air moving behind the front of SW (fig. 4). Using (2.8a), for the dynamic impulse we have:

$$j = \int_0^\tau \rho u^2 dt = 496.13 \cdot \sqrt[3]{\beta m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^{2.5} \quad (3.11)$$

Keep in mind that for the absolutely rigid surface the non-rigidity factor  $\beta = 1$ .

Using equations (3.6) and (3.7), we can obtain the distance  $r$ , from the center of explosion of an explosive charge  $m$ , where it is observed a certain max overpressure  $\Delta P_H$ .

When the SW impacts on an obstacle under an angle  $\alpha$ , the dynamic impulse is

$$j_\alpha = j \cdot \cos^2(\alpha), \quad (3.11a)$$

while the total impulse is

$$i_T = (i + j \cdot \cos^2(\alpha)). \quad (3.11b)$$

If the impact angle is  $\alpha = 90^\circ$ , i.e. when SW travel parallel to the surface of the obstacle, then the dynamic impulse is zero,  $j_{90} = 0$ , while the total impulse is equal to the static one. Indeed, since the particles of air move parallel to the obstacle (ground, wall, etc.), there is no interaction with the obstacle, and so the dynamic pressure is zero.

That is the reason that during nuclear explosions the personnel must lie down to avoid, not only the deadly debris put in motion by the strong "wind", but also the risk of falling down, or knocking other objects.

**Note** that the non-rigidity factor  $\beta$  must be used when a SW impacts on an obstacle (wall, facade, hill, etc.) that is not perfectly rigid.

In formula (3.9), for time-interval, we have to introduce as well the non-rigidity factor  $\beta$ . Thus, we have:

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{\beta m} \cdot \sqrt[2]{r}. \quad (3.9a)$$

**Example 1.**

Find the distance  $r$  from the center of ground explosion where max overpressure is  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

Substituting  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$  in (3.6) and (3.8), we have respectively:

$$1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 = 0.35, \quad (3.12)$$

and

$$1.27 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 2.40 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 21.10 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 - 0.019 = 0.35 \quad (3.13)$$

Solving each equation for the unknown inside the parenthesis we get respectively

$$\left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) = 0.170 \quad \text{and} \quad \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) = 0.165 \quad (3.14)$$

Hence, for the distance where is observed the overpressure  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$ , we can write respectively:

$$r = 5.88 \cdot \sqrt[3]{\beta m}, \quad r = 6.06 \cdot \sqrt[3]{\beta m}. \quad (3.15)$$

### Example 2

Consider an explosive charge mass  $m = 160 \text{ kg}$  that is detonated on a concrete flat surface,  $\beta = 0.85$ . Find:

- the distance from the center of ground explosion where max overpressure is  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$ .
- The total impulse at that distance.

Solution:

- (a) Substituting  $m = 160 \text{ kg}$ ,  $\beta = 0.85$  in both equations (3.15), we practically have the same outcome:

$$r = 5.88 \cdot \sqrt[3]{\beta m} = 5.88 \cdot \sqrt[3]{0.85 \cdot 160} = 30.24 \text{ m.}$$

$$r = 6.06 \cdot \sqrt[3]{\beta m} = 6.06 \cdot \sqrt[3]{0.85 \cdot 160} = 31.17 \text{ m.}$$

- (b) Since the SW travels parallel to the ground surface, i.e. the angle  $\alpha$  that the direction of air particles ("wind") form with the ground is  $\alpha = 90^\circ$ . So,

$$j_{\alpha(90)} = j \cdot \cos^2(\alpha) = j \cdot \cos^2(90^\circ) = 0.$$

The total impulse is

$$i_T = i = 266.68 \cdot \sqrt[3]{(\beta m)^2} / r = 266.68 \cdot \sqrt[3]{(0.85 \cdot 160)^2} / 30 = 235.1 \text{ Pa} \cdot \text{s.}$$

The load exerted on the ground is due to the static impulse.

### Example 3.

Consider an explosive charge mass  $m = 1,000 \text{ kg}$  that is detonated on a flat clay ground,  $\beta = 0.75$ . Find the distance from the center of explosion where max overpressure is  $\Delta P_H = 0.50 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

We need to find the distance  $r$  where max overpressure is  $\Delta P_H = 0.50 \text{ KG/cm}^2$ .

Substituting  $\Delta P_H = 0.50 \text{ KG/cm}^2$  in (3.6) and (3.8), we have respectively:

$$1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 = 0.50, \quad (3.16)$$

and

$$1.27 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 2.40 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 21.10 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 - 0.019 = 0.50 \quad (3.16a)$$

Solving each equation for the unknown inside the parenthesis we get respectively

$$\left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) = 0.21 \quad \text{and} \quad \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) = 0.20 \quad (3.17)$$

Hence, for the distance where it is observed the overpressure  $\Delta P_H = 0.50 \text{ KG/cm}^2$ , we can write respectively:

$$r = 4.76 \cdot \sqrt[3]{\beta m}, \quad r = 5 \cdot \sqrt[3]{\beta m}.$$

Substituting  $m = 1000$ , and  $\beta = 0.75$ , in the above equations we find the required distance, respectively

$$r = 4.76 \cdot \sqrt[3]{\beta m} = 4.76 \cdot \sqrt[3]{0.75 \cdot 1000} = 43.25 \text{ m}$$

and

$$r = 5 \cdot \sqrt[3]{\beta m} = 4.48 \cdot \sqrt[3]{0.75 \cdot 1000} = 45.43 \text{ m}.$$

**Example 4** (Clearing a Mine-Field).

To clear an antitank mine-field using conventional explosive devices it is needed a peak overpressure  $\Delta P_H = 20 \text{ KG/cm}^2$ .

Find the mass of an explosive TNT charge that is needed to clear the mines at a distance  $r = 2 \text{ m}$  from the center of explosion, if the field is a rocky-ground,  $\beta = 0.85$ .

Solution:

Since the peak overpressure is  $\Delta P_H = 20 \text{ KG/cm}^2 > 10 \text{ KG/cm}^2$ , we have to use equation (3.7), i.e.

- $\Delta P_H = 13.4 \cdot \left(\beta \frac{m}{r^3}\right) + 1 .$

Substituting we can write:

$$20 = 13.4 \cdot \left(0.85 \frac{m}{2^3}\right) + 1.$$

Solving the above equation, we find that mass of the TNT charge should be not smaller than  $m = 13.35 \text{ kg}$ .

**Note:** Solving the above equation for the mass  $m$ , we find the TNT mass of the explosive charge that is needed to clear the obstacles inside a circle with radius  $r$ .

- $m = 0.0749r^3(\Delta P_H - 1)/\beta.$

#### Example 5.

Use the data of Example 4,  $m = 13.35 \text{ kg TNT}$ ,  $r = 2 \text{ m}$ ,  $\beta = 0.85$  to find: the time-interval,  $\tau$ , the static impulse  $i$  and the dynamic impulse  $j$  that correspond to  $\Delta P_H = 20 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

Time interval,  $\tau$

a.  $\tau = 0.0013 \sqrt[6]{\beta m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.0013 \cdot \sqrt[6]{0.85 \cdot 13.35} \cdot \sqrt{2} = 0.0028 \text{ sec.}$

Static impulse  $i$ ,

b.  $i = \int_0^\tau \Delta P dt = 266.70 \sqrt[3]{(\beta m)^2} / r = 266.70 \sqrt[3]{(0.85 \cdot 13.35)^2} / 2 = 673.38 \text{ Pa} \cdot \text{sec.},$

Dynamic impulse:

c.  $j = \int_0^\tau \rho \cdot u^2 dt = 496.13 \cdot \sqrt[3]{0.85 \cdot 13.35} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{0.85 \cdot 13.35}}{2}\right)^{2.5} = 1491.936 \text{ Pa} \cdot \text{sec} .$

Note that the dynamic impulse does not interact with the mine, since the particles of air of SW are parallel to the ground surface.

#### Example 6 (Arrival time of SW).

The largest conventional bomb Blu-82/B has approximately an equivalent TNT charge of mass  $m = 12,300 \text{ kg}$ .

- Find the arrival time  $t$  of SW at a distance  $r = 220$  from the center of explosion, if it is detonated on a rigid ground,  $\beta = 1$ .
- Does a person have enough time, since the instant he saw the detonation light, to lie down on his/her belly, heels on the direction of center of explosion (as it is recommended for nuclear bombs)?

Solution:

The average constant velocity  $\bar{D}$ , that is equal to the velocity of SW at half of the distance, i.e.  $220/2 = 110 \text{ m}$ .

- Substituting in (3.3), we have:

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{12,300}}{110} \right) + 4.08 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{12,300}}{110} \right)^2 + 12.56 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{12,300}}{110} \right)^3 = 0.505 \text{ KG/cm}^2 .$$

Using (2.14a), we find the velocity of SW, at  $r = 110 \text{ m}$  is

$$\bar{D} = 340(1 + 0.857 \cdot 0.505)^{1/2} = 407 \text{ m/sec}.$$

Time of arrival of SW at  $r = 220 \text{ m}$  is approximately

$$t = r/\bar{D} = 220/407 = 0.54 \text{ sec} .$$

- No.

### 3.2 Long Explosive Charge, Bangalore Torpedo

Long explosive charges (LEC) are mainly used to clear mine-fields to open free pathways for personnel or vehicles (tanks, artillery etc.). The SW created by a long explosive charge (fig.6) that explodes on the ground, is a half-cylindrical surface with axis the LEC itself.

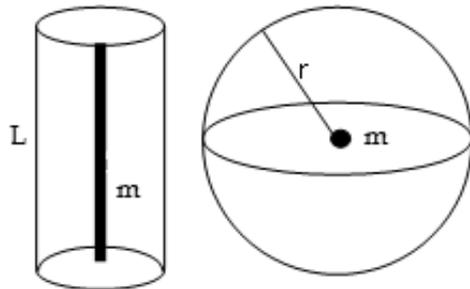


Fig. 6

Assume that a spherical explosive charge (SEC) and a **long explosive charge (LEC)**, are ground explosions. The peak overpressure at the front of SW created by LEC can be estimated using the equations obtained for SEC detonated on the ground (3.6, 3.7, 3.8). For that, let's consider as an example, the equation (3.7), valid for a ground explosion of a TNT mass  $m$ , radius  $r$ , i.e.

- $\Delta P_H = 13.4 \cdot \left(\beta \frac{m}{r^3}\right) + 1 , \quad (3.15)$

where ( $\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2$ .) while  $r$  is the distance from the center of explosive where is observed the maximum overpressure  $\Delta P_H$ .

We require that the max overpressure  $\Delta P_H$ , at a distance  $r$  from the center of the spherical TNT charge (mass  $m_1$ ) to be equal to max overpressure  $\Delta P_H$  created by the long TNT charge (mass  $m$ ). TNT of LEC is uniformly distributed along the axis with length  $L$ . (The linear density of the explosive is  $\rho_L = m/L$ ). The SW front of the long explosive charge, at the distance  $r$ , is a half-cylinder surface with radius of the base  $r$  and length  $L$ , i.e.  $S = \pi \cdot rL$ . The SW front of the spherical charge has a hemispheric form with radius  $r$ , i.e.  $S_1 = 2\pi r^2$ .

The max overpressure  $\Delta P_H$ , as a function of the energy of SW, would be the same for both charges if the flux of energy  $E$  at the unit of surface  $S$  will be equal to the flux of energy  $E_1$  at the unit of surface  $S_1$ . Thus, we can write:

$$E_1/(\pi rL) = E/(2\pi r^2) \quad (3.16)$$

Since the energy is proportional to the mass of the explosive charge, we can write

$$m/(\pi rL) = m_1/(2\pi r^2). \quad (3.17)$$

Hence,

$$m_1 = 2r(m/L). \quad (3.18)$$

Substituting  $m_1$  formally for  $m$ , in (3.15) we obtain the max overpressure of the SW of the long explosive charge:

$$\Delta P_H = 26.8 \cdot \beta \left(\frac{m}{L}\right) / r^2 + 1, \quad (3.19)$$

which is valid for ( $\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2$ ). Note that  $\rho_L = m/L$  is the linear density of the long explosive charge.

**Note.** For max overpressure  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ , the equation of maximum overpressure of SW is obtain by formally substituting in equation (3.6) and (3.8), instead of  $m$ , i.e.  $m_1 = 2mr/L$ , (See example 2 below).

**Example 1.**

The Russian military handbook [8, p.221], shows that to detonate any type of mine on a mine-field, the maximum overpressure of SW of the explosion must be not less than  $20 \text{ KG/cm}^2$ , i.e.  $\Delta P_H \geq 20 \text{ KG/cm}^2$ .

Find the linear density,  $\rho_L = m/L$  of the TNT needed to construct a LEC that would be necessary to open a mine-free pathway with width  $2r = 3.6 \text{ m}$ . The ground is a clay soil, with  $\beta = 0.80$ .

Solution:

Solving equation (3.19, with respect to  $(m/L)$ , we can write:

$$m/L = (\Delta P_H - 1)r^2/(26.8 \beta). \quad (3.20)$$

Substituting we find that the linear density is

$$m/L = (20 - 1) \cdot (1.8)^2/(26.8 \cdot 0.80) = 2.87 \text{ kg/m}.$$

**Example 2.**

Convert the spherical SW max overpressure equation (3.6) into the equation of max overpressure of SW generated by a long explosive cylindrical charge using equation (3.6), i.e.

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3.$$

Use the obtained long explosive charge equation to find the linear density of TNT explosive charge  $\rho_L = m/L$ , if we need to clear a pathway in a mine-field with a width of  $2r = 4 \text{ meter}$ . The long explosive charge is placed on a rocky ground with correction factor  $\beta = 0.85$ , while the max overpressure is  $\Delta P_H = 8 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

Substituting  $m_1, m_1 = 2r(m/L)$ , given by (3.18), instead of  $m$  in the above equation we find the equation:

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}}\right) + 4.08 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}}\right)^3 \quad (3.21)$$

where  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

Since,  $0.1 \text{ KG/cm}^2 < \Delta P_H = 8 < 10 \text{ KG/cm}^2$ , we will use equation (3.21).

Substituting  $\Delta P_H = 8$  in (3.21) we can write:

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}} \right) + 4.08 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}} \right)^2 + 12.56 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}} \right)^3 = 8$$

Solving for the unknown inside the parentheses we find

$$\sqrt[3]{\frac{2\beta m}{Lr^2}} = 0.738. \quad (3.22)$$

Substituting  $r = 2$ ,  $\beta = 0.85$  and solving for linear density,  $\rho_L = m/L$ , we find that the linear density is

$$\rho_L = \frac{m}{L} = 0.738^3 \cdot \frac{r^2}{2\beta} = 0.738^3 \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 0.85} = 0.945 \frac{\text{kg}}{\text{m}}.$$

**Note.** To open a pathway  $L = 10 \text{ meter}$  long we need a quantity of

$$L = 0.985 \cdot 10 = 9.45 \text{ kg TNT}.$$

#### **Example 4.** (Bangalore Torpedo)

A standard Bangalore Torpedo, with linear density  $\rho_L = m/L = 1.6 \text{ kg/m}$ , detonated on a ground with anti-personnel mines, clears of a pathway of  $2r = 7 \text{ meter}$ . Find the max overpressure  $\Delta P_H$  needed to clear the pathway from anti-personnel mines.

**Solution:**

Since we do not know the max overpressure  $\Delta P_H$ , we are going to use (3.19) and (3.20). Assume that the ground is a clay soil,  $\beta = 0.75$ . Substituting in (3.19) we obtain:

$$\Delta P_H = 26.8 \cdot \frac{\beta \left( \frac{m}{L} \right)}{r^2} + 1 = 26.8 \cdot \frac{0.75(1.6)}{3.5^2} + 1 = 3.625 \text{ KG/cm}^2.$$

The outcome obtained using (3.19) is not the right one since it is incompatible with the condition  $(\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2)$ . Thus, we need to use the equation (3.21).

Substituting in (3.21) we find that

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0.75 \cdot 1.6}{3.5^2}} \right) + 4.08 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0.75 \cdot 1.6}{3.5^2}} \right)^2 + 12.56 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0.75 \cdot 1.6}{3.5^2}} \right)^3 = 4.43 \text{ KG/cm}^2.$$

### Example 5.

Find the parameters at the front of a SW produced by a ground explosion of mass  $m = 100 \text{ kg TNT}$ , at a distance  $r = 10 \text{ m}$ . The explosion is on an absolutely rigid flat surface,  $\beta = 1$ .

Solution:

Substituting in equation (3.6), we have:

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{100}}{10} \right) + 4.08 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{100}}{10} \right)^2 + 12.56 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{100}}{10} \right)^3 = 0.454 \frac{\text{KG}}{\text{cm}^2}.$$

Substituting in equations (2.14a) - (2.14e) we find:

$D = 402 \text{ m/s}$ ,  $u_H = 95.4 \text{ m/s}$  (speed of wind),  $\rho_H = 1.7 \text{ kg/m}^3$ ,  $T_H = 322 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $c_H = 368 \text{ m/s}$ .

## 4. Reflected Shock Wave

### 4.1 Reflection of Vertical SW

When a shock wave runs vertically into a flat obstacle (wall, flat ground, façade of a building, etc.), it is reflected from the surface, which is the border between the air and the obstacle. At that time, there is generated the reflected SW, (SW<sub>r</sub>), that propagates in air, and another SW that propagates into the obstacle material. The last one is result of the compression of the material of obstacle initiated by incident SW. SW<sub>r</sub> moves in the opposite direction of the vertical incident SW.

For example, the SW<sub>r</sub> is initiated during the explosion in air (of an explosive charge), when the SW impacts vertically on the ground surface, i.e. at the epicenter of explosion.

The max overpressure at the front of vertically reflected SW<sub>r</sub>, can be estimated by the equation [1], [4]:

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7}, \quad (4.1)$$

where  $\Delta P_H$  is the max overpressure of the incident SW on the rigid surface.

Note that:

- When  $\Delta P_H$  is very small ( $\Delta P_H \approx 0$ ), from (4.1), we find that  $\Delta P_r \approx 2\Delta P_H$ .
- When  $\Delta P_H$  is very large ( $\Delta P_H \gg 7$ ), from (4.2), we find that  $\Delta P_r \approx 8\Delta P_H$ .

So, for the reflected SWr, the peak overpressure at the front of SWr can be 2 times to 8 times greater than the peak overpressure of the incident SW, i.e.

$$2\Delta P_H \leq \Delta P_r \leq 8\Delta P_H. \quad (4.2)$$

The increase of the peak overpressure, and in general, the increase of the overpressure at the positive phase of reflected SW, is due to the deceleration of the flux of air-particles (wind) by the obstacle.

**Note.** The time-interval and the total impulse can be estimated using the equations (2.7), (2.8) and (2.8a). The total impulse is:

$$I_r \approx 2(i + j) \quad (4.2a)$$

where

$$i = \int_0^\tau \Delta P \cdot dt, \quad j = \int_0^\tau \rho u^2 dt \quad (4.2b)$$

are the specific impulses of incident SW.

### Example 1.

An explosive charge of  $m = 10 \text{ kg TNT}$  is detonated  $h = 2.5 \text{ m}$  over the rocky ground ( $\beta = 0.75$ ). Find the peak overpressure of the incident SW and the peak overpressure of the reflected SW at the epicenter of explosion if the ground is composed by clay. Find as well the total impulse.

Solution:

- a. Substituting in (2.6), we find the peak overpressure of the incident SW is

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{0.75 \cdot 10}}{2.5} \right) + 2.57 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{0.75 \cdot 10}}{2.5} \right)^2 + 6.28 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{0.75 \cdot 10}}{2.5} \right)^3 = 2.8 \frac{KG}{cm^2}.$$

Using (4.1), we have:

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} = 2 \cdot 2.8 + 6 \cdot \frac{2.8^2}{2.8 + 7} = 10.4 \frac{KG}{cm^2}.$$

**Note.** We see that the reflected peak overpressure at the epicenter of explosion is 3.71 times greater than the peak overpressure of the incident SW.

$$b. \quad i = \frac{168 \sqrt[3]{m^2}}{r} = 312 \text{ Pa} \cdot \text{sec}, \quad j = 221 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{2.5} = 328.25 \text{ Pa} \cdot \text{sec} .$$

$$I_r \approx 2(i + j) = 1280.5 \text{ Pa} \cdot \text{sec} .$$

### Example 2.

A person is standing next to the wall of a building, when a SW with peak overpressure  $\Delta P_H = 0.35 \text{ KG/cm}^2$  run into the wall.

What is the peak overpressure of the reflected SW that is exerted on that person?

Solution:

Substituting in (4.1), we have

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} = 2 \cdot 0.35 + 6 \cdot \frac{0.35^2}{0.35 + 7} = 0.80 \frac{\text{KG}}{\text{cm}^2}.$$

Note that the standing human being is subject to the incident SW and the reflected SWr.

### Example 3.

A man standing next to a brick wall is hit by a SW generated by an explosive charge. Find the mass  $m$  of the explosive charge needed to be detonated on the ground at a standoff distance of  $r = 10 \text{ m}$ , from the wall if we want to have a reflected peak overpressure of  $\Delta P_r = 1.00 \text{ KG/cm}^2$ .

Solution:

Since we do not know the non-rigidity factor  $\beta$  that corresponds to the energy of SW lost during the reflection we can consider it  $\beta = 0.80$ .

Substituting  $\Delta P_r = 1 \text{ KG/cm}^2$  in (4.1), we can write:

$$2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} = 1.00$$

Solving the above equations for  $\Delta P_H$ , we find:  $\Delta P_H = 0.43 \text{ KG/cm}^2$ .

Substituting  $\Delta P_H = 0.43$ , in (3.6), we have:

$$1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 = 0.43.$$

Solving for  $\sqrt[3]{\beta m}/r$ , we can write  $\sqrt[3]{\beta m}/r = 0.19$ .

Substituting, we have:

$$\sqrt[3]{0.80m}/10 = 0.19.$$

Hence, we find:

$$m = 8.57 \text{ kg TNT.}$$

#### 4.2 Regular and Irregular Reflection of Shock Wave. Mach wave

The shock wave of an airburst of a given explosive charge  $m$ , detonated at an altitude  $h$  over the ground, is reflected when it reaches at any point on the ground surface (oblique reflection). As result, there are generated two other shock waves (fig. 4):

- the reflected shock wave, SWr that moves in opposite direction of incident wave. The spread of the SWr can be considered as if the center of the SWr is mirror reflection of the airburst of mass  $m$ .
- the so called "Mach wave", that travels parallel to the ground surface. Mach wave degenerates to a sound wave far away from the epicenter of explosion.

There is created also another SW that travels inside the ground (obstacle).

The region from the epicenter of explosion to the point  $C$ , where the Mach wave is created, is called the region of regular reflection. In this region, the angle of reflected SW and the angle of incident SW are equal. In this region, the angle  $\alpha$  of the incident shock wave is less than a boundary value  $\alpha_c$ , i.e.  $\alpha \leq \alpha_c$ .

Note that the angle  $\alpha$ , is the angle between the incident SW and the vertical line  $CN$  (fig. 7), while  $\alpha_c$  is the angle between  $mC$  and  $CN$ .

Incident angle  $\alpha$  can be calculated using the formulas:

$$\tan(\alpha) = r/h, \quad \sin(\alpha) = r/R, \quad \text{where} \quad R^2 = r^2 + h^2, \quad (4.3)$$

where  $r$  is the distance from the epicenter of airburst,  $h$  is the altitude of explosive charge,  $R$  is the distance of the point of ground impact from the explosive charge.

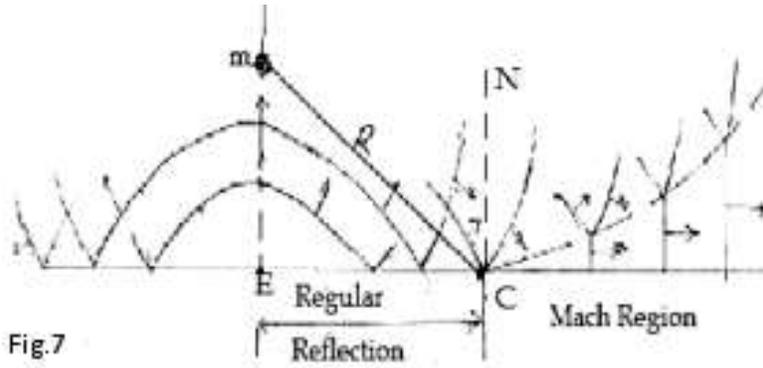


Fig.7

In the irregular region, beyond the point C (called critical point), there is the Mach wave, which propagates along the flat ground, while the triple point moves away from the ground. At the irregular region, the angle  $\alpha$  of the incident shock wave is greater than boundary value  $\alpha_c$  ( $\alpha \geq \alpha_c$ ).

The point on the ground C that separates the regular reflection region from the Mach wave region is at the same time the point where the incident shock wave, the reflected shock wave and the Mach wave intersect.

At the triple point C, the incident angle  $\alpha$  is equal to  $\alpha_c$ ,  $\alpha = \alpha_c$ ). The triple point corresponds to the critical angle  $\alpha_c$ .

At the triple point C, the incident angle  $\alpha$  is equal to  $\alpha_c$ ,  $\alpha = \alpha_c$ ). The triple point corresponds to the critical angle  $\alpha_c$ .

#### 4.3 Parameters of the Reflected SW and Mach Wave

In general, regular reflection and the Mach wave are observed when the incident SW runs obliquely into a flat surface of an obstacle (flat ground, hillside, wall of a building). Let's consider a SW that runs into a concrete wall (along line EC). fig. 7.

1. Assume that the incident SW falls on the ground, or on an obstacle (wall, hillside, facade, etc.) at an angle  $\alpha \leq \alpha_c$  (regular reflection). The incident SW is reflected from the ground, or from an obstacle at an angle that, in general, is different from the incident angle  $\alpha$ .

The maximum overpressure of the reflected SWr (in regular reflection region), can be estimated approximately using the formula [4]:

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} \cdot \cos^2(\alpha) \quad (4.4)$$

where  $\Delta P_H$  is the peak overpressure of the incident SW.

The total impulse is:

$$I_r = 2[(i + j \cdot \cos^2(\alpha))] \quad (4.5)$$

where

$$i = \int_0^\tau \Delta P \cdot dt \quad , \quad j = \int_0^\tau \rho u^2 dt$$

are respectively the static and dynamic impulses of the incident SW.

For a given peak overpressure  $\Delta P_H$ , in the front of the incident shock wave, the critical angle,  $\alpha_c$  can be calculated using the equation:

$$\alpha_c = \arccos(0.775^3 \sqrt{1 - \exp(-2.3 \cdot \Delta P_H)}) \quad (4.6)$$

In table 8 are presented some critical angles obtained using equation (4.6).

Table 8.

$\Delta P_H(KG/cm^2)$	0	0.10	0.25	0.40	0.65	1.50
$\alpha_c$ (degree)	90	63	54	49	45	40

$\Delta P_H(KG/cm^2)$	2.00	4.00	10	20	50	100
$\alpha_c$ (degree)	39.4	39	39	39	39	39

Table 8 shows that for  $\Delta P_H \geq 4$ , the boundary value is almost constant and equal to approximately  $\alpha_c = 39^\circ$ .

**Note** that for incident angle  $\alpha = 0$ , the formulas (4.4), (4.5) describe the parameters of the vertical incident SW (section 4.1).

2. If the incident SW forms an angle ( $\alpha > \alpha_c$ ), (irregular reflection, Mach SW), then the max overpressure, at the front of Mach shock wave, is

$$\Delta P_r = \Delta P_H \left[ 1 + \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha_c)} + \frac{6\Delta P_H}{\Delta P_H + 7} \cdot \cos^2(\alpha) \right]. \quad (4.7)$$

The total impulse of the reflected SW is

$$I_r = i \left( 1 + \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha_c)} \right) + 2j \cdot \cos^2(\alpha), \quad (4.8)$$

where

$$i = \int_0^\tau \Delta P \cdot dt \quad r, \quad j = \int_0^\tau \rho u^2 dt$$

are respectively the static and dynamic impulses of the incident SW.

**Note:** To estimate the scale of damage/injury, we have to consider the parameters of the reflected SW<sub>r</sub>, since the reflected max overpressure of SW<sub>r</sub> is always 2 to 8 times greater than the corresponding max overpressure of incident SW.

**Example 1.**

A TNT explosive charge of mass  $m = 120 \text{ kg}$  explodes in air at an altitude of  $h = 8 \text{ m}$ . Find:

- max overpressure  $\Delta P_r$  of the reflected SW at the epicenter of the airburst.
- max overpressure  $\Delta P_r$  at the front of reflected SWr at the distance  $r = 8 \text{ m}$  from the epicenter E of the airburst.
- max overpressure  $\Delta P_r$  at the distance  $r = 5 \text{ m}$  from the epicenter E.
- max overpressure at the front of SW, at a distance of  $r = 5 \text{ m}$  if the same explosive charge will be detonated at the epicenter E of airburst.

Consider that the ground surface is absolutely rigid.

Solution:

1. Given:  $m = 120 \text{ kg}$ ,  $h = 8 \text{ m}$ ,  $r = 0 \text{ m}$ .

Substituting in (2.6),  $m = 120$ ,  $h = 8$  we find the max overpressure of incident SW at the epicenter E of airburst,

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{8}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{8}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{8}\right)^3 = 2.94 \text{ KG/cm}^2.$$

Using (4.1), we find the maximum overpressure of reflected SWr at the epicenter, (E):

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} = 2(2.94) + 6 \cdot \left(\frac{2.94}{2.94 + 7}\right) = 11.08 \text{ KG/cm}^2.$$

2. Given:  $m = 120 \text{ kg}$ ,  $h = 8 \text{ m}$ ,  $r = 6 \text{ m}$ .

Let's find the max overpressure of the incident SW at the point that is at the distance  $r = 8 \text{ m}$  from the epicenter.

The incident angle of the SW, at the point located  $r = 6 \text{ m}$  from the epicenter (E), is

$$\alpha = \arctan(r/h) = \arctan(6/8) = 36.87^\circ.$$

For the slant range  $R$ , we can write:

$$R^2 = r^2 + h^2 = 6^2 + 8^2 = 100.$$

Hence, we find  $R = 10 \text{ m}$ .

Substituting in (2.6), we get the max overpressure of incident SW at the slant distance  $R = 10 \text{ m}$  :

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{10}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{10}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{10}\right)^3 = 1.77 \text{ KG/cm}^2.$$

The critical angle is

$$\alpha_c = \arccos\left(0.775^3 \sqrt{1 - \exp(-2.3 \cdot \Delta P_H)}\right) = \arccos\left(0.775^3 \sqrt{1 - \exp(-2.3 \cdot 1.77)}\right) = 39.6^\circ.$$

Since the incident angle  $\alpha$  is less than the critical angle  $\alpha_c$ ,  $\alpha = 36.87^\circ < \alpha_c = 39.6^\circ$ , the given point is located at the irregular reflection region.

Substituting in (4.4) we find that the reflected max overpressure is:

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} \cdot \cos^2(\alpha) = 2(1.77) + \frac{6(1.77)^2}{1.77 + 7} = 4.91 \text{ KG/cm}^2$$

3. Given:  $m = 120 \text{ kg}$  ,  $h = 8 \text{ m}$ ,  $r = 8 \text{ m}$ .

The incident angle of the SW, at the point located  $r = 8 \text{ m}$  from the epicenter (E), is

$$\alpha = \arctan(r/h) = \arctan(8/8) = 45^\circ .$$

For the slant range  $R$ , we can write:

$$R^2 = r^2 + h^2 = 8^2 + 8^2 = 128.$$

Hence, we find  $R = 11.31 \text{ m}$ .

Substituting in (2.6), we get the max overpressure of incident SW at the slant distance  $R = 11.31 \text{ m}$  :

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{11.31}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{11.31}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{120}}{11.31}\right)^3 = 1.35 \text{ KG/cm}^2.$$

The critical angle is

$$\alpha_c = \arccos\left(0.775 \sqrt[3]{1 - \exp(-2.3 \cdot \Delta P_H)}\right) = \arccos\left(0.775 \sqrt[3]{1 - \exp(-2.3 \cdot 1.35)}\right) = 40.25^\circ.$$

Since the incident angle  $\alpha$  is greater than the critical angle  $\alpha_c$ ,  $\alpha = 45^\circ > \alpha_c = 40.25^\circ$ , the given point ( $r=8, h=0$ ) is located at the irregular reflection region.

Using (4.7), we can write:

$$\Delta P_r = \Delta P_H \left[1 + \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha_c)} + \frac{6\Delta P_H}{\Delta P_H + 7} \cdot \cos^2(\alpha)\right] = 1.35 \left(1 + \frac{\cos 45}{\cos(40.25)} + \frac{6(1.35)}{1.35 + 7} \cdot \cos^2(45)\right) = 3.26 \text{ KG/cm}^2.$$

### Example 2 (ref. [6])

In this example we are estimating the same quantities as in [6]:

A TNT explosive charge of mass  $m = 100 \text{ kg}$  explodes on the ground at a standoff distance  $r = 15 \text{ m}$  from a building wall. Find:

- max overpressure  $\Delta P_r$  of the reflected SW at the standoff distance  $r = 15 \text{ m}$  from the center of ground burst. Find as well the corresponding impulse, and time interval.
- max overpressure  $\Delta P_r$  at the front of reflected SWr at the point of the wall that is  $h = 12 \text{ m}$  over the ground. Find as well the corresponding impulse and the time-interval.

Consider that the ground surface and the surface of the wall are absolutely rigid.

Solution:

1. Given:  $m = 100 \text{ kg}$ ,  $r = 15 \text{ m}$ , angle of incident SW  $\alpha = 0^\circ$ , vertical reflection.

Substituting in (2.6),  $m = 100$ ,  $r = 15$  we find the max overpressure of incident SW at the bottom of the wall:

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{15}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{15}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{15}\right)^3 = 1.072 \text{ KG/cm}^2.$$

Using (4.1), we find the maximum overpressure of reflected SWr at the bottom of the wall:

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} = 2(1.072) + 6 \cdot (1.072)^2 / (1.072 + 7) = 3 \text{ KG/cm}^2.$$

The static impulse of the incident SW is (see 3.10):

$$i = 266.68 \sqrt[3]{(m)^2} / r = 266.68 \sqrt[3]{(100)^2} / 15 = 383.03 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

The dynamic impulse of the particles of air moving behind the front of SW is (see 3.11):

$$j = 496.13 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{2.5} = 496.13 \cdot \sqrt[3]{100} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{15}\right)^{2.5} = 122.66 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

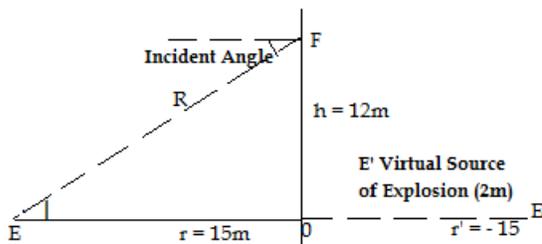
Total impulse is

$$I_r = 2[(i + j \cdot \cos^2(\alpha))] = 2[(383.03) + (122.66) \cdot \cos^2(0)] = 1011.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

Time-interval is

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{2m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.0013 \sqrt[6]{2 \cdot 100} \cdot \sqrt[2]{15} = 0.012 \text{ sec}.$$

In the above formulas we introduced the factor (2), since the SW is reflected from a rigid wall. We consider that the reflected SW is result of the SW created by a virtual TNT charge of the double mass detonated at the opposite side of the wall, at the distance  $r = -15 \text{ m}$ .



Note. Comparing the above obtained values with the corresponding values predicted by Remennikov [6]:

$$\Delta P_r = 2.8 \text{ KG/cm}^2, I_r = 954 \text{ Pa} \cdot \text{s},$$

one can see that they are approximate.

The predicted time interval,

$\tau = 0.012 \text{ sec}$ , is different from the

value  $\tau = 0.0172 \text{ sec}$  predicted by Remennikov.

2. Given:  $m = 100 \text{ kg}$ ,  $h = 12 \text{ m}$ ,  $r = 15 \text{ m}$ .

The incident angle of SW, at the point located  $h = 12 \text{ m}$  from the bottom of the building is

$$\alpha = \arctan(h/r) = \arctan(12/15) = 39.81^\circ.$$

Let's find the max overpressure of the incident SW at the given point on the wall. For the slant range  $R$ , we can write:

$$R^2 = r^2 + h^2 = 15^2 + 12^2 = 369 \text{ m}.$$

Hence, we find the slant range:  $R = 19.21 \text{ m}$ .

Substituting in (2.6), we get the max overpressure of the incident SW at the slant distance  $R = 19.21 \text{ m}$ :

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{19.21}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{19.21}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{19.21}\right)^3 = 0.657 \text{ KG/cm}^2.$$

The critical angle that corresponds to max overpressure  $\Delta P_H = 0.657 \text{ KG/cm}^2$  of the incident SW, is

$$\alpha_c = \arccos(0.775 \sqrt[3]{1 - \exp(-2.3 \cdot \Delta P_H)}) = \arccos(0.775 \sqrt[3]{1 - \exp(-2.3 \cdot 0.657)}) = 44.50^\circ.$$

Since the incident angle  $\alpha$  is smaller than the critical angle  $\alpha_c$ , i.e.

$$\alpha = 39.81 < \alpha_c = 44.50^\circ, \text{ the given point is located at the regular reflection region.}$$

Substituting in (4.4) we find that the max overpressure of the reflection SWr is:

$$\Delta P_r = 2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} \cdot \cos^2(\alpha) = 2(0.657) + \frac{6(0.657)^2}{0.657 + 7} \cdot \cos^2(39.81) = 1.65 \text{ KG/cm}^2,$$

or

$$\Delta P_r = 161.8 \text{ kPa} = 23.47 \text{ psi. (Remennikov 146 kPa)}$$

**Note** that the max overpressure at the wall decreases continuously from  $\Delta P_r = 3 \text{ KG/cm}^2$  (at the bottom of the wall) to  $\Delta P_r = 1.65 \text{ KG/cm}^2$  (at the point located on the wall at the height  $h = 12 \text{ m}$ ).

Estimation of Impulse: Given  $m = 100 \text{ kg}$ ,  $h = 12 \text{ m}$ ,  $r = 15 \text{ m}$ ,  $\alpha = 39.81^\circ$ .

The static impulse of the incident SW is (see 3.10):

$$i = 266.68 \sqrt[3]{(m)^2} / R = 266.68 \sqrt[3]{(100)^2} / 19.21 = 299.09 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

The dynamic impulse of the particles of air moving behind the front of SW is (see 3.11):

$$j = 496.13 \cdot \sqrt[3]{m} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{R}\right)^{2.5} = 496.13 \cdot \sqrt[3]{100} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{19.21}\right)^{2.5} = 66.09 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

Total impulse is

$$I_r = 2[(i + j \cdot \cos^2(\alpha))] = 2[(299.09) + (66.09) \cdot \cos^2(39.81)] = 676.17 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

Remennikov Prediction: 715 kPa s

Time-interval is

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{2m} \cdot \sqrt[2]{R} = 0.0013 \sqrt[6]{2 \cdot 100} \cdot \sqrt[2]{19.21} = 0.014 \text{ sec}.$$

(Remennikov: 0.019 sec)

## 5. Injury from Shock Wave

### 5.1 Injury or Damage Criteria

Shock Wave of an explosion, hitting the human body, can cause different traumas and injuries, even deadly. The injury/trauma is result of:

- Primary action of SW, or and action of SWr, (the overpressure of positive phase).
- Secondary action of SW:
  1. The impact on human body of small fragments (debris, etc.) that are set into motion by SW, or are formed from shattered metallic body of the bomb,
  2. Damage/destruction of the buildings, shelters, etc. where the people are trapped inside.
  3. Fall of the person on the ground, or other objects, as result of the powerful “wind” that accompany the blast of large explosions.

#### Primary Action of SW.

The evaluation of the level of injury (damage), resulting from the interaction of SW of an explosion with a human being (obstacle) exposed to it, can be described using the peak overpressure  $\Delta P_H$ , specific impulse  $i$  of the compressed phase, and the time-interval  $\tau$  of the positive phase, which depend on the mass of the explosive charge and the distance from the center of explosion.

- If the length  $L$  of the SW is much greater than the characteristic dimension of a person (object) then the interaction is due to overpressure of SW, and can be estimated using as indicator the peak overpressure  $\Delta P_H$ .

Approximately, the length of SW can be estimated by the formula  $L = c_0 \cdot \tau$ , where  $c_0$  is the standard speed of sound in air. As a matter of fact, the length of SW is determined by the formula  $L = D \cdot \tau$  where  $D$  is the supersonic speed of SW which decreases as the SW travels away (see formula 2.14a).

- The peak overpressure estimation of the level of injury (destruction) is done also for very large explosive charges, if  $\tau \geq 10T$ , where  $T$  is the period of self-oscillation of the object that is given in many handbooks.
- The impulse estimation of the level of injury (damage) is done when  $\tau < 0.25 T$  (small explosive charges).
- For,  $0.25 T < \tau < 10 T$  the estimation is performed using both the peak overpressure and impulse.

Large explosions have large time-intervals of the positive phase,  $\tau$ , as well as large lengths of SW, while explosion of small conventional explosives have small time-interval and length.

It is known that for a small explosion, a given level of injury (damage) will occur at a higher max overpressure  $\Delta P_{Hsmall}$ , than the smaller peak overpressure  $\Delta P_{HLarge}$  of a large explosion (which has a longer time interval  $\tau$  of the positive phase duration), i.e.

$$\Delta P_{Hsmall} > \Delta P_{H(Large)}$$

if

$$\tau(smaller) < \tau(Large).$$

See illustration examples (1) and (2) below.

Note that the level of injury, estimated using as criteria the threshold max overpressure, are mainly prepared using the outcomes of the bombardments during WWII, or outcomes of nuclear explosion test, and so they are not valid for small explosions.

We must be cautious if we use estimation criteria to predict the level of injury caused by SW of relatively small explosive charges without knowing the origin. Most probably we are using criteria that belong to large explosions, or nuclear explosions. The examples below illustrate the fact that a large explosion that produces a small peak overpressure of SW and a time-interval relatively large, creates a level of injury bigger than that of a small explosive charge for the same peak overpressure.

**Example 1.** (Nuclear Explosions, anti-tank mine field)

The handbook [8] shows that a nuclear explosion of power  $m_N$  (KT) can clear of an anti-tank mine field within a radius:

$$r_N = 2.46\sqrt[3]{m_{Neq}}, \quad (1)$$

where mass  $m_{Neq}$  is the TNT equivalent mass of the nuclear charge  $m_N$  that goes to the creation of SW. It is known that half of the energy released during a nuclear explosion, goes for creation of SW i.e.,  $m_{Neq} = 0.5 m_N$ .

Let's consider a typical atomic bomb of TNT equivalent mass  $m_N = 20 \text{ KT TNT}$ , that explodes on an absolutely rigid mine-field terrain.

Find:

- The radius of the area on the anti-tank mine-field cleared during explosion.
- The max overpressure needed to explode (clear of) the antitank mines inside a circle, radius  $r_N$ .
- The time-interval of positive phase,  $\tau$ .
- The impulse of SW at the estimated distance.

Solution:

a.  $m_{Neq} = 0.5 \cdot 20 \text{ kT} = 10^7 \text{ kg}.$

Using equation (1), we find the radius of the circular area that is cleared of mines:

$$r_N = 2.46\sqrt[3]{m_{Neq}} = 2.46\sqrt[3]{10^7} = 530 \text{ m}.$$

b. Using equation (1), we can write:

$$\frac{\sqrt[3]{m_{NEq}}}{r_N} = \frac{1}{k} = \frac{1}{2.46} = 0.4065 \quad (2)$$

Substituting (2) in (3.3), i.e. in

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m_{NEq}}}{r_N}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m_{NEq}}}{r_N}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m_{NEq}}}{r_N}\right)^3,$$

we find that the peak overpressure at the distance  $r_N = 530 \text{ m}$  from the detonation center is

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot (0.4065) + 4.08 \cdot (0.4065)^2 + 12.56 \cdot (0.4065)^3 = 1.92 \text{ KG/cm}^2,$$

c. Using (3.9) we find that the time duration of SW,  $r_N = 530 \text{ m}$  from the explosion center is:

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.0013 \sqrt[6]{10^7} \cdot \sqrt[2]{530} = 0.44 \text{ sec.}$$

d. Because the mines are buried in the ground, close to the surface, the dynamic impulse is zero since the flux of particles, at the positive phase, is parallel to the surface. That means that the impulse of SW is equal to the static impulse:

$$i = 266.68 \sqrt[3]{(m)^2} / r = 266.68 \sqrt[3]{(10^7)^2} / 530 = 23,355 \text{ Pa} \cdot \text{sec} .$$

### Example 2.

- Use the scaling rule to find the radius  $r$  of the circular area on the same mine-field that is supposed to be cleared of by a TNT conventional explosive charge of mass  $m = 20 \text{ kg}$  that produces the same max overpressure,  $\Delta P_H = 1.92 \text{ KG/cm}^2$ , as in example 1.
- Find the time-interval,  $\tau$ , the static impulse  $i$  and dynamic impulse,  $j$ , at the distance  $r$  obtained above:

Solution:

- a. Substituting (2) (see Example 1) in the scaling rule,

$$\frac{\sqrt[3]{m}}{r} = \frac{\sqrt[3]{m_N}}{r_N},$$

we can write:

$$\frac{\sqrt[3]{20}}{r} = 0.4065 .$$

Hence, for the radius of the circular area, we find:  $r = 6.68m$  .

$$b. \quad \tau = 0.0013\sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.0013\sqrt[6]{20} \cdot \sqrt[2]{6.68} = 0.0055 \text{ sec.}$$

The dynamic impulse of SW is equal to zero, since the particles of the compressed phase travels parallel to the ground where are placed the mines. The total impulse is equal to the static impulse:

$$i = 266.68\sqrt[3]{(m)^2}/r = 266.68\sqrt[3]{(20)^2}/6.68 = 294.15 P_a \cdot \text{sec.}$$

Note that the ratio of time-intervals and the ratio of impulses is respectively:

$$\text{Ratio} = 0.44/0.0055 = 80,$$

and

$$\text{Ratio} = 23,355/294.15 = 79.40.$$

#### **Comment:**

Note that for the same peak overpressure,  $\Delta P_H = 1.92 \text{ KG/cm}^2$ , the time-interval of the action on the ground of the overpressure  $\Delta P$  of nuclear explosion (20 KT TNT), is 80 times greater than the time interval of the action of the overpressure of the TNT conventional charge of mass  $m = 20 \text{ kg}$ . The same is valid as well for the static impulse.

**These big discrepancies explain the fact that for small explosive charges (same peak overpressure) we do not get the same outcome (injury/damage) as we get for nuclear explosions.**

**The injury/damage criteria that usually are available for nuclear explosions and large TNT charges (aviation bombs), are not valid for small explosive charges.**

As a matter of fact, **the experiments, we performed long time ago**, have shown that the conventional explosive charge, that corresponds to the threshold peak overpressure  $\Delta P_H = 1.92 \text{ KG/cm}^2$ , is not enough to clear of the mines within the area with radius  $r = 6.68 \text{ m}$ . In other words, to clear of the mines, using small explosive

charges, it is not sufficient to produce the threshold peak overpressure,  $\Delta P_H = 1.92 \text{ KG/cm}^2$ , that is needed for the nuclear explosions to detonate the mines.

The short time-length  $\tau$  of the positive phase of the SW of small explosive charges, and as result the relatively small impulses, are not enough to cause the same destructive action as that of the large explosions.

In fact, to open a pathway of  $r = 6.68 \text{ m}$  on the mine-field, using relatively small explosive charges, we need to detonate a TNT charge of at least

$$m = 0.0749 \cdot r^3(\Delta P_H - 1)/\beta = 0.0749 \cdot (6.68)^3(20 - 1) = 424 \text{ Kg TNT.}$$

For small conventional charges the peak overpressure of SW needed to detonate antitank mines is  $\Delta P_H = 20 \text{ KG/cm}^2$ . (see Example 4, section 3.1).

We have to outline that the peak-overpressure (or/and impulse) is used to estimate the level of injury/damage since, in general, there are no means to measure the overpressure/impulse at the time-interval of SW.

An interesting and effective method to predict the level of injury is developed in [5]. In that method they circumvent the fact that are no clear criteria on the prediction of the level of injury/damage [5, page 3: Damage/injury criteria].

## 5.2 Lethal Action of Explosives on Human Being

We will see only injuries caused to the human beings by the primary action of SW. According to Orlenko [1, p.206], the eardrums have a very small period of self-oscillations  $T$ . For that reason, the lethal action of the SW related to the injury of eardrums can be estimated using as criterion the peak-overpressure  $\Delta P_H$ .

The incapacitation of lung, that is another vulnerable organ, can be estimated as well using the peak-overpressure criterion.

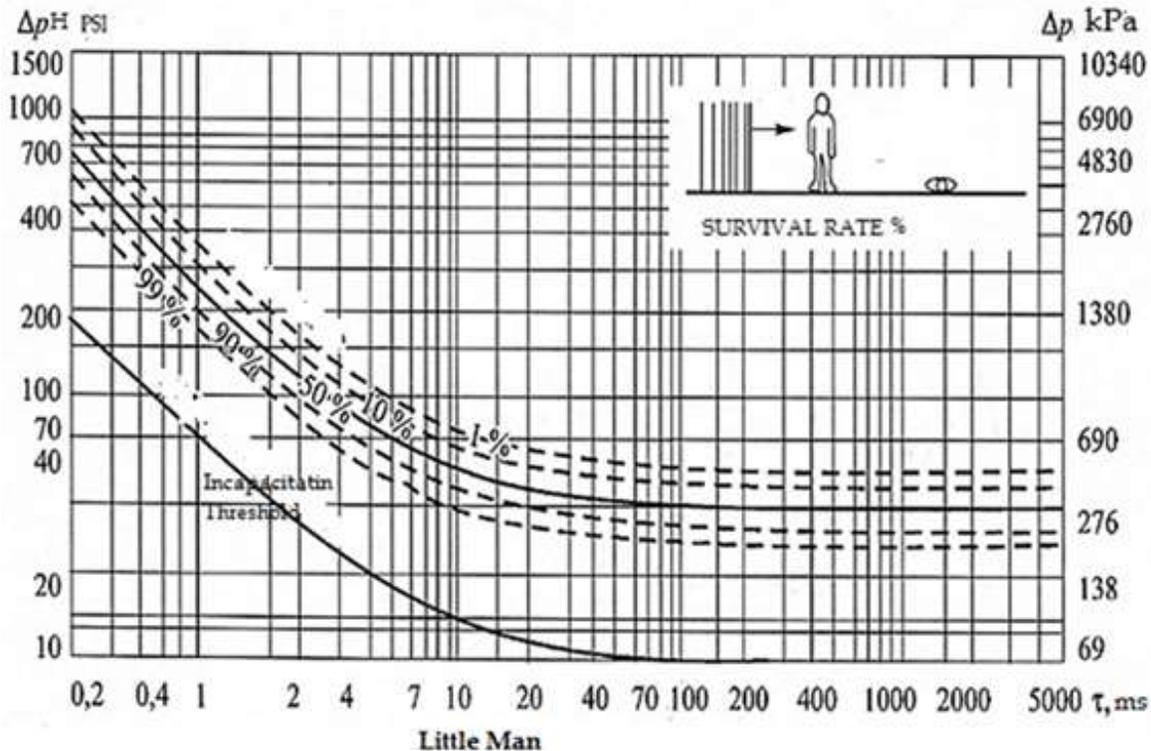
The graph in Fig. "Little Man" represents the ratio of survivability of a 70 kg man/woman as a function of time-interval  $\tau$  of SW and the peak overpressure  $\Delta P_H$  [9], [4].

At the same time the graph shows the lethality probability of that man, since, for example, 90% survivability is equal to 10% lethality (incapacitation) resulting from lung and/or eardrum injury. Note that  $\tau$  is in milliseconds (ms).

The lethal probability of lungs and, or eardrums is a conditional probability. It represents the probability of injury given the time-length (and the related peak overpressure) of SW that interreacts with human body, i.e.  $P_{\tau}(I)$ .

### Some Observations Related to the “Little Man” Graph

1. The graph “Little Man” shows that for those SWs that have a time-interval  $\tau > 50 \text{ ms}$ , the 50% incapacitation probability results when the peak overpressure is around  $\Delta P_H = 50 \text{ psi} = 3.52 \text{ KG/cm}^2$ . The peak overpressure threshold does not depend on time-interval  $\tau$  for those large explosive charges (or nuclear ones), i.e. it remains constant and equal to around  $3.50 \text{ KG/cm}^2$ . That is the reason that for nuclear explosions there are lethality/destruction criteria that do not depend on the TNT equivalent mass of the explosive charge.



2. When  $\tau$  decreases,  $\tau < 50 \text{ ms}$ , the peak overpressure that causes 50% incapacitation probability increases continuously, starting from around  $\Delta P_H = 50 \text{ psi} = 3.50 \text{ KG/cm}^2$ .

For example, when  $\tau = 1.5 \text{ ms} = 0.0015 \text{ sec}$ , to have 50% incapacitation probability the peak overpressure must be at least  $\Delta P_H = 150 \text{ psi} = 10.55 \text{ KG/cm}^2$ .

We observe the same pattern for any other incapacitation probability (1%, 10%, 90%, 99%).

### Estimating Incapacitation Probability, $P_\tau(i)$ . Ground Surface Explosion

To predict the mass  $m$  of an explosive charge and the distance  $r$  related to a certain time-interval  $\tau$ , using the graph in Fig. "Little Man", we have to employ the equations (3.3), or (3.5), i.e.:

- $$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3, \quad (5.1)$$

- $$\Delta P_H = 1.27 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.40 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.10 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 - 0.0196 \quad (5.2)$$

valid for  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ , and the equation (3.4),

- $$\Delta P_H = 13.84 \cdot m/r^3 + 1, \quad (5.3)$$

valid for  $\Delta P_H \geq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

The time-interval (duration of positive phase), equation (3.9):

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r}. \quad (5.4)$$

#### a. Fifty Percent Incapacitation Probability

Peak overpressure  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$

Assume that we need to find the TNT equivalent mass  $m$  that produces a max overpressure  $\Delta P_H$  at a distance  $r$  from the center of explosion, as well as a given time-interval of  $\tau$ . We consider that  $0.1 \text{ KG/cm}^2 \leq \Delta P_H \leq 10 \text{ KG/cm}^2$ .

Solving equation (5.1) for  $\sqrt[3]{m}/r$ , we find a number that we denote by  $k$ , i.e.

$$\sqrt[3]{m}/r = k. \quad (5.5)$$

Hence, we find the distance  $r$ , where is observed the max overpressure  $\Delta P_H$ :

$$r = \frac{1}{k} \sqrt[3]{m}. \quad (5.6)$$

Substituting (5.6) in (5.4), we find the relation between time-interval  $\tau$  and mass of the explosive charge:

$$\tau = 0.0013 \cdot \sqrt[3]{m}/\sqrt{k}. \quad (5.7)$$

Solving the last equation for  $m$  we have:

$$m = \left(\frac{\tau}{0.0013}\right)^3 \cdot k^{3/2}. \quad (5.8)$$

Examples below, illustrate the way we estimate the mass  $m$  of an explosive charge that produces a given incapacitation probability  $P_\tau(I)$  and the corresponding distance  $r$  from the center of explosion, using the time-interval  $\tau$  and peak overpressure  $\Delta P_H$ .

**Example 1.**

The 50% probability of incapacitation,  $P_\tau(i) = 0.50$ , of the personnel exposed to SW of a surface-ground explosion, corresponds to a SW with time-interval  $\tau = 90 \text{ ms} = 0.090 \text{ sec}$  and to a peak overpressure  $\Delta P_H = 40 \text{ psi} = 2.8 \text{ KG/cm}^2$  (See the graph “Little Man”).

Find the corresponding mass  $m$  of the explosive charge that produces the given peak overpressure as well as the related distance  $r$  from the center of explosive.

Solution:

Substituting in (5.3), we have:

$$2.8 = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3,$$

Solving the above equation, we find  $k = \sqrt[3]{m}/r = 0.479$ . Hence,  $r = \frac{1}{0.479} \sqrt[3]{m}$ .

Using (5.8), we find:

$$m = \left(\frac{0.090}{0.0013}\right)^3 \cdot (0.479)^{3/2} = 110,002 \text{ kg TNT}.$$

The related distance is

$$r = \frac{1}{k} \sqrt[3]{m} = \frac{1}{0.48} \sqrt[3]{110,346.7} = 100 \text{ m}.$$

As we see, to have a (50%) incapacitation probability it is needed a large explosive charge of at least around 110,000 Kg TNT equivalent.

Note that in order to achieve the required 50% incapacitation probability for the SWs with very short time-length we need to have a very large max overpressure.

**b. Fifty Percent Incapacitation Probability,  $\Delta P_H > 10 \text{ KG/cm}^2$ .**

We will show an example to demonstrate the way we estimate the mass of explosive charge and time interval of SW needed to produce a given incapacitation probability  $P_{\tau}(I)$  of people exposed to SW.

**Example 2.**

The 50% probability of incapacitation of the personnel, i.e.  $P_{\tau}(I) = 0.50$ , corresponds to an explosion with time-interval  $\tau = 1 \text{ ms} = 0.001 \text{ sec.}$ , and to a peak overpressure  $\Delta P_H = 250 \text{ psi} = 17.58 \text{ KG/cm}^2$  (See the graph Fig. "Little Man").

Find the corresponding mass  $m$  of the explosive charge that creates the given peak overpressure,  $\Delta P_H = 17.58 \text{ KG/cm}^2$  as well as the related distance  $r$  from the center of explosion.

Solution:

Since  $\Delta P_H > 10 \text{ KG/cm}^2$  we use equation (5.3).

Substituting  $\Delta P_H = 17.58 \text{ KG/cm}^2$  in (5.3), we can write:

$$17.58 = 13.84 \cdot m/r^3 + 1.$$

Hence, we have:

$$m = \frac{17.58-1}{13.84} \cdot r^3 = 1.198 \cdot r^3.$$

Substituting  $\tau = 0.001$ ,  $m = 1.198 \cdot r^3$  in (5.4), we can write:

$$0.001 = 0.0013 \sqrt[5]{1.198} \cdot r.$$

Hence, we find the distance from the center of explosion

$$r = 0.75 \text{ m.}$$

For the mass  $m$  of explosive charge we have:

$$m = 1.198 \cdot r^3 = 1.198 \cdot 0.75^3 = 0.50 \text{ kg.}$$

**Example 3.**

A 100 kg TNT explosive charge, is detonated on a flat rigid ground. Find the incapacitation probability at a distance:

- a. 10 meters.
- b. 5 meters from the center of explosion.

Solution:

a. The solution is similar to the one in Example 1.

$$k = \sqrt[3]{m}/r = \sqrt[3]{100}/10 = 0.464.$$

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot (0.465) + 4.08 \cdot (0.464)^2 + 12.56 \cdot (0.464)^3 = 2.597 \text{ KG/cm}^2 = 37 \text{ psi} .$$

$$\tau = 0.0013 \cdot \sqrt[3]{m}/\sqrt{k} = 0.0013 \cdot \sqrt[3]{100}/\sqrt{0.464} = 0.00885.$$

The “Little man” graph shows that for  $\tau = 0.00885$  and  $\Delta P_H = 37 \text{ psi}$ , the incapacitation probability is between zero, and 1%,  $P_\tau(i) = 0.00$  or 0.01.

**No serious injury resulting from SW. Maybe a temporary loss of hearing.**

**Note:** For the given explosive charge, at distance 10 meters, the incapacitation, most likely, might be due to the flying debris, or fragments of the metallic body of ammunition.

b. Incapacitation probability at a distance 5 meter from the center of explosion.

$$k = \sqrt[3]{m}/r = \sqrt[3]{100}/5 = 0.928.$$

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot (0.928) + 4.08 \cdot (0.928)^2 + 12.56 \cdot (0.928)^3 = 14.49 = 206.1 \text{ psi}.$$

Since  $\Delta P_H > 10 \text{ KG/cm}^2$  we have to use a similar approach as in Example 2.

Substituting in (5.3),  $\Delta P_H = 14.49 \text{ KG/cm}^2$ ,  $m = 100 \text{ kg}$ ,  $r = 5 \text{ m}$ , we find:

$$\Delta P_H = 13.84 \cdot 100/5^3 + 1 = 12.072 \text{ KG/cm}^2 = 172 \text{ psi} .$$

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r} = \tau = 0.0013 \sqrt[6]{100} \cdot \sqrt[2]{5} = 0.0063 \text{ sec} = 6.3 \text{ ms} .$$

The “Little Man” graph shows that for the above values of max overpressure and time-interval, incapacitation probability is  $P_\tau(i) = 100\%$ .

#### Example 4.

A man standing next to a brick wall is hit by a SW generated by an explosive charge.

1. Find the mass  $m$  of the explosive charge needed to be detonated on the ground

at a standoff distance of  $r = 15 \text{ m}$ , from the wall if we want to have a reflected peak overpressure of  $\Delta P_r = 1.5 \text{ KG/cm}^2$ .

2. Find the incapacitation probability that the man standing next to the brick wall will be a casualty.

Solution:

We consider the coefficient  $\beta$  that corresponds to the energy of SW lost during the reflection from the wall to be  $\beta = 0.80$ .

1. Substituting  $\Delta P_r = 1.50 \text{ KG/cm}^2$  in (4.1), we can write:

$$2\Delta P_H + \frac{6(\Delta P_H)^2}{\Delta P_H + 7} = 1.50$$

Solving the above equations for  $\Delta P_H$ , we find:  $\Delta P_H = 0.605 \text{ KG/cm}^2$ .

Substituting  $\Delta P_H = 0.605$ , in (3.6), we have:

$$1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\beta m}}{r}\right)^3 = 0.605.$$

Solving for  $\sqrt[3]{\beta m}/r$ , we find:  $\sqrt[3]{\beta m}/r = 0.23$ .

Hence:

$$\sqrt[3]{0.80m}/15 = 0.23.$$

and

$$m = 15.21 \text{ kg TNT}.$$

2. To find the incapacitation probability of the standing man, exposed to the reflected peak overpressure  $\Delta P_r = 1.50 \frac{\text{KG}}{\text{cm}^2} = 21.43 \text{ psi}$ , we need to find the time duration  $\tau$  of the reflected SWr.

We consider that the peak overpressure  $\Delta P_r = 1.50 \text{ KG/cm}^2$  of SWr, is created by the reflected SW of a double mass,  $(2\beta m) = 2 \cdot 0.80 \cdot 15.21 = 24.34 \text{ kg TNT}$ , exploded at the distance  $r = 15 \text{ m}$ .

That assumption is based on the physics model that the reflected wave originates at the virtual center of explosion, located on the opposite side of the reflective surface, at the same distance  $r = -15 \text{ m}$ .

Using (5.4), we find the time-interval

$$\tau = 0.0013 \sqrt[6]{m} \cdot \sqrt[2]{r} = 0.0013 \sqrt[6]{24.34} \cdot \sqrt[2]{15} = 0.0086 \text{ s} = 8.6 \text{ ms}.$$

Using the “Little Man” graph, we find that the point with coordinates  $\tau = 8.6 \text{ ms}$  and  $\Delta P_H = 21.43 \text{ psi}$  is between the curve “Incapacitated Threshold” and the curve “1% casualty = 99% survivability”.

The standing man will survive without any serious injury.

### Example 5.

The 50% probability of incapacitation,  $P_\tau(i) = 0.50$ , of the personnel exposed to SW of an explosion, corresponds to a SW with time-interval  $\tau = 4 \text{ ms} = 0.004 \text{ sec}$  and to a peak overpressure  $\Delta P_H = 90 \text{ psi} = 6.33 \text{ KG/cm}^2$  (See the graph “Little Man”).

Find the corresponding mass  $m$  of the explosive charge that produces the given peak overpressure as well as the related distance  $r$  from the center of explosion.

Consider a ground surface burst, and a rigid ground.

Solution:

Substituting in (5.3), we have:

$$1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 = 6.33,$$

Solving the above equation, we find  $k = \sqrt[3]{m}/r = 0.672$ . Hence,  $r = \frac{1}{0.672} \sqrt[3]{m}$ .

Using (5.8), we find:

$$m = \left(\frac{0.004}{0.0013}\right)^3 \cdot (0.672)^{\frac{3}{2}} = 16.05 \text{ kg TNT}.$$

The related distance is

$$r = \frac{1}{k} \sqrt[3]{m} = \frac{1}{0.672} \sqrt[3]{16.05} = 3.75 \text{ m}.$$

As we see, to have (50%) incapacitation probability it is needed a small explosive charge, at least around 16.05 Kg TNT equivalent.

Note that in order to achieve the required 50% incapacitation probability for a SW with very short time-length  $\tau$  we need to have a very large max overpressure,  $\Delta P_H = 90 \text{ psi} = 6.33 \text{ KG/cm}^2$ .

## Human Tolerance to the SW

Human tolerance to the SW of an explosion and the level of injury mainly depends on:

- the positioning of the body (standing, prone, etc.) with respect to SW.
- overpressure and the peak overpressure of incident SW and/or reflected SW<sub>r</sub>.
- impulse of SW as well as the time-interval of positive phase of overpressure
- characteristics of terrain and the distribution of objects (targets, shelters, structures, etc.).
- Age and mass of the person.

As such, the level of injury can be measured using the probability that a random person will be incapacitated by the action of SW.

The model that is used to estimate the probability of injury is an ideal one and can serve as a reference indicator.

An important factor used to determine the probability level of injury is the time-duration of the positive phase of SW. As the “Little Man” graph shows the human tolerance to the SW overpressure is higher for short-time duration (relatively small explosions, small explosive charges) than that of long duration SW overpressure (relatively big explosions).

For example, the graph of “little man”, shows that at a 50% incapacitation probability, to the time-interval  $\tau = 4 \text{ ms} = 0.004 \text{ sec}$  corresponds a peak overpressure of approximately  $\Delta P_H = 90 \text{ psi} = 6.33 \text{ KG/cm}^2$ , while to the time interval  $\tau = 90 \text{ ms} = 0.090 \text{ sec}$  corresponds a peak overpressure of around  $\Delta P_H = 40 \text{ psi} = 2.8 \text{ KG/cm}^2$ .

According to [10], man’s response to a short-time-interval  $\tau$ ,  $3 \text{ ms} < \tau < 5 \text{ ms}$ , of the SW peak overpressure, corresponds to the threshold lethality level (casualty probability zero) of a pressure 30 - 40 psi ( $2.1 - 2.8 \text{ KG/cm}^2$ ).

### 5.3 Total Incapacitation Probability

The probability level of an injury depends on the time-duration  $\tau$  of the positive overpressure of the SW as well as on the overpressure. As a matter of fact, the probability level of an injury can be predicted using the peak overpressure and the specific impulse which depends on  $\tau$ . A SW with short-time duration  $\tau$  has a higher peak overpressure than a SW of long-time duration.

To estimate the level of injury at humans, we consider the peak overpressure and the time-interval of incident SW (or reflected SW), and use the graph “Little Man”.

As we illustrated above and as the “Little Man” shows, for relatively small explosive charges, (with time-interval  $\tau < 50 \text{ ms}$ ), the incapacitation probability, and the related peak overpressure, should be estimated experimentally for each explosive charge, or at least for some most significant charges. The criteria for the estimation of injuries that are shown in many papers, are based on the nuclear explosions, or on the WWII bombardments. They must not be used for the SW of short time duration.

Most likely, this is the reason that, in the contemporary literature, in general, we do not find criteria to estimate the level of injury/damage caused by relatively small conventional charges. Nevertheless, those criteria are used also for relatively small conventional explosive charges.

A good source of information on the level of injury/lethality of human, for relatively small conventional explosive charges we referred to, are the US Manual [10], and [9]. The data of the USA manual (page 11-12) for small explosive charges, (duration 3 - 5 ms) are a confirmation of the validity of our demonstration on the level of injury/lethality of people exposed to SW of small conventional ammunitions.

### Total Probability

Let's estimate the total probability that corresponds to the time duration  $\tau = 4 \text{ ms} = 0.004 \text{ sec}$ . In table 1, it is given the distribution of the conditional probability as a function of the peak overpressure that corresponds to  $\tau = 4 \text{ ms} = 0.004 \text{ sec}$  and to a TNT charge of mass  $m = 16.05 \text{ kg}$ .

Table 1. Conditional Incapacitation Probability,  $P_i$

$\Delta P_H (\text{psi})$	-	130	115	90	80	60	28
$\Delta P_H (\text{KG/cm}^2)$	-	9.14	8.08	6.328	5.625	4.22	1.96
P(i)	100%	99%	90%	50%	10%	1%	0%
$k = \sqrt[3]{m}/r$	-	0.777	0.741	0.672	0.641	0.57	0.41
$r = \sqrt[3]{m}/k$	0	3.25	3.40	3.75	3.94	4.43 m	6.21

The mass  $m = 16.05 \text{ kg}$  is determined in the above Exercise 5.

To predict the total incapacitation probability, we will use the same method we followed in the paper, described in details at [11].

Using data of table 1, we will only show the approximate calculation of the total probability:

$$P(I) \approx \frac{\pi}{D} \sum (r_{i+1}^2 - r_i^2) p(\bar{r}_i) = (3.25^2 - 0^2) \cdot (0.99 + 1)/2 + (3.40^2 - 3.25^2) \cdot (0.90 + 0.99)/2 + (3.75^2 - 3.40^2) \cdot (0.50 + 0.90)/2 + (3.94^2 - 3.75^2) \cdot (0.10 + 0.50)/2 + (4.43^2 - 3.94^2) \cdot (0.10 + 0.01)/2 + (6.21^2 - 4.43^2) \cdot (0.00 + 0.01)/2 = 13.868 \frac{\pi}{D} = 13.868 \cdot \pi / (\pi \cdot 6.21^2) = 0.36.$$

Thus,  $P(I) \approx 0.36$ .

Expected value of Casualties is

$$E(I) = N \cdot \left( 13.868 \cdot \frac{\pi}{D} \right) = \frac{N}{D} \cdot (13.86 \cdot \pi) = n \cdot (13.86 \cdot \pi),$$

where:  $N$  is the number of personnel in the flat circular area  $D = \pi \cdot R^2$ ,  $n = N/D$  is the density of personnel at the area  $D$  with radius  $R = 6.21 \text{ m}$ , in our case (see table 1, last column).

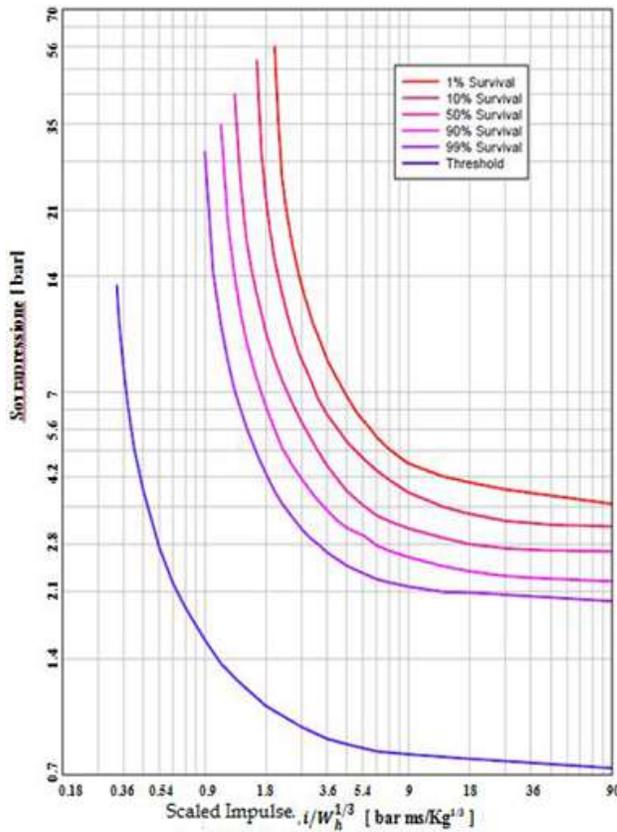
Thus, for a density  $n = 0.04 \text{ persons/m}^2$ , i.e. 4 persons randomly distributed inside the area of  $100 \text{ m}^2$ , on average, it will be incapacitated/injured

$$E(I) = n(13.86 \cdot \pi) = 0.04(13.86 \cdot \pi) = 1.74 \text{ persons.}$$

### **Lung and Eardrum Injury**

The breath system and the hearing system are the most vulnerable organs of the human beings. We will illustrate the level of casualty/survival using the following exercises.

#### **Example 6 (Lung Injury)**



Assess Lung Injury caused by the SW of the surface-ground explosion of a mass  $m= 100 \text{ lb.} = 45.3592 \text{ kg}$ . TNT at a distance  $r = 100 \text{ ft.} = 30.48 \text{ m}$ . Mass of human body  $w_h = 60 \text{ kg}$ , altitude: sea level [12].

Note. In the above figure it is given the level of survival of lungs that at the same time is the probability of survival of a person standing at a certain distance  $r$  from the detonation center [10], [13].

The level of injury depends as well on the mass  $w_h$  of the person exposed to SW.

Solution

First, we find the peak overpressure that corresponds to

$$k = \sqrt[3]{m}/r = \sqrt[3]{45.36}/30.50 = 0.117.$$

Substituting in (3.3), we have:

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot (0.117) + 4.08 \cdot (0.117)^2 + 12.56 \cdot (0.117)^3 = 0.193 \text{ kg}/= 0.189 \text{ bar}.$$

The specific impulse is

$$i = \frac{266.70 \sqrt[3]{m^2}}{r} = \frac{266.70 \sqrt[3]{45.36^2}}{30.48} = 111.3 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1.113 \text{ bar ms}$$

Scaled impulse is

$$i_s = i/w_h^{1/3} = 1.113/60^{1/3} = 0.284 \text{ bar ms/kg}^{1/3}.$$

Using the graph below, we see that the point with coordinates ( $i_s = 0.284$ ) and ( $\Delta P_H = 0.189$  bar) is below the threshold curve (100% survival).

So, there is no serious injury.

**Example 7 (Eardrum Injury)**

Find the probability of eardrum injury caused by the SW of an air-burst of mass  $m = 100$  lb. = 45.3592 kg. TNT at a distance  $r = 100$  ft. = 30.48 m.

Solution:

First, we find the peak overpressure that corresponds to

$$k = \sqrt[3]{m}/r = \sqrt[3]{45.36}/30.50 = 0.117.$$

Substituting in (2.6), i.e. in

$$\Delta P_H = 0.79 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 2.57 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 6.28 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3$$

We find the peak overpressure of incident SW

$$\begin{aligned} \Delta P_H &= 0.79 \cdot (0.117) + 2.57 \cdot \\ &(0.117)^2 + 6.28 \cdot (0.117)^3 = 0.138 \frac{KG}{cm^2} = \\ &1.97psi. \end{aligned}$$

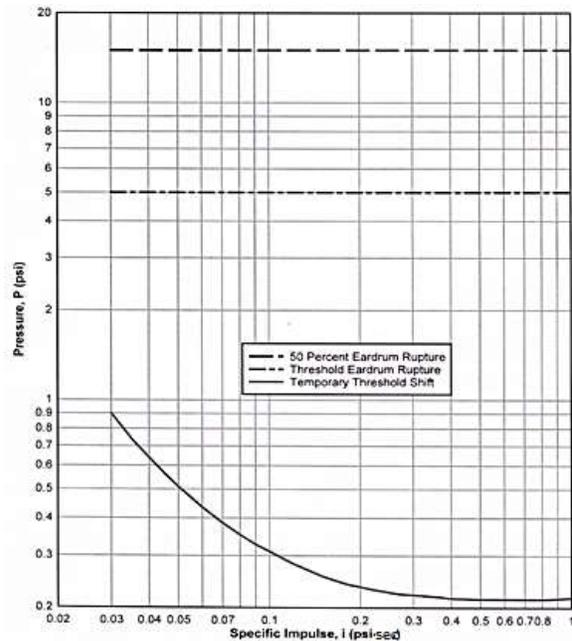
Specific Impulse

Substituting in (2.8), we find the specific impulse:

$$\begin{aligned} i &= 168\sqrt[3]{m^2}/r = 168\sqrt[3]{45.36^2}/ \\ 30.50 &= 70.6 Pa \cdot s = 1.016 \times 10^{-2}psi \cdot s. \end{aligned}$$

**Level of Eardrum Injury**

Using this graph, we see that the point with coordinates ( $i_s = 1.016 \times 10^{-2}psi \cdot s$ )



and ( $\Delta P_H = 1.97 \text{ psi}$ ) is above the temporary threshold shift, but below the curve of 50% Eardrum Rupture.

So, there is no serious ear injury, but only a temporary hearing loss.

### **Instead of Conclusions**

In this long paper on the shock wave of explosion, we tried to explore to the reader some basic concepts, laws and equations to solve practical problems related to the Physics of Explosion, and in particular those related to the shock wave.

The topics we included in the material are developed using the laws and formulas of different authors. We reached almost the same conclusions or results, using approaches different from many other authors in the area of SW. We compared our results obtained in problem solving with some well-known fundamental outcomes generally accepted in the studies of SW.

We demonstrated through problem-solving that the outcomes related to the SW are approximate, mostly indicative solutions obtained in ideal or simplified conditions.

We illustrated that the level of injury/damage caused by the interaction of an object (soft or hard target) with the SW of explosion depends on the power of explosion, and so we do not have general evaluation criteria valid for all SW of different peak overpressures and time-durations. In other words, the criteria, generally used to classify the damage caused by the shock wave of huge explosions are not valid for relatively small explosions.

### **Bibliography**

- [1] Orlenko, L. P., *Fizika Vzriva I Udara*, Fizmatlit 2006
- [2] Mori, E. <http://www.earmi.it/balistica/esplosivi.htm>.
- [3] Kato ed. alt. *Numerical Scheme for Strong Blast Wave Driven by Explosion*, Wiley Interscience, 2006.
- [4] Andreev ed alt., *Fizika Vzriva*, 3d. Ed, Editor Orlenko, Fizmatlit 2004.
- [5] Dewey, McMillin, *Eblast- Measurement of the Physical Properties of Blast Wave*, Proc. 15<sup>th</sup> Int. Symp. Mil Proc. Canada
- [6] Remennikov, A. *A Review of Methods for Predicting Bomb Blast Effects on Buildings*, Wollongong University, 2003.
- [7] Michael Neff, *A Visual Model for Blast Waves and Fracture*, Thesis, Toronto, 1998.
- [8] *Tehnika i Vooruzenie*, Spravocnik, 1982.
- [9] Claiton, S. White ed. Alt. "The Biodynamic of AirBlast" Fig. 35, Defense Nuclear Agency, Washington DC, July 1, 1971, Unclassified.

- [10] Manual *Unified Facility Criteria (UFC)*, USA Department of Defense, December 5<sup>th</sup>, 2006. Un-classified.
- [11] Klimi, G., *Estimation of Casualties from Fragmentation Ammunition*", July 2016, published at ResearchGate.
- [12] Baker, W. E. ed. Alt., *A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading on Structures*, (Problem 4.14), Unclassified Report, November 1980.
- [13] Guarrato, V. *Predizione dei carichi di blast generati da un'esplosione sferica in aria*, p.42, Tesi di Laurea, 2011/2012.

(Updated 06/25/2019)

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/348250214>

# Exterior Ballistics of Fragments Public Safe Evacuation Zone Related to Munition Disposal

Preprint · January 2021

DOI: 10.13140/RG.2.2.11276.13447

---

CITATIONS

0

2 authors:



George Klimi

Pace University & Citytech NY

32 PUBLICATIONS 10 CITATIONS

SEE PROFILE



Edoardo Mori

[www.earmi.it](http://www.earmi.it)

8 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Exterior Ballistics [View project](#)



Exterior Ballistics of Fragments Public Safe Evacuation Zone Related to Munition Disposal [View project](#)

# Exterior Ballistics of Fragments

## Public Safe Evacuation Zone Related to Munition Disposal

**Edoardo Mori, Esq. (Retired)**

Doctor at Law. Examining Magistrate, & Hopologist, Italy

<http://www.earmi.it/>, e-mail: [e.mori@armi.it](mailto:e.mori@armi.it)

**George Klimi, PhD (Retired)**

Math Department,

NYC College of Technology & Pace University, New York.

e-mail: [iven24@aol.com](mailto:iven24@aol.com)

The paper aims to predict the range of fragments of munition explosion and to give some indicators of the minimum Public Evacuation Safe Zone related to the detonation of unexploded conventional munitions.

We could not find credible experimental criteria for the injury of personnel caused by the Shock Wave, or metallic fragments related to the detonation of unexploded munitions. The readers must be cautious when they use the theoretical results presented in the paper.

We predict the range of natural fragments that are lunched during the detonation of unexploded munitions using the well-known model of the system of differential equations.

For public safety reasons, the reader has to consider a larger than predicted fragment range.

An evacuation safe zone, for example, could be considered the area with the radius equal to the flying range of manufactured spherical fragments, but that range could be overestimated.

In many papers, there are shown different safety zones, but we do not see the scientific bases of estimation<sup>1</sup>.

For example, according to Epov (Ref.2), the safe distance from the center of explosion, related to the flying fragments, depends on the caliber of bomb (mass of explosion and mass of metallic body). It is estimated to be 500 m to 2000 m.

This estimation has a large range of uncertainty.

## 2. Estimation of the Flying Range of Metallic Fragments

### Fragments

We consider the following metallic fragments.

- **Natural Fragments** are the metallic fragments produced as results of destruction of the metallic case of the ammunition, during the detonation. They have an irregular form and are launched with relatively high speed that is determined by the mass of explosive charge and the mass of the metallic body.
- **Manufactured Fragments**, usually spherical, or cuboid, are already implanted on the explosive charge.  
For example, M18 Claymore Mine contains 700 steel balls each of mass 0.68 gram<sup>[2]</sup>.
- **Secondary Fragments**, are those debris that the shock wave of explosive encounter and put in motion during the expansion of shock wave.

The departure velocity of natural fragments, or of manufactured fragments can be estimated using the well-known approximate method of Gurney<sup>3</sup>.

The speed of the projectile fragments decreases during the flight because of the resistance of air.

### Approximate Method

Let's estimate the distance traveled by the fast flying fragments considering:

- The projectile fragment is launched at narrow angles.

When the range is short, or the departure angle is narrow, the fragment trajectory can be considered as a straight line.

For example, the trajectory of a spheres launched during the detonation of M18 Claymore mine, can be assumed straight line.

The straight-line trajectory model **cannot** be used to predict the range related to the fast flying fragments launched at relatively large angles.

The differential equation of motion that define the straight-line trajectory (of a fragment) is<sup>4</sup>

$$\frac{dv}{dx} = -c \cdot h(y) \cdot v \cdot 4.732 \times 10^{-4} C_F(v/a_{0N}), \quad (3)$$

where  $v$  is the velocity of fragment,  $C_F(v)$  is drag coefficient depends on the velocity of fragment. In (3) we have  $a_{0N}$  the velocity of sound in standard atmosphere.

We consider as well that  $v \approx v_x$ .

The drag coefficient,  $C_F(v/a_{0N}) = C_F$  is a constant which depends on the type of fragment (sphere, cub, irregular fragment, etc.),

$$c = i \cdot \frac{d^2}{m} \cdot 1000 \quad (4)$$

is the ballistic coefficient,  $i$  is the coefficient of the frontal resistance (form coefficient),  $d$  is the diameter of the (average) cross section area of the projectile, perpendicular to the flight direction of the fragment,

$$h(y) = \left( \frac{289.08 - 0.006328 \cdot y}{289.08} \right)^{4.4} \quad (5)$$

is the density function.

Thus, for drag coefficient  $C_f$ , we can write (3) as

$$\frac{dv}{dx} = -c \cdot h(y) \cdot v \cdot (4.732 \times 10^{-4} C_F). \quad (6)$$

When the fragment moves along x-axis ( $y=0$ ,  $h(0) = 1$ ) we have:

$$\frac{dv}{dx} = -c \cdot v \cdot (4.732 \times 10^{-4} C_F), \quad (7)$$

and

$$dp/dx \approx 0$$

(see system (18) below).

The values of form coefficient  $i$  and the parameter  $C_F$  (that depend on the type of fragment: irregular, sphere, cube, etc.) are given in table 1.

Solving the differential equation (7), we find the flight distance of the fragment from the center of explosion

$$x = \frac{1}{A} \cdot \ln \left( \frac{v_0}{v} \right) \quad (8)$$

where

$$A = c \cdot (4.732 \times 10^{-4} G) = \left( i \cdot \frac{d^2}{m} 1000 \right) \cdot (4.732 \times 10^{-4} G). \quad (9)$$

Table 1<sup>5</sup>.

Type of Fragment	Sphere Manufactured	Short Cylinder Manuffact.	Cube Manuffact.	Cube Manufact	Irregular Natural Fragment
Form Coefficient $i$	1.21	1.38	1.50	1.50	2.00

<i>Parameter</i> $C_F$	0.47	0.82 - 1.2 depends on direction of flight	1.05 Side of cube perpendicular to velocity	0.8, Velocity along diagonal	Average 1.21
---------------------------	------	---	--	---------------------------------------	-----------------

Usually we can measure the mass of a fragment,  $m$ . Using the mass, we can find the diameter  $d$  of the average cross-section, or the diameter of the cross-section of spherical fragment.

We will consider the spherical or irregular fragment as a sphere with average diameter  $d$  of the cross-section (area of a circle), and express that diameter through the respective parameters  $i$  and  $G$  given in table 1, i.e. for the sphere the data in column 1, for the natural fragment the data in last column.

To find  $d$ , we can write the mass of the sphere:

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi \frac{d^3}{8} \rho_F = \pi \frac{d^3}{6} \rho_F = 0.526 \cdot d^3 \cdot \rho_F \quad (10)$$

where  $\rho_F$  is the density of the material of fragment. Hence, we find that the diameter of the cross-section of the spherical fragment is

$$d = 1.241 \cdot \left(\frac{m}{\rho_F}\right)^{1/3}. \quad (11)$$

For example, the average diameter of an irregular steel-fragment of mass  $m = 0.09kg$ , and density  $\rho_F = 7800 kg/m^3$  is

$$d = 1.241 \cdot \left(\frac{m}{\rho_F}\right)^{1/3} = 1.241 \cdot \left(\frac{0.09}{7800}\right)^{1/3} = 0.028 m. \quad (12)$$

Using (4), for the ballistic coefficient we have:

$$c = i \cdot \frac{d^2}{m} \cdot 1000 = 2 \cdot \frac{0.028^2}{0.09} \cdot 1000 = 17.47.$$

Thus,

$$A = c \cdot (4.732 \times 10^{-4} C_F) = (17.47) \cdot (4.732 \times 10^{-4} \cdot 1.21) = 0.01. \quad (13)$$

### Example 1. Natural Irregular Fragment

Using the above data.

a. If the launching velocity is  $v_0 = 1000m/s$ , the terminal velocity is  $v = 100 m/s$ , then the distance of fragment at the terminal point is

$$x = \frac{1}{A} \cdot \ln\left(\frac{v_0}{v}\right) = \frac{1}{0.01} \cdot \ln\left(\frac{1000}{800}\right) = 22.31 \text{ m.} \quad (14a)$$

- b. If the departure velocity is  $v_0 = 1000 \text{ m/s}$ , the terminal velocity is  $v = 600 \text{ m/s}$  then the distance of fragment to the terminal point is

$$x = \frac{1}{A} \cdot \ln\left(\frac{v_0}{v}\right) = \frac{1}{0.01} \cdot \ln\left(\frac{1000}{600}\right) = 51.08 \text{ m.} \quad (14b)$$

**Comment.**

The results (14a), (14b) show that the distance to the terminal point depends on the terminal velocity.

**Approximate method must not be used to predict the radius of the safety zone.**

**Example 2.** The departure velocity of a natural fragment is  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$ , the terminal velocity is  $v = 1000 \text{ m/s}$ , the mass of fragment is  $m = 100 \text{ g} = 0.01 \text{ kg}$ . Find the distance of fragment to the terminal point.

Solution

We consider the natural fragment as a sphere, with diameter

$$d = 1.241 \cdot \left(\frac{m}{\rho_F}\right)^{\frac{1}{3}} = 1.241 \cdot \left(\frac{0.1}{7800}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.029 \text{ m,}$$

ballistic coefficient

$$c = i \cdot \frac{d^2}{m} \cdot 1000 = 2 \cdot \frac{0.029^2}{0.1} \cdot 1000 = 16.87.$$

The value of  $A$  is

$$A = c \cdot (4.732 \times 10^{-4} G) = (16.87) \cdot (4.732 \times 10^{-4} \cdot 1.21) = 0.0097.$$

For the range we get

$$x = \frac{1}{A} \cdot \ln\left(\frac{v_0}{v}\right) = \frac{1}{0.0097} \cdot \ln\left(\frac{1500}{1000}\right) = 42 \text{ m.} \quad (14a)$$

**Example 3.** For the spherical fragment of the same characteristics, mass  $0.090 \text{ kg}$ , diameter  $0.028 \text{ m}$ , from Table 1 we get:  $i = 1.21$ ,  $G = 0.47$ . Using (9) we have:

$$A = \left(i \cdot \frac{d^2}{m} 1000\right) \cdot (4.732 \times 10^{-4} G) = \left(1.21 \cdot \frac{0.028^2}{0.09} 1000\right) \cdot (4.732 \times 10^{-4} \cdot 0.47) = 0.0023$$

Then, the horizontal range is

$$x = \frac{1}{A} \cdot \ln\left(\frac{v_0}{v}\right) = \frac{1}{0.0023} \cdot \ln\left(\frac{1500}{1000}\right) = 176 \text{ m} . \quad (15).$$

**Note.** The calculated range seems too large. That is result of non-validity of the straight-line trajectory model for such distance.

### Terminal Velocity of Fragments

Solving the equation (8) with respect to the terminal velocity, we find that the terminal velocity at the distance  $x$ :

$$v = v_0 e^{-Ax} \quad (16)$$

For example:  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$ ,  $A = 0.01$ ,  $x = 40 \text{ m}$ , we have

$$v = v_0 e^{-Ax} = 1500 \cdot e^{-0.01 \cdot 40} = 1005 \text{ m/s}. \quad (17)$$

As we can see, we have a large drop of velocity in relatively small distances.

## 3. The Model of Differential Equations

### Differential Equations of Trajectory Fragments

The system of differential equations that describe the flight of the trajectory of fragments is<sup>6</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_x}{dx} = -c \cdot j^{-1} h(y) \cdot \frac{G(v)}{v} \\ \frac{dp}{dx} = -\frac{g}{v_x^2} \\ \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v_x} \\ \frac{dy}{dx} = p \end{array} \right. \quad (18)$$

where  $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$  is the gravity acceleration,  $v$  and  $v_x$  are respectively the fragment velocity and the component of velocity along x-axis,  $p = \tan(\alpha)$ ,  $\alpha$  is the angle the velocity forms with the x-axis,

$$c = i \cdot \frac{d^2}{m} \cdot 1000 \quad (19)$$

is the ballistic coefficient,  $i$  is the form coefficient,  $d$  is the diameter of the average cross-section area (circle),  $m$  is the mass of fragment.

The parameter

$$j^{-1} = \frac{p_0}{p_{0N}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{0N}}{\tau_0}} \quad (20)$$

is the scaling factor that depends on the virtual temperatures and pressures:  $\tau_0$ ,  $\tau_{0N}$ ,  $p_0$ ,  $p_{0N}$  at the firing site ( $\tau_0$ ,  $p_0$ ), and ICAO standard conditions ( $\tau_{0N}$ ,  $p_{0N}$ ),

The quantity

$$h(y) = \left( \frac{\tau_0^{-0.006328 \cdot y}}{\tau_0} \right)^{4.4} \quad (21)$$

is the density function which changes with the height  $y$  over the firing location<sup>1</sup>  
 $G(v)$  is the function of resistance.

According to Orlenko<sup>7</sup>, for the irregular natural fragments, the drag coefficient (as a function of velocity  $v$ ) is:

$$C_F(v) = \begin{cases} 0.5 & \text{for } v \leq 150 \text{ m/s} \\ (1.49 + 0.51 \cdot \sin(860^\circ - 350 \cdot \log(v)))^{-1} & 150 < v \leq 550 \\ 0.865 \cdot (1 + 50/v) & v > 550 \text{ m/s} \end{cases} \quad (22)$$

The function of resistance  $G(v)$ , in the first equation of (18), is<sup>2</sup>:

$$G_F(v) = 4.8110 \times 10^{-4} \cdot v^2 \cdot C_F(v). \quad (22.1)$$

For manufactured spherical fragments the function of resistance  $G(v)$  can be written<sup>3</sup>:

$$G_S(v) = 2.7189 \times 10^{-4} \cdot v^2 \quad \text{for } v \leq 1400 \text{ m/s} \quad (23)$$

The function  $G(v)$ , presented in (22.1), or (23) must be substituted at the system of differential equations to predict respectively the trajectory of natural irregular fragments (22.1), and the trajectory of spherical fragments (23).

The model of the system of differential equations (18) can be used to estimate the safety evacuation radius.

<sup>1</sup> For more information the reader is recommended to read chapter 3 of "Elements of Exterior Ballistics", Klimi. G Xlibris 2016

<sup>2</sup> Klimi, G. Exterior Ballistics: The Remarkable Methods, p. 75, Equation (1.6.8), Xlibris 2014

<sup>3</sup> Klimi, G. "Elements of Exterior Ballistics", p. 207, Xlibris 2016

## Spherical Fragment

The  $G(v)$  function for the sphere, (23), is obtained using McCoy's drag coefficient  $C_D$  presented on page 112 of his book (Ref. 9).

- According to McCoy<sup>8</sup>, the form coefficient  $i$  for the spherical fragments depends on the smoothness/roughness of the sphere, as well as on the cross-section area.

For approximate calculations, we can consider that the form coefficient for the spherical fragment is  $i = 1.21$ , (see Table 1).

## Natural Irregular Fragment

- For the natural irregular fragments, the form coefficient can be considered  $i = 2$ . That value, given in the model of approximate solutions, produces an average horizontal range that we obtain using the system of differential equations, with  $G_F(v)$  presented in (22.1).

## PC Programs.

We have compiled two PC programs to solve the system of differential equations (18).

- Irregular.BAS,
- Spherical.BAS.

Those programs allow us to predict respectively the trajectory of irregular fragments and spherical ones.

In each program are given examples to illustrate the use of them.

Note that  $G_S(v)$ , for spherical fragments is limited till the velocity  $v \leq 1400 \text{ m/s}$ .

Anyway, since for velocities of the spherical fragment that are greater than  $v = 1400 \text{ m/s}$ , drag function is approximately constant, we can assume that the PC program can be used for approximate solution even when  $v > 1400 \text{ m/s}$ .

The initial velocity of the fragment launched during the detonation of explosive, could be estimated using the well-known Gurney's method.

### Example 3.1.

An irregular natural steel-fragment of mass  $m = 100 \text{ g}$  has an initial velocity  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$ . A WWII undetonated bomb was set to explode.

Estimate the maximum distance from the center of the controlled explosion where the fragment will hit the ground. The unexploded bomb is on the sea-level ground.

Consider:

- Initial velocity,  $v_0 = 1500$ , launching angle  $\alpha_0 = 25^\circ$ , form coefficient  $i = 2$ , temperature of air and temperature of propellant charge  $t = 20$  degree Celsius, pressure of air at the explosion location,  $p_0 = 760 \text{ mm Hg}$ , humidity 50% = 0.5,  $m = 100 \text{ g}$ , no wind, density of fragment  $7800 \text{ kg/m}^3$ , integration step = 1.

Solution

**Results:**

PC Program Irregular.bas

- For  $i = 2$ : Horizontal range,  $x = 826.2 \text{ m}$ , time of flight,  $t = 12.65 \text{ s}$ , terminal velocity,  $v = 46 \text{ m/s}$ . terminal angle,  $-74$  degree,  $BC = 16.57$ .  
Example 5. Same data as in Example 3, but the departure angle is 30, 20, 17 degree:
- If the departure angle of the given fragment is 30 degree, then the horizontal range is 817 m. Terminal velocity is 47 m/s.
- If the departure angle of fragment is 20 degree then horizontal range is 822.31 m. Terminal velocity is 44m/s.
- If the departure angle of fragment is 17 degree then horizontal range is 812.24 m. Terminal velocity is 43 m/s.

The safety horizontal range, for a natural fragment of mass 100 g, initial velocity 1500 m/s and  $i = 2$ , is most probably around 820 m.

**Note.** The calculation of the radius of the safety evacuation zone, performed using the system of differential equations (18), gives an indication to determine the evacuation area.

For a given bomb or artillery projectile, we need to know the initial velocity of the fragments and the largest mass.

**Example 3.2.**

A spherical steel-fragment of mass  $m = 100 \text{ g}$  has the initial velocity  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$ , launching angle  $\alpha_0 = 25^\circ$ , initial velocity  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$ , fragment mass,  $m = 100 \text{ g} = 0.10 \text{ kg}$ , form coefficient  $i = 1.21$  (Table 1), temperature of air and temperature of propellant charge  $t = 20$  degree Celsius, pressure of air at the explosion location,  $p_0 = 760 \text{ mm Hg}$ , humidity 50%, density of fragment, 7800, no wind, integration step = 1.

Solution

Using PC program Spherical.bas we have:

- For  $i = 1.21$ : Horizontal range,  $x = 1426$  m, time of flight,  $t = 17.15$  s, terminal velocity,  $v = 57$  m/s. terminal angle,  $-77$  degree,  $BC = 10.2$ .

#### 4. Validity of Prediction Model of Differential Equations

##### Drag Coefficient $C_D$ of the Natural Irregular Fragments.

To verify the validity of the differential equations (18), for natural irregular fragments,

(i.e. the validity of  $G_F(v)$  function of resistance (22.1) and PC program Irregular.BAS), we consider the unclassified paper "Fragment Hazardous Investigation Program" by Powell, J. G. ed alt, ref.<sup>9</sup>

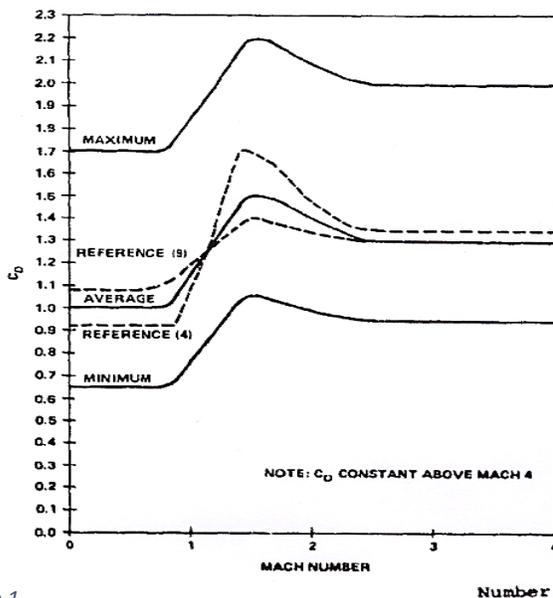


Figure 1

Note that the  $G_F(v)$  function of resistance is related to a respective drag coefficient  $C_D$ , which is represented graphically in figure 1.

According to Powell ed alt., "at least 95% of all bomb and projectile fragments will have a  $C_D$  (Drag Coefficient) between minimum and maximum limits shown" in Fig. 1.

Note that minimum, average and maximum  $C_D$  curves correspond to the fragments that have respectively less, average, or maximum drag.

The natural fragment that corresponds to the minimum  $C_D$  curve has a greater range than all fragments that correspond to a  $C_D$  curve that is above the minimum curve.

Using the  $C_D$  curves of Fig. 1, for a typical natural fragment (of cannon 155 mm) of mass 0.0875 kg, launched with velocity 1980 m/s, at an angle 20 degree, the authors have found the results presented in Table 2 (ref. 11).

Table 2.

$C_D$ curve	Range	Terminal Velocity
Minimum	850 m	43.48 m/s
Average	610 m	36.70 m/s
Maximum	396 m	27.76 m/s

Using our PC program, Irregular.Bas, for the same fragment, i.e. mass 0.0875 kg, launched in ICAO atmosphere (Temperature 15 degree C,

pressure 760 mm Hg, humidity 0%) with velocity 1980 m/s, at an angle 20 degree, we

find:

$$\text{Range} = 824 \text{ m, terminal velocity} = 43 \text{ m/s.}$$

Since our predicted range, 824 m, is less than 850 m, it means that our  $C_D$  curve that is related to  $G_F(v)$  function (22.1), is between Min.  $C_D$  and Average  $C_D$ .

Based on the above bold-text statement of Powell ed. Alt., the  $C_D$ , related to  $G_F(v)$ , function of resistance (22.1), is valid for at least 95% of all bomb and projectile fragments.

That means that the model we use to predict the trajectory of natural fragments is justified.

### **Predicting the Evacuation Public Safety Region**

Since we don't know the Min. drag coefficient  $C_D$  (Min. curve) used by Powell ed alt., to determine the radius of that safety area, we use the PC program Irregular.bas. considering the form coefficient  $i = 2$ .

#### **Example4.1**

Using Irregular.BAS, for  $i = 2$ , and the data for the typical natural fragment of cannon 155 mm, i.e. of mass 0.1 kg, launched with velocity 1000 m/s, at an angle 20 degree, as well as the temperature 15 degree Celcius, pressure 760 mm, density of fragment 7800, humidity 0.5, we find a

- Possible safe evacuation radius of  $r = 815 \text{ m} < 850 \text{ m}$ , terminal velocity,  $v_T = 44 \text{ m/s}$ , time of flight,  $t = 10.88 \text{ s}$ .

The evacuation radius  $r = 815 \text{ m}$  is 50 meters smaller than the radius 850 meters, obtained by Powell ed. Altr., using the minimum  $C_D$  curve.

We note as well that the  $C_D$  curve that corresponds to the range 815 meters is between the min  $C_D$  curve and maximum curve of figure 1.

#### **Comment:**

**Seems that the maximum range  $r = 850 \text{ m}$ , of table 2, calculated by Powell ed. altr., using the minimum  $C_D$  is most probably the safety range related to more than 95% of all bomb and artillery projectile fragments.**

#### **Conclusion**

- The determination of the evacuation safe zone using the approximate method is not reliable and must not be used in practice.

- Using the  $G(v)$  function of resistance, (22.1), or (23) and the differential equation model (18), we have presented a method to predict the trajectory of irregular natural fragments.
- We have determined a reliable method to estimate the radius of safe zone using the differential equations and the function of resistance  $G_F(v)$  for irregular fragments.
- We have compiled two PC programs to solve numerically the set of differential equations (18) in order to determine the radius of safe evacuation zone.
- To our surprise, we have found that the range  $r = 850 \text{ m}$ , estimated by Powel ed. Alt., is most likely the safe evacuation radius related to natural irregular fragments.

#### Note

The reader can solve by himself the System of differential equations (18)

---

#### References

- <sup>1</sup> Mori, E. <http://www.earmi.it/balistica/evacuazioni.html>
- <sup>2</sup> Klimi, G. Exterior Ballistics with Applications, p. 530 - 540, 3d edition, Xlibris 2010
- <sup>3</sup> Joseph Backofen, The Gurney Velocity: A "Constant" Affected by Previously Unrecognized Factors , 22nd International Ballistics Symposium, 2005.
- <sup>4</sup> Klimi, G. Exterior Ballistics with Applications, p. 84, 3d edition, Xlibris 2010
- <sup>5</sup> Orlenko, L. P. Explosion and Impact Physics, p.249-250, Moscow 2006  
Orlenko, L. P (Editor), Explosion Physics, p. 182 - 185, Moscow 2004
- <sup>6</sup> Klimi, G., Elements of Exterior Ballistics, p. 159, Xlibris 2016
- <sup>7</sup> Orlenko, L. P (Editor), Explosion Physics, p. 182 - 185, Moscow 2004.
- <sup>8</sup> McCoy R. L. Modern Exterior Ballistics, p. 76 -78, Schiffer Military History, 1999
- <sup>9</sup> Powel, J. G., Smith, W. D., McCleskey, F. Fragment Hazardous Investigation Program, NSWCC, July 1981,

Updated on 01/05/2021

## APPENDIX 1. PC Programs in QuickBasic (QB)

### 1. QBasic PC Program for Irregular Fragments

' FIND : Range, and other Elements of the Trajectory, etc.

' GIVEN: Departure Velocity, Departure Angle, Form Factor, Mass of Fragment, Density of Fragment

-----  
' Control DATA

' Input:

' ICAO atmosphere;  $x_0 = y_0 = 0$ , Departure velocity = 1000, departure angle 20 degree,

' Form Coefficient  $i = 2$ , Mass of Fragment  $m = 0.09$ , Density of fragment = 7800 (Iron)

' Temperature of air = 15 Celsius, Propellant temperature 15 C, Pressure = 750 mm Hg; Humidity 50  
%=0.5,

' Range wind 0 m/s, Cross wind 0 m/s. Integration Step = 1

' Results: Range = 401.5 m, Time of Flight = 9.21 s,

' Terminal Speed = 23 m/s, Terminal Angle = - 84 Degree

' Cross wind deflection, 0 m;

' BC = 17.48  
-----

' Functions & Subs.

DECLARE SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind, ys, yy, pa, ta1, TE, De, m, Pr)

DECLARE SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, ta1, pa1, xx1, voo, vo1, wind, koef, cw, vv,  
De, Pr, TE, m, atm, G, GA)

DECLARE SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k, L, r, q)

DECLARE SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)

DECLARE SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t\$)

DECLARE SUB c (koef)

' Variables

DIM m(4, 4), v(4)

rendi = 4

cog = 7: cof = 0

' Solution

CLS

fillimi:

menu cog, cof, 3, 10, 21, 70, "INITIAL DATA"

InfHyres x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, ta1, pa1, xx1, voo, vo1, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m,  
atm, G, GA, Tc

c koef

```

F:
FOR nk = 1 TO rendi
  NPxyzvw nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k, L, r, q

  y1z1v1w1 x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind, ys, yy, pa, ta1, TE, Pr
  NPkoef k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1
  m(nk, 1) = k: m(nk, 2) = L
  m(nk, 3) = r: m(nk, 4) = q
NEXT nk

'Calculation

FOR i = 1 TO rendi
  v(i) = 1 / 6 * (m(1, i) + 2 * m(2, i) + 2 * m(3, i) + m(4, i))
NEXT i

'New Data

x0 = x0 + h: y0 = y0 + v(1): z0 = z0 + v(2)
v0 = v0 + v(3): w0 = w0 + v(4)

IF ABS(z0) < .0001 THEN
  ymax = v0
  xmax = x0 + wind * w0
END IF

xxc = x0 + wind * w0
IF (xxc - xx1) <= .001 THEN
  xc = xxc
  yc = v0
  Tc = w0
  ac = (180 / 3.141592654#) * ATN(z0)
  vc = y0 / COS(ATN(z0))
END IF

IF x0 > 10 AND v0 <= .005 THEN

'Display Resultst

menu cog, cof, 6, 20, 22, 72, "RESULTS:"

LOCATE 11, 25: PRINT "Horizontal Range [m]   = "; INT((x0 + w0 * wind - v0 / z0) * 100 + .5) / 100
LOCATE 12, 25: PRINT "Corresponding y-Coord [m] = "; (v0 - v0)
LOCATE 13, 25: PRINT "Departure Angle [Deg.] = "; INT((a) * 10000 + .5) / 10000
LOCATE 14, 25: PRINT "Time of Flight [s]     = "; INT((w0) * 100 + .5) / 100
LOCATE 15, 25: PRINT "Terminal Speed [m/s]   = "; INT((y0 * (1 + z0 ^ 2) ^ .5) + .5)
LOCATE 16, 25: PRINT "Terminal Angle [Deg.] = "; INT((ATN(z0) * 180 / 3.141593) * 10000 + .5) /
10000
LOCATE 17, 25: PRINT "Cross-Wind Deflection = "; INT((cw * (w0 - x0 / (voo * COS(a * 3.14159265#
/ 180)))) * 1000 + .5) / 1000

```

```

LOCATE 18, 25: PRINT "Trajectory Vertex [m] = "; "("; INT((xmax) * 10 + .5) / 10; ","; INT((ymax) * 100
+ .5) / 100; ")"
LOCATE 19, 25: PRINT "Ballistic Coefficient BC = "; koef
ELSE
GOTO F:
END IF
END

SUB c (koef)
koef = koef
END SUB

SUB InfHyes (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, ta1, pa1, xx1, voo, vo1, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE,
m, atm, G, GA, Tc)

TE = 288.15: Pr = 760: Tc = 21
CLS
GOTO 400:

400
LOCATE 5, 13: INPUT "Initial x-coordinate of fragment = "; x0
LOCATE 6, 13: INPUT "Initial y-coordinate of fragment = "; v0
LOCATE 7, 13: INPUT "Departure Angle [Degree] = "; z0
LOCATE 8, 13: INPUT "Departure Speed [m/s] = "; y0
LOCATE 9, 13: INPUT "Temperature of Air [C] at firing site = "; ta
LOCATE 10, 13: INPUT "Propellant Temperature[C] = "; tp
LOCATE 11, 13: INPUT "Pressure [mm] at the firing site = "; pa
LOCATE 12, 13: INPUT "Humidity of Air % [decimal #] at site = "; ea
LOCATE 13, 13: INPUT "Form Coefficient = "; koef
LOCATE 14, 13: INPUT "Mass of Fragment [kg] = "; m
LOCATE 15, 13: INPUT "Density of Fragment [kg/m^3 = "; De
De = 1.241 * (m / De) ^ (1 / 3) 'Diameter of Cross Section [m]
koef = koef * De ^ 2 * 1000 / m 'BC

LOCATE 16, 13: INPUT "Range Wind [m/s] = "; wind
LOCATE 17, 13: INPUT "Cross Wind [m/s] = "; cw

LOCATE 18, 13: INPUT "Integration Step, 10, 1, or 0.5, 0.1 = "; h0
vv = v0: a = z0: voo = y0
ta = ta + 273.15
IF ta > 273.16 AND ta <= 327.15 THEN
ea = ea * 7.50187 * EXP(19.04 * (1 - 280.07 / ta))
END IF
IF ta > 255.15 AND ta < 273.15 THEN
ea = ea * 7.50187 * EXP(22.024 * (1 - 279.24 / ta))
END IF

pa1 = ta / (1 - .3785 * ea / pa)
vo1 = (voo - .4 * voo * (dm / m) + .0014 * voo * (tp - Tc))
y0 = SQR(vo1 ^ 2 + wind ^ 2 - 2 * vo1 * wind * COS(a * 3.141592654# / 180))
y0 = y0 * COS(a * 3.141592654# / 180)

```

```

z0 = TAN(a * 3.141592654# / 180)
z0 = z0 / (1 - wind / (v01 * COS(a * 3.141592654# / 180)))
CLS
END SUB

```

```

SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)

```

```

    COLOR cog, cof
    LOCATE xf - 1, yf: PRINT t$

    LOCATE xf, yf: PRINT "É" + STRING$(yfu - yf, 205) + "»";

    FOR i = xf + 1 TO xfu
        LOCATE i, yf: PRINT "°" + SPACES$(yfu - yf) + "°";
    NEXT
    LOCATE xfu + 1, yf: PRINT "È" + STRING$(yfu - yf, 205) + "¼";
END SUB

```

```

SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)

```

```

    k = h * y1: L = h * z1
    r = h * v1: q = h * w1
END SUB

```

```

SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k, L, r, q)

```

```

    IF nk = 1 THEN
        x = x0: y = y0: z = z0
        v = v0: w = w0: h = h0
        GOTO fund:
    END IF

    IF nk = 2 OR nk = 3 THEN
        x = x0 + (.5 * h): y = y0 + (.5 * k)
        z = z0 + (.5 * L): v = v0 + (.5 * r)
        w = w0 + (.5 * q)
        GOTO fund:
    END IF

    IF nk = 4 THEN
        x = x0 + h: y = y0 + k: z = z0 + L
        v = v0 + r: w = w0 + q
    END IF

    fund:
END SUB

```

```

SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind, ys, yy, pa, ta1, TE, Pr)

```

```

    ta1 = (TE / pa1) ^ .5
    yy = y * SQR(1 + z ^ 2)

```

```

IF yy > 550 THEN

    y1 = -1 * koef * .865 * 4.732 ^ -4 * (1 + 50 / yy) * yy

ELSEIF yy > 150 AND yy <= 550 THEN

    y1 = -1 * koef * 4.723 * 10 ^ -4 * (1.49 + 0.51 * SIN(860 * 3.14159 / 180 - 350 * LOG(yy) * 3.14159 / 180))
    ^ -1 * yy

ELSEIF yy < 150 THEN

    y1 = -1 * koef * 4.73210 ^ -4 * 0.5 * yy

END IF
z1 = -9.80665 / y ^ 2
v1 = z
w1 = 1 / y

END SUB

```

---

## QBasic PC Program: Spherical Fragment

```

'
'                               QBasic PC Program: Spherical Fragment
'
'FIND: Range, and other Elements of the Trajectory, etc.
'GIVEN: Departure Velocity, Departure Angle, Form Factor, Mass of Fragment (Sphere), Density of
'Fragment
'-----
' Control DATA
' Input:
' ICAO atmosphere; x0 = y0 =0, Departure velocity =1000, departure angle 20 degree,
' Form Coefficient i = 1.21 (Table 1), Mass of Fragment m = 0.09, Density of fragment = 7800 (Iron)
' Temperature of air = 15 Celsius, Propellant temperature 15 C, Pressure = 750 mm Hg; Humidity (50 %) =
' 0.5,
' Range wind 0 m/s, Cross wind 0 m/s. Integration Step = 1
'
' Results: Range = 1228 m, Time of Flight = 13.56 s,
'         Terminal Speed = 53 m/s, Terminal Angle = - 69 Degree, Vertex (892, 263)
'         Cross wind deflection, 0 m; BC =10.57
'-----
'
'Functions & Subs.

DECLARE SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind, ys, yy, pa, ta1, TE, De, m, Pr)

```

```

DECLARE SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, ta1, pa1, xx1, voo, vo1, wind, koef, cw, vv,
De, Pr, TE, m, atm, G, GA)
DECLARE SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k, L, r, q)
DECLARE SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)
DECLARE SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)
DECLARE SUB c (koef)

```

'Variables

```

DIM m(4, 4), v(4)
rendi = 4
cog = 7: cof = 0

```

'Solution

CLS

fillimi:

```

menu cog, cof, 3, 10, 21, 70, "INITIAL DATA"
InfHyres x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, ta1, pa1, xx1, voo, vo1, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE, m,
atm, G, GA, Tc
c koef

```

F:

```

FOR nk = 1 TO rendi
  NPxyzvw nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k, L, r, q

  y1z1v1w1 x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind, ys, yy, pa, ta1, TE, Pr
  NPkoef k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1
  m(nk, 1) = k: m(nk, 2) = L
  m(nk, 3) = r: m(nk, 4) = q
NEXT nk

```

'Calculation

```

FOR i = 1 TO rendi
  v(i) = 1 / 6 * (m(1, i) + 2 * m(2, i) + 2 * m(3, i) + m(4, i))
NEXT i

```

'New Data

```

x0 = x0 + h: y0 = y0 + v(1): z0 = z0 + v(2)
v0 = v0 + v(3): w0 = w0 + v(4)

```

```

IF ABS(z0) < .0001 THEN
  ymax = v0
  xmax = x0 + wind * w0
END IF

```

```

xxc = x0 + wind * w0
IF (xxc - xx1) <= .001 THEN
  xc = xxc

```

```

yc = v0
Tc = w0
ac = (180 / 3.141592654#) * ATN(z0)
vc = y0 / COS(ATN(z0))
END IF

IF x0 > 10 AND v0 <= .005 THEN

'Display Resultst

menu cog, cof, 6, 20, 22, 72, "RESULTS:"

LOCATE 11, 25: PRINT "Horizontal Range [m]   = "; INT((x0 + w0 * wind - v0 / z0) * 100 + .5) / 100
LOCATE 12, 25: PRINT "Coresponding y-Coord [m] = "; (v0 - v0)
LOCATE 13, 25: PRINT "Departure Angle [Deg.] = "; INT((a) * 10000 + .5) / 10000
LOCATE 14, 25: PRINT "Time of Flight [s]     = "; INT((w0) * 100 + .5) / 100
LOCATE 15, 25: PRINT "Terminal Speed [m/s]   = "; INT((y0 * (1 + z0 ^ 2) ^ .5) + .5)
LOCATE 16, 25: PRINT "Terminal Angle [Deg.] = "; INT((ATN(z0) * 180 / 3.141593) * 10000 + .5) /
10000
LOCATE 17, 25: PRINT "Cross-Wind Deflection = "; INT((cw * (w0 - x0 / (voo * COS(a * 3.14159265#
/ 180)))) * 1000 + .5) / 1000
LOCATE 18, 25: PRINT "Trajectory Vertex [m] = "; "("; INT((xmax) * 10 + .5) / 10; ","; INT((ymax) * 100
+ .5) / 100; ")"
LOCATE 19, 25: PRINT "Ballistic Coefficient BC = "; koef
ELSE
GOTO F:
END IF
END

SUB c (koef)
koef = koef
END SUB

SUB InfHyres (x0, y0, z0, v0, w0, a, h0, ta, pa, ea, tp, ta1, pa1, xx1, voo, vo1, wind, koef, cw, vv, De, Pr, TE,
m, atm, G, GA, Tc)

TE = 288.15: Pr = 760: Tc = 21
CLS
GOTO 400:

400
LOCATE 5, 13: INPUT "Initial x-coordinate of Fragment [m] = "; x0
LOCATE 6, 13: INPUT "Initial y-coordinate of Fragment [m] = "; y0
LOCATE 7, 13: INPUT "Departure Angle [Degree]           = "; z0
LOCATE 8, 13: INPUT "Departure Speed [m/s]              = "; v0
LOCATE 9, 13: INPUT "Temperature of Air [C] at firing site = "; ta
LOCATE 10, 13: INPUT "Propellant Temperature[C]         = "; tp
LOCATE 11, 13: INPUT "Pressure [mm] at the firing site   = "; pa
LOCATE 12, 13: INPUT "Humidity of Air at Site in % [decimal #]= "; ea
LOCATE 13, 13: INPUT "Form Coefficient                  = "; koef
LOCATE 14, 13: INPUT "Mass of Fragment [kg]              = "; m
LOCATE 15, 13: INPUT "Density of Fragment [kg/m^3]         = "; De

```

```

De = 1.241 * (m / De) ^ (1 / 3) 'Diameter of Cross Section
koef = koef * De ^ 2 * 1000 / m 'BC

LOCATE 16, 13: INPUT "Range Wind           = "; wind
LOCATE 17, 13: INPUT "Cross Wind          = "; cw

LOCATE 18, 13: INPUT "Integration Step, 10, or 1, 0.5, 0.1  = "; h0
vv = v0: a = z0: voo = y0
ta = ta + 273.15
IF ta > 273.16 AND ta <= 327.15 THEN
    ea = ea * 7.50187 * EXP(19.04 * (1 - 280.07 / ta))
END IF
IF ta > 255.15 AND ta < 273.15 THEN
    ea = ea * 7.50187 * EXP(22.024 * (1 - 279.24 / ta))
END IF

pa1 = ta / (1 - .3785 * ea / pa)
vo1 = (voo - .4 * voo * (dm / m) + .0014 * voo * (tp - Tc))
y0 = SQR(vo1 ^ 2 + wind ^ 2 - 2 * vo1 * wind * COS(a * 3.141592654# / 180))
y0 = y0 * COS(a * 3.141592654# / 180)
z0 = TAN(a * 3.141592654# / 180)
z0 = z0 / (1 - wind / (vo1 * COS(a * 3.141592654# / 180)))
CLS
END SUB

SUB menu (cog, cof, xf, yf, xfu, yfu, t$)

    COLOR cog, cof
    LOCATE xf - 1, yf: PRINT t$

    LOCATE xf, yf: PRINT "É" + STRING$(yfu - yf, 205) + "»";

    FOR i = xf + 1 TO xfu
        LOCATE i, yf: PRINT "°" + SPACE$(yfu - yf) + "°";
    NEXT
    LOCATE xfu + 1, yf: PRINT "È" + STRING$(yfu - yf, 205) + "¼";
END SUB

SUB NPkoef (k, L, r, q, h, y1, z1, v1, w1)

    k = h * y1: L = h * z1
    r = h * v1: q = h * w1
END SUB

SUB NPxyzvw (nk, x, x0, y, y0, z, z0, v, v0, w, w0, h, h0, k, L, r, q)

    IF nk = 1 THEN
        x = x0: y = y0: z = z0
        v = v0: w = w0: h = h0
        GOTO fund:
    END IF

```

```

IF nk = 2 OR nk = 3 THEN
  x = x0 + (.5 * h): y = y0 + (.5 * k)
  z = z0 + (.5 * L): v = v0 + (.5 * r)
  w = w0 + (.5 * q)
  GOTO fund:
END IF

IF nk = 4 THEN
  x = x0 + h: y = y0 + k: z = z0 + L
  v = v0 + r: w = w0 + q
END IF

fund:
END SUB

SUB y1z1v1w1 (x, y, z, v, w, y1, z1, v1, w1, koef, pa1, wind, ys, yy, pa, ta1, TE, Pr)

  ta1 = (TE / pa1) ^ .5
  yy = y * SQR(1 + z ^ 2)

  y1 = -1 * koef * (pa / Pr) * ta1 * ((pa1 - .006328 * v) / pa1) ^ 4.4 * 2.7189 * 10 ^ -4 * (yy) ^ 2 / yy
  z1 = -9.80665 / y ^ 2
  v1 = z
  w1 = 1 / y

END SUB

```

---

## References

- <sup>1</sup> Mori, E. <http://www.earmi.it/balistica/evacuazioni.html>
- <sup>2</sup> Еров, В. А. Основы Взрывного Дела, p. 165, 169, Moscow 1974
- <sup>3</sup> Klimi, G. Exterior Ballistics with Applications, p. 530 - 540, 3d edition, Xlibris 2010
- <sup>4</sup> Joseph Backofen, The Gurney Velocity: A "Constant" Affected by Previously Unrecognized Factors , 22ndInternational Ballistics Symposium, 2005.
- <sup>5</sup> Klimi, G. Exterior Ballistics with Applications, p. 65, 3d edition, Xlibris 2010
- <sup>6</sup> Orlenko, L. P. Explosion and Impact Physics, p.249-250, Moscow 2006  
Orlenko, L. P (Editor), Explosion Physics, p. 182 – 185, Moscow 2004
- <sup>7</sup> Klimi, G., Elements of Exterior Ballistics, p. 159, Xlibris 2016
- <sup>8</sup> Orlenko, L. P (Editor), Explosion Physics, p. 182 – 185, Moscow 2004



**SCIENTIFIC TECHNICAL EVALUATION OF EXPLOSIVE EFFECTS AND  
CONSEQUENCES - SAFETY DISTANCES (QD) AND RISK ANALYSIS**



**EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY  
RISK ANALYSIS AND EXECUTION OF A MISSION  
CASE STUDY**

Rome, 22<sup>nd</sup> november 2016

**Cpt. Marco APPODIA**  
[marco.appodia@esercito.difesa.it](mailto:marco.appodia@esercito.difesa.it)



# **AGENDA**



- 1. Reference documents**
- 2. Explosive Remnants of War Disposal**
- 3. Explosive Remnants of War Disposal: Threat  
Vulnerability Risk Assessment**
- 4. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (1)**
- 5. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (2)**



## REFERENCE DOCUMENTS

- **STANAG NATO 2369 / ALLIED EOD PUBLICATION 14**  
**NATO EOD Publications Set (NEPS)**  
**IDENTIFICATION AND DISPOSAL OF SURFACE, AIR, AND UNDERWATER MUNITIONS**
- **Technical Manual Explosive Ordnance Disposal Procedures A-1-1-4**  
**PROTECTION OF PERSONNEL AND PROPERTY**  
Published under the authority of the US Secretaries of the Army, Navy and Air Force
- **Italian Standard Operating Procedures (SOP)**  
**PROTEZIONE DI PERSONE, ATTIVITÀ E BENI IN CASO DI DETONAZIONE IN CAMPO APERTO DI ORDIGNI ESPLOSIVI ED ESPLOSIVI IN GENERE**



## AGENDA



- 1. Reference documents**
- 2. Explosive Remnants of War Disposal**
- 3. Explosive Remnants of War Disposal: Threat Vulnerability Risk Assessment**
- 4. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (1)**
- 5. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (2)**



# EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

## Explosive Remnant of War (ERW):

Unexploded Ordnance (UXO) and/or Abandoned Explosive Ordnance (AXO) that remain after the end of an Armed Conflict.

International Ammunition Technical Guidelines ONU no. 1.40  
Convention on Certain Conventional Weapons (10<sup>th</sup> October 1980)/  
Protocol V on Explosive Remnants of War (28<sup>th</sup> November 2003).



## Explosive Ordnance Disposal (EOD):

The detection, identification, onsite evaluation, rendering safe, recovery and final disposal of Unexploded Explosive Ordnance.

NATO Allied Administrative Publication no. 06



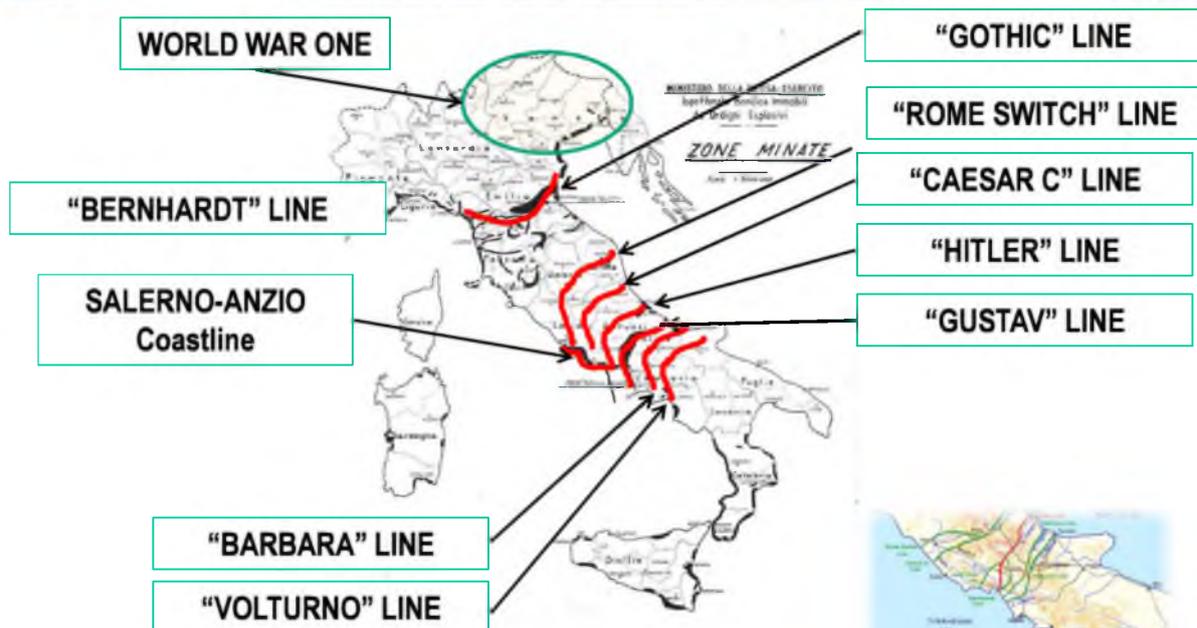
# EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence



## CURRENT THREATS:

Unexploded Explosive Remnants of War  
Depots of Abandoned Explosive Ordnances





# AGENDA



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

1. Reference documents
2. Explosive Remnants of War Disposal
3. Explosive Remnants of War Disposal: Threat Vulnerability Risk Assessment
4. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (1)
5. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (2)



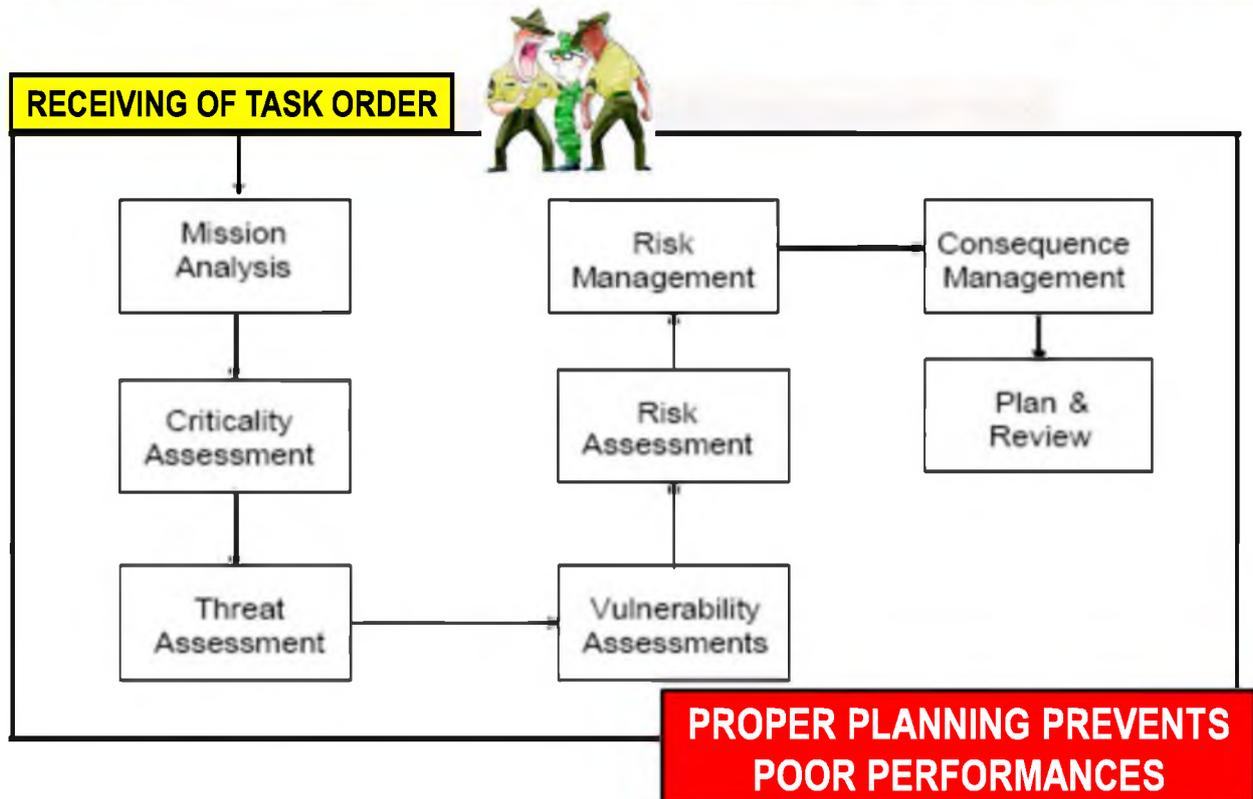
## EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY THREAT VULNERABILITY RISK ASSESSMENT



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

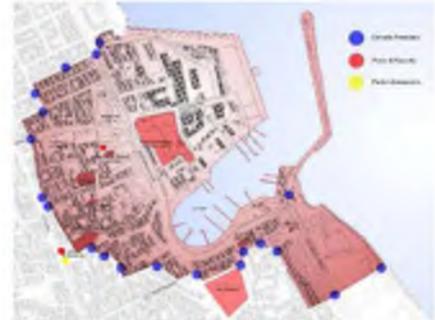




## MISSION ANALYSIS

### GOALS

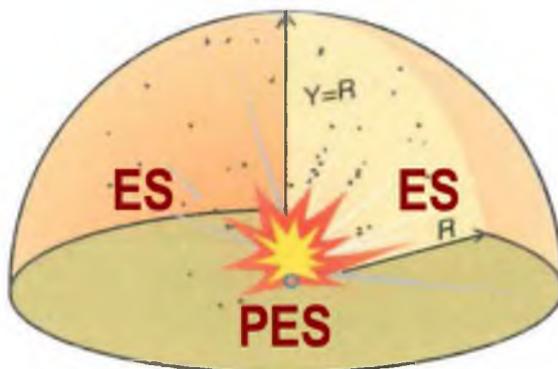
- Recommend minimal protection criteria to minimize serious injury, loss of life, and damage to property.
- Analyze field methodologies to manage risks associated with the explosion effects of Ammunition and Explosives.
- Implement protection of personnel and property.



## MISSION ANALYSIS

### CHEMICAL EXPLOSION

### HEMISPHERICAL GEOMETRY



An Exposed Site (ES) is an area exposed to the potentially hazardous explosion effects from an explosion at a Potential Explosion Site (PES).

Protection of personnel and property can be achieved by:

- Minimal Separation distances for Ammunition hazards;
- Personnel protective measures;
- Ammunition explosion effects engineering controls.



## MISSION ANALYSIS

### SET OF HAZARD AREA

- Identify the threat (PAYLOAD + CASING) and the methods of activation (FUZES OR PISTOLS) of the Explosive Ordnance.
- Calculate the hazard area using tables of formulae.
- Assess the hazard of secondary threats (gas pipes, fuel tanks, power stations, water tanks, etc.).
- Assess the effect of natural protection on site.
- Assess the effectiveness of precautionary measures to be used.



## QUANTITY DISTANCE (QD) PRINCIPLES

- Quantity distance is the **potential damage and/or injury** and the **minimum separation distance relationship** between the PES and the ES.
- Quantity distance is a function of the explosive charge (**Type and Weight**) and the Ammunition **fragment** category.
- There are three main categories based on charge/weight ratio: Extremely Heavy case, Robust and Non-robust.





## BLAST OVERPRESSURE DISTANCE - BOD -

### BLAST WAVE SCALING / CUBE-ROOT-SCALING

$$D = K \times \sqrt[3]{C}$$

Equivalent Explosive Weight TNT in Kg



- BOD 1 Essential personnel (K19,84) 6,1kPa;
- BOD 2 Non Essential Personnel (K130,16) 0,46kPa.



## FRAGMENTATION ORIGINATING FROM THE AMMUNITION CASING

$$D = 110 * C^{0,164}$$

Equivalent Explosive Weight TNT in Kg

**HFD**

*Hazardous Fragmentation Distance*

$$D = 976,4 + 172,5 * \ln(C)$$

Equivalent Explosive Weight TNT in Kg

**MFD – HORIZONTAL**

*Maximum Fragmentation Distance*

$$MFD-V = 0,932 * MFD-H^{0,974}$$

**MFD – VERTICAL**

*Maximum Fragmentation Distance*



## PARTICULAR HAZARDOUS SCENARIO

**MFD-H \* 1,33**

- Intentional detonations of stacked Ammunition and Explosives.

**MFD-H \* 1,33**

- Intentional detonations of Ammunition having preformed/scored fragmenting warheads.

**MFD-H \* 1,33**

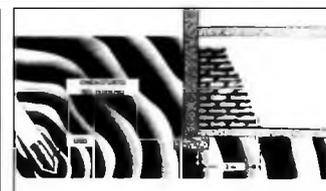
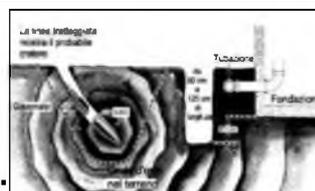
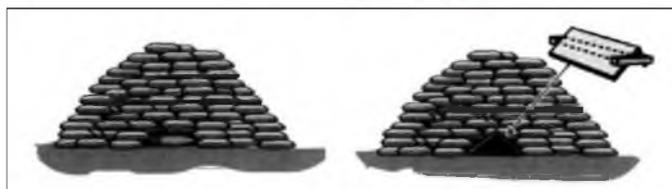
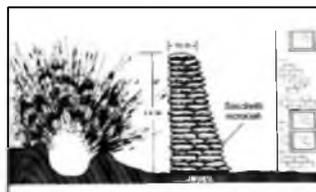
- Intentional detonations of Ammunition by other than the design mode-of-initiation.

Noses, nose plugs, suspension lugs, and baseplates, also known as "rogue" fragments can be projected to distances greater than 3.048 m.



Field Measures for Hazard Confinement have the purpose of preventing the damage due to explosion of Ammunition or Explosives.

- barricading;
- trenching;
- abutments;
- venting;
- covering;
- mounds;
- Tape on windows;
- Buried (tamped) detonations.





# AGENDA



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

1. Reference documents
2. Explosive Remnants of War Disposal
3. Explosive Remnants of War Disposal: Threat Vulnerability Risk Assessment
4. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (1)
5. Explosive Remnants of War Disposal: Case study (2)



## EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY CASE STUDY



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

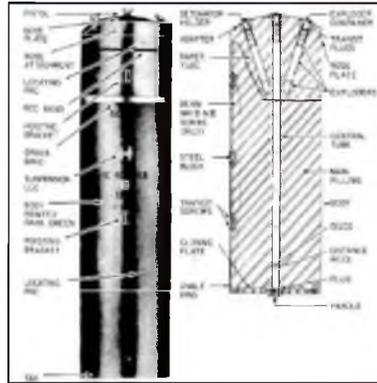
### MISSION ANALYSIS CRITICALLY AND THREAT ASSESSMENT

<b>WHAT?</b>	Explosive Remnants of War found – British Air Bomb 4000 Lbs
<b>WHO?</b>	Civilian Technicians employed in an Unexploded Ordnance Detection Task
<b>WHEN?</b>	During detection of the ground for the realization of “PARCO DELLA PACE”
<b>WHERE?</b>	Former military and touristic airport “DAL MOLIN” Northern part of Vicenza (3 Municipalities: Vicenza, Caldogno, Costabissara)
<b>WHY?</b>	Precautionary Measures due to impact of World War 2 in Vicenza





## MISSION ANALYSIS CRITICALLY AND THREAT ASSESSMENT



<b>FUZING</b>	3 Nose Pistols
<b>COLOR MARKINGS</b>	Dark green with red and light green bands from nose
<b>BODY LENGTH</b>	82 in.
<b>BODY DIAMETER</b>	30 in.
<b>EXPLOSIVE WEIGHT</b>	2954 lb. Amatol (60/40); 2960 lb. Amatol (80/20); 3070 lb. RDX/TNT (60/40); 3088 - 3242 lb. MINOL 2; 3294 lb. TORPEX 2
<b>CHARGE/WEIGHT RATIO</b>	75%



## MISSION ANALYSIS CRITICALLY AND THREAT ASSESSMENT

### BLAST OVERPRESSURE DISTANCE

- **NET EXPL. WEIGHT:**  
3242 lb. MINOL 2 = 1472 kg
- **EQUIVALENT EXPL. WEIGHT TNT:**  
1472 x 1,2 = 1766 kg
- **1583 meters**



**IF HIGH EXPLOSIVE WITHOUT CASING**



## MISSION ANALYSIS CRITICALLY AND THREAT ASSESSMENT FRAGMENTATION ORIGINATING FROM THE AMMUNITION CASING

### HFD

- 287 METERS

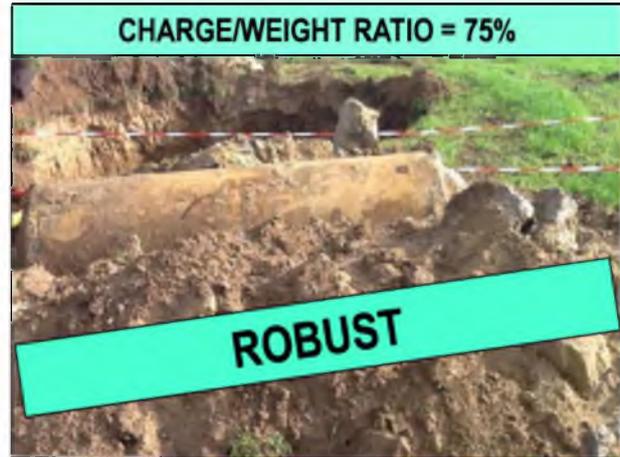
### MFD – HORIZONTAL

- 1803 METERS

### MFD – VERTICAL

- 1382 METERS

CHARGE/WEIGHT RATIO = 75%



## MISSION ANALYSIS CRITICALLY AND THREAT ASSESSMENT PARTICULAR HAZARDOUS SCENARIO

### STACKED MUNITIONS

- MFD – H x 1,33 =  
1803 METERS X 1,33  
2404 METERS

### ROGUE FRAGMENTS

- DISTANCES GREATER  
THAN 3048 METERS

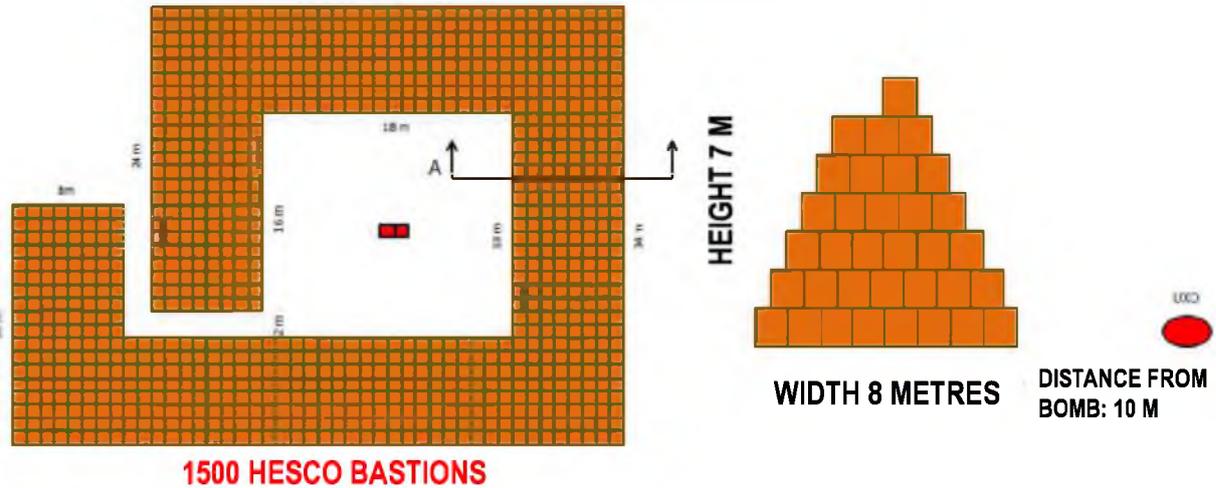




## RISK MANAGEMENT

### AMMUNITION AND EXPLOSIVES EXPLOSION EFFECTS FIELD ENGINEERING CONTROLS

FINAL DECISION BASED ON THE RISKS PERMITTED AND ASSUMED  
**FROM 3048 TO 2500 M**



## RISK MANAGEMENT

### PROTECTION OF PERSONNEL

Involved Municipalities:

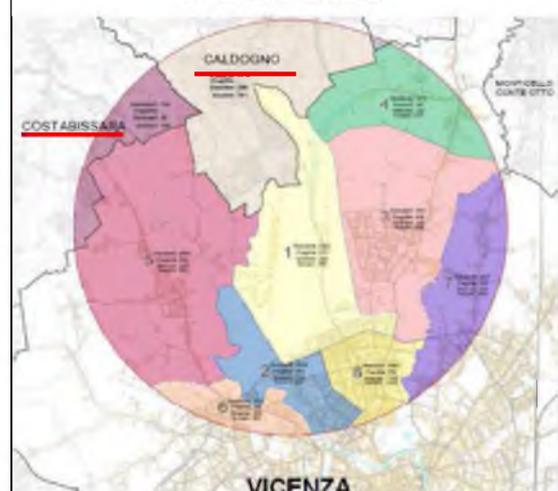
- VICENZA (27832 citizens)
- CALDOGNO (5438 citizens)
- COSTABISSARA (1735 citizens)
- Plus 5% of persons not registered

Provided specific medical assistance: 241 persons

No-Italian persons: 4000

- All communication in 7 different languages: Arabic, English, French, Romanian, Russian, Serbian and Spanish;
- Permanent coordination with the specific communities and religious Leaders.

### EVACUATION OF 36750 PERSONS





## EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY CASE STUDY



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

# RISK MANAGEMENT

## PROTECTION OF PROPERTY

### INFRASTRUCTURES IN DANGEROUS AREA

- Routes: 243
- Buildings: 3.702
- Schools: 27
- Shops: 294
- Religious Sites: 20
- Sport Facilities: 28
- Monuments: 7
- USA SETAF Barracks: 1
- National Barrack: 6
- Local Hospital at 2700 meters



## EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY CASE STUDY



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

# RISK MANAGEMENT

## CLEAR, CORDON AND CONTROL

**DISINNESCO BOMBA  
EVACUAZIONE DELLA POPOLAZIONE  
VENERDI' 25 APRILE 2014**

Il centro identifica l'area da evacuare con raggio di 2700 metri a partire dal punto in cui è situata la bomba. The circle identifies the area with an evacuation radius of 2700 meters from where the bomb is located.

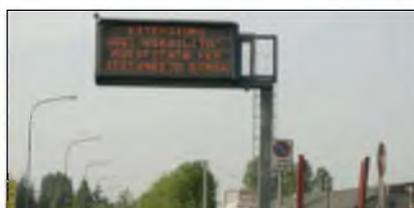
È OBBLIGATORIO PER TUTTI I SOGGETTI FUGIRE ALL'INTERNO DEL RAGGIO DI EVACUAZIONE E NON USCIRVI LE ORE 8.30 DEL MATTINO. IT IS MANDATORY FOR CITIZENS TO GO OUTSIDE THE EVACUATION AREA NOT LATER THAN 8.30 A.M.

ComuneVi

Disinnesco di pericoloso ordigno bellico. Lasciare le abitazioni e liberare le strade entro le ore 8,30. Per informazioni [www.comune.vicenza.it](http://www.comune.vicenza.it) 800 127812

Sono iniziate le operazioni di disinnesco dell'ordigno. Per informazioni [www.comune.vicenza.it](http://www.comune.vicenza.it) 800 127812

Operazione di disinnesco terminata. F



COMUNE DI VICENZA

**DISINNESCO BOMBA  
25 APRILE 2014**

**OBBLIGO  
DI EVACUARE L'EDIFICIO  
ENTRO LE ORE 8.30  
DEL GIORNO 25 APRILE**

IL SINDACO

Per informazioni: [www.comune.vicenza.it](http://www.comune.vicenza.it) 800-127812

**BOMB DAY  
EVACUATION FOR BOMB DISPOSAL  
FRIDAY 25 APRIL 2014**

A bomb was found and is being disarmed in the center of the city of Vicenza. Citizens are requested to evacuate their buildings within a radius of 2700 meters from the location of the explosive device.

US Army specialists will start disposal of the bomb at 8:00 am on Friday 25 April 2014. All the buildings and roads within a radius of 2700 meters from where the bomb was found must be evacuated.

Evacuation must be completed before the start of the morning of 25 April 2014.

For information please call 800 127812 or visit the website [www.comune.vicenza.it](http://www.comune.vicenza.it)



# EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY CASE STUDY



Italian Army

Italian Engineers Command

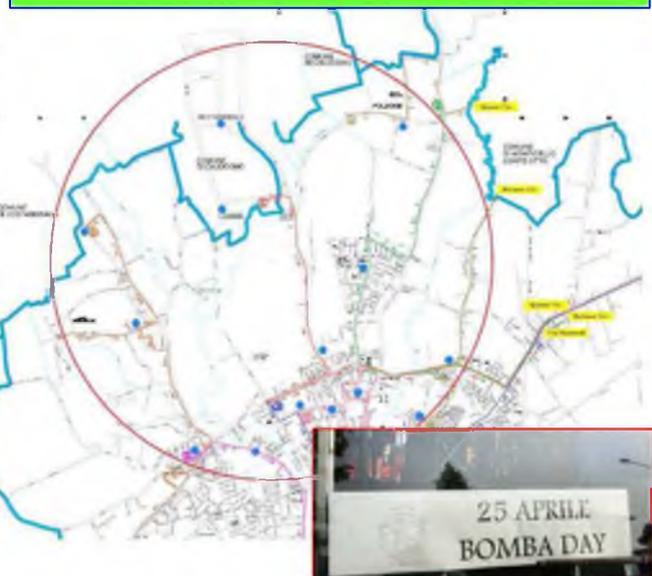
C-IED Centre of Excellence

## RISK MANAGEMENT

### CLEAR, CORDON AND CONTROL

45 CHECKPOINTS

8 ALL DAY FREE BUS



# EXPLOSIVE REMNANTS OF WAR DISPOSAL IN ITALY CASE STUDY



Italian Army

Italian Engineers Command

C-IED Centre of Excellence

## RISK MANAGEMENT

### CLEAR, CORDON AND CONTROL

7 DAYCARE POINTS

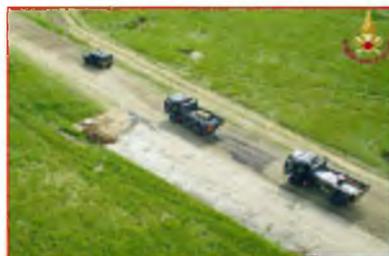
16 INFO POINTS





# RISK MANAGEMENT

## CLEAR, CORDON AND CONTROL



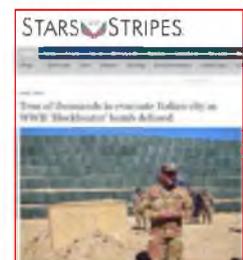
# RISK MANAGEMENT

## PERSONNEL EMPLOYED DURING THE TASK

- 32 OFFICIAL MEETINGS
- 25 LOCAL AUTHORITIES
- 60 ACCREDITED NEWSPAPER/TV & RADIO STATIONS
- 2 EOD STAFF OFFICERS (1 from C-IED CoE)
- 4 CMD TEAMS (1 from ...)

**2000 PERSONS WORKED TOGETHER TO ACHIEVE THE SAME GOAL:  
PROTECTION OF PERSONNEL AND PROPERTY!**

- 100 TRAFFIC OFFICERS
- 210 MUNICIPAL WORKERS
- 600 VOLUNTEERS OF NATIONAL CIVIL PROTECTION
- 60 TEAMS OF MEDICAL EMERGENCY SERVICE
- 100 TECHNICIANS OF SERVICES





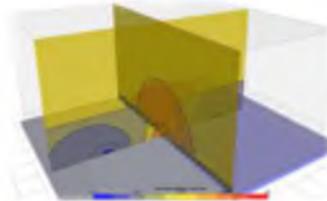


# **AMMUNITION AND EXPLOSIVES EXPLOSION EFFECTS ENGINEERING CONTROLS**



**Verona, June 2015**

**FEMA:**  
FINITE ELEMENT METHOD OF ANALYSIS



US Air Bomb mod. AN M64 500 Lbs  
from 1800 m to 700 + 1000 m



**Rome, September 2015**



**COVERING**



## APPENDICE 2

### OSSERVAZIONI SULLE ISTRUZIONI ITALIANE-NATO

*Scientific technical evaluation of explosive effects and consequences - safety distances (qd) and risk analysis*

**Per l'onda di sovrappressione** si indica la formula

$$D = K \times C^{1/3}$$

Non si dice e non si capisce che cosa sia  $K$ , se  $x$  sia il moltiplicatore o altro; e' un coefficiente ... segreto. A logica può essere solo riferito alla distanza; ma quella effettiva o quella scalata?  $C$  indica la massa in Kg.

Se si prende la formula (3.1) del testo Mori, Klimi, Shock Wave of Explosion

$$\Delta P_H = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3 \quad (1)$$

per esplosione al suolo, la zona di sicurezza è l'area di raggio  $r$  in cui la sovrappressione non supera

$$\Delta P_H = 0.1 \text{ Kg/cm}^2 = 9.81 \text{ KPa}.$$

Sostituendo in (1), si può scrivere:

$$0.1 = 1.00 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right) + 4.08 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^2 + 12.56 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^3, \quad (2)$$

Risolvendo (2) rispetto alla incognita  $\sqrt[3]{m}/r$  si trova:

$$\sqrt[3]{m}/r = 0.0732.$$

Quindi abbiamo un raggio della zona di sicurezza

$$r = 14 \cdot \sqrt[3]{m} \quad (3)$$

Ad esempio per  $m = 100$  kg TNT- equivalente si trova

$$r = 14 \cdot \sqrt[3]{m} = 14 \cdot \sqrt[3]{100} = 65 \text{ m} \quad (4)$$

Se per grande cautela lo raddoppiamo o triplichiamo si avrà

$$r \sim (2 \text{ till } 3) \cdot 14 \cdot \sqrt[3]{100} = (2 \text{ till } 3) \cdot 65 \text{ m} = (130 \text{ or } 195) \text{ m}.$$

Se  $m = 140$  kg TNT- equivalente si avrà:

$$r \sim (2 \text{ till } 3) \cdot 14 \cdot \sqrt[3]{140} = (2 \text{ till } 3) \cdot 14 \cdot 5.19 = (145 \text{ or } 218) \text{ m.}$$

Quindi forse K sta per la distanza reale, x è il segno di moltiplicazione e il risultato corrisponde a quattro volte quello reale, il che è cosa ridicola. Se si applicasse alle bombe a mano il lanciatore sarebbe da considerare a rischio quanto il bersaglio!

Non viene detto neppure in quale unità di misura viene espresso il risultato D; però subito dopo si fanno esempi in kilopascal (1 atm = 100 kp circa). Ma si ottiene un risultato accettabile solo se si tiene conto che nella formula si deve inserire non la distanza effettiva, ma la distanza scalata. Per Sadowski 140 kg di TNT a 50 m danno una sovrappressione di poco meno di una atm, sia nell'aria senza ostacoli che sulla superficie terrestre.

### **Distanza pericolosa per frammenti**

Viene proposta questa formula

$$D = 110 * C^{0,164}$$

Per 14g kg di TNT si ha:

$$D = 110 * 140 \text{ kg}^{0,164} = 247 \text{ m.}$$

Non capisco che cosa si intende con questa distanza del tutto illogica.

### **Gittata massima**

Viene proposta questa formula:

$$D = 976,4 + 172,5 * \ln(140) = 1828 \text{ m.}$$

È misura non confortata da alcuna evidenza scientifica: forse hanno utilizzato esperimenti fatti con sfere di piombo (densità 11.000 kg/mc) contro 7500 dell'acciaio. È poi insensato aggiungere per ogni quantitativo di esplosivo un valore fisso di 976,4 metri, valore uscito dal cervello di Giove, come dimostra il decimale; un valore del genere, da sommare semplicemente, viene inserito a braccio: forse si voleva inserire un valore base di 300 metri, poi malamente trasformato in piedi! Ma per certi frammenti il valore di 200 metri è già al limite della loro gittata.

### **Massima altezza verticale**

Viene proposta questa formula

$$0,932 * 1828^{0,974} = 0,932 * 1096 = 1022 \text{ m}$$

Il valore quadra con il calcolo per frammenti di piombo di qualche decina di grammi; ma non vale per pesi maggiori o per frammenti di acciaio o con

diverso coefficiente balistico: già un frammento di 200 gr, non supera i 300 m.

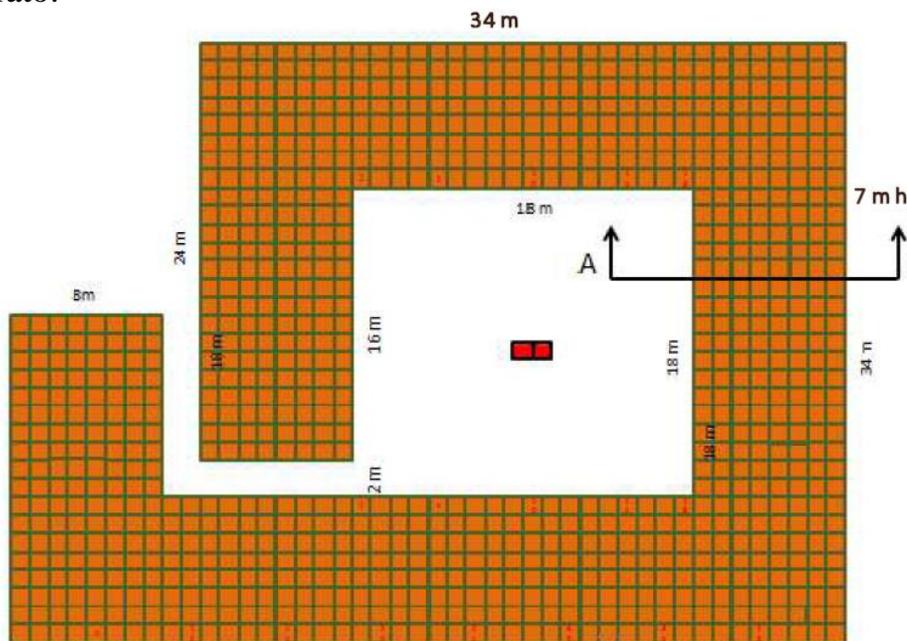
### Grossi frammenti

Trovo scritto che testate, fondello e altri grossi componenti possono arrivare fino a 3.048 m. Devono aver usato una formula poiché altrimenti non si spiegherebbe la ridicola precisione (se fosse un dato statistico di casi reali il valore sarebbe tondo).

Se si prende la testata di una bomba da 250 kg, del diametro di 36 cm si può calcolare un volume, tolti i vuoti, di 100 dmc; pari a 7,5 kg di acciaio.

Qualunque programma di calcolo balistico ci dice che a qualunque velocità iniziale essa parta, non supererà mai i 300 metri di distanza. A meno di supporre che esso abbia un perfetto coefficiente aerodinamico, pari a quello del miglior proiettile realizzabile e perfettamente stabilizzato.

Poco realistico è anche il metodo di barriere da creare attorno alla bomba da disinnescare (bastione HESCO, gabbione fatto con tondini metallici, mentre al suo interno può alloggiare grandi quantità di terra e sabbia) e così raffigurato:



Prevedono cioè una buca quadrata di 18 metri di lato (25 m in diagonale) con la bomba al centro lontana 10 metri dalle pareti verticali alte 8 metri. Ciò significa che i frammenti possono uscire dalla buca con un angolo di  $35^\circ$ ; sembra proprio studiato per ottenere la massima gittata e il massimo pericolo! Se la distanza attorno alla bomba fosse di tre metri, l'angolo si ridurrebbe a  $65^\circ$  e i frammenti avrebbero una gittata ridotta forse del 20%.

Si devono infatti conciliare due esigenze: quella di restringere al massimo l'area di pericolo e di danni in caso di scoppio non voluto o di brillamento guidato, e quella di consentire agli artificieri di operare con adeguato spazio per l'estrazione della spoletta o per lo svuotamento del guscio mediante l'uso di apparecchiature manuali o teleguidate; quindi un anello su cui possano spostarsi. Mi rimane difficile da credere che siano necessari 320 mq.

## ALLEGATO 1

### Pagine estratte dal testo

Rheinmetall  
Waffentechnisches Taschenbuch 1972 -1982  
Tradotto in inglese

#### 1.4.6.2 Fragmentation Charges

Fragmentation charges consist of an explosive body, the surface of which fits against a casing of metal (usually steel). When the explosive detonates, the metal casing is splitted up and the resulting fragments are accelerated at a relatively high velocity. This charge is used in HE-projectiles, HE-bombs, HE-mines, hand grenades, etc.

The metal casing is generally homogeneous, but it can be provided with predetermined fracture points or be composed of separate elements. Predetermined fracture occurs through variation in wall thickness at specific points, or through a reduction in material strength in certain narrow zones, e.g. through electron beam treatment. Fragments resulting from predetermined fracture during detonation are referred to as preshaped fragments.

Fragmentation charges work in the following way. The fragments are hurled outward, and penetrate or perforate objects within a certain distance from the point of burst. In this way damage to the object is attained. The effects of a single fragment at a certain distance from the point of burst are determined by the velocity of the fragment, its mass, shape and position at the time of impact. These characteristics are determined, in turn, by the fragmentation process (mass and shape), acceleration (initial velocity), and the effects of aerodynamic forces (velocity of the fragment when it strikes the object). This means that the fragmentation effects can be divided into four phases, which, taken together, are known as *fragmentation ballistics*:

- Fragmentation of the casing,
- acceleration of the fragments,
- loss of speed due to aerodynamic forces (drag).
- penetration of the object (damage to the object).

The *fragmentation* of the homogeneous metal casing or envelope is dependent upon the type of explosive, the type of initiation, the caliber, the ratio between the diameters of the explosive charge and the entire charge (shell, grenade or bomb), and the quality of the casing material. The fragmentation of the metal casing can often be improved considerably by selecting the optimal quality of steel for the task. The relationship between the weight of the explosive and the total weight of the charge is between 0.1 and 0.2 for fragmentation charges; in HE-incendiary shells with tracer (small caliber), this ratio can fall to 0.05.

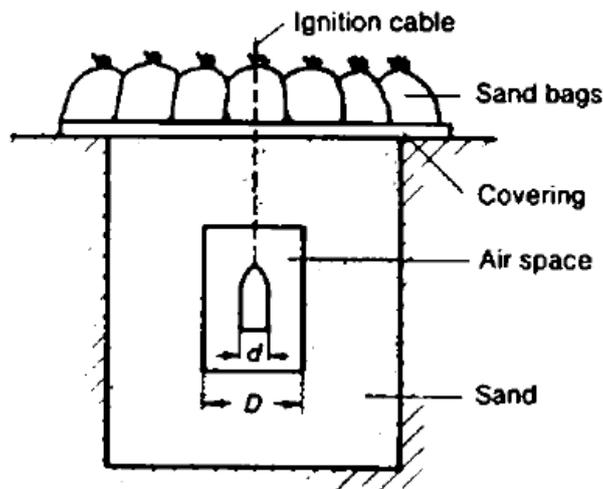


Figure 111. Detonation pit.

Figure 111 shows how the size (that is the size distribution) of fragments is determined using the detonation pit.

The fragmentation charge is surrounded by an air space inside a sand lined pit. The pit is covered and the cover is weighted down with sand bags to dampen the effects of the explosion. The initiation is set off either electrically, or by means of a mechanical fuze with a lanyard.

The air space between the charge and the sand, which is formed by a cardboard cylinder, affects the amount of fragmentation if it is too small. According to H. HANSEL [23], the proper ratio should be  $D \approx 5d$ .

The fragments produced by the detonation are trapped inside the pit and can be removed from the sand by using a sieve. A magnet is used to separate the fragments from non-metallic materials (from the fuze or other components). The collected fragments are weighed and sorted according to weight classes.

In order to avoid the sifting required after detonation in a sand filled pit, LINDEIJER and LEEMANS [24] revived an old idea, which called for detonating underwater, and collecting the fragments in a net. Automatic selecting devices are being developed for the sorting of fragments.

Figures 112, 113, 114 and 115 depict typical examples of the *size distribution of the fragments* produced- when 30 mm shells are detonated inside a detonation pit. Figure 112 is a photograph of the fragments of a HE-incendiary shell (arranged according to weight classes).

Figure 113 shows the fragments from a thin wall HE-shell (Minen- geschoss) of the same caliber. Figure 114 and 115 illustrate the number of fragments in each weight class produced by the two projectiles.

The *acceleration* of the fragments produced when the shell body explodes is largely dependent on the weight ratio  $\mu = m_{\text{body}} : \mu_{\text{explosive}}$ . The impulse is transferred firstly by the shock wave which is transmitted to the body and repeatedly reflected at its inner surfaces, and then by the exposure of the fragments to the flow of the expanding fumes. The direction of motion of the fragments is roughly at right angles to the surface of the charge.

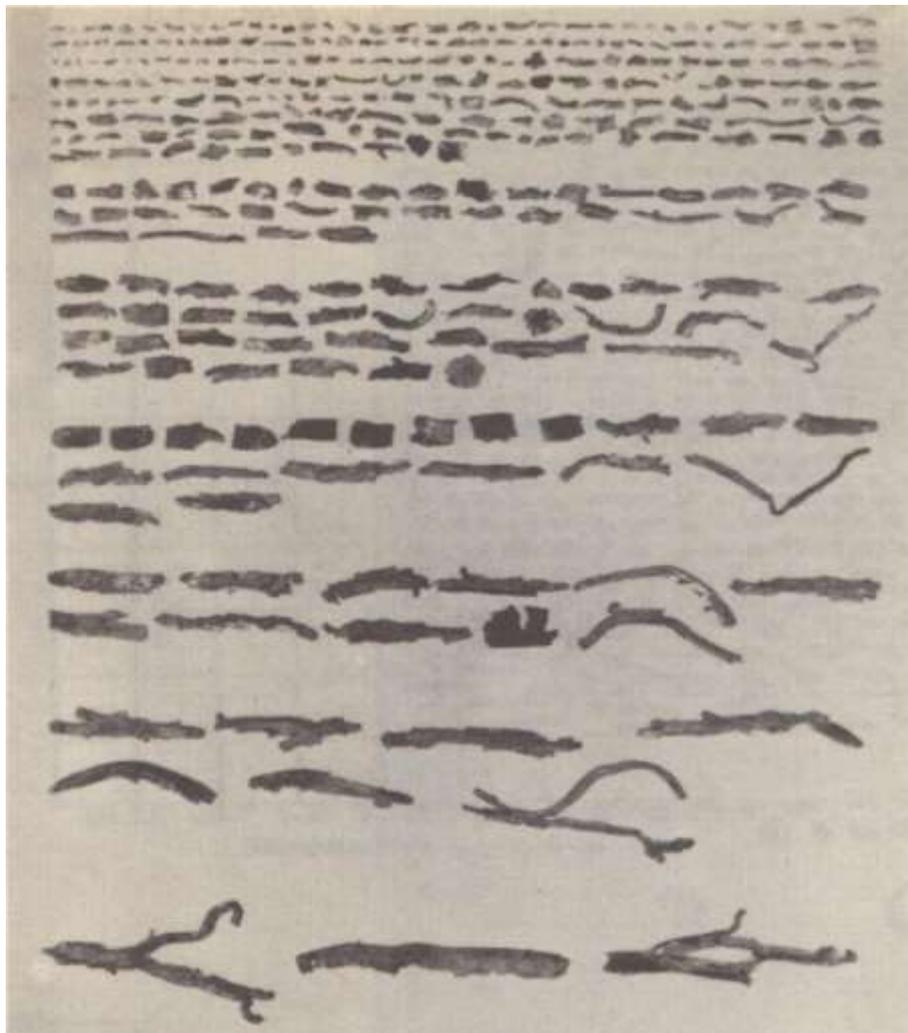


Figure 112.\_ *Photograph of fragments from 30 mm HE-incendiary shell.*

X-ray photographs make it possible to analyse the acceleration of individual fragments. According to new values obtained by M. HELD [25] using a charge with steel balls (pellets), the acceleration process is limited to approximately 6 ps for oblique incidence of the detonation front. The greatest acceleration under the influence of the shock wave takes place within  $< 1$  ps. Figure 116 shows the X-ray photograph of an exploding fragmentation charge.

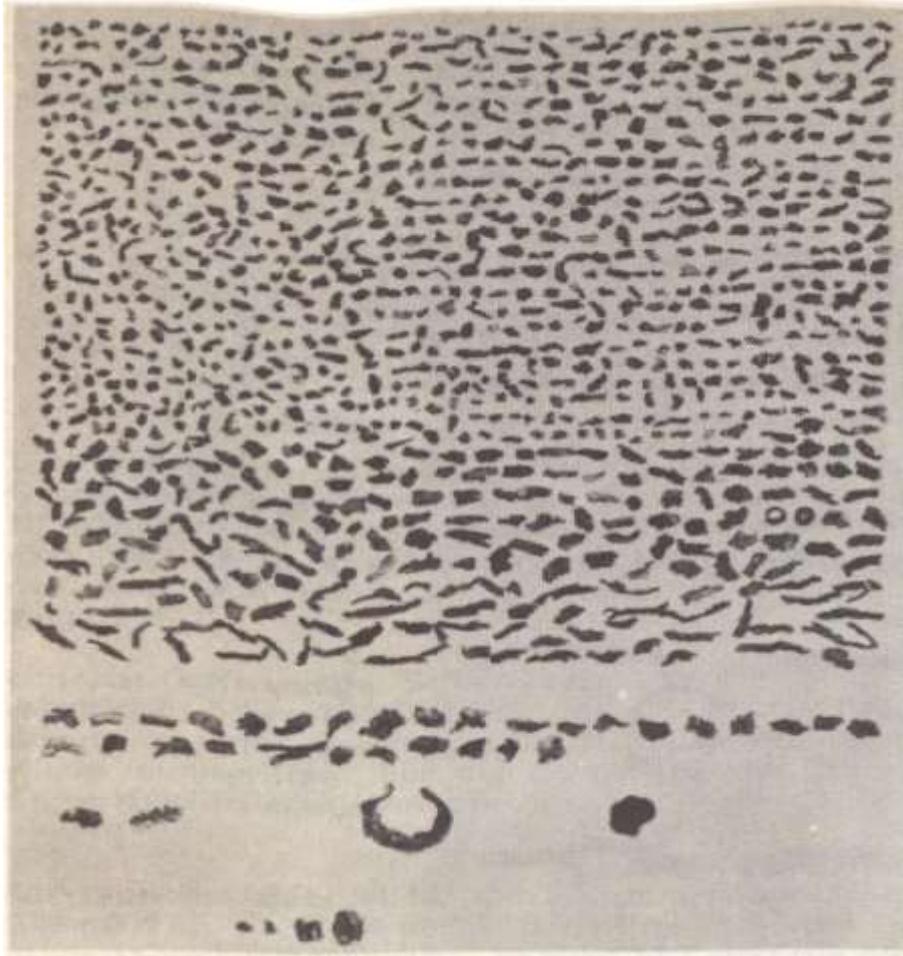


Figure 113. *Photograph of fragments from 30 mm thin wall HE-shell (Minengeschoss).*

At the end of the acceleration phase, the fragments attain velocities of between 1000 and 1500 m/s. For rounds detonated in flight, this velocity must be added (as a vector) to the velocity of the projectile. Due to the velocity of the projectile at the time of detonation, the trajectories of most of the fragments form a cone that opens away from the projectile. The angle of the cone depends on the ratio of the velocity of the projectile to the velocity of the fragments (determined when the projectile is at rest).

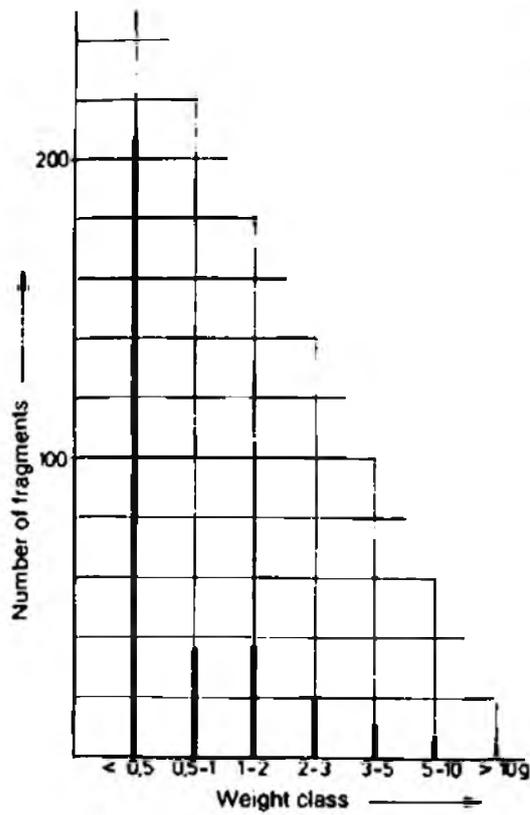


Figure 114.  
30 mm HE-incendiary shell, number of fragments by weight class.

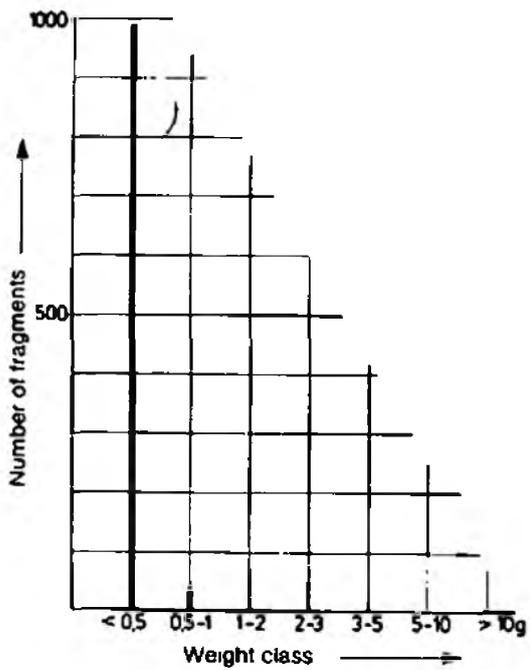


Figure 115.  
30 mm thin wall HE-shell (Minengeschoss), number of fragments by weight class.

It is difficult to estimate how much the fragments will be retarded by air resistance, because the fragments have very complex geometric shapes, and tumble several times during their flight (since they do not fly with great stability). In any event, the deceleration is so great, that small fragments (less than 0.5 g) lose their effectiveness within a few meters, despite the high initial velocity.

The ability to penetrate the target or to damage the object is characterized by the concept of the "*effective fragment*", which is defined as follows: *A fragment is effective if it perforates a steel sheet, 1.5 mm thick.*

**The number of *effective fragments*, dependent on the distance from the point of burst, can be determined in a fragmentation test area.**



Figure 116. *X-ray photograph of an exploding fragmentation charge.*

This device consists of several sheets of 1.5 mm steel plate arranged at various distances from a central point (as shown schematically in Figure 117). The fragmentation charge is detonated in a lying position at the center.

By counting the number of fragments perforating each of the sheets, one can derive the number of effective fragments at each of the different distances, as well as their spatial distribution.

Since most fragmentation charges are symmetrical about their axis of rotation but are shaped differently front and rear (e.g. an HE-projectile), it is necessary to carry out two detonation tests. In the second one, the nose and base of the projectile are reversed, that is to say, the projectile is rotated 180° from the position shown in Figure 117.

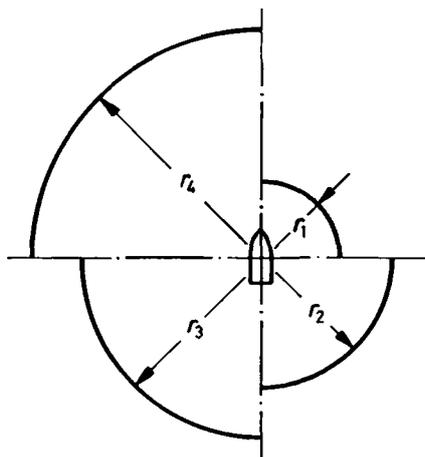


Figure 117. Fragmentation test area (schematically).

Figure 118 illustrates as an example the number of effective fragments from a 30 mm HE-shell, as a function of the distance from the burst point.

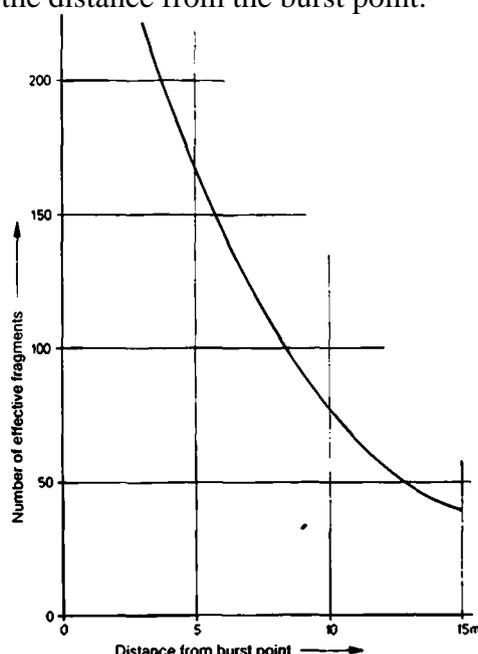


Figure 118. Number of effective fragments as a function of the distance from the burst point for a 30 mm HE-shell.

Of particular importance in the effectiveness tests is the number of effective fragments hitting per unit area as a function of the distance from the point of burst. This number is known as the *fragmentation density*.

The fragmentation density decreases with the distance, because of the energy loss of the fragments due to air resistance and because of the simple geometric fact, that the greater the distance from the point of burst, the greater the area hit by the fragment spray. The decrease in the fragment density determined geometrically is proportional to  $r^{-1}$  for cylindrical charges with no fragmenting material other than the cylindrical cover, and

proportional to  $r^2$  for spherical charges initiated centrally.

The distance for fragment density "1" is often used as a simple way for describing a charge effectiveness. The fragment density "1" means that there is *one* effective fragment for each  $m^2$ .

The effectiveness of fragmentation charges such as HE-projectiles used in anti-aircraft defenses are of particular interest. Today, low flying planes are engaged with 20 to 40 mm automatic guns as well as rockets. These guns fire special projectiles which have an impact fuze with a delay mechanism. The fuze is activated when the shell hits the skin of the plane, but does not initiate the detonation until the shell has penetrated to a depth of some 5 calibers.

The number of hits which are required to knock out a given plane depends upon the projectiles fired, the type and size of the plane, and the location of hits. In general, one can add up (accumulate) the damage caused by individual hits to determine when the plane will be knocked out; this means that the kill effect of each hit can be defined by the following expression:

$$P_{k|h} \times N_k = 1. \quad (41)$$

In this expression,  $P_{k|h}$  stands for the kill probability of an individual hit, and  $N_k$  is the number of hits required to achieve the kill.

For  $P_{k|h}$ , various functions have been stated depending on the weight of the projectile, the weight of the explosive, and on the type of aircraft involved. Here we shall use the function suggested by MOLITZ which takes the weight of the explosive as the independent variable:

$$P_{k|h} = 1 - e^{-(m/m_0)^\lambda}, \quad (42)$$

where  $m$  = weight of the explosive  
and  $m_0$  = standardizing factor

and

$$\lambda > 1.$$

Figure 119 plots the function described by Equation (42)

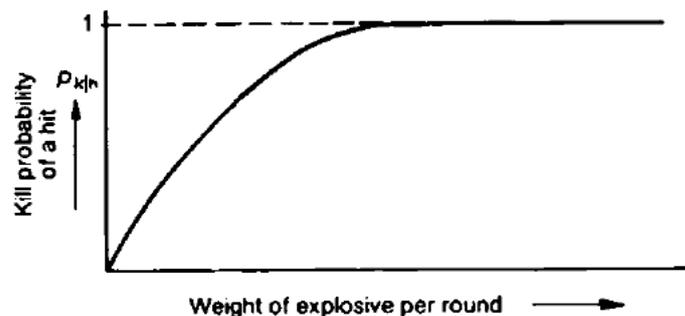


Figure 119. *Relationship between the kill probability of a hit and the weight of explosive per round.*

Figure 119 shows that, according to Equation (42), with increasing explosive weight,  $p_{k|h}$  tends towards the saturation value of "1". Just when this saturation value is reached, so that an increase in the explosive weight per projectile would lead to "overkill", remains a matter of debate. The reason for the lack of reliable values for  $p_{k|h}$  can be traced to the extremely high costs involved in carrying out the necessary trials. In addition, any such values, as far as they are known, are likely to be regarded as military secrets.