

De la conversión de energía de ondas en energía de masas en las impulsiones (*)

Forma de Calcular un Calderín o una Chimenea de Equilibrio

Por EMILIO HERRANZ GARCIA

M.^a CARMEN DE ANDRES CONDE

Ingenieros de Caminos, C. y P.

Quando una brusca parada de las bombas en una impulsión da lugar a un golpe de ariete sin movimiento apreciable del agua, la Energía Cinética queda automáticamente transformada en Energía de Ondas, que se mueven a velocidades enormes y que se reflejan prácticamente en todo su valor, con lo que las depresiones y sobrepresiones máximas son muy semejantes.

Quando con la instalación de un Calderín o de una Chimenea de Equilibrio, se dispone de la masa de agua suficiente para absorber con su movimiento la Energía Cinética, las cosas suceden de manera mucho más asequible al cálculo, con velocidades de transporte de agua, y con fenómenos bien conocidos.

Lo que este trabajo trata de ofrecer es un método de cálculo del Calderín o de la Chimenea de Equilibrio necesarios, de tal manera que en su exposición aporte una clarificación de ideas sobre el fenómeno físico, y contribuya por su exactitud a la seguridad de las conducciones.

BASES DE CALCULO

En el movimiento del agua van a intervenir los siguientes factores:

Energía Cinética: E_c

Energía de Rozamiento: E_r

Energía de Gravedad: E_g

Energía de Expansión (calderín): $E_{c.x}$

Energía de Compresión (calderín): $E_{c.o}$

Siendo:

L = Longitud de la impulsión a partir del punto de encuentro de la tubería con el Calderín o Chimenea, en metros.

Q_1 = Caudal impulsado, en m^3/s .

Q_2 = Caudal máximo creado durante la compresión, en m^3/s .

\varnothing = Diámetro nominal de la tubería, en metros.

H = Altura geométrica desde el punto de encuentro de la tubería con el Calderín o Chimenea, hasta el nivel del agua de salida, al final de la impulsión, en metros.

V_0 = Volumen de aire en el Calderín, en régimen de impulsión, en metros cúbicos.

P_0 = Presión absoluta en el Calderín, en régimen de impulsión, en Kg/m^2 .

α = Coeficiente de cambio de volumen de aire en el Calderín.

h_0 = Altura geométrica desde el punto de encuentro de la tubería con la Chimenea, hasta el nivel de agua en ella, en régimen de impulsión, en metros.

S = Superficie de la sección de Chimenea, en metros cuadrados.

$|\Delta h_0|$ = Cambio de altura en valor absoluto, en la Chimenea, en metros.

B = Coeficiente de pérdida de carga, de Darcy, en s^2/m .

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de julio de 1979.

CONVERSION DE ENERGIA DE ONDAS EN ENERGIA DE MASAS

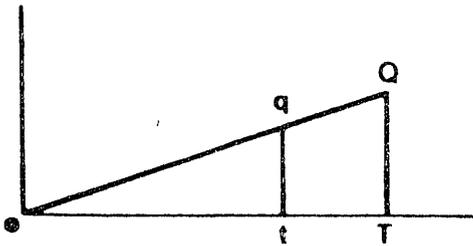
La Energía Cinética E_c

La expresamos así:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{65 L Q^2}{\varnothing^5} \quad [m \times Kg]$$

La Energía de Rozamiento E_r

Se supone que el caudal Q disminuye o aumenta hasta o desde cero, en forma lineal.



Se utiliza como ley de pérdidas de carga a lo largo de la tubería, la ley de Darcy:

$$J = B \frac{Q^2}{\varnothing^5}$$

En caso de Calderín:

El volumen de agua que se mueve a lo largo de la tubería es: αV_0

$$dE_r = \frac{Q}{T} t \times 1.000 \times dt \times B \left(\frac{Q}{T} t \right)^2 \times L$$

es decir, en cada instante un volumen diferencial recorriendo la longitud L .

Y sabiendo que:

$$\int_0^T \frac{Q}{T} t dt = \frac{QT}{2} = \alpha V_0$$

$$E_r = \frac{Q^3 B L}{T^3 \varnothing^5} \times 1.000 \times \frac{T^4}{4} =$$

$$= \frac{500 B Q^3 L}{\varnothing^5} \alpha V_0 \quad [m \times Kg]$$

En caso de Chimenea:

El volumen de agua que se mueve a lo largo de la tubería es: $S |\Delta h_0|$

$$E_r = \frac{500 B Q^2 L}{\varnothing^5} S |\Delta h_0| \quad [m \times Kg]$$

La Energía de Gravedad E_g

En caso de Calderín:

El volumen de agua que se mueve a lo largo de la tubería es: αV_0 .

Este volumen de agua vamos a subirlo desde un origen de medición de alturas situado a 10,33 metros por debajo del punto de encuentro de la tubería con el Calderín. Esto es necesario porque las Energías de Expansión y Compresión del Calderín se miden en presiones absolutas y por ello, las "caídas" y "subidas" tienen este origen obligado.

Así pues:

$$E_{gH} = \alpha V_0 \times 1.000 \times (H + 10,33) \quad [m \times Kg]$$

En caso de Chimenea:

Por una parte:

El volumen de agua que se mueve a lo largo de la tubería es: $S |\Delta h_0|$.

En este caso el origen de medición de alturas puede situarse en el punto de encuentro de la tubería con la Chimenea.

Así pues:

$$E_{gH} = S |\Delta h_0| \times 1.000 \times H \quad [m \times Kg]$$

Por otra parte:

El volumen de agua que se mueve a lo largo de la Chimenea: $S |\Delta h_0|$, da lugar a unas Energías de Gravedad, en relación con el origen de alturas establecido, de:

$$E_{gh_0} = S |\Delta h_0| \times 1.000 \times \left(h_0 \mp \frac{|\Delta h_0|}{2} \right) \quad [m \times Kg]$$

CONVERSION DE ENERGIA DE ONDAS EN ENERGIA DE MASAS

**Las Energías de Expansión: $E_{c,x}$
y de Compresión: $E_{c,o}$**

En caso de Calderín:

El volumen de agua que se mueve en el Calderín es: αV_0 .

siendo:

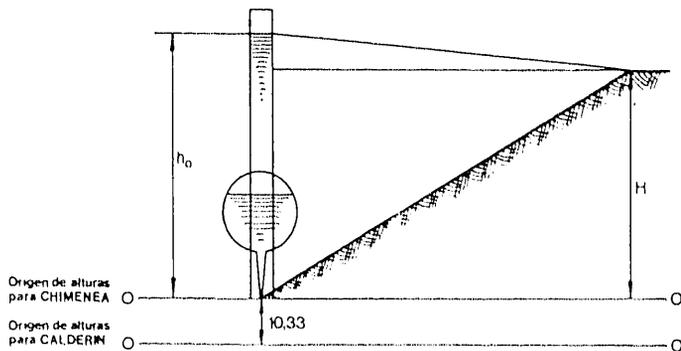
$$V = (1 \pm \alpha) V_0$$

$$P \cdot V^\gamma = P_0 V_0^\gamma$$

Así pues:

$$E_{c,x} = \int_{V_0}^V P dV = \pm \frac{P_0 V_0}{0,4} [1 - (1 \pm \alpha)^{-0,4}] \quad [m \times Kg]$$

METODO DE CALCULO



El cálculo se establece como un sencillo *Sistema de Ecuaciones de Equilibrio*, buscando la cantidad de agua necesaria para que nada de la Energía Cinética tenga que convertirse en Energía de Ondas.

Primera Ecuación.

Se refiere a la caída de nivel del agua en el Calderín o Chimenea desde el punto de régimen de impulsión hasta el punto de máxima depresión.

La Energía Cinética: $E_{r,1}$ existente, más la de Expansión: $E_{c,x,1}$ (calderín) o de Gravedad: $E_{g,1,h_0}$ (chimenea), han de quedar equilibradas con las Energías de Rozamiento: $E_{r,1}$ y de Gravedad: $E_{g,1,u}$, creadas por el agua que hacemos mover.

En caso de Calderín:

$$E_{c,1} + E_{c,x,1} = E_{r,1} + E_{g,1,u}$$

$$\frac{65 L Q_1^2}{\varnothing^2} + \frac{P_0 V_0}{0,4} \times [1 - (1 + \alpha_1)^{-0,4}] =$$

$$= \frac{500 B Q_1^2 L}{\varnothing^5} \alpha_1 V_0 + \alpha_1 V_0 \times 1.000 \times (H + 10,33)$$

y obtenemos α_1 y por tanto V_1 y P_1

$$\text{pues } V_1 = (1 + \alpha_1) V_0 \quad \text{y} \quad P_1 = \frac{P_0 V_0^{1,4}}{V_1^{1,4}}$$

En caso de Chimenea:

$$E_{c,1} + E_{g,1,h_0} = E_{r,1} + E_{g,1,u}$$

$$\frac{65 L Q_1^2}{\varnothing^2} + S |\Delta_1 h_0| \times 1.000 \times \left(h_0 - \frac{|\Delta_1 h_0|}{2} \right) =$$

$$= 500 B \frac{Q_1^2 L}{\varnothing^5} S |\Delta_1 h_0| + S |\Delta_1 h_0| \times 1.000 \times H$$

y se obtiene $|\Delta_1 h_0|$ y por tanto h_1 .

En cualquier caso ocurrirá que si $E_{c,1}$ es grande en comparación con el valor H , será necesario el paso de gran cantidad de agua, y aunque V_0 sea pequeño, saldrá un V_1 grande o bien $|\Delta_1 h_0|$ grande.

Lo contrario si H es grande en relación con $E_{c,1}$.

P_1 o h_1 tiene que tener un valor tal que no quede Energía sin transformar que pase a Energía de Ondas, y por tanto hay que comprobar que la línea de mínimas presiones a lo largo de la tubería, se mantiene siempre por encima de ésta.

Segunda Ecuación.

Se refiere a la subida de nivel del agua en el Calderín o Chimenea desde el punto de máxima depresión hasta el punto que estaba en régimen de impulsión.

La Energía de Gravedad: $E_{g,2,H}$, por tratarse del movimiento de la misma cantidad de agua, será la misma Energía de Gravedad: $E_{g,1,u}$, anterior. Es decir, $E_{g,2,H} = E_{g,1,u}$, y originará un nuevo movimiento *creando* nuevas Energías de Rozamiento $E_{r,2}$ y Cinética $E_{c,2}$, y las mismas Energías de Compresión: $E_{c,o,2} = E_{c,x,1}$ (calderín) o de Gravedad: $E_{g,2,h_0} = E_{g,1,h_0}$ (chimenea), y tendremos:

En caso de Calderín:

$$E_{g,1,u} = E_{c,x,1} + E_{r,2} + E_{c,2}$$

$$\alpha_1 V_0 \times 1.000 \times (H + 10,33) =$$

$$= \frac{P_0 V_0}{0,4} [1 - (1 + \alpha_1)^{-0,4}] +$$

$$+ \frac{500 B Q_2^2 L}{\varnothing^5} \alpha_1 V_0 + \frac{65 L Q_2^2}{\varnothing^2}$$

CONVERSION DE ENERGIA DE ONDAS EN ENERGIA DE MASAS

En caso de Chimenea:

$$E_{g3H} = E_{g1h} + E_{r2} + E_{c2}$$

$$S |\Delta_1 h_0| \times 1.000 \times H = S |\Delta_1 h_0| \times 1.000 \times$$

$$\times \left(h_0 - \frac{|\Delta_1 h_0|}{2} \right) +$$

$$+ 500 B \frac{Q_2^2 L}{\phi^5} S |\Delta_1 h_0| + \frac{65 L Q_2^2}{\phi^2}$$

Y, en ambos casos, se obtiene Q_2 , que es el caudal creado al pasar por el punto del nivel de agua en régimen de impulsión.

Se observa cómo la sobrepresión ya es independiente de la depresión (no se refleja), puesto que, siendo E_{r1} grande y la altura H pequeña, la Energía de Gravedad E_{g3H} puede quedar anulada con $Q_2 \leq 0$, lo que significa que no hay sobrepresión, pues ni tan siquiera se alcanza el nivel de régimen de impulsión, y V_0 puede disminuirse aunque V_1 tenga que ser grande.

Tercera Ecuación.

Se refiere a la subida de nivel del agua en el Calderín o Chimenea desde el punto de régimen de impulsión hasta el punto de máxima sobrepresión.

La Energía de Gravedad: E_{g3H} del agua que aún tiene que bajar por la tubería, más la Energía Cinética: E_{c2} creada en la Segunda ecuación, se anularán con las Energías de Compresión: E_{c3} (calderín) o de Gravedad: E_{g3H0} (chimenea), y la de Rozamiento: E_{r3} , que corresponde a este tercer movimiento.

En caso de Calderín:

$$E_{g3H} + E_{c2} = E_{c3} + E_{r3}$$

$$\alpha_2 V_0 \times 1.000 \times (H + 10,33) + \frac{65 L Q_2^2}{\phi^2} =$$

$$= - \frac{P_0 V_0}{0,4} [1 - (1 - \alpha_2)^{0,4}] + \frac{500 B Q_2^2 L}{\phi^5} \alpha_2 V_0$$

y se obtiene α_2 y por tanto V_2 y P_2

$$\text{pues } V_2 = (1 - \alpha_2) V_0 \quad \text{y} \quad P_2 = \frac{P_0 V_0^{1,4}}{V_2^{1,4}}$$

En caso de Chimenea:

$$E_{g3H} + E_{c2} = E_{g3H0} + E_{r3}$$

$$S |\Delta_2 h_0| \times 1.000 \times H + \frac{65 L Q_2^2}{\phi^2} = S |\Delta_2 h_0| \times$$

$$\times 1.000 \left(h_0 + \frac{|\Delta_2 h_0|}{2} \right) + 500 B \frac{Q_2^2 L}{\phi^5} S |\Delta_2 h_0|$$

y se obtiene $|\Delta_2 h_0|$ y por tanto h_2 .

Se observa que si H es grande en relación con E_{r1} , el volumen de agua que se mueve es pequeño, pero como E_{g3H} será grande, tiene que ser grande E_{c3} y en consecuencia tiene que ser grande V_0 (volumen inicial de aire), para que P_2 no resulte excesivo, aunque V_1 sea poco mayor que V_0 . Lo mismo respecto a E_{g3H} , y en consecuencia $|\Delta_2 h_0|$, y en definitiva h_2 .

P_2 o h_2 tienen que tener un valor tal que convenga a la tubería que se vaya a utilizar.

COMENTARIOS FINALES

Las líneas de máxima y mínima presión se obtienen uniendo el extremo final de la tubería (el punto más alto de agua), con los puntos que representan la altura de agua sobre la vertical en la unión de la tubería con el Calderín o Chimenea, es decir, con los valores de P_1 y P_2 en metros de agua, o con los valores de h_1 y h_2 , medidos desde el origen de alturas O - O' correspondiente a cada Caso.

En el caso de Calderín, se tantea el valor V_0 , y como resultado queda:

V_1 = Tamaño del Calderín a instalar (se aumenta un poco para que siempre quede agua en su interior con una altura de resguardo).

V_0 = Volumen del aire que ocupará el Calderín durante la explotación, es decir, a la presión P_0 .

En el caso de Chimenea, se tantea el valor S , para acomodar los valores de h_1 y h_2 .

Se adjunta un programa de la HP-97 para la aplicación del Método expuesto.

En el caso de Calderín los datos de entrada son:

Sto A: L en metros.

Sto B: Q_1 en m^3/seg .

Sto C: ϕ en metros.

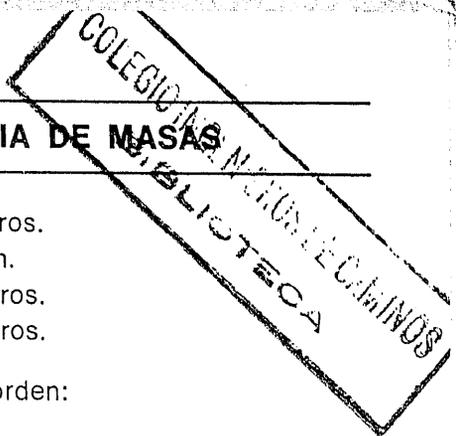
Sto D: H en metros.

Sto E: B en s^2/m .

Sto 0: P_0 en Kg/m^2 (en absolutas).

Sto 2: P_2 en Kg/m^2 (en absolutas).

CONVERSION DE ENERGIA DE ONDAS EN ENERGIA DE MASAS



y los de salida por orden:

- V_0 en m^3 .
- V_1 en m^3 .
- P_1 en Kg/cm^2 (en absolutas).

- Sto D: H en metros.
- Sto E: B en s^2/m .
- Sto 0: h_0 en metros.
- Sto 2: h_2 en metros.

y los de salida por orden:

- h_1 en m.
- S en m^2 .

La interpretación del resultado consiste en comprobar que P_1 tiene un valor tal que como ya se ha dicho, no se produzcan puntos de depresión a lo largo de la tubería.

La interpretación del resultado consiste en comprobar que h_1 tiene un valor tal que como ya se ha dicho, no se produzcan puntos de depresión a lo largo de la tubería.

En el caso de Chimenea, los datos de entrada son:

- Sto A: L en metros.
- Sto B: Q_1 en m^3/seg .
- Sto C: ϕ en metros.

Para el cálculo se introducen los datos en las memorias correspondientes, y se pulsa la tecla A.

1. PROGRAMA PARA EL CASO DE CALDERIN (Calculadora Hewlett-Packard 97)

| N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla |
|----------|--------------------------|----------|-------|----------|--------------------------|----------|----------------|----------|--------------------------|
| 1 | *LBLA | 36 | 1 | 71 | RCL6 | 106 | *LBL1 | 141 | RCL2 |
| 2 | 1 | 37 | 0 | 72 | RCL7 | 107 | RCLB | 142 | RCL1 |
| 3 | RCLO | 38 | . | 73 | STO6 | 108 | X² | 143 | × |
| 4 | STO1 | 39 | 3 | 74 | — | 109 | RCL1 | 144 | RCL0 |
| 5 | RCL2 | 40 | 3 | 75 | ÷ | 110 | × | 145 | × |
| 6 | ÷ | 41 | + | 76 | × | 111 | RCL8 | 146 | RCL1 |
| 7 | 1 | 42 | EEX | 77 | ST-8 | 112 | 1 | 147 | — |
| 8 | . | 43 | 3 | 78 | RND | 113 | + | 148 | × |
| 9 | 4 | 44 | × | 79 | X≠0? | 114 | . | 149 | 1 |
| 10 | 1/X | 45 | STO3 | 80 | CTO7 | 115 | 4 | 150 | RCL0 |
| 11 | Y ^x | 46 | RCL1 | 81 | RCL8 | 116 | CHS | 151 | — |
| 12 | — | 47 | . | 82 | 1 | 117 | Y ^x | 152 | . |
| 13 | P \rightleftharpoons S | 48 | 4 | 83 | + | 118 | 1 | 153 | 4 |
| 14 | STO0 | 49 | ÷ | 84 | RCL1 | 119 | — | 154 | CHS |
| 15 | 6 | 50 | STO4 | 85 | DSP2 | 120 | RCL4 | 155 | Y ^x |
| 16 | 5 | 51 | *LBLB | 86 | SPC | 121 | × | 156 | 1 |
| 17 | RCLA | 52 | . | 87 | PRTX | 122 | STO5 | 157 | X \rightleftharpoons Y |
| 18 | × | 53 | 5 | 88 | × | 123 | RCL8 | 158 | — |
| 19 | RCLC | 54 | STO8 | 89 | SPC | 124 | RCL3 | 159 | RCL4 |
| 20 | X² | 55 | STO9 | 90 | PRTX | 125 | × | 160 | × |
| 21 | ÷ | 56 | GSB1 | 91 | RCL1 | 126 | + | 161 | RCL3 |
| 22 | STO1 | 57 | STO6 | 92 | ÷ | 127 | RCL2 | 162 | RCL0 |
| 23 | 5 | 58 | EEX | 93 | 1 | 128 | RCL8 | 163 | × |
| 24 | 0 | 59 | CHS | 94 | . | 129 | × | 164 | + |
| 25 | 0 | 60 | 4 | 95 | 4 | 130 | RCLB | 165 | RCL2 |
| 26 | RCLB | 61 | ST+8 | 96 | CHS | 131 | X² | 166 | RCL1 |
| 27 | × | 62 | *LBL7 | 97 | Y ^x | 132 | × | 167 | × |
| 28 | RCLA | 63 | DSP6 | 98 | P \rightleftharpoons S | 133 | + | 168 | RCL8 |
| 29 | × | 64 | RCL8 | 99 | RCL0 | 134 | ÷ | 169 | × |
| 30 | RCLC | 65 | GSB1 | 100 | × | 135 | STO1 | 170 | RCL1 |
| 31 | 5 | 66 | STO7 | 101 | EEX | 136 | RCL8 | 171 | + |
| 32 | Y ^x | 67 | RCL9 | 102 | 4 | 137 | RCL3 | 172 | × |
| 33 | ÷ | 68 | RCL8 | 103 | ÷ | 138 | × | 173 | — |
| 34 | STO2 | 69 | STO9 | 104 | PRTX | 139 | RCL5 | 174 | RTN |
| 35 | RCLD | 70 | — | 105 | RTN | 140 | + | 175 | R/S |

CONVERSION DE ENERGIA DE ONDAS EN ENERGIA DE MASAS

2. PROGRAMA PARA EL CASO DE CHIMENEA (Calculadora Hewlett-Packard 97)

| N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla | N.º Paso | Tecla |
|----------|--------------------------|----------|---------------|----------|-------|----------|-------|----------|--------------------------|
| 1 | *LBLA | 27 | × | 53 | RCL3 | 79 | + | 105 | RCL8 |
| 2 | RCL2 | 28 | STO5 | 54 | × | 80 | RCLD | 106 | STO9 |
| 3 | RCL0 | 29 | 6 | 55 | STOI | 81 | — | 107 | — |
| 4 | P \rightleftharpoons S | 30 | 5 | 56 | 6 | 82 | × | 108 | RCL6 |
| 5 | STO0 | 31 | ST \times 3 | 57 | 5 | 83 | RCL1 | 109 | RCL7 |
| 6 | — | 32 | GTOB | 58 | RCL4 | 84 | × | 110 | STO6 |
| 7 | STO1 | 33 | RTN | 59 | RCL1 | 85 | RCL2 | 111 | — |
| 8 | RCLB | 34 | *LBL1 | 60 | × | 86 | — | 112 | ÷ |
| 9 | RCLC | 35 | RCLD | 61 | RCL1 | 87 | RTN | 113 | × |
| 10 | ÷ | 36 | RCL0 | 62 | × | 88 | *LBLB | 114 | ST—8 |
| 11 | X ² | 37 | RCL8 | 63 | — | 89 | DSP4 | 115 | RND |
| 12 | RCLA | 38 | 2 | 64 | RCL2 | 90 | 1 | 116 | X \neq 0? |
| 13 | × | 39 | ÷ | 65 | × | 91 | 0 | 117 | GTO7 |
| 14 | STO3 | 40 | — | 66 | STO2 | 92 | STO8 | 118 | DSP2 |
| 15 | RCLC | 41 | — | 67 | RCL4 | 93 | STO9 | 119 | SPC |
| 16 | 3 | 42 | RCL8 | 68 | RCL1 | 94 | GSB1 | 120 | RCL0 |
| 17 | CHS | 43 | × | 69 | × | 95 | STO6 | 121 | RCL8 |
| 18 | Y ^x | 44 | STO2 | 70 | RCL8 | 96 | EEX | 122 | — |
| 19 | RCL E | 45 | EEX | 71 | × | 97 | CHS | 123 | PRTX |
| 20 | × | 46 | 3 | 72 | 6 | 98 | 4 | 124 | RCL1 |
| 21 | 5 | 47 | × | 73 | 5 | 99 | ST+8 | 125 | PRTX |
| 22 | 0 | 48 | RCL5 | 74 | + | 100 | *LBL7 | 126 | P \rightleftharpoons S |
| 23 | 0 | 49 | RCL8 | 75 | RCL1 | 101 | RCL8 | 127 | RTN |
| 24 | × | 50 | × | 76 | 2 | 102 | GSB1 | 128 | R/S |
| 25 | STO4 | 51 | + | 77 | ÷ | 103 | STO7 | | |
| 26 | RCL3 | 52 | 1/X | 78 | RCL0 | 104 | RCL9 | | |

CEMENTOS PORTLAND, S.A.

Cemento Portland Cangrejo
Supercemento Diamante

Capacidad de producción: 750.000 toneladas anuales

Estella, 6 • Apartado 107

Teléfono 21 18 60 (PAMPLONA)