Antiaeronáutica

La seguridad y la economía en los polvorines subterráneos

Por *Benjamín Llorca Gisbert*
Comandante de Ingenieros, Jefe del Servicio de Obras de la Zona Aérea de Baleares

La facilidad con que actualmente el Arma aérea puede llevar su acción ofensiva a cualquier punto del interior del país, impone la necesidad de proteger verticalmente los almacenes de bombas y explosivos. Por esta razón, los polvorines de la retaguardia, que hasta hace poco se proyectaban precisamente con cubiertas ligerísimas para evitar las proyecciones en caso de explosión, han de construirse subterráneamente si se les quiere sustraer a la acción del enemigo.

El cumplimiento de este precepto lleva consigo la construcción de un gran número de polvorines subterráneos, y ello plantea al Arma de Aviación el problema de llevar a cabo unas obras de gran volumen, muy costosas además por su naturaleza.

Expuesta de esta forma escueta la cuestión, si la construcción de polvorines subterráneos estuviera sujeta a leyes o principios inmutables por todos admitidos y sancionados por la práctica, sólo nos restaría aplicar las fórmulas de rigor y proyectar las formas y capacidades necesarias para proteger el número de toneladas de explosivo que en cada caso interesara al Mando. En realidad, el caso es bien distinto.

Para proyectar un polvorín protegido sólo conocemos, de una manera bastante cierta, la penetración y efectos de las bombas de aviación de distintos calibres en los diferentes medios: roca, hormigón, tierra, etc.; pero esto es sólo un dato para la resolución del problema planteado, y él nos dará la profundidad a que hay que colocar las galerías para que sean invulnerables a los bombardeos enemigos. Queda, sin embargo, por resolver todo cuanto se refiere a la seguridad interior, y he aquí dónde fácilmente pueden surgir las dudas o diferencias de criterio.

¿Cuál debe ser, ciertamente, la capacidad máxima en kilogramos de explosivo para cada almacén? ¿Cuál debe ser esta capacidad en relación con la naturaleza del explosivo? ¿A qué distancia hay que colocar un almacén de otro para que la explosión fortuita (incendio, sabotaje, etc.) de uno de ellos no provoque la destrucción o explosión del vecino, y así la de todo el polvorín? ¿Cuál es la verdadera influencia que tiene en el rayo de explosión la forma alargada de las galerías, y por ello la de las cargas, y el hecho de considerar la del almacén como centrada?

Creo muy difícil poder contestar a estas preguntas de un modo categórico, porque las fórmulas que hoy se emplean en cada país son muy distintas y todas pueden ser igualmente respetables, ya que, fundamentalmente, no existen datos experimentales que hayan impuesto una disciplina concreta. Así, pues, cada proyectista escogerá una fórmula más o menos atrevida. Unos sacrificarán el coste de la obra a su seguridad; otros preferirán ésta a aquél. ¿Quiénes tienen razón?

Estas interrogantes son las que nos mueven a escribir este modesto artículo, cuya finalidad es invitar a plumas más doctas que la nuestra a tratar esta cuestión, y con ello aporten la necesaria luz, o también a formar el ambiente propicio para crear una Comisión de experiencias cuyos trabajos llenen los innumerables huecos actualmente existentes en estas teorías.

Otros problemas lleva consigo el estudio de una obra de esta naturaleza: su situación respecto a los campos de Aviación, grado de humedad y ventilación, forma de las galerías, procedimientos de carga y transporte, etc.; pero todos éstos los consideramos sujetos a principios más concretos, y por ello de importancia secundaria.

Expuesto todo cuanto antecede, pasaremos a tratar en la forma somera que nos permite este trabajo, los principios fundamentales del problema que nos ocupa.

* * *

Perdónesenos quizá la improcedencia de recordar ciertos principios elementales. En la figura núm. 1 tenemos:

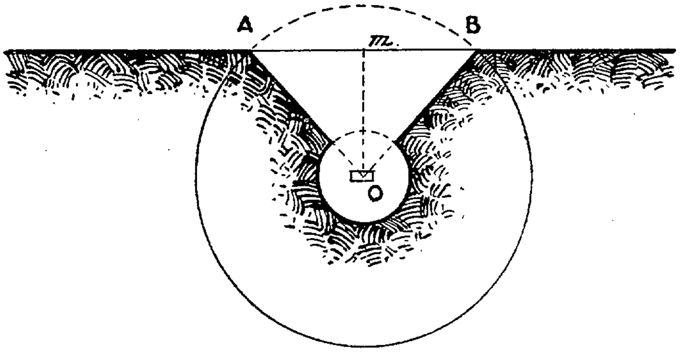
O — Situación de la carga.

O_m — Línea de mínima resistencia (l. m. r.). La designaremos por H.

AB — Base del embudo.

MB — Radio de la base del embudo. Lo designaremos por *r*.

*o*A — Radio de la esfera de compresión. Lo designaremos por R.



Llámanse hornillos ordinarios aquellos en los que $\frac{r}{H} = 1$; hornillo recargado si $\frac{r}{H} > 1$, y hornillo subcargado si $\frac{r}{H} < 1$. La relación $\frac{r}{H}$ la designaremos por n, llamándola índice del hornillo.

Si $r = o$, $n = \frac{r}{H} = o$, y ello significa que no habiendo radio de la base del embudo, el radio de explosión R es tangente al terreno e igual a la l. m. r. (H), con lo cual la carga situada en O no ha producido ningún efecto exterior. Este caso se distingue con el nombre de *humazo máximo*.

Profundidad de las galerías.—De acuerdo con los ingenieros Romani, Stellingwerff, Borsani, y Comité Central de Protección Antiaérea de Italia y Ministerio del Interior de Francia, para evitar los efectos de penetración y explosión de las bombas de aviación, bastan los siguientes espesores:

CLASE DE BOMBAS — Kilogramos	ESPESORES EN METROS			
	Tierra	Mampostería	H. masa	H. armado
10	3	0,75	0,40	0,25
50	5	1,50	1,00	0,70
100	8	2,50	1,70	1,10
500	12	4,00	2,10	1,40
1.000	20	6,00	3,00	2,00

Como en algunos casos convendrá situar el polvorín por su proximidad al campo de Aviación o en lugares donde se quiera evitar la proyección exterior, caso de explosión del polvorín, las galerías deberán estar situadas a una profundidad tal que su explosión produzca humazo máximo.

La fórmula de Dambrun para hornillos de índice cualquiera es:

$$c = g\,H^3 \left(\sqrt{1 + n^2} - 0.41\right)^3,$$

en la que c es la carga del explosivo en kilogramos y g un coeficiente que depende de la naturaleza del terreno (página 477, tomo II del Sojo).

Para humazo máximo

$$R = H \quad n = o$$

$$c = g\,H^3\,(0{,}59)^3 \approx 0{,}20\,g\,H^3.$$

Si suponemos un almacén para 50.000 kilogramos de explosivo y la naturaleza del terreno roca, $g = 4$, la profundidad de las galerías deberá ser

$$H = \sqrt[3]{\frac{50.000}{0{,}20 \times 4}} = \sqrt[3]{62.500} \approx 40 \text{ metros.}$$

Capacidad máxima de los almacenes.—Cuantos autores hemos consultado y proyectos visto para almacenes de esta naturaleza, y explosivos que detonen en masa y la transmitan a distancia (dinamitas, cheditas, bombas de aviación, granadas de mano, etc.), coinciden en fijar la capacidad máxima, por razones de seguridad interior, en 50 ó 60 toneladas de explosivo.

Admitiremos, con la mayoría, la capacidad máxima de 50.000 kilogramos de explosivos por almacén.

Las bombas de aviación contienen, con relación a su peso total, un número de kilogramos de explosivo variable con el tipo y nacionalidad de la bomba; para nuestros cálculos tomaremos ahora por ejemplo el de 50 por 100; así, pues, cada almacén podrá ser capaz para

$$\frac{50.000 \times 100}{50} = 100.000 \text{ kilogramos de peso total de bombas.}$$

Esta es una consideración de capital importancia, puesto que, fijado el peso máximo de bombas por almacén, el tipo de éstas (de 500, 250, 100 kgs., etc.) determinará, juntamente con la forma de su estibado, el volumen, y por ello la longitud del almacén; y este dato tendrá singular importancia en la fijación de la separación entre almacenes, como veremos a continuación.

Separación entre almacenes.—He aquí, a nuestra opinión, el punto más dudoso, y a su vez más importante, en esta clase de obras.

Si se tratara de construir un solo polvorín, el problema tendría una relativa importancia científica; pero tratándose de proteger muchos millones de kilogramos de explosivos, creemos que el asunto tiene verdadero interés, ya que de adoptar uno u otro criterio lleva consigo el ahorro de muchos kilómetros de galería, con la consiguiente economía para el Estado.

Para proyectar en verdaderas condiciones de seguridad tenemos que suponer que uno de los almacenes puede hacer explosión (incendio, sabotaje, etc.), y evitar que este accidente lleve consigo la destrucción o explosión del almacén vecino.

Ya sabemos la carga máxima por almacén:

$$C = 50.000 \text{ kilogramos;}$$

y si aplicamos la teoría de Dambrun, tan generalizada, tendremos que conformarnos con los datos experimentales obtenidos por dicho señor sobre los efectos obtenidos con hornillos de cargas concentradas sobre galerías de 1.ª, 2.ª y 3.ª, cuyas dimensiones son, respectivamente, de (2 × 2,10), (1,85 a 2 × 1), (1,30 a 1,50 × 1), con revestimiento de madera.

Escogiendo el caso más desventajoso dado por Dambrun para radios de ruptura límite de flanco en galerías de 2.ª, y en caso de humazo máximo $n = o$, tendremos la siguiente separación entre almacenes:

$$D_H = 2{,}66\ H.$$

Fórmula en la que H es la l. m. r. en la cual la carga del almacén obra como hornillo ordinario.

(Minas Militares.—Sojo.)

Para obtener esta distancia H podemos emplear la fórmula clásica:

$$C = g\ H^3 \quad ,, \quad H = \sqrt[3]{\frac{C}{g}},$$

o también la empleada por otros autores, la llamada fórmula italiana:

$$C = \alpha\ .\ m\ .\ H^3 \quad ,, \quad H = \sqrt[3]{\frac{C}{\alpha\ .\ m}},$$

en la cual

C — Carga del explosivo en kilogramos.

α — Un coeficiente dependiente de la naturaleza del explosivo (1).

m — Un coeficiente dependiente de la naturaleza del medio.

(1)

CLASE DE EXPLOSIVO	VALORES DE α
Pólvora negra	0,56
Cordita	0,30
Trilita	0,24
Picrinita	0,20
Gelatina explosiva	0,16

He aquí un primer punto de duda, puesto que esta fórmula da para H valores superiores a los de Dambrun.

Aplicando la fórmula italiana en nuestro caso, tendremos:

$$\alpha = 0{,}24 \qquad m = 4 \text{ (roca)},$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{50.000}{4 \times 0{,}24}} = \sqrt[3]{\frac{50.000}{0{,}96}} = 38 \text{ metros.}$$

Aplicando la fórmula de Dambrun, se obtiene:

$$H = \sqrt[3]{\frac{c}{g}} = \sqrt[3]{\frac{50.000}{4}} = 23{,}20 \text{ metros.}$$

Véanse los distintos valores del radio de ruptura, es decir, las separaciones entre almacenes, empleando una u otra fórmula:

Dambrun:

$$D_H = 23{,}20 \times 2{,}66 = 61{,}7 \text{ metros.}$$

Fórmula italiana:

$$D_H = 38 \times 2{,}66 = 107{,}68 \text{ metros.}$$

No paran aquí las dudas del proyectista. El radio de ruptura es, según Dambrun, 2,66 H; pero la Escuela de Minas de Versalles admite como valores para el radio de ruptura límite para galerías de 2.ª el valor de $D_H = 1{,}83$ H; es decir, según dicha Escuela, el radio de ruptura es en este caso 1,45 veces menor que el anterior. ¿Quién está en lo cierto?

Queda otro punto por aclarar. Tanto Dambrun como la Escuela de Versalles han deducido sus fórmulas por experimentos hechos con hornillos y galerías de 2.ª (1,85 a 2 $\times$ 1); pero las galerías que forman los almacenes tienen dimensiones mayores y su revestimiento no es de madera; los efectos de la esfera de ruptura serán, pues, diferentes. Las fórmulas que en realidad debiéramos emplear sólo podrían deducirse con datos experimentales.

Cabe también la consideración de que cuanto llevamos dicho se refiere a cargas centradas, y en realidad, la forma alargada de los almacenes hace que la carga tenga también esta forma y, por tanto, sus efectos sean menores que los obtenidos al considerar la carga como centrada.

Sobre esto sólo podemos decir que la experiencia ha demostrado que si la longitud del almacén (por tanto, la de carga) fuese cinco veces mayor que la línea de mínima resistencia correspondiente al hornillo ordinario con la misma carga concentrada, los almacenes podrían estar separados, sin peligro alguno, una distancia igual al radio de explosión.

En nuestro caso obtendríamos la longitud de la línea mínima de resistencia para $n = 1$ de la siguiente forma:

$$\left.\begin{array}{l} C = g\ H^3 \\ g = 4 \end{array}\right\} \quad H = \sqrt[3]{\frac{50.000}{4}} \approx 24 \text{ metros.}$$

El radio de explosión será:

$$R = H\sqrt{2} = 24 \times 1{,}41 = 34 \text{ metros.}$$

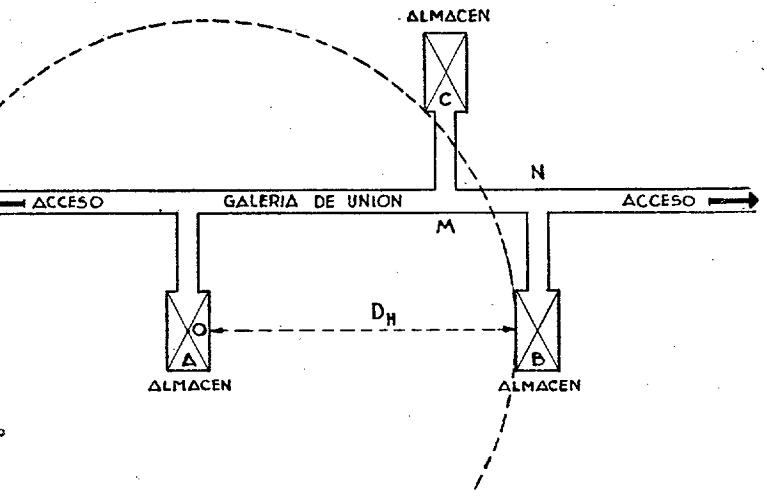
Luego para poder separar los almacenes sólo 34 metros, necesitaríamos dar a los mismos una longitud de $5 \times H = 5 \times 24 = 120$ metros; y esta solución es inadmisible prácticamente, puesto que esta longitud de almacén, con la sección necesaria para poder efectuar con comodidad las operaciones de carga y descarga, representa un volumen que, si no se quiere tener en pura pérdida, caben en él muchas más bombas de las que corresponden a los 50.000 kgs. de explosivo, *cifra fijada como tope por las otras consideraciones ya indicadas.*

La longitud práctica de los almacenes oscilará entre los 20 y 40 metros. Véase, pues, cuán lejos estamos de poder considerar las cargas de estos almacenes como cargas alargadas para los efectos del radio de ruptura mínimo.

Si se quisiera obtener una exactitud mayor, una vez deducida la longitud del almacén, podrían aplicarse las fórmulas que nos dan para una determinada longitud de carga los ejes del elipsoide de ruptura; pero en la práctica se consideran las cargas del almacén como centradas, obteniendo de este modo la distancia D_H a que deben estar separados los almacenes.

Puede hacerse una reducción de estas distancias si consideramos la carga del almacén concentrada en su centro de gravedad y trazamos el círculo indicado en la figura 2.ª; entonces el almacén B puede sustituirse por el C, que acorta la longitud de la galería en la distancia MN, y queda, sin embargo, fuera de la acción del radio máximo de ruptura del almacén A. De todas formas, la distancia MN será siempre pequeña.

Naturalmente, ante la diversidad de opiniones, el proyectista adopta el sano criterio de colocarse en el caso más des-



favorable; pero esto conduce a longitudes de galerías de circulación exageradas en cuanto el número de bombas que haya que almacenar sea un poco grande. Aplíquense las fórmulas expuestas a algún caso concreto y se comprobará esta circunstancia, y se verá, además, el gran número de metros cúbicos de excavación necesarios, que, juntamente con los revestimientos y otros elementos de construcción indispensable, dan lugar a presupuestos de un número de millones verdaderamente alarmante.

Supongamos que tratamos de proteger diversas clases de bombas, con un peso total de 5.000 toneladas. Vamos a hacer un ligero tanteo aplicando las fórmulas ya expuestas para venir en conocimiento del coste aproximado de las obras.

Profundidad de las galerías.—Ya vimos que si se quiere evitar proyección exterior han de situarse a 40 metros de profundidad (suponemos terreno rocoso y la capacidad máxima de cada almacén para 50.000 kgs. de explosivo). Esta protección es muy superior a la que se requiere para evitar los efectos del bombardeo aéreo.

Número de almacenes.—Ya vimos que, suponiendo que cada bomba contenga un peso de explosivo igual al 50 % de su peso total, cada almacén podrá almacenar el número de kilogramos de bombas siguiente:

$$\frac{50.000 \times 100}{50} = 100.000$$

El número de almacenes necesarios será, por tanto:

$$\frac{50.000 \times 100}{100.000} = 50.$$

Este solo número ya nos indica la conveniencia de hacer varios polvorines, pues uno solo de esta naturaleza llevará consigo dificultades de ventilación y de emplazamiento, por la longitud de las galerías necesarias. La construcción de varios polvorines para una misma carga es más cara que la de uno sólo (más accesos, pozos de ventilación, etc., etc.).

Como nuestra finalidad es dar una idea aproximada del coste, seguiremos suponiendo un solo polvorín; pero repetimos que obtendremos con esto una cifra bastante menor que la real.

Volumen de los almacenes.—Suponiendo diferentes bombas, de 500, 250, 100, etc., kilogramos, los 5.000.000 de kilogramos representan, aproximadamente, un volumen de 8.000 metros cúbicos. El estibado de las bombas y el espacio necesario para su manejo hacen que el espacio útil por almacén no sea muy superior al 40 %; por tanto, los 8.000 metros cúbicos necesarios requerirán:

$$\frac{8.000 \times 100}{40} = 20.000 \text{ m}^3.$$

Longitud de las galerías de unión.—Aplicando la fórmula italiana, ya vimos que la separación entre almacenes era de 107 metros. Tomando solamente $D_H = 100$, los 50 almacenes necesitan:

$$50 \times 100 = 5.000 \text{ metros de galería.}$$

Suponiendo que las galerías de circulación tengan una sección de 5,3 m² (sección muy modesta para la categoría de este polvorín. Conocemos proyectos aprobados por el Mando, de polvorines sólo para 350.000 kgs. de explosivo, en los que estas galerías son capaces para circulación de camiones y peatones).

El volumen de estas galerías será:

$$5{,}3 \times 5\,000 = 26.500 \text{ metros cúbicos.}$$

Hasta ahora tenemos como volumen:

$$26.500 + 20.000 = 46.500 \text{ metros cúbicos.}$$

Faltan por cubicar los accesos a los almacenes desde la galería de circulación, porque no es conveniente colocarlos en su inmediación, y además los almacenes habrán de hacerse con cámara de aire a su alrededor si se quiere tener la seguridad de evitar humedades. Todo esto aumentará el número de metros cúbicos de excavación.

Por estas razones fijaremos, muy por defecto con relación a la cifra que nos daría el proyecto real de este polvorín, en 60.000 el número de metros cúbicos de excavación.

Suponiendo un precio medio de 80 pesetas por metro cúbico, esta sola partida representa:

$$60.000 \times 80 = 4.800.000 \text{ pesetas;}$$

es decir, 5.000.000 de pesetas en cifras redondas.

Súmese a esto el coste de los caminos de acceso, de los revestimientos necesarios, de las explanadas de carga, de las galerías y pozos de ventilación, y se podrá tener una idea aproximada del coste total de la obra y de su duración.

CONCLUSIÓN.

Cuanto llevamos expuesto ha sido en el supuesto de construir protegidos todo el polvorín y galerías, que es en definitiva su construcción perfecta; pero, naturalmente, caben soluciones más económicas cuando se trate de proteger grandes cantidades de explosivo y se disponga de lugares adecuados (largas vaguadas con escarpados en uno de los lados) para situar los almacenes protegidos y las galerías de unión al exterior.

Cada solución tiene sus ventajas y sus inconvenientes, y por ello, repetimos, sería muy conveniente que una Comisión técnica fijara normas más concretas en este asunto, que todo nos autoriza a calificar de muy interesante.