

# LA TECNICA DE LA CIRCULACION INVERSA DE LEVANTAMIENTO POR AIRE EN LA PERFORACION DE POZOS. FUNDAMENTOS Y ASPECTOS CUANTITATIVOS(\*)

Por JESUS L. PRESA SANTOS

Doctor Ingeniero de Caminos (A. T. K. Agromán)

ADOLFO ERASO ROMERO

Licenciado en Ciencias Químicas, A. D. Investigación y Métodos (Agromán)

*Los sistemas tradicionales de perforación no están concebidos para los grandes diámetros que se necesitan actualmente. Tanto la percusión, como la rotación por circulación directa, tienen inconvenientes fácilmente apreciables. Por ello surgió el sistema de rotación por circulación inversa, dentro del cual se ensayaron diversos procedimientos, imponiéndose entre ellos el de levantamiento por aire, que consiste, en esencia, en insuflar aire dentro del varillaje para disminuir el peso de la columna interior de manera que al ser mayor la carga del anular se prorrogue la circulación.*

*En el presente artículo, que por su extensión dividiremos en dos partes, se estudian las características del sistema. En esta primera parte se analizan las hipótesis de partida, estudiando el empuje ascensional y los parámetros que en él influyen. En la segunda parte, que aparecerá en el próximo número, se estudiará la velocidad real del fluido en la tubería y la influencia de las pérdidas de carga, así como la potencia requerida por los compresores y los aspectos reológicos del lodo más importantes, estableciendo, finalmente, interesantes conclusiones.*

## 1. Introducción.

La perforación por circulación inversa es una consecuencia de la moderna necesidad de perforar a grandes diámetros, con el fin de poder introducir bombas sumergibles de mayor potencia, ya que al ser los filtros cada vez más perfectos, el pozo puede entrar antes en servicio por reducirse el tiempo de desarrollo, y la vida del mismo puede ser más larga por reducirse los problemas de arrastre de finos.

De esta suerte, si el acuífero que se pretende explotar posee buen coeficiente de almacenamiento y alta transmisibilidad, podrán conseguirse elevados regímenes de bombeo, incluso en pequeñas velocidades de entrada de agua al pozo gracias al gran diámetro con que fue perforado.

Es evidente que los sistemas tradicionales

de perforación no están concebidos para realizarla a grandes diámetros; la *percusión*, por ejemplo, sería inoperante no sólo al tener que manejar los grandes pesos que alcanzarán los tubos de revestido, sino por los inconvenientes insoslayables que plantearían las uniones entre los mismos, donde el sistema tradicional de soldadura sería inadecuado y el roscado implicaría la adopción de un costoso sistema de entubado capaz de impartir elevados momentos torsores, que harían antieconómico el procedimiento. El sistema tradicional *rotary* por circulación directa tampoco es adecuado, pues, para la buena extracción de los detritus se necesitan velocidades de ascenso del lodo del orden de 100 a 120 pies por minuto, que multiplicado por las elevadas secciones de que constarían los pozos de grandes diámetros nos daría caudales considerables, para los que precisaríamos de enormes bombas, a todas luces incómodas y costosas.

Tratando de soslayar los referidos inconvenientes surgió el procedimiento de circulación

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de marzo de 1971.

inversa dentro del sistema *rotary*, por el cual el lodo entra desde el espacio anular, y tras atravesar la herramienta de corte arrastrando los detritus sale por el interior de los tubos, precisándose para la adecuada limpieza caudales notablemente menores.

Se han ensayado diferentes procedimientos que creemos interesante citar de pasada, aunque sólo posean interés histórico.

El primero consistió en dar presión sobre el anular que permanecería cerrado en la boca del sondeo por un inmenso prensaestopas que permitía sólo el paso y giro de la tubería. Se abandonó pronto, pues, los elevados empujes conseguidos actuaban sobre la superficie cubierta por la herramienta de corte tendiendo a hacer flotar la sarta.

Los intentos posteriores se centraron en crear depresiones dentro del varillaje, para lo que se utilizaron tanto robustas bombas centrífugas que succionaban directamente del varillaje, como instalando eyectores dentro del varillaje, provocando la succión por efecto venturi. Ambos procedimientos presentaban:

a) El inconveniente común de crear pequeñas depresiones (0,98 Kg./cm.<sup>2</sup> en el primer caso y 1,8 Kg./cm.<sup>2</sup> en el segundo, como máximo).

b) El inconveniente específico para el primer caso de que todos los detritus pasen necesariamente por la bomba.

c) El inconveniente específico para el segundo caso de que el área ocupada por el eyector dentro del varillaje supone un importante obstáculo en la extracción del detritus, perturbando su salida normal.

Tras ligeras variantes en los procedimientos descritos cobró gran auge el sistema de levantamiento por aire, objeto de estas líneas, que consiste en esencia en insuflar aire dentro del varillaje para disminuir el peso de la columna hidrostática interior, de manera que al ser mayor la carga del anular se provoque la circulación. Los empujes así conseguidos sólo están limitados por la capacidad del compresor utilizado; así encontraremos que es frecuente utilizarlos de 30 Kg./cm.<sup>2</sup>, capaces, pues, de crear depresiones muchísimo más elevadas que los otros procedimientos.

Los perfeccionamientos de detalle de dicha técnica han venido impuestos por la tónica de

dejar totalmente expedita la totalidad de la sección del varillaje por donde se extraerá el detritus, lo que se ha conseguido tanto a base de utilizar varillaje abridado en el que el aire se inyecta por dos tubos paralelos exteriores, como varillaje roscado doble en el que el aire transita por el que circunda al varillaje de extracción.

Lo importante en todos los casos es conseguir empujes cuanto más altos mejor, por lo que la única limitación del procedimiento solamente se presenta en la consecución de los primeros metros (hasta profundidades de 7 a 8 metros), razón por la cual las casas fabricantes de dichas máquinas acostumbran a dotar a sus equipos de un sistema complementario, generalmente a base de eyector, para salvar esta primera etapa.

Por todo lo considerado hasta ahora, es fácil de entender que la limitación de la profundidad a alcanzar, en el procedimiento de circulación inversa de levantamiento por aire, se halla condicionado a la capacidad de elevación de peso de las máquinas, no a la disminución de empujes por aumento de pérdidas de carga al crecer la longitud del varillaje, según se profundizan los pozos.

## 2. Hipótesis de partida.

Ya hemos visto que en el sistema de circulación inversa por levantamiento con aire, el principio básico del movimiento viene condicionado por la diferencia de densidades entre la columna exterior e interior, diferencia que nos definirá el empuje conseguido.

Para conocer la expresión del empuje hemos de recurrir a la figura 1, que representa el esquema de la circulación inversa, en ella las alturas y densidades indicadas representan:

$h_1$  = altura en metros de la manguera de salida del fluido de perforación con relación al nivel del pozo (lleno).

$h_2$  = distancia en metros entre la posición de la válvula de inyección de aire y el fondo del pozo (cuando se está perforando).

$\gamma_1$  = peso específico en Tm./m.<sup>3</sup> del fluido de perforación utilizado (lodo o agua).

$\gamma_2$  = peso específico en Tm./m.<sup>3</sup> del fluido de perforación que lleva en su seno

ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA CIRCULACION INVERSA DE LEVANTAMIENTO POR AIRE E HIPOTESIS DE EXPANSION ISOTERMICA DEL AIRE Y VARIACION LINEAL DE LA PRESION EN EL TRAMO DE LA EMULSION ( $h_1 + h_2$ )

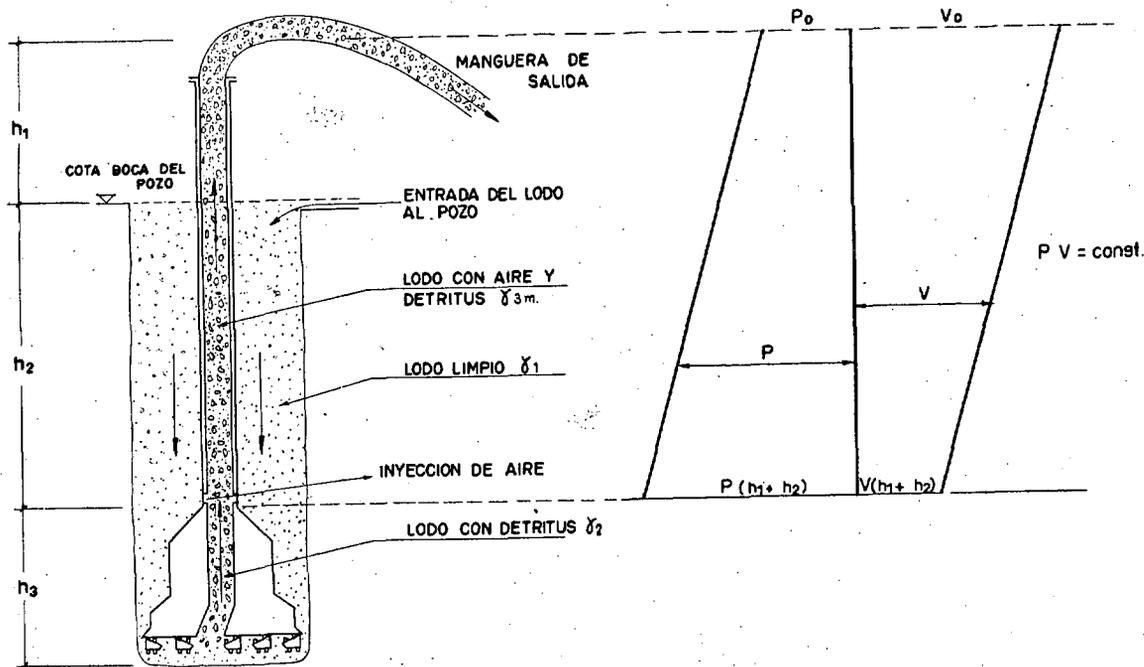


Figura 1.

los detritus arrancados por la herramienta de perforación.

$\gamma_{3m}$  = peso específico medio en Tm./m.<sup>3</sup> del fluido de perforación con detritus y aire inyectado.

Entonces, el empuje  $E$  nos vendrá dado por la diferencia de cargas entre la columna exterior y la interior, según la expresión:

$$E = \gamma_1 (h_2 + h_3) - [\gamma_2 h_3 + \gamma_{3m} (h_1 + h_2)] \quad (2-1)$$

en Tm./m.<sup>2</sup>.

Es evidente que a dicha expresión habríamos de restarle otro término correspondiente a las pérdidas de carga, pero como éstas dependen fundamentalmente de la velocidad de circulación, las abordaremos cuando tratemos dicho tema.

En la expresión (2-1) conocemos inmediatamente  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  y  $\gamma_1$ , no así  $\gamma_{3m}$  y  $\gamma_2$ , que deberemos la primera estimar analíticamente mediante la introducción de algunas hipótesis, y la segunda, a partir de unos pocos datos fácilmente obtenibles a pie de tajo, en las perforaciones.

Estimación de  $\gamma_{3m}$ .

Si utilizamos agua como fluido de perforación, la densidad media de la emulsión es evidente que será:

$$\gamma_{3m} = \frac{Q_w}{Q_w + Q_{Am}} \quad (2-2)$$

siendo:

$Q_w$  = caudal del agua en circulación.

$Q_{Am}$  = caudal medio de aire en la columna  $h_1 + h_2$ .

de los que  $Q_w$  se puede medir en el tajo, tanto a la salida como a la entrada al pozo en el circuito de superficie;  $Q_{Am}$  debemos estimarlo.

Para ello, si suponemos que la expansión del aire en la tubería es isotérmica ( $P V = \text{const}$ ), y admitimos que la variación de la presión es lineal desde el punto de entrada del aire (cota  $h_1 + h_2$ ) a la salida y que el peso del aire es despreciable frente al del agua, se cumplirá el

esquema dispuesto a la derecha de la figura 1, según el cual:

$$V_m = \frac{V_0 + V_{(h_1 + h_2)}}{2}$$

siendo:

$V_m$  = volumen específico medio del aire.

$V_0$  = volumen del aire en las condiciones exteriores.

$V_{(h_1 + h_2)}$  = volumen del aire a la cota  $h_1 + h_2$ .

relación que también será válida para los caudales:

$$Q_{Am} = \frac{Q_{A_0} + Q_{A(h_1 + h_2)}}{2} \quad (2-3)$$

$Q_{A_0}$  = caudal del aire en las condiciones exteriores (que podemos conocer sabiendo las características del compresor).

$Q_{A(h_1 + h_2)}$  = íd. a la cota  $h_1 + h_2$ .

Es evidente que se cumplirá la relación siguiente al conservarse la cantidad de movimiento:

$$Q_{A_0} \cdot 10 = Q_{A(h_1 + h_2)} \cdot \gamma_{3m} \cdot (h_1 + h_2)$$

mediante la que:

$$Q_{A(h_1 + h_2)} = \frac{10 \cdot Q_{A_0}}{\gamma_{3m} \cdot (h_1 + h_2)}$$

valor que reemplazado en la expresión (2-3) queda la expresión:

$$Q_{Am} = \frac{1}{2} \left( Q_{A_0} + \frac{10 \cdot Q_{A_0}}{\gamma_{3m} \cdot (h_1 + h_2)} \right)$$

que introducido a su vez en la (2-2) obtenemos:

$$\gamma_{3m} = \frac{Q_w}{Q_w + \left[ Q_{A_0} + \frac{10 \cdot Q_{A_0}}{\gamma_{3m} \cdot (h_1 + h_2)} \right] \frac{1}{2}}$$

si ahora introducimos el valor de  $r$  como la relación entre el caudal de aire inyectado en condiciones exteriores (a la entrada del compresor) y el caudal de agua en la circulación (ambos valores conocidos en el sondeo), de manera que:

$$r = \frac{Q_{A_0}}{Q_w}$$

y lo introducimos en la expresión, llegamos a:

$$\gamma_{3m} = \frac{1}{1 + \frac{r}{2} \left[ 1 + \frac{10}{\gamma_{3m} (h_1 + h_2)} \right]}$$

y procediendo ahora a la separación de  $r$  y  $\gamma_{3m}$ :

$$\gamma_{3m} + \gamma_{3m} \cdot \frac{r}{2} \left[ 1 + \frac{10}{(h_1 + h_2) \gamma_{3m}} \right] = 1$$

$$\gamma_{3m} + \gamma_{3m} \cdot \frac{r}{2} + \frac{10r}{2(h_1 + h_2)} = 1$$

$$\gamma_{3m} \left( 1 + \frac{r}{2} \right) = 1 - \frac{5r}{(h_1 + h_2)}$$

queda, finalmente:

$$\gamma_{3m} = \frac{1}{1 + \frac{r}{2}} - \frac{5r}{(h_1 + h_2) \left( 1 + \frac{r}{2} \right)} \quad (2-4)$$

Su forma gráfica la hemos calculado en la figura 2 para diferentes valores de  $r$  utilizando como abscisa las profundidades de entrada de aire  $h_1 + h_2$  y como ordenadas los valores buscados de  $\gamma_{3m}$ .

Es evidente que para profundidades elevadas se tiende al valor asintótico:

$$\gamma_{3m} = \frac{1}{1 + \frac{r}{2}}$$

mientras que para profundidades someras  $\gamma_{3m}$  se anula cuando:

$$h_1 + h_2 = 5r$$

que nos define la profundidad umbral, a partir de la cual comienza a producirse el levantamiento.

En el caso de utilizar lodo en lugar de agua, el valor encontrado de  $\gamma_{3m}$  en la figura 2, deberá ser multiplicado por el peso específico del mismo  $\gamma_1$  (dividido por el peso específico del agua para que sea adimensional).

CALCULO DEL PESO ESPECÍFICO DE LA EMULSION  $\gamma_{3m}$  EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD DE INYECCION DE AIRE ( $h_1 + h_2$ ) Y DE LA RELACION DE VOLUMENES  $r$  UTILIZANDO AGUA COMO FLUIDO DE PERFORACION.

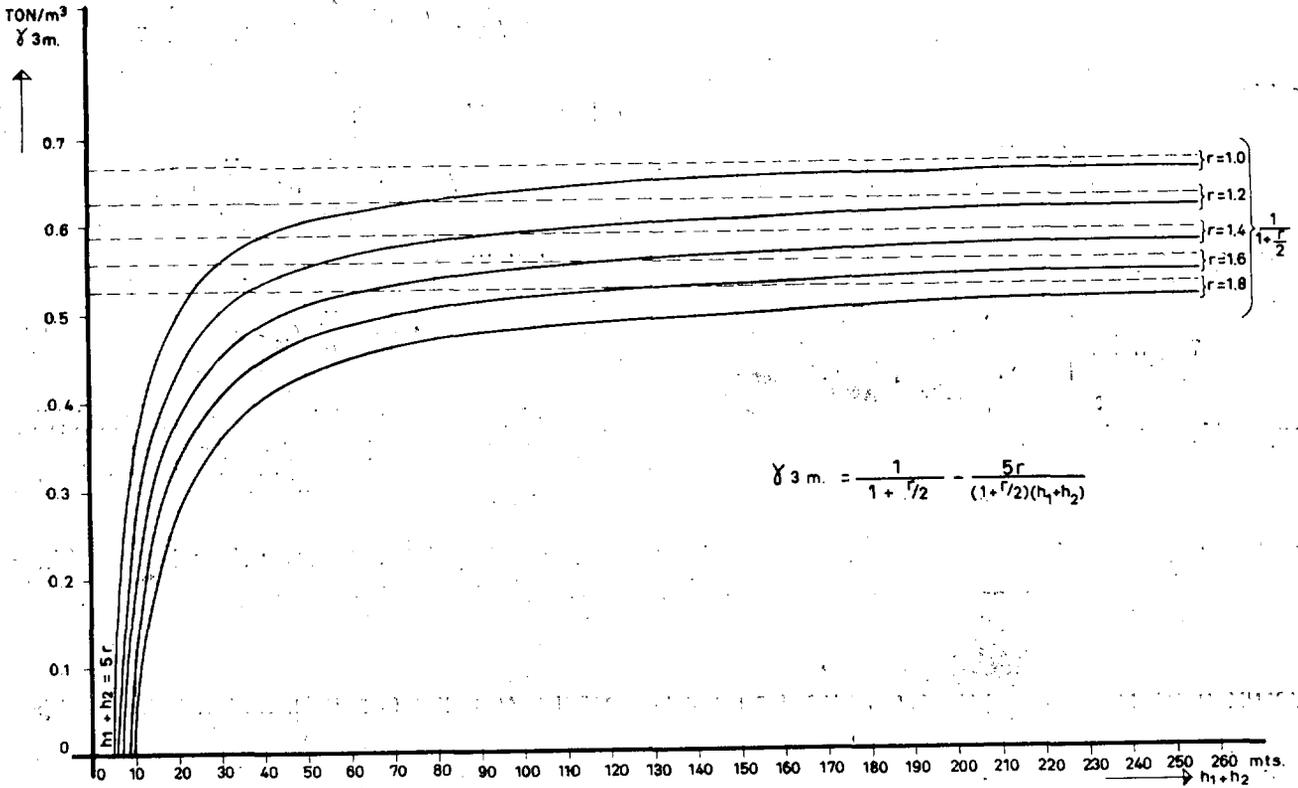


Figura 2.

Finalmente, y en condiciones de perforación, es decir cuando se está extrayendo detritus, que es el caso más frecuente y real, el valor de  $\gamma_{3m}$  encontrado en la figura 2 deberá ser multiplicado por  $\gamma_2$  (adimensional) para obtener su valor real.

*Estimación de  $\gamma_2$ .*

Si denominamos  $V_1$  al volumen de fluido de perforación que en un momento dado pasa a través de la herramienta de corte arrastrando consigo un volumen  $V_2$  de detritus, y admitimos que ambos, lodo y detritus, no son comprensibles, se cumple:

$$V_t = V_1 + V_2 \quad (2-5)$$

siendo  $V_t$  = volumen total.

De la misma manera sus respectivos pesos específicos serán:

$\gamma_1$  = peso específico del fluido de perforación en Tm./m.<sup>3</sup>.

$\gamma_s$  = ídem de los detritus de perforación en toneladas métricas/m.<sup>3</sup>.

$\gamma_2$  = peso específico de la mezcla en toneladas métricas/m.<sup>3</sup>.

Si admitimos la constancia de las masas que intervienen, se cumple también:

$$\gamma_2 \cdot V_t = V_1 \cdot \gamma_1 + V_2 \cdot \gamma_s \quad (2-6)$$

de manera que despejando  $\gamma_2$  tenemos:

$$\gamma_2 = \frac{V_1 \gamma_1 + V_2 \gamma_s}{V_t}$$

y reemplazando  $V_1$  por su valor en (2-5) queda:

$$\gamma_s = \frac{(V_t - V_2) \gamma_1 + V_2 \gamma_s}{V_t}$$

o bien:

$$\gamma_s = \frac{V_t - V_2}{V_t} \gamma_1 + \frac{V_2}{V_t} \gamma_s$$

y, finalmente:

$$\gamma_s = \gamma_1 + \gamma_1 \left[ \frac{V_t - V_2}{V_t} - 1 \right] + \frac{V_2}{V_t} \gamma_s$$

expresión que toma la forma de:

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \Delta \gamma_1 \quad (2-7)$$

en la que  $\Delta \gamma_1$  equivale al incremento de densidad sufrido por el fluido de perforación como

consecuencia de los detritus arrastrados en su seno; entonces:

$$\Delta \gamma_1 = \left( \frac{V_t - V_2}{V_t} - 1 \right) \gamma_1 + \frac{V_2}{V_t} \gamma_s$$

o lo que es lo mismo:

$$\Delta \gamma_1 = - \frac{V_2}{V_t} \gamma_1 + \frac{V_2}{V_t} \gamma_s$$

y en definitiva:

$$\Delta \gamma_1 = \frac{V_2}{V_t} (\gamma_s - \gamma_1) \quad (2-8)$$

expresión en la que deberemos conocer  $V_2/V_t$  en función de la velocidad de avance de perforación y del volumen de fluido desplazado en un tiempo dado.

Para ello, debemos recurrir a las combinaciones más usuales de diámetro de pozo y diámetro

VOLUMEN DE LODO CIRCULANTE A TENOR DE SU VELOCIDAD DE ASCENSO POR EL INTERIOR DEL VARILLAJE

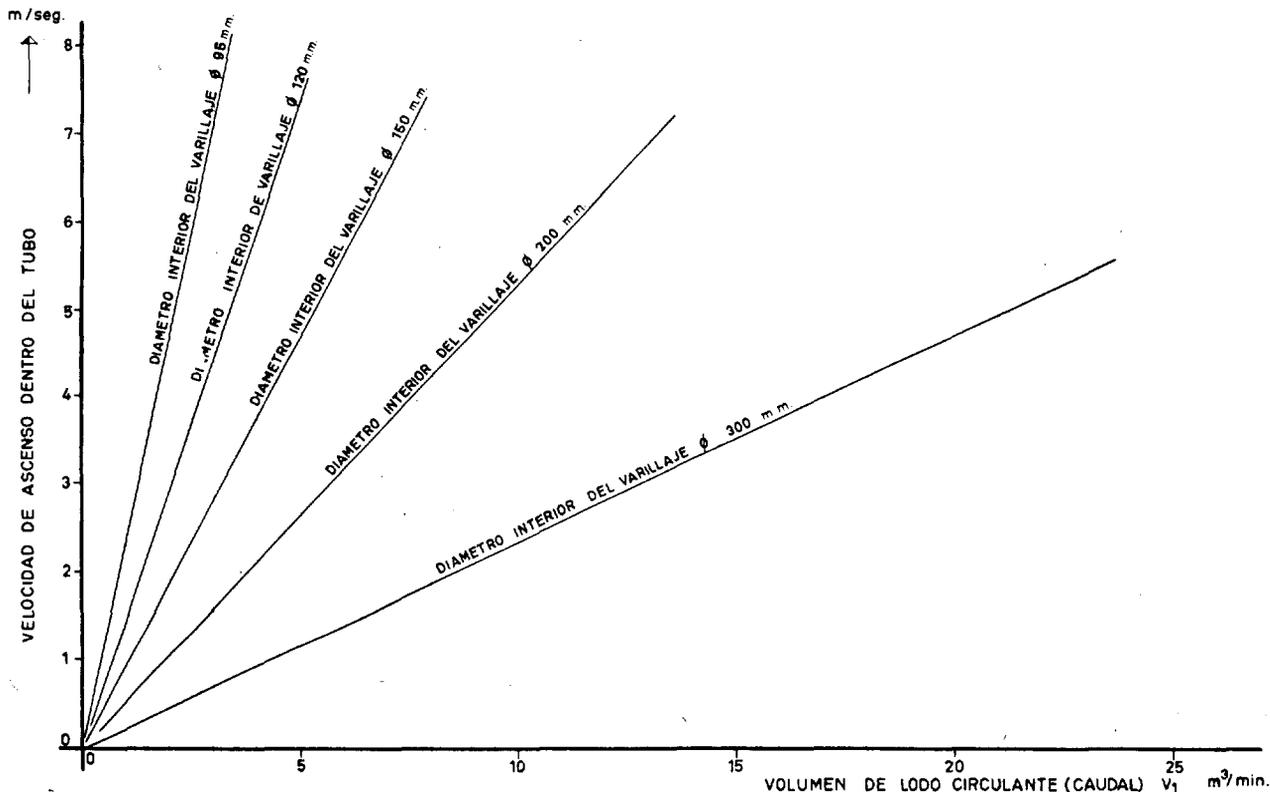


Figura 3.

metros interiores de varillaje utilizados, entre las que seleccionamos las siguientes combinaciones:

TABLA 1

Ø Varillaje mm.	Ø POZO mm.
95	445
120	600
150	1 000
200	1 500
300	2 000

Entonces, en la figura 3 presentamos el volumen  $V_1$  de fluido de perforación en abscisas que pasa en un tiempo dado (en m.<sup>3</sup>/min.) por el interior de cada uno de los varillajes considerados, en función de su velocidad de ascenso (en m./seg.) en ordenadas.

De la misma manera en la figura 4, en función de la velocidad de avance de perforación (metros/h.) en ordenadas, obtenemos en abscisas en función del diámetro de pozo utilizado en la perforación, el volumen de detritus  $V_2$  excavado en un momento dado (en l./min.).

Con las figuras 3 y 4 podemos ya estimar  $V_2/V_t$ .

Como en nuestros datos de campo hemos encontrado para la relación  $V_2/V_t$  valores comprendidos entre el 2 y el 5 por 100, expresamos en la figura 5 el valor de  $\Delta \gamma_1$  en Tm./m.<sup>3</sup> en ordenadas, en función de la densidad inicial del lodo  $\gamma_1$  y de la relación  $V_2/V_t$ , para valores comprendidos entre 0,5 y 8 por 100, suponiendo que la densidad del terreno atravesado  $\gamma_2$  es igual a 2,2 Tm./m.<sup>3</sup>.

En definitiva, sin más que reemplazar el valor encontrado en la figura 5 para  $\Delta \gamma_1$ , obtenemos el valor buscado de  $\gamma_2$ .

Resumiendo, los datos necesarios para po-

CANTIDAD DE DETRITUS EXTRAIDO SEGUN LA VELOCIDAD DE AVANCE DE PERFORACION

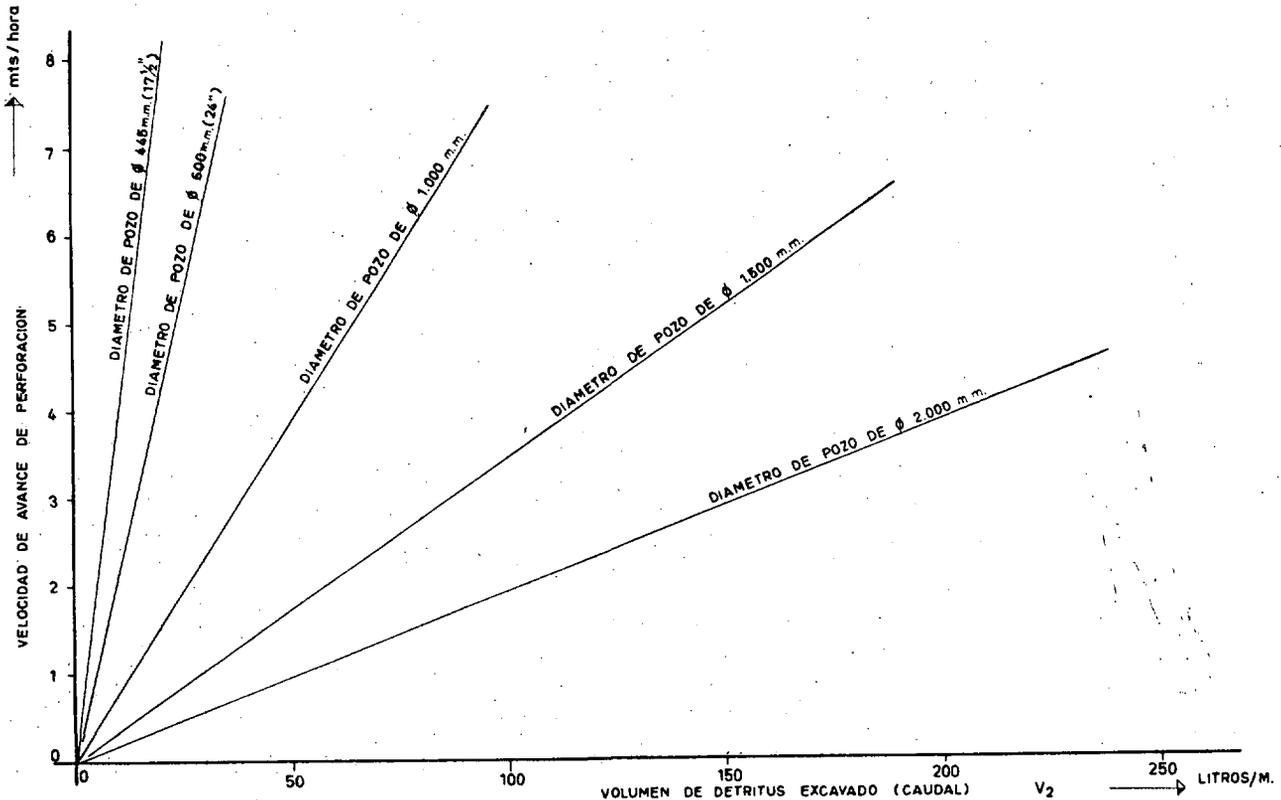


Figura 4

INCREMENTO DEL PESO ESPECIFICO DEL LODO AL EXTRAER LOS DETRITUS

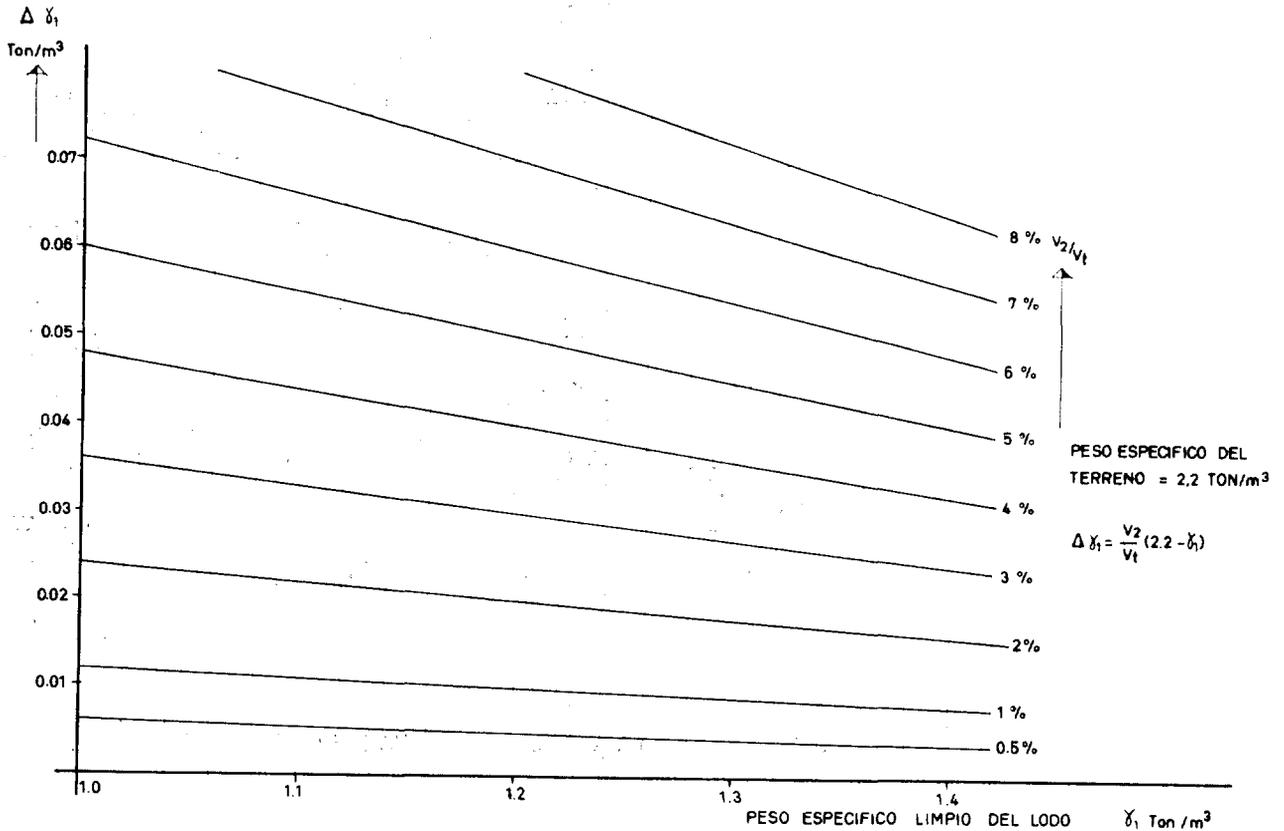


Figura 5.

der conocer todos los términos que intervienen en la expresión del empuje (2-1) son:

La altura del cayado de la manguera de salida del lodo, con relación al nivel del mismo en el espacio anular (generalmente, 3 m.).

La profundidad de la válvula de inyección del aire:

La profundidad del pozo.

El diámetro del pozo.

El diámetro interior del varillaje.

La densidad del lodo utilizado.

El caudal de aire inyectado por el compresor (que debe estar tomado en la succión del mismo) que es una característica del mismo, dada en condiciones normales, por lo que deberemos hacer la correspondiente corrección de altitud del emplazamiento.

El caudal del lodo, tanto a la salida de la manguera  $V_t$  (con detritus) o la entrada en el espacio anular  $V_1$  ó  $Q_w$  (limpio).

Para este último dato, quizá el más difícil de medir, recomendamos la instalación a la entrada del pozo del retorno de circulación un vertedero de lámina o estrangulador que nos estima en cada momento con una altura equivalente, el caudal que tenemos de régimen, procedimiento más sencillo y seguro que medir la velocidad de ascenso en el interior del varillaje.

**3. El empuje ascensional en función de otros parámetros.**

Una vez conocidos la totalidad de los términos que intervienen en la expresión de los empujes (2-1) es interesante observar cómo varían éstos con relación a cada uno de los términos de que dependen, fijando los demás.

Para medir dichos empujes en kilogramos por centímetro cuadrado, debemos dividir por 10 cada uno de los términos del segundo miem-

bro de la expresión (2-1), que sabemos vienen dados en toneladas métricas por metro cuadrado.

Como la mayoría de las perforaciones las hemos realizado utilizando un lodo estándar de bentonita Clarsol FB-2 al 6,8 por 100 en agua, al perforar formaciones terciarias, su peso específico se nos ha ajustado espontáneamente en  $\gamma_1 = 1,2 \text{ Tm./m.}^3$ , vamos a expresar prácticamente los resultados siempre que podamos, tanto para el caso en que el fluido de perforación fuera agua ( $\gamma_1 = 1,0 \text{ Tm./m.}^3$ ) como el referido lodo.

**Caso 1;  $f(E, h_2)$ .** — Se trata de ver la variación del empuje en función de la cota de inyección de aire.

Suponemos, que la inyección de aire se efectúa inmediatamente encima de la herramienta de corte:

$$h_3 \approx 0$$

que la manguera de salida está elevada 3 m. sobre el retorno de entrada al pozo (lleno):

$$h_1 = 3$$

que usamos indistintamente como fluido de perforación agua o lodo:

$$\gamma_1 = 1,0$$

$$\gamma_1 = 1,2$$

que la relación  $r$  de caudal de aire con respecto al fluido de perforación es:

$$r = 1,4$$

que los detritus extraídos no afectan al peso específico del fluido de perforación:

$$\gamma_1 \approx \gamma_2$$

entonces, la ecuación de empujes toma la forma (en kilogramos por centímetro cuadrado):

$$E = 0,1 \cdot \gamma_1 \cdot h_2 - 0,1 \cdot \gamma_3 \cdot m(3 + h_2) \frac{\gamma_1}{\gamma}$$

VARIACION DEL EMPUJE EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD DE INYECCION DE AIRE

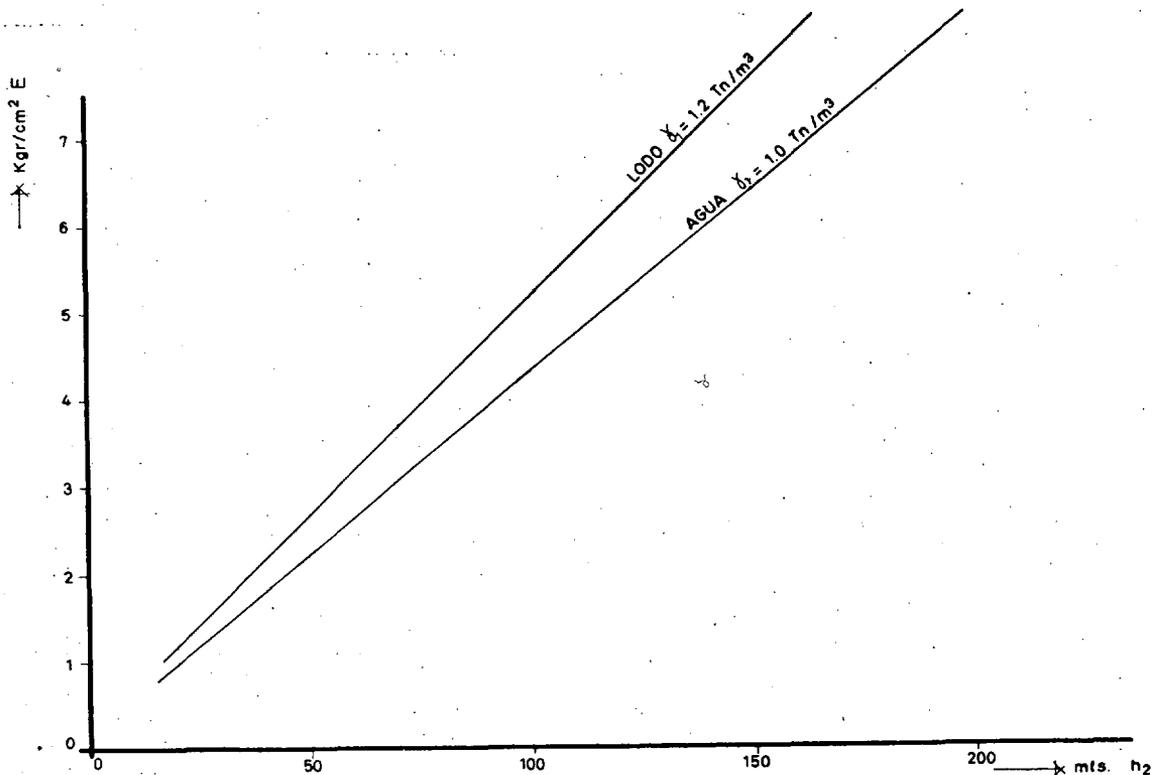


Figura 6.

y después de calcular  $\gamma_{3m}$  mediante la figura 2, dando valores a los restantes términos encontramos los resultados en la figura 6 que nos muestra claramente cómo los empujes crecen en proporción lineal a la profundidad de inyección de aire  $h_2$ .

Caso 2;  $f(E, h_3)$ . — Consiste en observar la variación del empuje según aumenta la profundidad del pozo para el que no se dispone sino de un compresor limitado (vgr.: 7 Kg./cm.<sup>2</sup>, caso muy frecuente) incapaz de inyectar aire en columnas de agua superiores a 60 m.

Consideramos como fijos:

$$r = 1,4$$

$$h_1 = 3 \text{ m.}$$

$$\gamma_1 \begin{cases} = 1,0 \text{ Tm./m.}^3 \text{ (agua)} \\ = 1,2 \text{ Tm./m.}^3 \text{ (lodo)} \end{cases}$$

$$h_2 \begin{cases} = 60 \text{ m. (agua)} \\ = 50 \text{ m. (lodo)} \end{cases}$$

y como cantidad de detritus correspondiente a la perforación una relación:

$$\frac{V_2}{V_t} = 2 \text{ o/}_0$$

En este caso, la expresión de los empujes toma la forma:

$$E = 0,1 \cdot \gamma_1 \cdot (h_2 + h_3) + 0,1 \cdot \gamma_2 h_3 + 0,1 \cdot \gamma_{3m} (3 + h_3) \frac{\gamma_2}{1}$$

y calculando  $\gamma_{3m}$  y  $\gamma_2$ , respectivamente, de las figuras 2 y 5 y después de dar valor a los restantes parámetros, expresamos los resultados en la figura 7, que nos muestra cómo disminuyen los empujes al aumentar la carga hidrostática de la fracción de columna  $\gamma_2 h_3$ .

A título de curiosidad hemos incluido en la figura 7, los casos correspondientes a perforaciones con lodo de 2 000 mm., 1 000 mm. y 445 mm., utilizando respectivamente varillaje de

INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD DEL POZO SOBRE LOS EMPUJES CUANDO EL COMPRESOR UTILIZADO NO SOBREPASA UNA PRESION LIMITADA

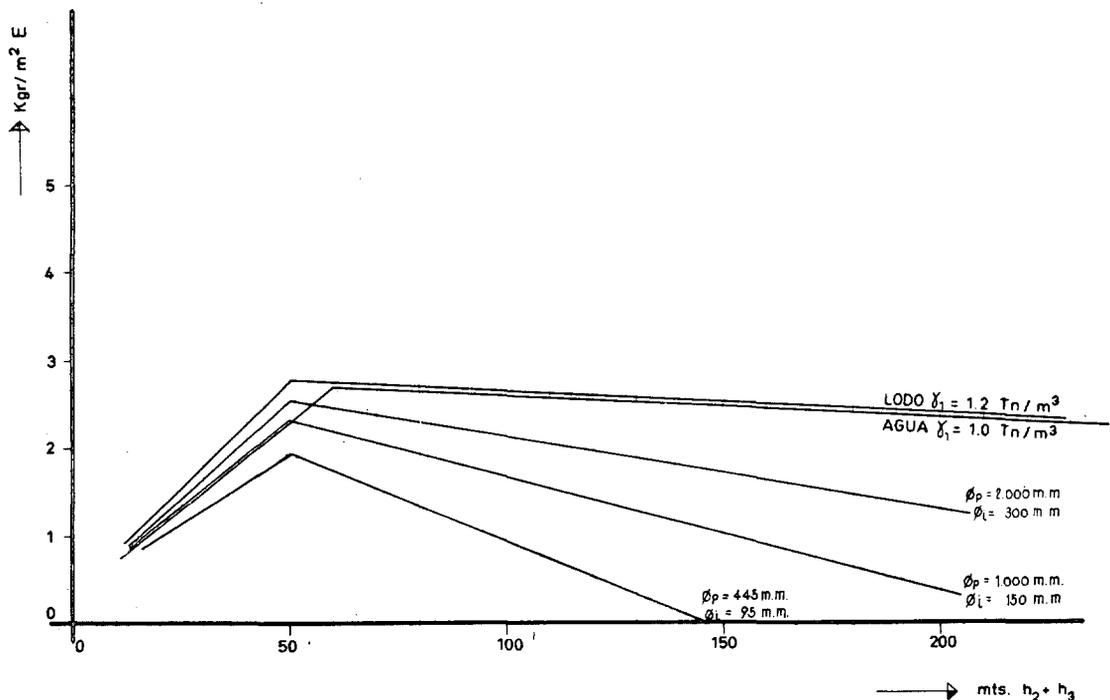


Figura 7.

diámetro interior 300 mm., 150 mm. y 95 mm. en los que hemos restado del valor del empuje las pérdidas de carga para una velocidad de ascenso de lodo en los tubos de 3,30 m./seg.

Es notable cuan rápidamente desciende el valor de los empujes, limitando en consecuencia la profundidad a alcanzar.

Caso 3;  $f(E, \gamma_1)$ . — Variación del empuje en función del peso específico del fluido utilizado.

Partimos de las siguientes hipótesis:

$$h_1 = 3 \text{ m.}$$

$$r = 1,4$$

$$h_2 = h_3$$

$$h_2 + h_3 = 200 \text{ m.}$$

y la velocidad de avance de perforación corresponde a la relación:

$$\frac{V_s}{V_t} = 2\%$$

la ecuación de empuje nos queda:

$$E = 0,1 \cdot \gamma_1 \cdot 200 - 0,1 \cdot 103 \cdot \gamma_{3m} - 0,1 \cdot 100 \cdot \gamma_2$$

y calculando como siempre  $\gamma_{3m}$  y  $\gamma_2$  en las figuras 2 y 5, expresamos en la figura 8 los resultados de la función, que nos dice que es directamente proporcional al aumento del peso específico utilizado.

Caso 4,  $f(E, \gamma_2)$ . — Como varía el empuje según aumenta la cantidad de retrituras arrastrado por el lodo, o lo que es lo mismo, según aumenta la velocidad de penetración del sondeo.

Suponemos como condiciones fijas:

$$h_1 = 3 \text{ m.}$$

$$\gamma_1 = 1,2 \text{ Tm./m.}^3$$

$$r = 1,4$$

$$h_2 = h_3$$

$$h_2 + h_3 = 200 \text{ m.}$$

VARIACION DE LOS EMPUJES EN FUNCION DEL PESO ESPECIFICO DEL FLUIDO DE PERFORACION UTILIZADO

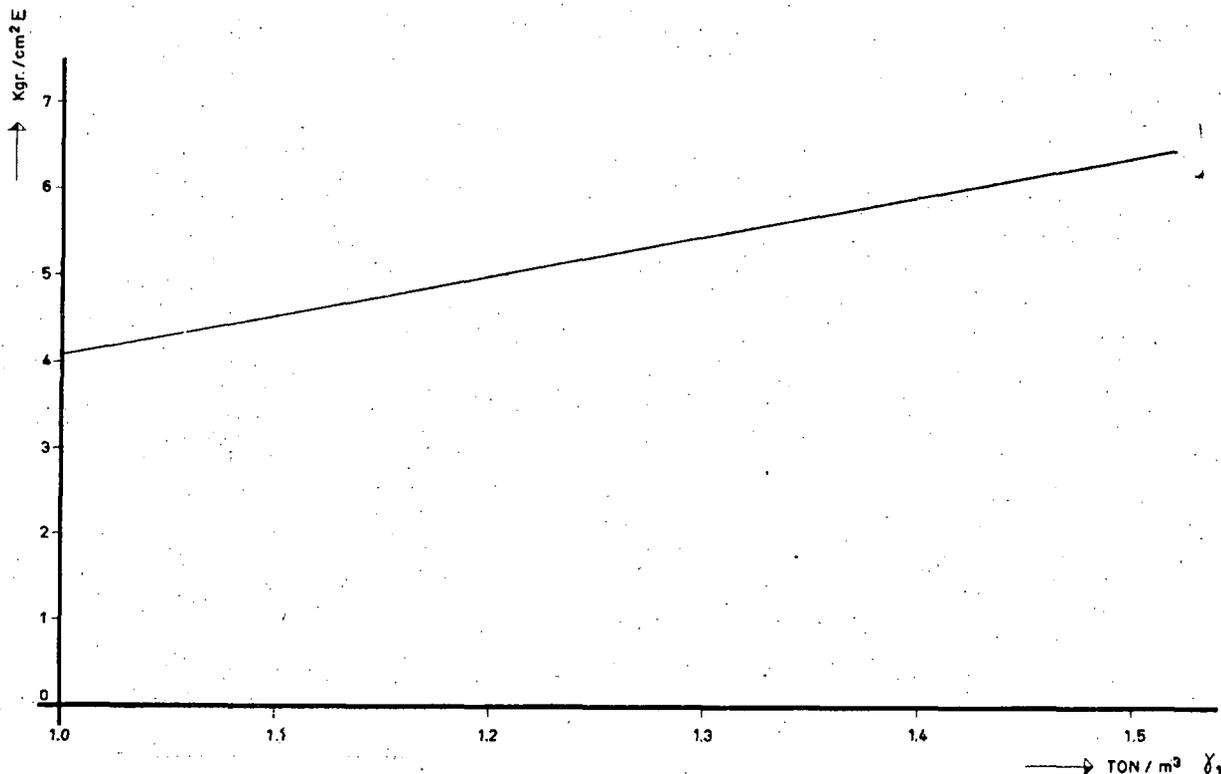


Figura 8.

VARIACION DEL EMPUJE EN FUNCION DE LA CANTIDAD DE DETRITOS EXTRAIDA EN UN MOMENTO DADO

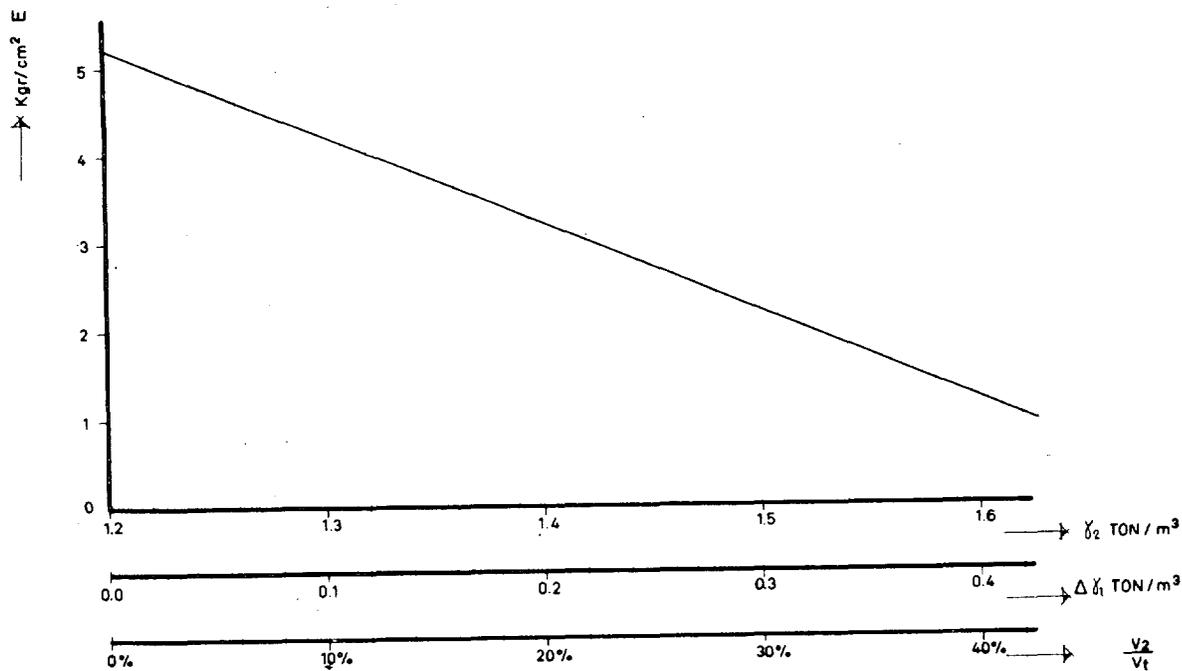


Figura 9.

RELACION ENTRE EL AVANCE DE PERFORACION Y EL INCREMENTO DEL PESO ESPECIFICO DEL LODO POR INCORPORACION DE DETRITOS EN SU SENO

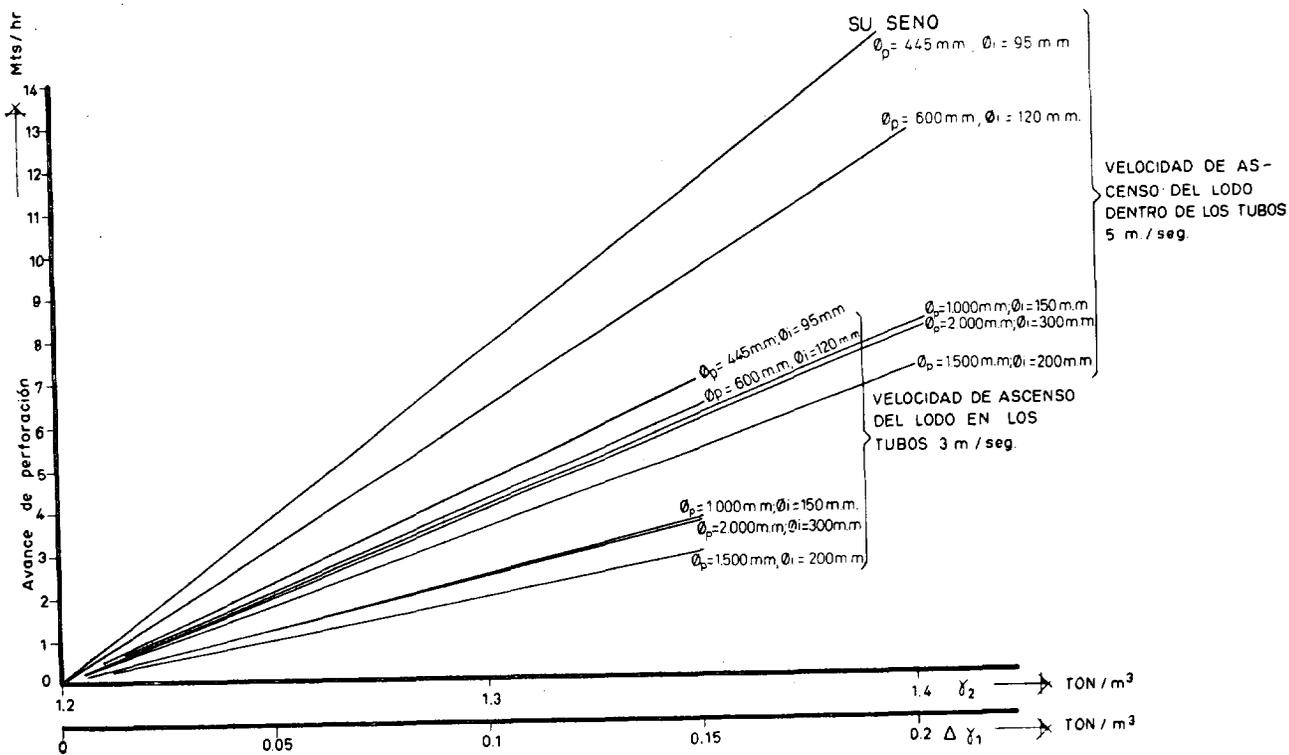


Figura 10.

con lo que la ecuación de los empujes se nos convierte en:

$$E = 0,1 \cdot 200 \cdot 1,2 - 0,1 \cdot 103 \cdot 0,55 \cdot \frac{1,2}{1} - 0,1 \cdot 100 \cdot \gamma_2$$

y utilizando las figuras 3, 4 y 5, llegamos a los resultados de la figura 9 en la que se ve cómo descienden los valores del empuje al aumentar la velocidad de perforación.

Hemos expresado en abscisas, tanto los valores de  $\gamma_2$ , como los relativos a  $\Delta \gamma_1$  y  $\frac{V_s}{V_f}$ .

Si partimos de las combinaciones más corrientes en las máquinas de circulación inversa expresada en la Tabla 1, interesa ver cómo varía la velocidad de avance de perforación en función del incremento de densidad sufrido por el lodo, al que suponemos un peso específico de 1,2. Para ello debemos de fijar la velocidad de ascenso del lodo en el interior del varillaje, por debajo de la entrada de aire.

En la figura 10, hemos expresado estos resultados para dar valores de velocidad del lodo correspondientes a 3 y 5 m./seg.

El sentido físico de dicha figura, pues, nos

define ni más ni menos, qué combinación de diámetro de pozo y varillaje nos dará una mejor limpieza de pozo. Se ve en seguida que existe el siguiente orden, partiendo de una mejor limpieza:

Ø 445 mm.	Ø 95 mm.
Ø 600 mm.	Ø 120 mm.
Ø 1 000 mm.	Ø 150 mm.
Ø 2 000 mm.	Ø 300 mm.
Ø 1 500 mm.	Ø 200 mm.

que se traducirá en una penetración más rápida si los otros parámetros de perforación se conservan constantes.

*Caso 5, f (E, h<sub>1</sub>).* — Como varía el empuje en función a la altura de salida del lodo con relación al nivel del mismo en el pozo.

Hasta ahora hemos supuesto que el anular del pozo estaba siempre lleno, pero, a veces, en el transcurso de la perforación, por aparición de horizontes permeables el nivel puede quedar más bajo. Interesa ver entonces qué pasa con el empuje, para ver si se puede producir el levantamiento por aire.

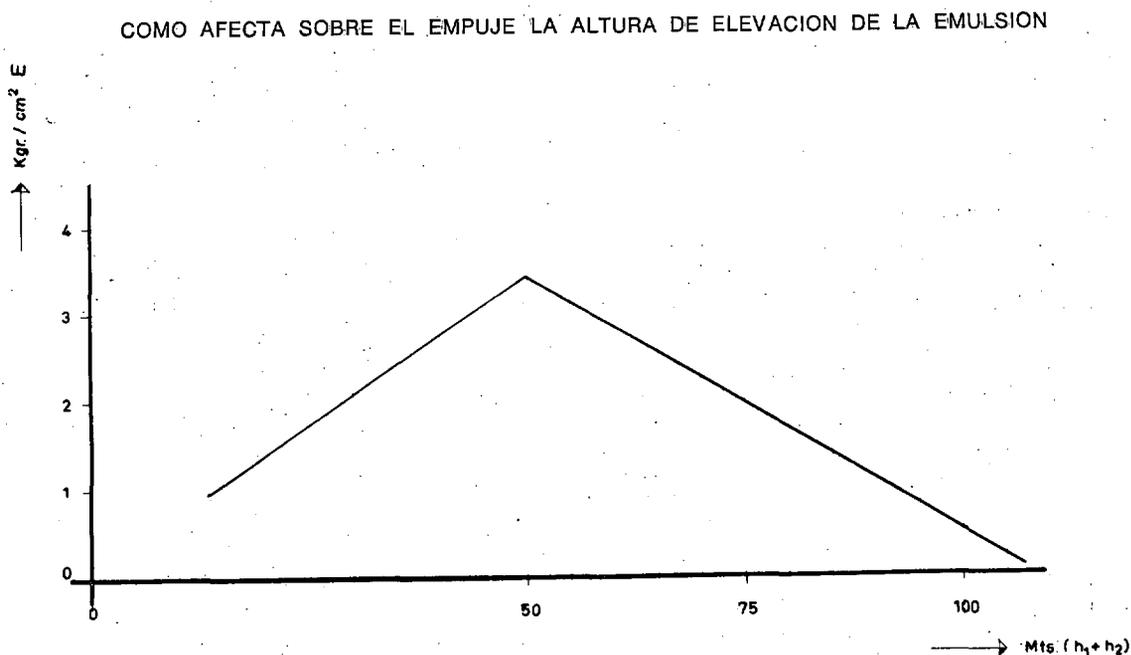


Figura 11.

Suponemos fijos:

$$h_3 = 0.$$

$$h_2 = 50 \text{ m.}$$

$$r = 1,4.$$

$$\gamma_{11} = 1,2 \text{ Tm./m.}^3.$$

$$V_2/V_t = 1.$$

Vamos a suponer fijos los siguientes valores:

$$h_1 = 3 \text{ m.}$$

$$h_2 = h_3.$$

$$h_2 + h_3 = 100.$$

$$\gamma_{11} = 1,2.$$

$$V_2/V_t = 20\%.$$

y la ecuación del empuje nos tomará la forma:

$$E = 0,1 \cdot 50 \cdot 1,2 - 0,1 \cdot \gamma_{3m} \cdot (50 + h_1) \frac{1,2}{1}$$

En este caso la ecuación de empuje nos toma la forma:

$$E = 0,1 \cdot 1,2 \cdot 100 - 0,1 \cdot 50 \cdot 1,22 - 0,1 \cdot 53 \cdot \gamma_{3m} \cdot \frac{1,22}{1}$$

INFLUENCIA DE LA RELACION  $r = \frac{Q A_0}{Q w}$  SOBRE EL EMPUJE

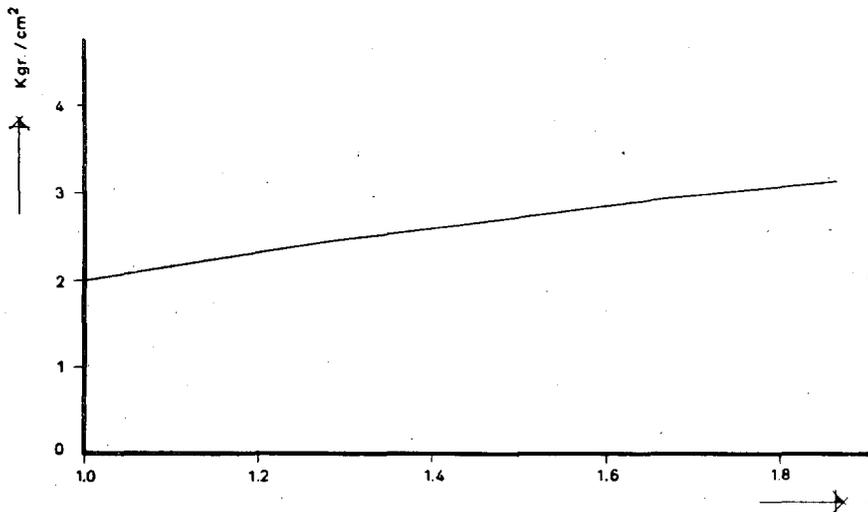


Figura 12.

de manera que dando valores como en los precedentes y expresando los resultados en la figura 11, observamos cómo el empuje disminuye rápidamente a tenor de aumento de  $h_1$ .

**Caso 6,  $f(E, r)$ .** — Influencia de la relación de caudales aire-fluido de perforación, sobre el empuje.

En todos los casos anteriores hemos considerado para  $r$  el valor 1,4, que es el que empíricamente dan las casas constructoras. Interesa ahora dar a  $r$  diferentes valores, ya que afecta directamente al valor de  $\gamma_{3m}$ , de manera que este caso equivale a considerar la función  $f(E, \gamma_{3m})$ .

y dando diferentes valores a  $r$  después de calcular mediante la figura 2 los correspondientes a  $\gamma_{3m}$ , en la figura 12, hemos expresado los resultados que nos indican que el empuje crece proporcionalmente al aumentar el valor de la relación  $r$ .

Si lo que se persigue en la técnica de levantamiento por aire es conseguir buenos empujes y  $r$  es directamente proporcional a ellos, parece lógico aumentar la relación  $r$  por encima de 1,4. En los apartados siguientes despejaremos esta incógnita por procedimientos analíticos que, como veremos, estarán en perfecta concordancia con los datos empíricos utilizados por las casas fabricantes.

(Continuará.)