

CARGAS EXPLOSIVAS

Por el Capitán R. RODRIGUEZ y el Teniente OUTEIRIÑO

En el terreno tan sugestivo de los explosivos, en que los conceptos que se refieren a los mismos están tan íntimamente relacionados, es tan fácil divagar y perderse en la bruma del tan ilimitado horizonte que presentan, que ya desde el principio, y después de un breve preámbulo, nos esforzaremos en ceñirnos al tema concreto de cargas explosivas; pero no en cuanto a sus características y propiedades como compuestos químicos, que más o menos ampliamente contestaría un manual *ad hoc*, sino en cuanto a sus efectos explosivos, función de la naturaleza de la carga y cantidad en peso de la misma, precisamente en su repercusión en el cálculo de los destrozos probables de una carga enterrada, y por ende en el cálculo de las profundidades a que deben estar situados los polvorines que hayamos de construir, según la seguridad que quiera exigirseles. Por último, también tocaremos el tema de la penetración de las bombas de aviación, para, en relación con su cálculo, determinar la profundidad mínima a que deben estar situados los polvorines en el caso más económico de que hagamos abstracción de las cargas encerradas en los mismos, tendiendo exclusivamente a la evitación de la explosión por simpatía de las bombas almacenadas, haciendo de este modo estériles los esfuerzos enemigos, que en sus incursiones tratarán de alcanzar los grandes depósitos de explosivos con que atiende el Ejército del Aire sus específicos fines.

En resumen: que podemos construir polvorines en que su explosión no va seguida de destrucciones y efectos exteriores por comportarse la carga como un "humazo máxi-

mo" (ya veremos más adelante en qué consiste), pero que no son prácticos ni económicos, porque para llevarlos a efecto son necesarias altas profundidades, que exigen el movimiento de un gran volumen de tierras, aun para pequeñas cargas; volumen de tierras que crece en progresión geométrica (valga la metáfora) cuando se ha preconcebido la construcción de un polvorín compartimentado, en que sus diferentes compartimientos cargados de explosivos se comporten como "humazo máximo" entre sí.

Es más asequible, y nos basta en la pluralidad de los casos (fig. 1), con que el almacén de bombas o explosivos se encuentre a una profundidad mínima, H , en que sean nulos los efectos explosivos de las bombas lanzadas de superior calibre, por permanecer dichos almacenes fuera de las zonas de rotura y agrietamiento.

CARGAS EXPLOSIVAS.—Pueden ser de dos clases, atendiendo a la forma de colocación de las mismas: *interiores* o de *hornillo*, en que la carga está en el seno del medio que se quiere alterar, y *adossadas*, en que la carga es exterior, pero en contacto de dicho medio. Ambas pueden estar concentradas alrededor de un punto central, que llamaremos *foco de explosión*, o bien alargadas, necesitando entonces del concurso del fenómeno de simpatía por onda explosiva o choque, para que la explosión se verifique en todas las partes de la carga.

La explosión de un petardo o bomba aislada con su carga, que consideraremos cúbica a estos efectos, y la corres-

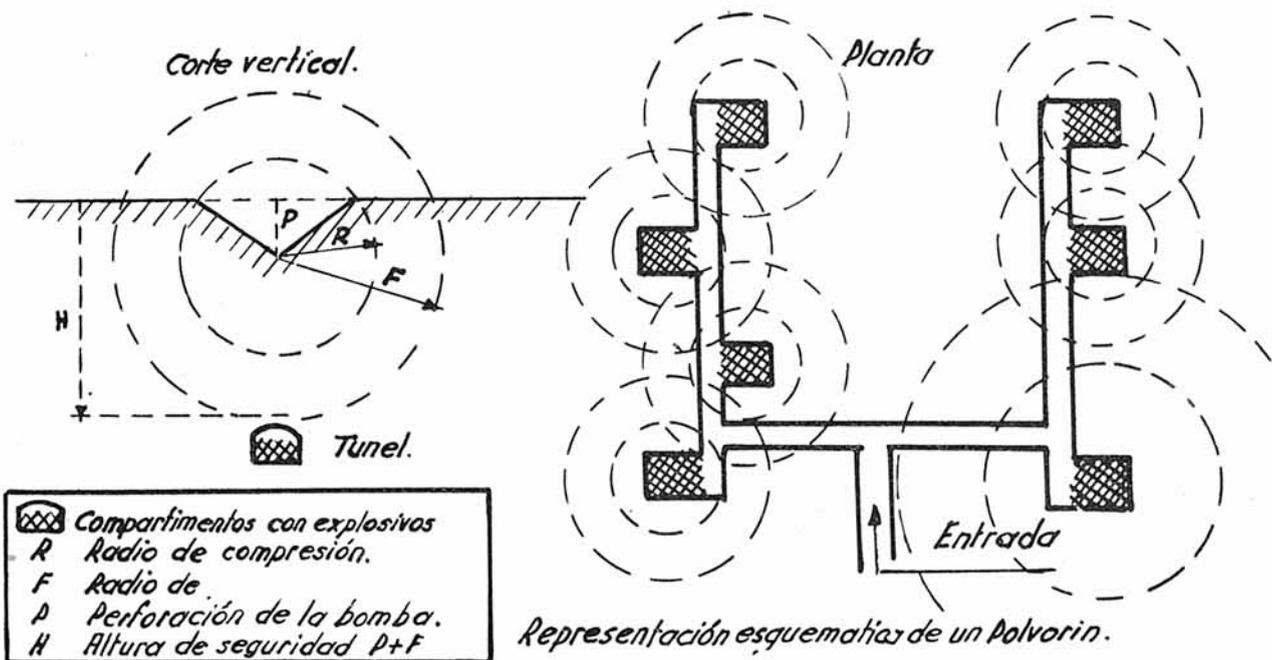


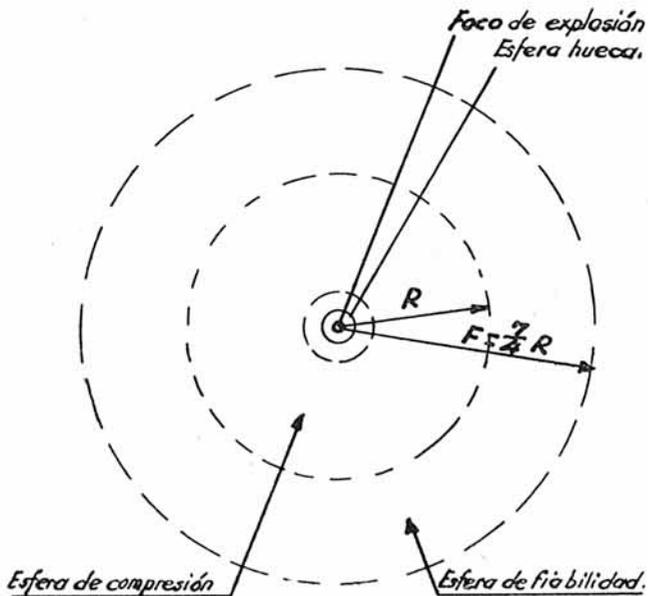
Fig. 1.

pondiente a una serie de petardos colocados unos a continuación de otros, son ejemplos comprensivos de las cargas concentrada y alargada.

Para el estudio aislado de cada una de estas cargas, imaginemos que colocamos la primera en el interior de un medio, constituyendo lo que se llama un "hornillo". Al hacer explosión pueden ocurrir tres casos: que sus efectos explosivos alcancen francamente al exterior; que la esfera imaginaria en que se desarrollan dichos efectos sea tangente al citado medio exterior, o que alcancen sólo a parte del medio en que está contenida la carga, y por consiguiente, sin proyección exterior de materiales, ya que no se rompe la trama de sus superficies.

En los tres casos aludidos, la gran cantidad de gases que se desarrollan, aunado a su elevada temperatura, se traducen en presiones y esfuerzos de rotura, que teóricamente crean una serie de esferas de radio cada vez mayor, que progresivamente van decreciendo en presión hasta llegar a un límite en que son nulos sus efectos, por contrarrestar en aquel momento la resistencia que opone el medio a la expansión de los gases, traducida en esfuerzos de rotura.

Tengamos en cuenta, pues (fig. 2), un *foco de explosión*, que es el centro de todas las esferas de presión aludidas y que se corresponde con el de la carga explosiva; una *esfera hueca*, desde luego la de menor radio, y producida por la expansión de los gases que comprimen las paredes de la cámara en que está contenida la carga; una *esfera de explosión o de compresión*, en la que se dejan sentir los efectos de rotura, y una esfera de *friabilidad* o de *comoción*, en donde se dejan sentir solamente los efectos de agrietamiento del terreno.



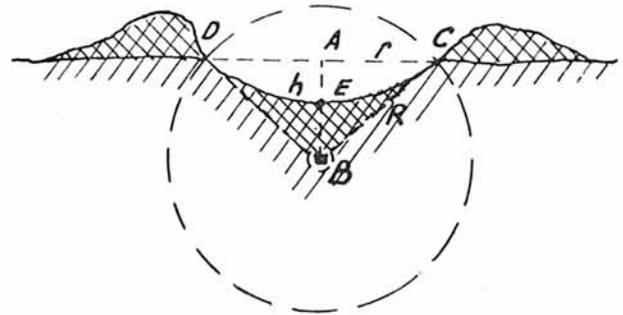
Esquema de las esferas explosivas de un hornillo

Fig. 2.

En el caso particular de un hornillo, en que los materiales se proyectan al exterior por efecto de la explosión, se forma un embudo que no es el teórico, ya que los materiales se depositan de nuevo en el mismo, decreciendo la profundidad y constituyendo asimismo en torno al embudo

a modo de un reborde, denominado *labios* o *bordes del embudo*.

Supongamos, pues, que el hornillo B (fig. 3), de esfera de compresión de radio R, corta al terreno en D y C. Teóricamente, hemos dicho, formará el embudo DBC; pero como parte del material lanzado caerá sobre el mismo hornillo y parte en las inmediaciones, quedará reducido a los bordes D y C y al embudo aparente DEC.



Esquema de un hornillo

Fig. 3.

Y siguiendo adelante en nuestro trabajo, vamos a reparar en el triángulo rectángulo ABC de la figura 3, que nos va a servir para establecer las relaciones existentes entre varios factores del hornillo, que nos interesarán grandemente cuando más adelante los relacionemos con la carga explosiva. Nos referimos a R = radio de compresión o explosión; h = altura del hornillo o línea de mínima resistencia (distancia del hornillo a la superficie del terreno), y r = radio de la base del embudo; en el triángulo citado ABC vemos que $R^2 = h^2 + r^2$; ahora bien: llamando a n índice del hornillo, que es igual a $\frac{r}{h}$, tendremos $n = \frac{r}{h}$; de donde $r = nh$, y sustituyendo

$$R = \sqrt{h^2 + n^2 h^2} = h \sqrt{1 + n^2} \quad [1]$$

Los hornillos pueden ser de diversos tipos, atendiendo a las relaciones existentes entre la altura h y radio r del embudo, expresándose en el cuadro siguiente:

- Cuando sea $r = h$ " $\frac{r}{h} = n = 1$ (hornillo ordinario).
- " $r > h$ " $\frac{r}{h} = n > 1$ (hornillo recargado).
- " $r < h$ " $\frac{r}{h} = n < 1$ (horn.º subcargado).
- " $r = 0$ " $\frac{r}{h} = n = 0$ (humazo máximo).

Analicemos ahora ligeramente los cuatro casos que se nos pueden presentar en las explosiones:

Hornillo ordinario.—Como se acaba de expresar en el cuadro anterior, cuando n (índice de hornillo) sea igual a 1 llamaremos hornillo ordinario a la explosión, y por tanto, poniendo en la fórmula [1] su valor, tendremos:

$$R = h \sqrt{1 + 1^2} = h \sqrt{2} \quad [2]$$

y como aunque exclusivamente por experiencias se ha demostrado que el radio de friabilidad, que llamaremos F, es

igual a $F = R \sqrt{2}$, sustituyendo R por su valor obtenido con anterioridad, tendremos:

$$F = R \sqrt{2} = h \sqrt{2} \sqrt{2} = 2h \dots [3]$$

que nos dice que la onda o radio de friabilidad, es doble que la línea de mínima resistencia h a que va colocada la carga explosiva.

Ahora, teniendo en cuenta que los efectos explosivos de una carga C vienen expresados por la fórmula

$$C = h^3 g m \dots [4]$$

en que g y m son coeficientes que dependen, el primero, de la potencia del explosivo, y el segundo, de la resistencia que el medio opone a su rotura (tablas I y II), fácilmente podemos venir en conocimiento del radio R de la esfera de compresión, para saber hasta dónde alcanzan los efectos destructores de una carga explosiva enterrada, y del radio F de friabilidad, para conocer el alcance del agrietamiento.

$$C = h^3 g m; \quad h = \sqrt[3]{\frac{C}{g m}} \dots [5]$$

y como [3]

$$F = 2h; \quad F = 2 \sqrt[3]{\frac{C}{g m}} \dots [6]$$

TABLA I

EXPLOSIVOS	g.
Pólvora ordinaria.....	1,00
Dinamita.....	0,62
Acido pícrico.....	0,58
Pólvora negra.....	0,56
Trilita.....	0,50
Gelatina explosiva.....	0,16

TABLA II

NATURALEZA DEL MEDIO	m.
Tierra ligera.....	1,20 a 1,60
Arena.....	1,75 a 1,90
Mamposería mala y mediana.....	1,85 a 2,50
Tierra mezclada con cantos.....	2,45
Mamposería buena.....	3,00 a 3,25
Mamposería antigua y de cemento.....	3,65 a 4,24
Roca de las distintas clases.....	2,50 a 5,60
Hormigón endurecido.....	7,00

Y por último, observaremos la figura 4, que nos ayudará a completar la caracterización del hornillo ordinario. En el triángulo HAB , el cateto $AB = CD = f$ lo llamaremos radio de friabilidad exterior; la hipotenusa $HB = HC = F$ es el radio de friabilidad, y $h = HA$, línea de mínima resistencia.

En dicho triángulo tenemos $f^2 = F^2 - h^2$; de donde $f = \sqrt{F^2 - h^2}$; y sustituyendo en esta fórmula F por su valor [3], tendremos:

$$f = \sqrt{4h^2 - h^2} = \sqrt{3h^2} = h\sqrt{3} = 1,732h \dots [7]$$

Para el valor del radio r en el triángulo BAC (fig. 3),

$$r = \sqrt{R^2 - h^2},$$

y como por [2],

$$R = h\sqrt{2}; \quad r = \sqrt{2h^2 - h^2} = \sqrt{h^2} = h,$$

que es lo que se estipula para ser hornillo ordinario: $r = h$.

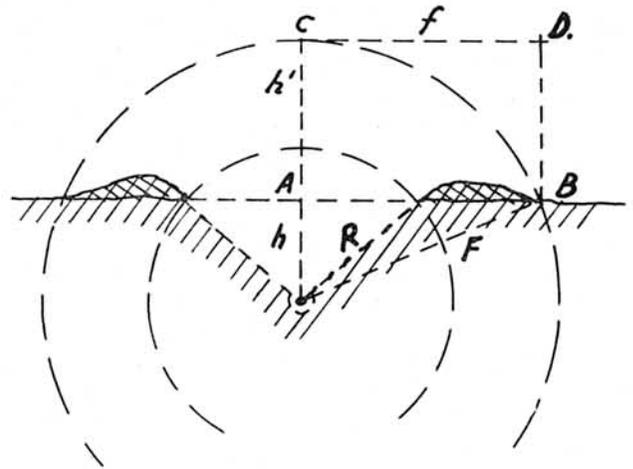


Fig. 4.

Hornillos recargados y subcargados.—De la orientación que dimos en el preámbulo de este trabajo se desprende la poca aplicación que dichos hornillos tienen para Aviación en lo que se refiere al cálculo de polvorines, que, como dijimos, se aprovecha de las propiedades del humazo; pero, por el contrario, es interesante para las tropas de Aviación que en los cometidos de hostigamiento efectuados por paracaidistas se verán obligados a minar ferrocarriles, viaductos y en general objetivos concretos y limitados de carácter militar, que con profusión precisarán el enterramiento de cargas que exploten formando hornillos recargados.

Si nos condicionasen la producción de un hornillo de un determinado índice n , calcularíamos la carga C' que se necesita a una profundidad de h metros, multiplicando la carga C que a esa profundidad lo produce ordinario por un coeficiente que llamaremos N , y cuyo valor función desde luego del índice n , es, según Dambrun:

$$N = (\sqrt{1 + n^2} - 0,41)^3;$$

es decir, que

$$C' = C N = g m h^3 (\sqrt{1 + n^2} - 0,41)^3 \dots [8]$$

$$C' = g m (h \sqrt{1 + n^2} - 0,41)^3;$$

y llamando a la expresión

$$(h \sqrt{1 + n^2} - 0,41) = H \dots [9]$$

tendremos, por último:

$$C' = g m H^3 \dots [10]$$

expresión que nos dice que si una carga C' , a la profundidad h , produce un hornillo de índice n , a la profundidad

$$H = (h \sqrt{1 + n^2} - 0,41)$$

lo produciría ordinario.

Con estas fórmulas podremos deducir las cargas que se necesitan para producir los hornillos de índice n que oscilen entre 1 y 3, que son valores para los que está de acuerdo la experiencia con la fórmula de Dambrun.

Y teníamos razón cuando resaltábamos lo ameno y práctico del campo de los explosivos, quizá influenciados por la seguridad de no poder pasar por alto sin dedicar unos párrafos (este es el caso) a otros conceptos, a otras formas

de aplicación que, íntimamente relacionadas con lo anterior, van a ocupar nuestra atención.

Si por un accidente fortuito un polvorín subterráneo explota, teóricamente, aun estando repleto de carga, debe producir un humazo; es decir, no originar proyecciones exteriores si su cálculo se ha basado y fundamentado en las propiedades del mismo; ahora bien, ¿no valdrá la pena tratar de las destrucciones que derivadas de otras clases de hornillos se han de exigir, sobre todo en puntos neurálgicos, a las Tropas de Aviación y a los paracaidistas? Se comprende que sí, y no vamos, como parece lógico, a enumerar sus distintas posibilidades, ya que cuanto se refiere a las mismas como tales fuerzas de choque, será tratado con la necesaria extensión a su debido tiempo.

Vamos a descender a un detalle concreto. Las misiones de estas tropas del Aire son variadas, pero su armamento y sus medios no han de complicarse en la misma proporción. Puede muy bien un medio llenar diferentes cometidos. La granada de mano ofensiva, la bomba de que irá ampliamente dotado y con la que justifica su actuación en el combate, puede no ser la clásica, sino la especial de las tropas paracaidistas, la que devuelve simplísimamente, por su fácil concepción, la carga explosiva y permite, de consiguiente, con la de varias, resolver los distintos problemas de destrucciones que se nos planteen, pero teniendo en cuenta que no es la complicada fórmula

$$C = m g h^3 (\sqrt{1+n^2} - 0,41)^3$$

la que vamos a emplear, sino la más simple y de fácil cálculo, $C = g d \alpha r^3$, en que α es un coeficiente que depende del explosivo, que para la trilita, explosivo nacional, $\alpha = 1$; g , otro que depende del medio; d , de la mejor o peor colocación de la carga, y r , que es el radio de ruptura en metros, para C expresado en kilogramos.

En la figura 5 se representan los valores de d , que pueden oscilar entre 1 y 4,5, según que el ataque sea mejor o peor, y en la tabla III, los valores de g para valores de r determinados.

TABLA III

MEDIOS	Valores de g cuando r está comprendido entre	
	0,90 a 1,50 metros	1,50 a 2 metros
Roca blanca, mampostería mala o muros de ladrillo.....	3,00	3,00
Roca dura, sillería, mampostería buena u hormigón.....	2,95	3,4
Roca dura, sillería, mampostería buena u hormigón cuando soporta grandes presiones.....	5,14	4,42
Hormigón armado.....	7,9	6,8

Supongamos que queremos volar el puente señalado en la figura 6, que tiene una anchura de 3,60 metros, con bóveda de mampostería, en que se colocan las cargas de trilita, de 0,60 metros de espesor.

Aplicando la fórmula $C = \alpha g d r^3 = 1 \cdot 4,8 \cdot 4,5 \cdot 0,6^3$, igual 4,45 kilogramos.

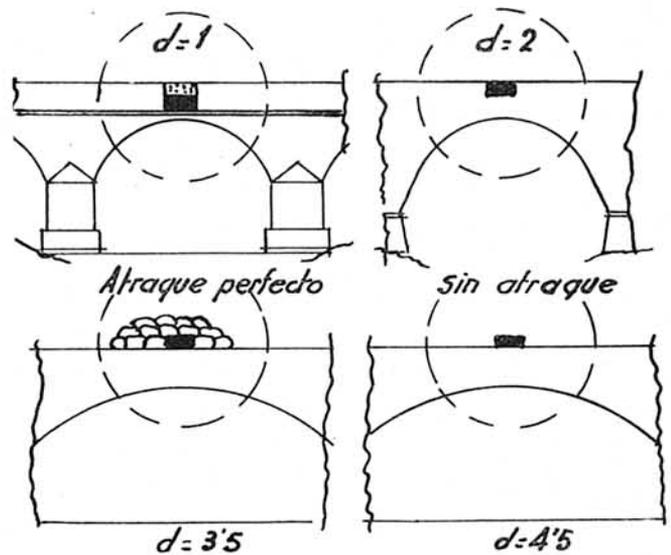


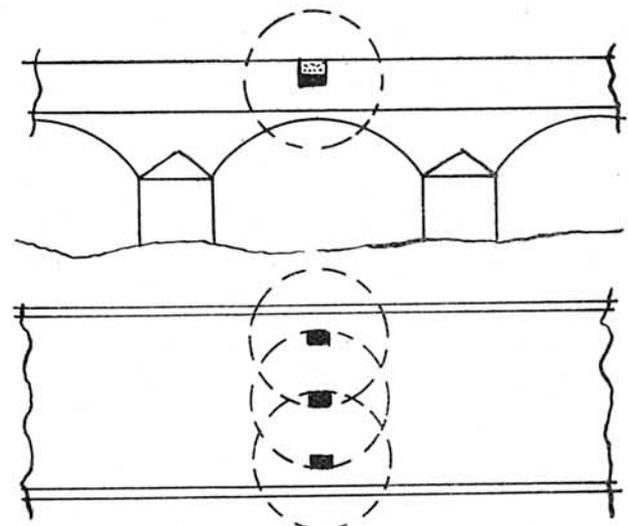
Fig. 5.

Ahora bien: con esta carga volaríamos una dimensión de 1,20 metros, es decir, el límite adonde alcanza el diámetro de explosión; como son 3,60 metros de puente, colocaríamos las tres cargas necesarias a 1,20 metros entre sí, haciendo falta un total de explosivo de

$$C_t = C \cdot 3 = 13,35 \text{ kilogramos,}$$

explosivo que puede extraerse sin riesgo de las bombas ideadas con esta finalidad, y en la concepción de las cuales trabajamos en la actualidad.

Humazo máximo.—Si en un hornillo subcargado, del tipo que antes hemos estudiado, se va aumentando el valor de h , irá disminuyendo en la misma medida el valor de r , hasta el momento en que por ser h igual al radio de explosión R , $h = R$, sea $r = 0$. Es el instante en que la fuerza resistente del medio equilibra la presión ejercida por los gases producto de la explosión; es decir, que los esfuerzos de rotura van decreciendo gradualmente hasta que en su lí-



Esquema de la colocación de las cargas explosivas para voladura de puentes.

Fig. 6.

mite son tangentes al medio externo. Se trata de un hornillo que recibe el nombre especial de "humazo máximo".

Siguiendo adelante, y si

$$r = 0; \frac{r}{h} = n = 0,$$

y por tanto, la fórmula [9]

$$H = h \sqrt{1 + n^2} - 0,41,$$

se nos convertirá en

$$H = h \sqrt{1 - 0,41} = h (1 - 0,41) = 0,59 h, \quad [11]$$

que nos proporciona el valor de la línea de mínima resistencia h para un hornillo que se haya transformado en humazo máximo. Sustituyendo este último valor en la fórmula [4], tendremos:

$$C'' = 0,59^3 h^3 g m = 0,20 g m h^3 = \frac{1}{5} C, \quad [12]$$

lo que nos da el valor de la carga que a una profundidad h originará un humazo máximo, y que es la quinta parte, como claramente se desprende, de la que a la misma altura h produce un hornillo ordinario. De otro modo, a la fórmula [12] podemos hacerla adoptar la siguiente expresión:

$$C'' = g m \left(\sqrt[3]{\frac{1}{5}} h \right)^3 = g m \left(\frac{1}{1,71} h \right)^3,$$

cuyo valor con errores inapreciables se aproxima a:

$$C'' = g m \left(\frac{4}{7} h \right)^3,$$

que comparada con la [10] nos dice que una carga que obra como hornillo ordinario a una profundidad h se comporta como humazo para todas las profundidades H , cuya línea de mínima resistencia sea $7/4$ de h , o superior a este valor. Efectivamente,

$$C'' = g m \left(\frac{4}{7} h \right)^3 \quad \text{y} \quad C' = g m H^3,$$

dividiendo ordenadamente

$$\frac{C''}{C'} = \left(\frac{4/7 h}{H} \right)^3$$

y suponiendo

$$C'' = C', \quad (4/7 h)^3 = H^3, \quad 4/7 h = H \quad \text{y} \quad h = 7/4 H.$$

A continuación, y en la tabla IV, se dan los valores del coeficiente N de Dambrun en función del índice del hornillo n calculados por la fórmula ya conocida

$$N = h \left(\sqrt{1 + n^2} - 0,41 \right)^3:$$

TABLA IV

n	N	n	N	n	N
0,10 - 0,21		1,10 - 1,25		2,10 - 7,00	
0,20 - 0,23		1,20 - 1,52		2,20 - 8,10	
0,30 - 0,26		1,30 - 1,86		2,30 - 9,25	
0,40 - 0,30		1,40 - 2,25		2,40 - 10,50	
0,50 - 0,35		1,50 - 2,69		2,50 - 11,86	
0,60 - 0,45		1,50 - 3,22		2,60 - 13,40	
0,70 - 0,53		1,70 - 3,80		2,70 - 15,07	
0,80 - 0,66		1,80 - 4,50		2,80 - 16,80	
0,90 - 0,82		1,90 - 5,25		2,90 - 18,75	
1,00 - 1,00		2,00 - 6,08		3,00 - 20,80	

En el bombardeo aéreo, en la destrucción de vías de comunicaciones y en las garantías que queramos adoptar en relación con la mayor o menor seguridad del almacenamiento de explosivos en los polvorines, hemos de tener en cuenta no solamente el radio de friabilidad exterior

$$F = h \sqrt{1 + 2 n^2},$$

el radio de friabilidad interior

$$f = h \sqrt{2 \pm 2 n^2}$$

y la profundidad del embudo aparente

$$p = \frac{1}{3} h (2 n - 1)$$

para valores de n comprendidos entre 0,5 y 3, sino la penetración de las bombas lanzadas, que, como sabemos, es función del medio en que penetra, de la velocidad de caída, función a su vez de la altura, y del coeficiente balístico de la misma, y que haremos depender exclusivamente de su diámetro.

Los efectos explosivos de las bombas es natural que sean muy variables y no pueden darse *a priori* resultados sobre penetración y destrozos completamente exactos; pero existen fórmulas que aproximadamente nos proporcionan cuantos datos podamos apetecer.

Fácilmente se comprende que la penetración de las bombas es función de la fuerza viva con que éstas inciden en el medio impactado, variando para un mismo medio con el tipo de bombas empleado.

La fórmula de la energía cinética, o fuerza viva,

$$\frac{1}{2} m V^2 = \frac{P V^2}{2 g},$$

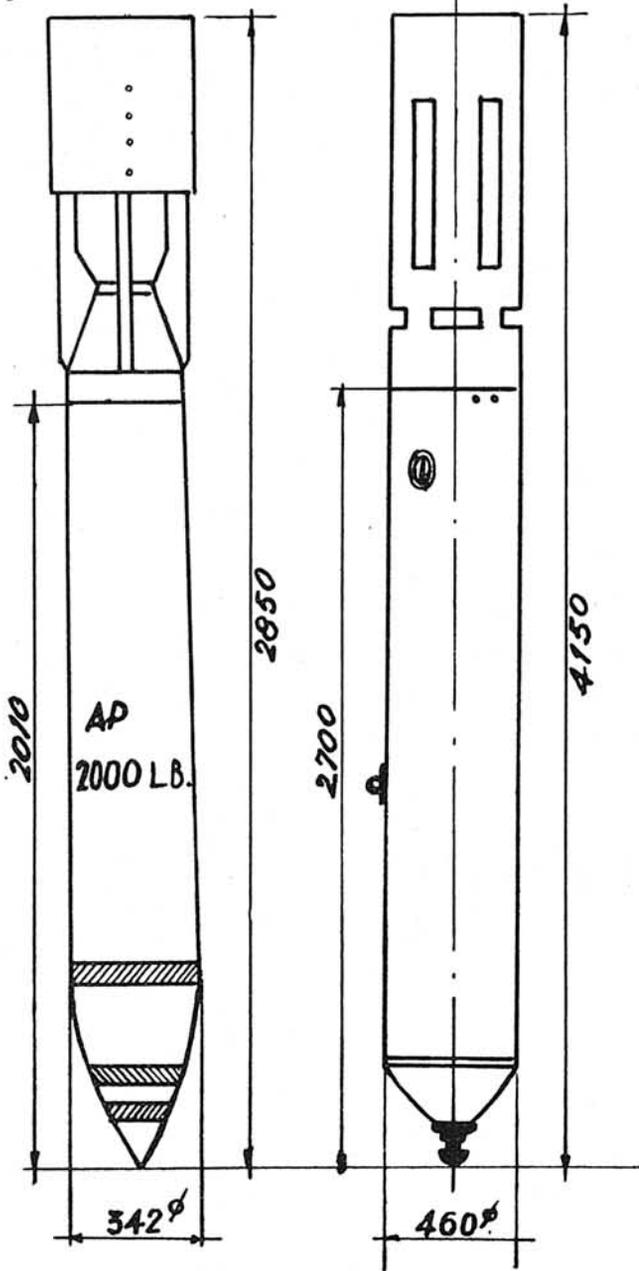
nos dice que ésta será tanto mayor cuanto mayor sea el peso de la bomba y velocidad de la misma, factor este último dependiente de la altura de bombardeo; pero existe un elemento integrante de la penetración que no figura en la citada fórmula, que es el diámetro o sección del proyectil, traducido en una forma más o menos fuselada, y de la que depende en gran parte dicha penetración.

Es decir, que dependiendo la penetración de varios factores, se han de tomar para valores de éstos, en el cálculo de profundidad de polvorines, los máximos admitidos por el estado actual de la Aeronáutica. Las alturas de bombardeo corrientemente han de oscilar de 2.000 a 8.000 metros; los pesos de las bombas han evolucionado desde los clásicos de 50, 100 y 250 kilogramos, hasta las modernas de 4.000 kilogramos, y como tipo de bomba perforante, en cuanto a su sección, mencionaremos la inglesa HC-2.000 LB de 2.000 libras (fig. 7), que tiene una sección de 460 milímetros y 625 kilogramos de carga de amatol, o bien la AP 2.000 LB de 2.000 libras con una sección de 342 milímetros y 80 kilogramos de trilita.

Se desprende de lo que llevamos dicho que la penetración no es sino un trabajo traducido en un camino recorrido en el medio impactado, trabajo que es igual a $K \cdot S$,

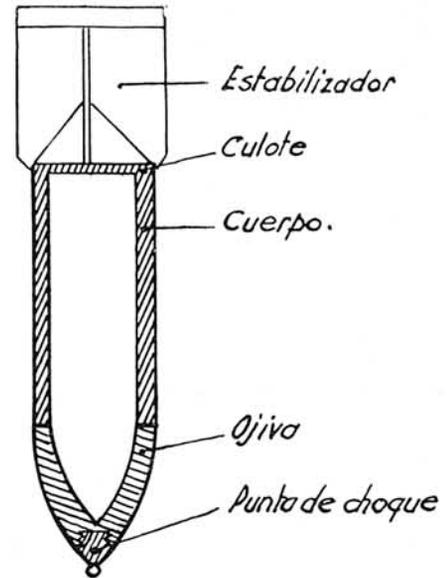
Fig = 7

HC-2000.LB.



He ahí la razón de dotar a las bombas perforantes de una punta de acero bien templado, sin otro objeto que aguantar la fatiga a que ha de someterse esta porción anterior en el breve tiempo que trata de vencer la resistencia del blanco a dejarse penetrar (fig. 8).

Como gráficamente expresa la figura 9, en los primeros momentos del choque del proyectil contra el blanco la íntegra resistencia del mismo se opone a la penetración de



Sección de una bomba con ojiva de paredes resistentes y punta de choque.

Fig. 8.

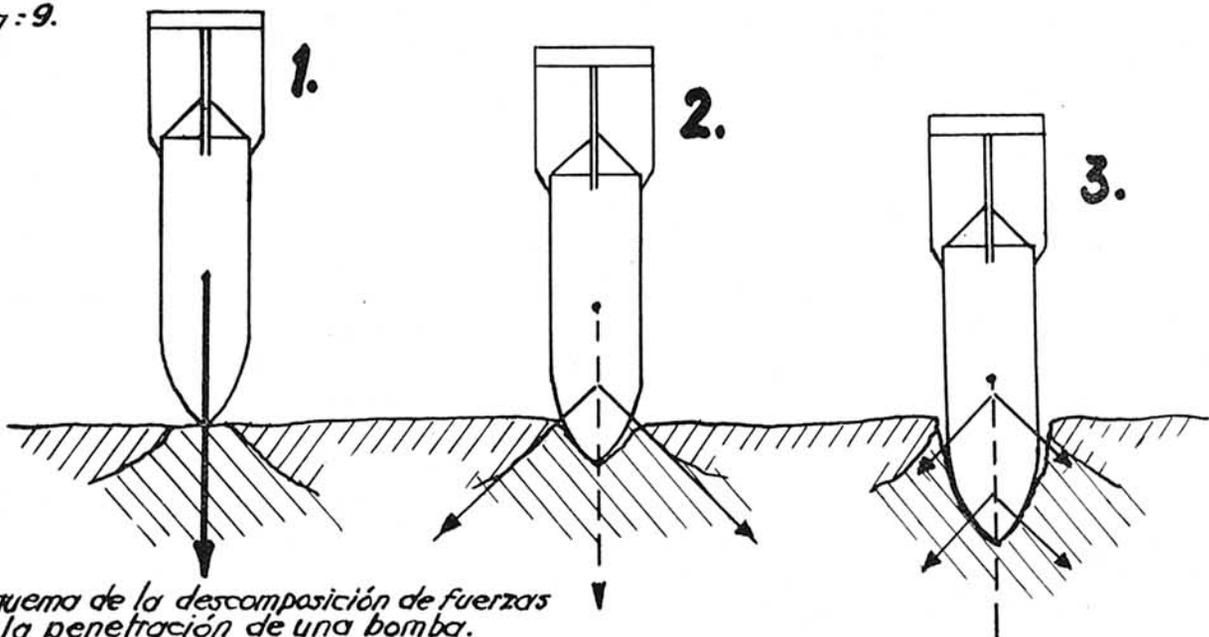
siendo K . la resistencia opuesta por el medio y S . el camino recorrido; efectuándose este esfuerzo hasta que

$$K \cdot S = \frac{m v^2}{2} = \frac{P \cdot V^2}{2g}$$

la bomba, y como entonces ésta no se apoya sino por su punta, quiere decir que la presión unitaria es mucho mayor que posteriormente, en que vemos que la misma resistencia del medio se reparte, no ya sobre un punto, sino sobre una superficie más o menos extensa, que hace decrecer en la misma proporción la presión unitaria.

Son numerosos los investigadores que han tratado de determinar, siquiera sea aproximadamente, la penetración tanto de las bombas de aviación como de los diferentes pro-

Fig-9.



Esquema de la descomposición de fuerzas de la penetración de una bomba.

yectiles a los cuales se pueden asimilar las anteriores. Así, en tanto Marre se preocupa exclusivamente de la perforación en las corazas preparadas al efecto mediante proyectiles artilleros, Rongerón nos adelanta ya resultados experimentales logrados por bombas de aviación de 250 y 500 kilos lanzadas desde 7.000 metros sobre placas acorazadas, en las que lograban penetraciones de 15,4 y 20,3 cms., respectivamente, mediante velocidad adquirida de 324 y 330 metros/segundo.

La penetración en hormigón la ha traducido también Brichler en fórmulas de acuerdo con los resultados experimentales; pero son las fórmulas de Parody las que más se aproximan a la realidad de los datos tomados de la experiencia, siendo, además, tan generales en su aplicación, que son las que vamos a emplear.

Llamando a la penetración de la bomba, en metros, X : $X = C \cdot K \cdot A$, donde C es un coeficiente balístico que viene determinado por $\frac{P}{1000 \cdot a^2}$, siendo P el peso de la bomba en kilogramos, y a el calibre en metros; K es una constante que depende del medio impactado (tabla V), y por último, A , que es un coeficiente función de la velocidad de caída de la bomba, y que viene expresado por la fórmula

$$A = \log \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{V}{100} \right)^2 \right),$$

siendo

$$V = \sqrt{2 g h};$$

es decir, que

$$X = C \cdot K \cdot A = \frac{P}{1000 a^2} \cdot K \cdot \log \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{V}{100} \right)^2 \right).$$

TABLA V

MEDIO	K.
Roca dura.....	0,44
Hormigón en masa.....	0,88
Roca semidura.....	1,00
Mampostería de ladrillo.....	1,63
Roca blanda.....	1,70
Piedra o grava apisonada.....	2,15
Arena.....	2,30
Arcilla con grava y arena.....	3,44
Maderas de pino y álamo.....	4,00
Tierra corriente.....	5,00
Tierra blanda, arena y arcilla.....	5,87
Arcilla húmeda.....	8,62

No son éstas las únicas fórmulas existentes para el cálculo de las penetraciones de las bombas de aviación, que, como antes hemos dicho, son de gran aplicación, lo mismo en el estudio de la posible adaptación de túneles o galerías subterráneas para polvorines, que en la determinación de los espesores que de determinado material son necesarios para resguardar los almacenes de explosivos de los efectos de un bombardeo aéreo.

Sin embargo, hemos de conformarnos con que los resultados del cálculo con las diferentes fórmulas, asimismo distintas entre sí, sean las más parecidas a la realidad, ya que, por otra parte, esa misma realidad sanciona en parecidas

circunstancias resultados tan dispares que nos hacen venir en conclusión de que no puede aplicarse siempre una fórmula general.

Así, según Justrow, los ejercicios prácticos demuestran que mientras una granada de mortero de 42 cms. de calibre y 1.000 kgs. de peso, animada de una fuerza viva de 6.000 toneladas-metros, apenas penetra un metro en un bloque de hormigón armado, una bomba de aviación del mismo peso, lanzada desde 2.000 metros, perfora 1,26 sobre idéntico medio; resultado que está de acuerdo con Parody.

Como resumen de cuanto llevamos dicho, parece necesario reseñar el cuadro VI de penetraciones; valores que son un término medio de las proporcionadas por las variables fórmulas, y para las cuales están de acuerdo los resultados experimentales; penetraciones que no son sino las transformaciones de la fuerza viva del proyectil en el momento del choque en trabajos de deformación, lo mismo del medio impactado que de los citados proyectiles.

TABLA VI

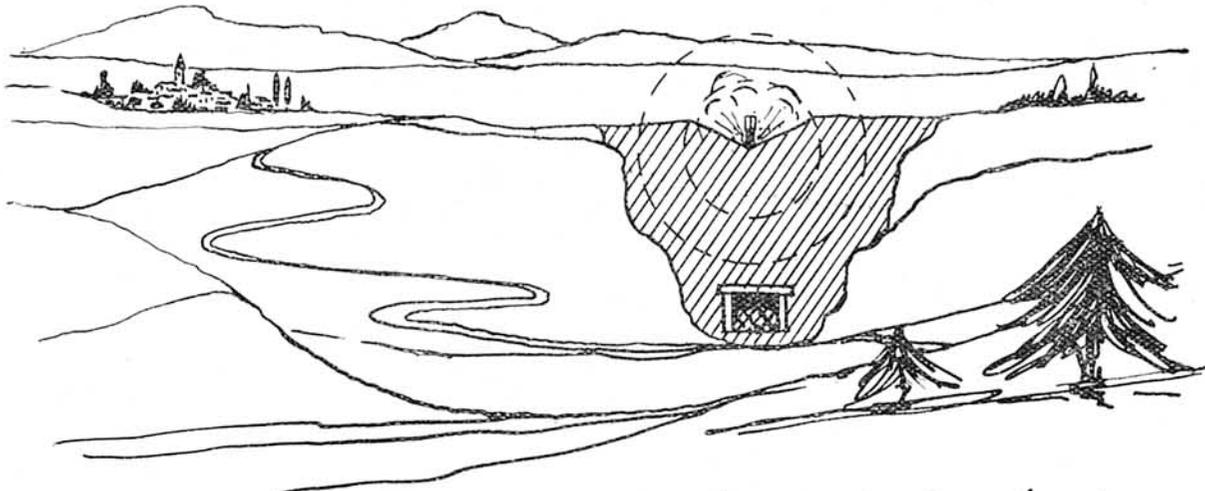
MEDIO IMPACTADO	PENETRACIÓN EN METROS PARA LAS BOMBAS DE				
	50	100	250	500	1.000
Roca dura.....	0,30	0,32	0,53	0,61	0,81
Hormigón armado.....	0,40	0,51	0,74	0,87	1,00
Hormigón en masa.....	0,60	0,64	1,10	1,26	1,62
Roca semidura.....	0,60	0,74	1,16	1,40	1,85
Roca blanda (yeso, margas)..	1,05	1,27	1,90	2,40	3,15
Arena o tierra media.....	1,38	1,96	2,40	3,17	4,25
Arcilla o tierra corriente....	3,12	3,68	4,60	6,90	9,20
Tierra blanda.....	4,00	4,40	7,33	8,28	11,04

Y para terminar, teniendo en cuenta que en el cálculo de la profundidad a que deben estar situados los polvorines debe ser condicionado al calibre superior de bombas posiblemente lanzadas, veamos, para mayor simplificación, un cuadro en que tengamos la penetración y radio de explosión, con una casilla igual que nos diga asimismo el espesor de diferentes medios necesario para asegurar un polvorín de la explosión de bombas de 1.000 kilos, tomadas en este caso, y que, como fácilmente se comprende (fig. 1), no es sino la suma de la penetración y radio de friabilidad F subsiguiente de la carga explosiva de la bomba.

TABLA VII

NATURALEZA de medio protector	Perforación en metros de las bombas de 1.000 kilogramos: $X = C \cdot K \cdot A$	Radio de friabilidad: $F = 2 \sqrt[3]{\frac{C}{g \cdot m}}$ [3] y [5]	Total capa protectora en metros
Roca dura.....	0,81	11,10	11,91
Hormigón armado.....	1,00	11,68	12,68
Hormigón en masa.....	1,62	11,96	13,58
Roca semidura.....	1,85	13,38	15,23
Roca blanda (yeso, margas, etc.).....	3,15	15,66	18,81
Arena o tierra media....	4,25	17,14	21,39
Arcilla o tierra corriente.	9,20	18,16	27,36
Tierra blanda.....	11,04	20,00	31,04

Es decir, que un polvorín situado en una galería cuyo terreno esté comprendido en la tabla VII, habrá que res-



Panoramica y corte esquemático del emplazamiento de un túnel para almacenamiento de explosivos.

Fig. 10.

guardarle de los efectos explosivos de las bombas de mayor calibre como hemos dicho antes, cuya carga explosiva se comportará como un hornillo a la profundidad que presente la penetración, y debiendo, como se comprende, estar separado el explosivo almacenado del exterior por una capa o espesor que, como gráficamente se observa en la figura 1, es la adición de la penetración y radio de la esfera de vibración o friabilidad.

Supongamos, pues, que se trata de almacenar un explosivo que se quiere proteger contra los efectos de un bombardeo con bombas de 1.000 kilos. Si el polvorín está situado en un medio constituido por roca blanda, la penetración sería, aproximadamente, 3,15 metros (ver tabla VII), y ya entonces y sabiendo que las bombas de 1.000 kilos poseen una carga explosiva de 600 kilos, calcularíamos el radio de friabilidad F como si se tratase de un hornillo recargado a esa profundidad.

Como

$$F = 2 h [3] \quad \text{y} \quad h = \sqrt[3]{\frac{C}{g m}};$$

$$F = 2 \sqrt[3]{\frac{600}{0,50 : 2,50}} = 15,659 \text{ metros.}$$

en que, repetimos nuevamente, C es la carga explosiva y $g m$ son coeficientes dependientes de la naturaleza del explosivo y del endurecimiento del medio, dados por las tablas I y II, respectivamente.

Por consiguiente, el polvorín no sufriría efectos si los almacenes estuviesen a una profundidad superior a $P + F = 3,15 + 15,65 = 18,80$ metros.

Y con esto damos fin a una reseña de sumo interés para los que de más o menos cerca se relacionan con el problema, siempre palpitante, de los explosivos.

