

Parámetros de tratamiento del Jet Grouting

JOSE J. CELMA GIMENEZ (*)

RESUMEN. Se definen en este artículo algunos parámetros característicos entre los distintos parámetros que intervienen en el tratamiento del terreno con la técnica del Jet Grouting, las relaciones existentes entre ellos y una propuesta para controlar la calidad del tratamiento.

JET GROUTING TREATMENT PARAMETERS

ABSTRACT. The aim of this article is to define some of the characteristic parameters involved in soil improvement using the jet-grouting technique. Characteristic parameters of this technology are defined, and a proposal is made for a methodology that controls the quality of the improved soil.

1. INTRODUCCION

El tratamiento de mejora del terreno con la técnica del Jet Grouting ha adquirido un gran desarrollo en nuestro país en los últimos años, ampliándose su aplicación a una gama extensa de problemas. El objeto del presente artículo es definir una serie de parámetros característicos del tratamiento del terreno con Jet Grouting y presentar relaciones entre ellos para poder diseñar cualitativamente el marco en el que se desarrollará el mismo y por tanto estimar o controlar la calidad del tratamiento. Se trata, por tanto, de un planteamiento simplificado y no exhaustivo sobre la naturaleza, posibilidades y características de esta técnica. Existe una abundante bibliografía al respecto que puede consultarse [2], [3].

Se introducen como parámetros de control el factor q/v_e , el criterio de eficiencia ϵ y la porosidad equivalente η_e .

En el tratamiento del terreno con Jet Grouting intervienen parámetros específicos del terreno, de los equipos utilizados y de la lechada a inyectar.

Del terreno: Profundidad de tratamiento, Naturaleza (cohesivo o granular), Propiedades (densidad, resistencia, granulometría), Profundidad del Nivel Freático.

Del tratamiento: Presión, caudal, diámetro de toberas, de la lechada (JET-1) o de la lechada, agua y aire en el JET-3, Velocidad ascensional y de rotación del varillaje.

De la lechada: Relación agua/cemento, aditivos, etc.

Durante el proceso de ejecución se pueden controlar los parámetros de tratamiento anteriores y también:

- Composición y naturaleza del detritus rechazo.
- Consumo de cemento por metro lineal de columna.

- Parámetros de sondeo obtenidos en la perforación del terreno.

El producto terminado, la columna de suelo tratado, está condicionado por los anteriores parámetros y se puede caracterizar con una serie de datos que pueden ser medidos o estimados:

Datos mediles: Diámetro de la columna, Propiedades (resistencia, densidad, granulometría, contenido en cemento).

Datos estimables: Grado de rechazo, eficacia del tratamiento (sobrexceso o escasez de lechada aportada), adecuación de los parámetros a los objetivos de calidad y diámetro previstos.

Se trata, pues, en este artículo, de definir algunos conceptos útiles para interpretar los datos obtenidos durante el tratamiento y sobre la columna de suelo mejorado obtenida. No se establecen, por tanto, criterios para estimar los parámetros de tratamiento necesarios para obtener unos diámetros o calidades dadas.

2. DENSIDAD DE LA LECHADA

Se toman como pesos específicos del agua y del cemento:

$$\gamma_w = 1 \text{ Tn/m}^3 \quad \gamma_c = 3 \text{ Tn/m}^3$$

Sea k = relación agua/cemento: P_a/P_c

$$\gamma_j = \frac{P_a + P_c}{V_a + V_c} = \frac{P_a k + P_c}{\frac{P_a}{\gamma_w} + \frac{P_c}{\gamma_c}} =$$

$$\gamma_j = \frac{3(k+1)}{(8k+1)} \quad [1]$$

(*) Doctor Ingeniero de Canales, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Valencia.

k	C _{co}	η _i
1.1	0.75	1.50
2.3	1.00	1.67
1.2	1.20	1.80
1.3	1.50	2.00

TABLA 1.

Donde C_{co} es la concentración de cemento de la lechada (Tn/m³) de valor:

$$C_{co} = 3/(3k + 1)$$

Para las relaciones agua/cemento habituales se obtienen los valores de la tabla 1.

3. PESO DE CEMENTO CONSUMIDO POR METRO LINEAL: π_c

Sea q = caudal inyectado en L/min

v_a = dz/dt = velocidad ascensional en cm/min

$$q \, dt = dV = \frac{dP_a}{\gamma_w} + \frac{dP_c}{\gamma_c} = dP_c \left[\frac{k}{1} + \frac{1}{3} \right] = dP_c \frac{3k + 1}{3}$$

$$\pi_c = \frac{q}{v_a} C_{co} \quad [2]$$

$$\pi_c = \frac{dP_c}{dz} = \frac{0.3}{3k + 1} \frac{q}{v_a} \text{ Tn/m}$$

3. DIAMETRO MAXIMO ALCANZADO θ_m

Se define el parámetro η_e como la porosidad equivalente inyectada.

El valor de η_e se entiende del siguiente modo: supongamos que todo el caudal inyectado, aportado, es absorbido por el terreno.

Si el terreno fuera desplazado totalmente por la acción del jet (terrenos cohesivos) quedaría un cilindro totalmente lleno de lechada y η_e sería igual a 1.

Si se desplazara parcialmente, la lechada se mezclaría con el terreno no desplazado, ocupando, por tanto, la lechada un volumen menor, dado por esta porosidad equivalente. Obviamente se habría producido un cierto rechazo de la lechada.

En un terreno granular, compuesto por una matriz estable (no desplazable) de partículas gruesas, que deja unos huecos ocupados por agua, aire y partículas finas desplazables, se supone que el jet desplaza los finos y el agua que ocupan los poros que dejan entre sí las partículas gruesas y en este caso η_e debería coincidir con la porosidad de las gravas, entendiendo por tal el volumen de suelo ocupado por el agua y la fracción fina. Obviamente, puede ocurrir que el desplazamiento no sea perfecto y en ese caso el valor de η_e sería menor que el real del terreno.

Como se ve, no toda la lechada inyectada se quedará en el terreno y por tanto el parámetro η_e indica en cierto modo dos aspectos: el grado de relleno de los huecos disponibles y el grado de utilización del caudal de lechada aportado. El valor η_e no debe pues confundirse con la porosidad del terreno.

Supongamos que se ha inyectado un caudal de lechada q y se ha realizado el tratamiento con una velocidad ascensional v_a y que una vez ejecutado el tratamiento se puede medir el diámetro de columna alcanzado θ_m . El valor de η_e se define:

$$q \, dt = dV = \frac{\pi \Phi_m^2}{4} \eta_e \, dh \quad [3]$$

$$dh = v_a \, dt$$

$$\frac{q}{v_a} = 2.5 \pi \Phi_m^2 \eta_e \text{ L/cm} \quad [4]$$

En la figura 1 se representa el valor del diámetro máximo, el parámetro q/v_a , la porosidad eficaz, η_e , y la dosificación de cemento por metro lineal.

5. INFLUENCIA DEL DIAMETRO DE LAS TOBERAS

Supongamos que se inyecta un caudal de lechada q , a una presión p_o y que el varillaje tiene una sección S_o .

Sea N el número de toberas y A_s la sección de cada una. Si la tobera se encuentra a una profundidad H , se puede aplicar el principio de Bernoulli y se tiene:

$$\frac{p_o}{\gamma_j} + \frac{v_a^2}{2g} + H = \frac{p}{\gamma_j} + \frac{v_s^2}{2g} \quad [5]$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

v_a = velocidad de entrada de la lechada en el varillaje

v_s = velocidad de salida por las toberas

Si se acepta que $p = \gamma_j H$ y que $q = S_o v_a = N A_s v_s$ se tiene:

$$q^2 = \frac{2g S_o^2}{\gamma_j} p_o \frac{N^2 \sigma_e^2}{1 - N^2 \sigma_e^2} \quad [6]$$

$$\sigma_e = \frac{A_s}{S_o} = \left[\frac{\Phi_s}{\Phi_o} \right]^2$$

La fórmula anterior se puede simplificar obteniéndose con una buena aproximación la siguiente expresión para el caudal:

$$q = N A_s \sqrt{\frac{2g p_o}{\gamma_j}}$$

$$A_s = \frac{\pi \Phi_s^2}{4}$$

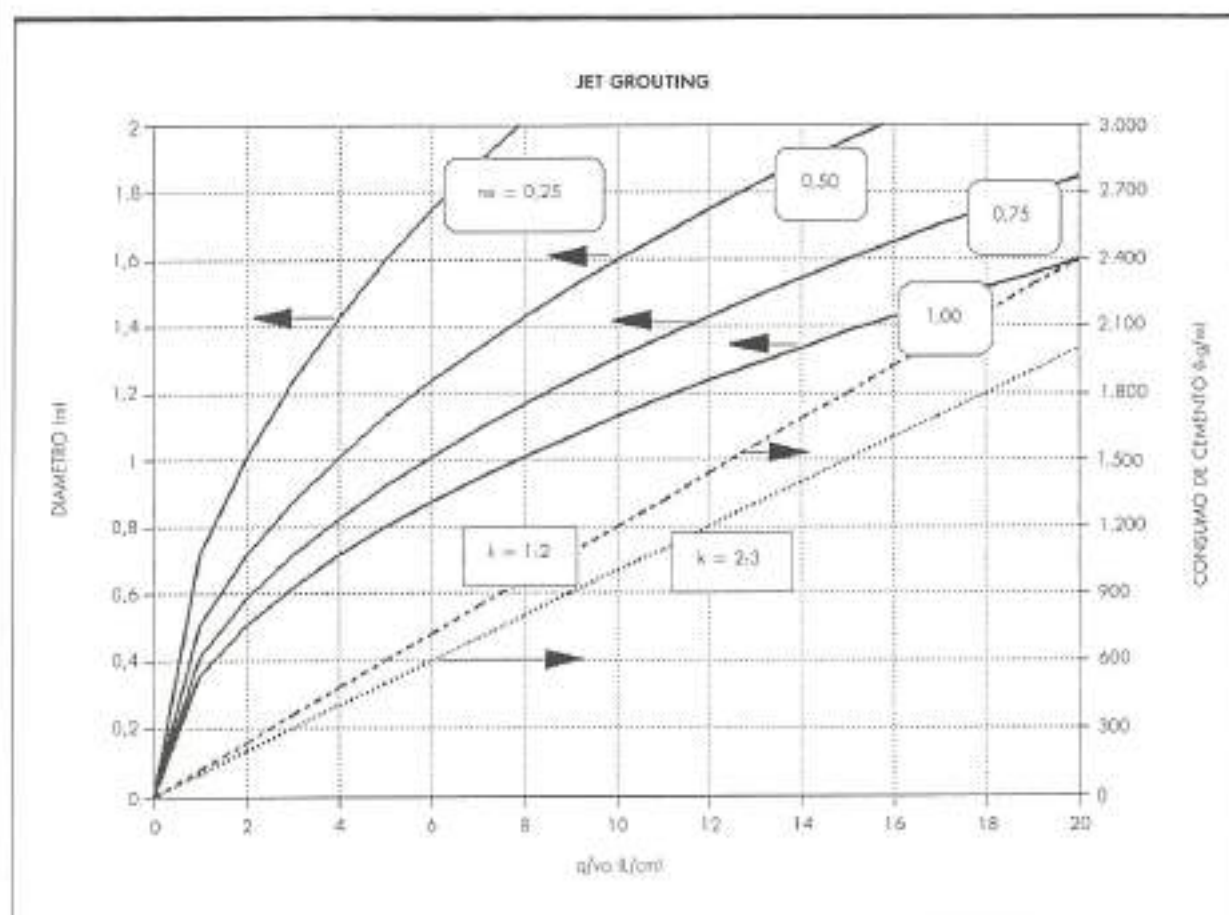


FIGURA 1. Parámetros de diseño.

En la figura 2 se representa la influencia del diámetro de las toberas, del número de ellas y de la presión de inyección. Se ha tomado como densidad $\gamma_s = 1,5 \text{ Tn/m}^3$.

6. ANALISIS DEL CAUDAL RECHAZADO Y CALIDAD DEL TRATAMIENTO

Supongamos un terreno constituido por gruesos y finos de modo que exista una matriz granular dejando huecos que quedarían rellenos por los finos, el agua y el aire. La curva granulométrica del terreno nos proporciona la relación entre el peso de los finos y el peso total.

Sea:

P_{so} = Peso de los sólidos de la fracción fina
 P_{go} = Peso de los sólidos del material grueso (gravas)
 $p = P_{so}/(P_{so} + P_{go})$ la proporción en peso de la fracción fina frente a la gruesa, obtenida del análisis de la curva granulométrica.

$$1 \geq p > 0$$

Si el terreno tratado ocupa un volumen inicial V_o se tendrá inicialmente, antes del tratamiento:

$$V_o = V_{so} + V_{go} + V_{vo} + V_{ao} \quad [7]$$

Al final del tratamiento, si no se desplaza la matriz granular:

$$V_o = V_{go} + V_L + V_{so} + V_a \quad [8]$$

El detritus vertido tendrá una composición:

$$V_f = V_{Lf} + V_{vf} + V_{af} \quad [9]$$

Se debe cumplir:

$$\begin{aligned} V_{Lf} &= V_{Lo} - V_L & V_{so} &= V_s + V_{sf} \\ V_f + V_{so} &= V_o + V_{vf} \end{aligned} \quad [10]$$

Donde V_f representa el volumen de agua inyectado a presión en el sistema Tri-jet. Para el sistema monojet, $V_f = 0$.

Sustituyendo [10] en [8] y teniendo en cuenta [9] se llega a la conclusión que:

$$V_f = V_{Lo} + V_f - V_{so} \quad [11]$$

Si se supone el mismo peso específico de las partículas para los finos y los gruesos, γ_s :

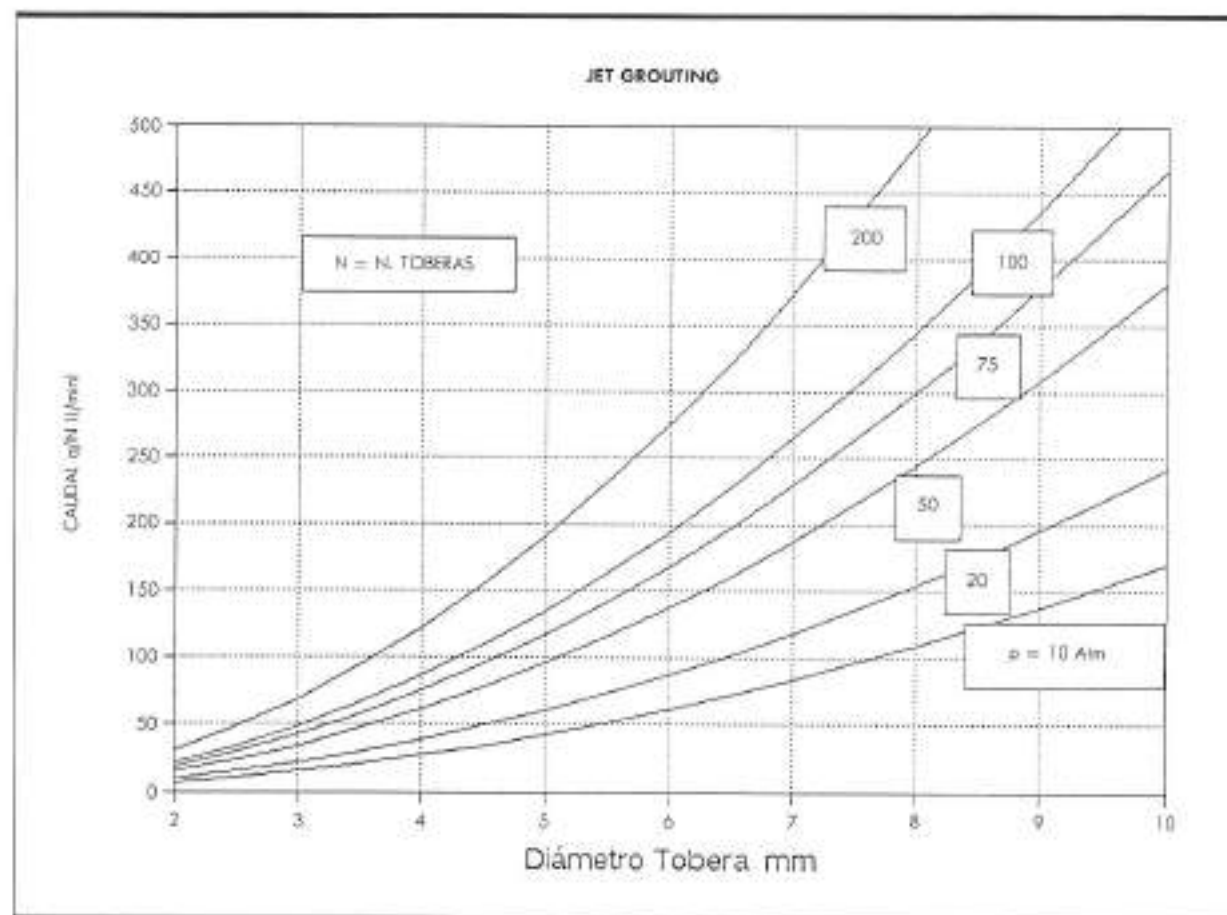


FIGURA 2. Caudal de inyección.

$$V_{ao} = V_{go} p / (1 - p) \quad P_{ao} = P_{go} p / (1 - p)$$

Sea w_a la humedad del terreno ($w_a = P_{ao} / (P_{go} + P_{ao})$) y γ_d el peso específico seco del terreno inicialmente y

Sea:

$$V_j = \mu V_{ao} \quad V_j = (1 - \mu) V_{ao} \quad [12]$$

$$V_{jr} = \beta V_{ao} \quad V_j = \rho V_{Lo} \quad [13]$$

$$V_{Lo} = \alpha V_{Lo} \quad V_{Lo} = (1 - \alpha) V_{Lo} \quad [14]$$

$$\frac{V_{go}}{V_o} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} (1 - p) = K_g \quad [15]$$

$$\frac{V_{ao}}{V_o} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} p = K_a \quad [16]$$

$$\frac{V_{ao}}{V_o} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} w_a = K_w \quad [17]$$

$$\frac{V_{ao}}{V_o} = 1 - \gamma_d \left[\frac{1}{\gamma_s} - \frac{w_a}{\gamma_w} \right] = K_a$$

según [11]:

$$V_f = V_{Lo} + V_j - V_{ao} = (1 - \alpha) V_{Lo} + (1 - \mu) V_{ao} + (1 - \beta) V_{ao} + V_j$$

es decir:

$$\alpha V_{Lo} = [(1 - \mu) K_a + (1 - \beta) K_w + K_u] V_o \quad [18]$$

$$q \, dt = \pi r^2 v_a \, dt \, \eta_c \quad [19]$$

$$q/v_a = \pi r^2 \eta_c \quad [20]$$

$$\alpha \eta_c = K_s (1 - \mu) + K_w (1 - \beta) + K_u \quad [21]$$

El valor máximo de η_c se obtiene para $\mu = \beta = 0$, es decir:

$$\eta_c \text{ máx} = (K_s + K_w + K_u) / \alpha$$

Por tanto, la eficiencia, ε , del tratamiento será:

$$\varepsilon = \eta_c / \eta_c \text{ máx} \quad [22]$$

$$\varepsilon = \frac{K_s (1 - \mu) + K_w (1 - \beta) + K_u}{K_s + K_w + K_u} \quad [23]$$

$$\eta_e = \frac{(K_s + K_w + K_a) \varepsilon}{\alpha} = \frac{(1 - K_a) \varepsilon}{\alpha} \quad [24]$$

El valor de α está relacionado con la concentración de cemento en la mezcla de salida y, por tanto, con el caudal de lechada rechazado.

En efecto, sea $C_c = P_c/V_f$ y sean V_e y V_{af} los volúmenes de agua y cemento en el volumen de lechada expulsado V_{Lf} :

$$V_{Lf} = V_{Lo} (1 - \alpha) = V_e + V_{af} = \\ = P_e / (1 + 3k) / 3 = P_e / C_{co}$$

si se toman como pesos específicos del agua y del cemento 1 y 3 Tn/m³, respectivamente, y k es la relación agua/cemento:

$$C_c = \frac{C_{co} (1 - \alpha) \eta_e}{\eta_e (\rho + 1) - K_a} \quad [25]$$

Siendo C_{co} la concentración de cemento en la lechada inicialmente (tabla 1).

Si se puede medir la concentración de suelo en el detritus $C_s = P_s/V_f$ se tendría:

$$C_s = (1 - \mu) K_s \gamma_s V_s / V_f \\ C_s [\eta_e (1 + \rho) - K_a] = (1 - \mu) K_s \gamma_s \quad [26]$$

Por otro lado, por la definición de η_e [3] y [20]:

$$K_w (1 - \beta) = \eta_e [\alpha - (\rho + 1) C_s / \gamma_s] - \\ - K_s [1 + C_s / \gamma_s] \quad [27]$$

De [26] y [27] se pueden obtener β y μ si se conoce η_e , C_s y C_c .

Si el terreno se encuentra seco $w_o = 0$ y $K_w = 0$.

Para el Jet-1: $\rho = 0$ y para el Jet-3 $\rho = q_j/q$ siendo q_j el caudal inyectado de agua a presión.

7. INTERPRETACION DE LAS PRUEBAS

Se supone que se conocen los datos del tratamiento (q , v_o , q_j), que se han tomado datos del detritus durante el tratamiento y que se pueden medir el diámetro de la columna y sus características (granulometría, contenido de cemento, densidad, resistencia).

De las ecuaciones anteriores se deduce que existen varios parámetros de control del tratamiento.

Para un terreno dado (ρ , w_o y γ_d fijos) el radio alcanzado no está unívocamente determinado, pues depende de varios factores.

El tratamiento se caracteriza fundamentalmente por la relación agua/cemento, k , por el parámetro q/v_o de la inyección de lechada y, en el caso de Jet-3, por el parámetro ρ . Fijados éstos, el radio a alcanzar dependerá de la eficacia del tratamiento ε , que puede estar condicionado por los parámetros de tratamiento o por la propia naturaleza del terreno.

La relación agua/cemento de la columna tratada, k' , se puede estimar a partir de los datos anteriores.

Por definición: $k' = (P_a + P_w)/P_c$ donde P_a y P_c son

los pesos de agua y cemento de la lechada inyectada en el suelo y P_w es el remanente de agua que queda en el terreno tratado. $P_a/P_c = k$.

De [14] y [25]:

$$P_w = \beta K_w \gamma_w V_o \quad P_c = C_{co} \alpha V_{Lo} \\ k' = k + \frac{\beta K_w \gamma_w V_o}{C_{co} \alpha V_{Lo}} = k + \frac{\beta K_w \gamma_w}{C_{co} \alpha \eta_e} \quad [28] \\ k' = k + \beta \frac{K_w}{1 - K_g} \frac{\gamma_w}{\varepsilon C_{co}}$$

El ensayo de probetas de las columnas de prueba, determinando densidades y resistencias permitiría establecer una relación entre la eficiencia ε y el parámetro α/v_o ya que según algunos autores [2], [3] existe una relación entre k y la resistencia a compresión simple.

La densidad del detritus vertido se puede obtener mediante la fórmula:

$$\gamma_f = (P_d + P_{af} + P_{Lf} + P_j) / V_f$$

Teniendo presente [26] y [27] se obtiene:

$$\gamma_f = C_s \left[1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right] + \gamma_j \frac{\eta_e (1 - \alpha)}{\eta_e (\rho + 1) - K_a} + \\ + \gamma_w \frac{\eta_e (\rho + \alpha) - K_w}{\eta_e (\rho + 1) - K_a} \quad [29]$$

El peso específico seco del detritus tiene por expresión:

$$\gamma_{af} = C_c + C_s \quad [30]$$

$$\gamma_{af} = C_s + \frac{C_{co} (1 - \alpha) \eta_e}{\eta_e (\rho + 1) - K_a}$$

Las ecuaciones [29] y [30] forman un sistema de ecuaciones que permite determinar C_s y α .

Conocidos C_s y α se puede obtener C_c , β , μ y k' .

También se puede analizar el tratamiento a partir de los datos de la columna tratada. Supongamos que se ha obtenido la densidad de la columna, la granulometría de la misma y su densidad.

La curva granulométrica permite obtener la proporción de finos presentes en el terreno tratado p_f . Al igual que para el terreno original se obtiene:

$$p_f = \frac{\mu K_s}{\mu K_s + K_g} = \frac{\mu}{\mu + \frac{1 - p}{p}} \quad [31]$$

de donde:

$$\mu = \frac{1 - p}{p} \frac{p_f}{1 - p_f} \quad [32]$$

El contenido de cemento en la columna tratada se define como:

$$\lambda_c = \frac{P_c}{P_s + P_j} \quad [33]$$

Por tanto, el peso específico de la columna, γ_{col} , será:

$$\gamma_{col} = \gamma_s \frac{K_s}{p} \frac{1-p}{1-p_f} [1 + \lambda_s(1+k')] \quad [34]$$

Por otro lado λ_s vale:

$$\lambda_s = \frac{C_{cs}}{\gamma_s} \frac{1-K_s}{K_g + \mu K_s} \quad [35]$$

Se puede, pues, obtener la relación agua/cemento de la columna con otros datos. La resistencia de la columna estará relacionada con la densidad a partir de la relación agua/cemento y del contenido de cemento.

Obsérvese que el contenido de cemento de por sí no es un índice de calidad si no se considera conjuntamente con la relación agua/cemento.

8. APLICACION PRACTICA

Se va a analizar la aplicación práctica de los anteriores criterios con unos ejemplos proporcionados por Muzas [1]. Realmente el presente artículo no hace sino explicitar o generalizar parte de los cálculos allí expuestos.

En el artículo citado se analizan dos ejemplos:

Ejemplo 1:

Datos de inyección:

- Caudal: 120 l/min.
- Número de toberas: 2.
- Diámetro de las toberas: 2,2 mm.
- Presión de inyección: 530 Atm.
- Velocidad ascensional: 40 cm/min.

Datos de la lechada:

- Dosificación agua/cemento: 1/1.
- Peso específico: 1,50 tn/m³.

Datos del terreno:

- Peso específico: 2,073 tn/m³.
- Composición volumétrica por m³:
 - Volumen de agua: 350 l.
 - Volumen de árido fino: 300 l.
 - Volumen de árido grueso: 350 l.
- Peso específico de áridos: 2,65 tn/m³.

Datos del detritus:

- Composición por m³:
 - Agua: 416 kg/m³.
 - Cemento: 359 kg/m³.
 - Árido fino: 638 kg/m³.
- Peso específico: 1,637 tn/m³.

El diámetro obtenido es de 80 cm de columna tratada.

Supongamos que del detritus sólo se hubiera obtenido el peso específicos aparente y seco,

$$\gamma_{af} = 0,997 \text{ tn/m}^3 \quad \gamma_f = 1,637 \text{ tn/m}^3$$

Con los datos anteriores se obtiene:

$$\begin{aligned} K_s &= 0,30 & K_w &= 0,35 & K_g &= 0,35 & K_a &= 0 \\ \gamma &= (K_s + K_g) \gamma_s + K_w \gamma_w = 2,0725 \text{ tn/m}^3 \\ K_s (1-p) &= K_g \rho & p &= 0,4615 \text{ tn/m}^3 \end{aligned}$$

$$(1 + w_s) \gamma_s K_s = \gamma \rho \quad w_s = 0,2030$$

$$A/C = k = 1 \quad C_{cs} = 0,750 \text{ tn/m}^3$$

$$q/r_s = 0,30 \quad r = 0,40$$

$$\text{de [20]} \quad \eta_c = 0,5968$$

de [29] y [30] se obtiene el sistema:

$$0,62264 C_s - 0,50 \alpha = 0,1365$$

$$C_s - 0,75 \alpha = 0,247$$

La resolución del sistema da:

$$C_s = 639 \text{ kg/m}^3 \quad \alpha = 0,5236$$

Por tanto,

$$\text{de [25]} \quad C_r = 0,75 (1 - 0,5236) = 0,3573 \text{ tn/m}^3$$

$$\text{de [24]} \quad \varepsilon = 0,4807$$

$$\text{de [26] y [27]: } \mu = 0,5203 \quad \beta = 0,5183$$

$$\text{de [28]} \quad k' = 1,7741.$$

Con respecto al suelo tratado:

$$\text{Agua: } V_w = K_w \beta V_a = 0,1814 V_a$$

$$\text{Finos: } V_f = K_f \mu V_a = 0,156 V_a$$

$$\text{Lechada: } V_L = \alpha \eta_c V_s = 0,3124 V_s = 4 P_r/3 \quad (\text{Para } k = 1)$$

$$P_r/V_a = 0,2343 \text{ tn/m}^3 \quad P_s = 0,2343 \text{ tn/m}^3$$

Pasando a pesos por metro cúbico con los pesos específicos de los materiales y sumando el agua del terreno a la de la lechada:

$$\text{Agua: } (P_w + P_{w0})/V_a = 415,7 \text{ kg/m}^3 \quad (416).$$

$$\text{Cemento: } 234,3 \text{ kg/m}^3 \quad (233).$$

$$\text{Finos: } 413,4 \text{ kg/m}^3 \quad (414).$$

$$\text{Grav: } 927,5 \text{ kg/m}^3 \quad (928).$$

El peso específico del terreno tratado sería: $\gamma = 1,9909 \text{ tn/m}^3$ (entre paréntesis los valores dados por Muzas).

Ejemplo 2:

Igual al ejemplo 1, pero con el terreno seco.

$$K_w = 0,35 \quad K_a = 0.$$

El valor de η_c será el mismo: 0,5968.

No se da en el artículo de Muzas más dato que la concentración de cemento en el terreno tratado que es de 325 kg/m³. Es decir: $P_r/V_a = 0,325$.

En el terreno tratado $P_r/C_{cs} = V_L = \alpha V_{Lo} = \alpha \eta_c V_s$. Luego $0,325 = \alpha \times 0,5968 \times 750$. Es decir, $\alpha = 0,7260$.

La concentración de cemento en el detritus será:

$$C_r (\eta_c - K_s) = \eta_c C_{cs} (1 - \alpha) \quad C_r = 0,496 \text{ tn/m}^3.$$

La eficiencia ε será: $\alpha \eta_c = \varepsilon (K_s + K_g)$ $\varepsilon = 0,6665$.

El porcentaje de finos retenido en el suelo, μ , será:

$$K_s (1 - \mu) = \alpha \eta_c - K_g \mu = 0,7224$$

La concentración de sólidos en el detritus sería:

$$C_s = 894 \text{ kg/m}^3$$

Como se ve en ambos ejemplos, la eficiencia del tratamiento es diferente. No existe una relación única entre el parámetro q/r_s y el radio de la columna de terreno tratada, dependiendo de la eficiencia del tratamiento.

9. CONCLUSIONES

Se han analizado los parámetros que intervienen en un tratamiento de Jet Grouting relativos al terreno, la inyección, la columna tratada y el detritus vertido. No se definen por tanto los criterios de diseño de los parámetros de tratamiento necesarios para obtener la calidad o diámetros esperados.

El parámetro condicionante es el valor q/v_a que regula el diámetro de columna alcanzable. Existe un valor mínimo del diámetro de columna para cada valor de q/v_a que supone una eficiencia del tratamiento del 100 %. En este caso todos los huecos accesibles del terreno se llenan con lechada y no se produciría rechazo.

Para el mismo diámetro obtenido, en función de la eficiencia, se conseguirían calidades de la columna tratada diferentes, estimadas según la relación agua/cemento de la columna tratada. La concentración de sólidos y de cemento en el detritus sería diferente.

Por contra se pueden conseguir diámetros mayores con una eficiencia menor y por tanto con una calidad menor de la columna tratada desde el punto de vista estructural.

Para definir los parámetros de tratamiento se sugiere la siguiente secuencia:

1. Determinar las propiedades del terreno inicial (granulometría, humedad, densidad, pesos específicos). Determinar los volúmenes específicos K_g , K_a , K_s y K_v .
2. Determinar los valores de q/v_a —y ρ , en el caso de J-3—, mínimos necesarios para conseguir el rango de diámetros de la columna deseada con una eficiencia del 100 %. Debe señalarse que a mayor diámetro de columna, el coste de tratamiento por metro cuadrado será menor al tener que realizarse menos taladros. Por contra, el consumo de cemento por metro lineal de profundidad será mayor para una relación A/C dada. Se puede demostrar [4] que el coste por metro cuadrado disminuye al aumentar el parámetro q/v_a .
3. Establecer un campo de pruebas en el que se fijen varios recintos. En cada recinto se analizará un diámetro óptimo y por tanto un valor fijo de q/v_a . Se variará en las diferentes columnas la influencia de la relación A/C y del parámetro ρ si se trata de J-3, así como los parámetros físicos del tratamiento.
4. Se medirá durante las pruebas la densidad aparente y seca del detritus y de la lechada inyectada.
5. Se procederá a descubrir las columnas y a tomar probetas para determinar entre otros ensayos la resistencia a compresión simple y la densidad. Se recomienda analizar la granulometría de la columna tratada y su contenido de cemento.
6. Con los datos obtenidos se establecerá una relación entre la eficiencia y la resistencia para cada columna teniendo presente la relación A/C estimada para la columna tratada, k' , y el contenido de cemento, k_c .
7. Se diseñará el tratamiento adecuado fijando el valor de q/v_a , relación A/C y el parámetro ρ en función de criterios económicos, estructurales o funcionales según el resultado de los ensayos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MUZAS, F. (1989). «Reflexiones sobre el Jet-Grouting». *Revista de Obras Públicas*, Feb. 1989, pp. 89-94.
- [2] ASCHIERI, F. et al. (1983). «Case history of a cut-off wall executed by Jet Grouting». Proc. 8th. European Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Helsinki.
- [3] TORNAGHI, R. et al. (1985). «Soil Improvement by Jet Grouting for the solution of tunnelling problems». Proc. 4th Int. Symp. Tunnelling'85, Brighton, U.K.
- [4] CELMA, J. J. (1992). «Notas sobre criterios de diseño de un campo de pruebas de Jet Grouting». Informe no publicada. Metro de Valencia-Generalitat Valenciana, Valencia.

NOTACION

- A_t = Área de la tobera.
 C_{ca} = Concentración de cemento en la lechada inyectada.
 C_d = Concentración de cemento en el detritus.
 C_s = Concentración de finos en el detritus.
 g = Aceleración de la gravedad.
 H = Profundidad de la tobera.
 k = Relación agua/cemento en peso en la lechada.
 k' = Relación agua/cemento en peso en el terreno tratado.
 K_g = Volumen parcial de las gravas o fracción en el terreno original.
 K_a = Volumen parcial de los finos o fracción gruesa en el terreno original.
 K_{av} = Volumen parcial del agua o fracción gruesa en el terreno original.
 K_v = Volumen parcial del aire o fracción gruesa en el terreno original.
 N = Número de toberas.
 P = Presión de la lechada a la salida de la tobera.
 P_0 = Presión de inyección de la lechada.
 ρ = Proporción relativa en peso de los finos frente al total de sólidos existente en el terreno original.
 ρ_f = Proporción relativa en peso de los finos frente al total de sólidos existente en la columna tratada (sin contar el cemento).
 P_{ga} = Peso de la fracción fina.
 P_{gv} = Peso de la fracción gruesa.
 P_{wa} = Peso del agua.
 P_{wo} = Peso del agua en la lechada.
 P_c = Peso del cemento en la lechada.
 q = Caudal de lechada inyectada.
 q_f = Caudal de agua a presión inyectada (Jet-3).
 S_d = Sección de la tubería de inyección.
 V = Volumen de terreno tratado.
 V_{ga} = Volumen de la fracción gruesa en el terreno inicial.
 V_{go} = Volumen de la fracción fina en el terreno inicial.
 V_f = Volumen de la fracción fina en el terreno tratado.
 V_{fv} = Volumen de la fracción fina en el detritus.
 V_{wa} = Volumen de agua en el terreno inicial.
 V_{wo} = Volumen de agua en el terreno tratado.
 V_{cv} = Volumen del agua en el detritus.
 V_{ao} = Volumen del aire en el terreno inicial.
 V_c = Volumen del cemento en la lechada.
 V_a = Volumen del agua en la lechada.
 V_L = Volumen de lechada en el terreno tratado.

V_{Ls} = Volumen de lechada.
 V_{Ld} = Volumen de lechada en el detritus.
 V_{Lr} = Volumen del detritus.
 V_j = Volumen del agua inyectada a presión (Jet-3).
 v_a = Velocidad ascensional del tratamiento.
 v_s = Velocidad de salida de la lechada por la tobera.
 v_o = Velocidad inicial de la lechada en la conducción.
 w_o = Humedad inicial del terreno.
 α = Proporción de la lechada retenida en el terreno.
 β = Proporción de agua inicial retenida en el terreno de la inyección.
 γ = Peso específico del terreno inicial.
 γ_d = Peso específico seco del terreno inicial.
 γ_c = Peso específico del cemento.
 γ_{col} = Peso específico de la columna tratada.
 γ_w = Peso específico del agua.

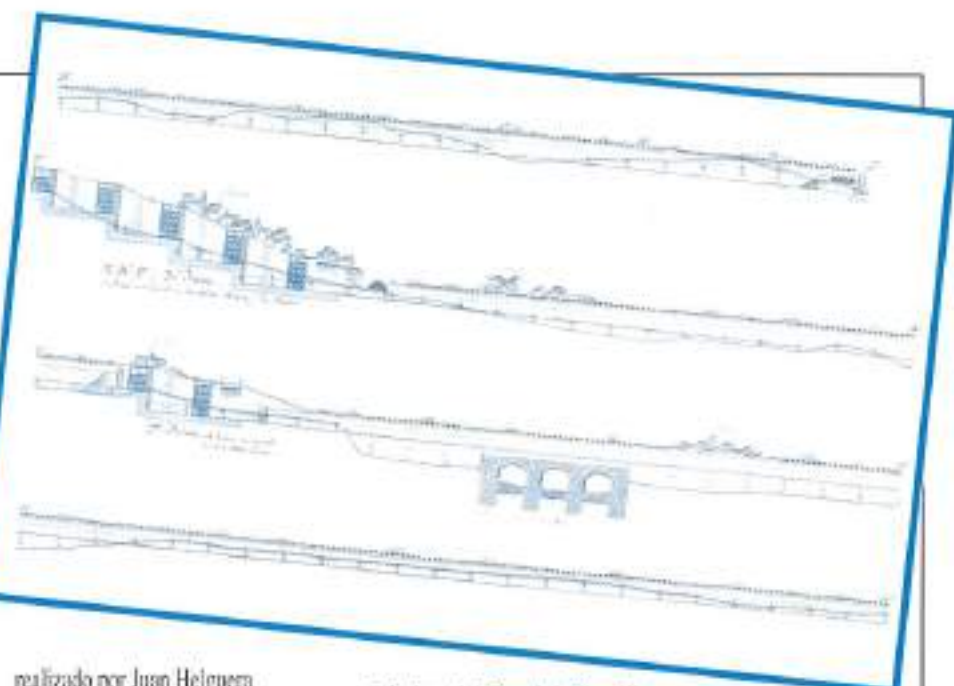
γ_f = Peso específico del detritus.
 γ_{df} = Peso específico seco del detritus.
 γ_s = Peso específico de las partículas sólidas.
 γ_l = Peso específico de la lechada.
 e = Eficiencia del tratamiento.
 λ_c = Proporción en peso seco de cemento frente a los sólidos en la columna tratada.
 η_e = Porosidad eficaz del tratamiento.
 μ = Proporción de finos retenidos en el terreno después de la inyección.
 π_c = Peso de cemento consumido por metro lineal de tratamiento.
 ρ = Relación entre caudal de agua inyectado y caudal de lechada (Jet-3).
 σ_c = Relación de áreas de conducción y toberas.
 σ_w = Diámetro del terreno tratado.

EL CANAL DE CASTILLA DE Juan de Homar

Reproducción facsímil de los planos realizados y firmados por Juan de Homar en 1806, cuyos originales se encuentran guardados en el Archivo del Palacio Real de Madrid. Se completa el libro con un estudio de la historia del Canal

realizado por Juan Helguera Quijada, profesor de la Universidad de Valladolid, y con una selección de textos de viajeros y tratadistas de la Ilustración, cuyo contenido es una visión del Canal por los referidos autores.

Título: El Canal de Castilla.
 Cartografía de un Proyecto Ilustrado.
Autor: Juan de Homar.
Editor: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
Edición facsímil.
ISBN: 84-7790-137-6
 140 páginas.





No existen dos obras iguales. Cada nuevo proyecto exige respuestas diferentes. Por eso, en Prefabricados Lemona, S.A. queremos ofrecerle **algo más** que productos, queremos ofrecerle **soluciones**.

En unos casos se tratará de adaptar un elemento de serie a sus necesidades concretas; en otros, de diseñar y fabricar un elemento totalmente distinto. Cualquiera que sea la situación, no dude en consultarnos. Podemos proponerle soluciones.



Prefabricados Lemona, S.A. Zubiarte, 12

NOMBRE: _____

EMPRESA: _____

DIRECCION: _____

LOCALIDAD: _____

TELEFONOS: _____

Deseo recibir información sobre:

☐ Matière® ☐ Galerías en general ☐ Prefabricados en general

☐



**Prefabricados
Lemona, S.A.**

Licenciataria de ENTREPRISE
MATIÈRE - Francia

*fabricamos
soluciones*

Si desea más información sobre nuestras
soluciones, remítanos el cupón adjunto
o llame a uno de estos teléfonos:
(94) 6313227 - 6313105 - 6313307

Fax: (94) 6314185

Nos encantará atenderle.

48330 LEMONA - Vizcaya

IC

I/55 A

es el Cemento de Alta Resistencia de Uniland Cementera para la torre de comunicaciones de Collserola.

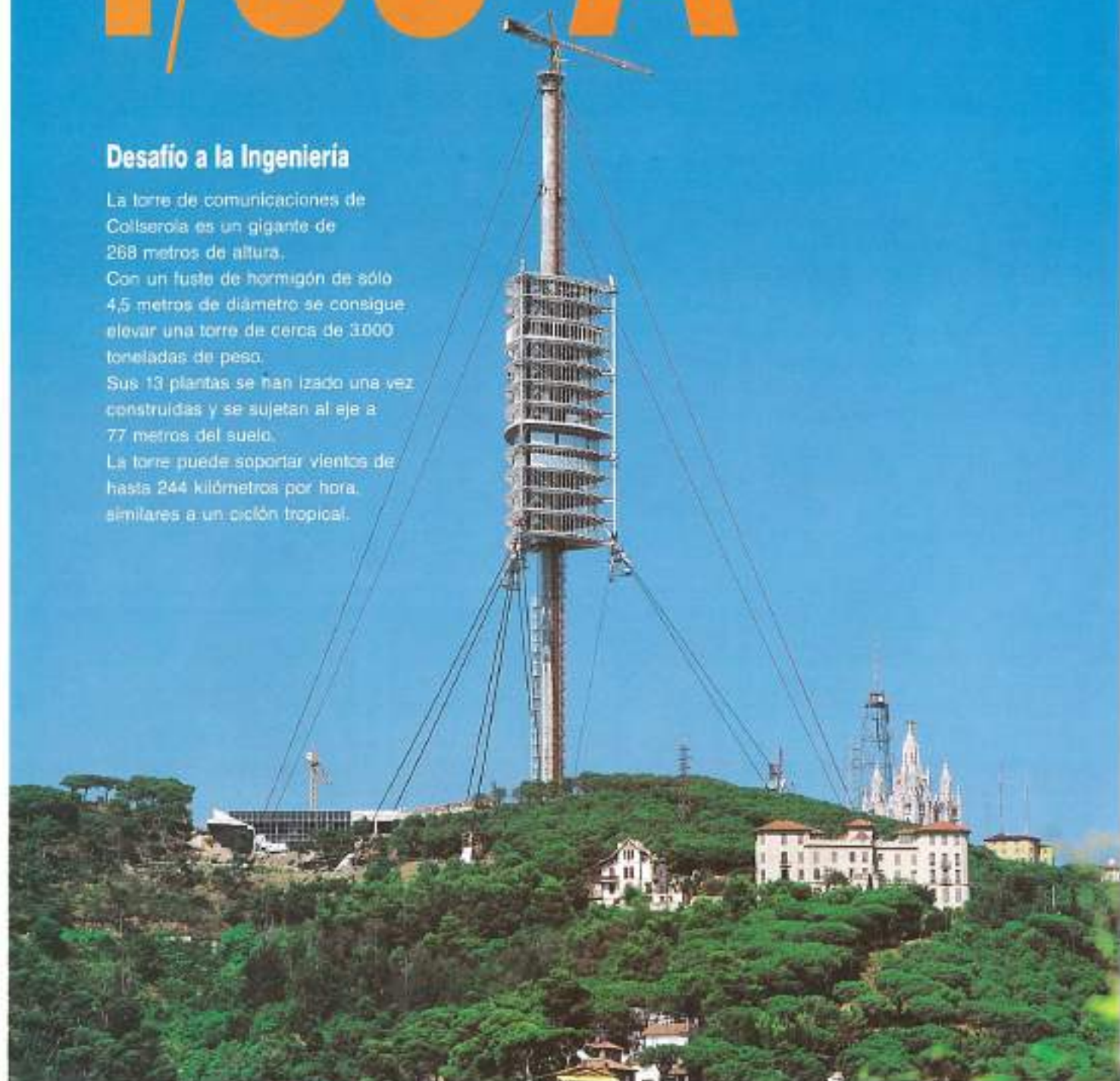
Desafío a la Ingeniería

La torre de comunicaciones de Collserola es un gigante de 268 metros de altura.

Con un fuste de hormigón de sólo 4,5 metros de diámetro se consigue elevar una torre de cerca de 3.000 toneladas de peso.

Sus 13 plantas se han izado una vez construidas y se sujetan al eje a 77 metros del suelo.

La torre puede soportar vientos de hasta 244 kilómetros por hora, similares a un ciclón tropical.



UNILAND

CON EL PROGRESO TÉCNICO