# EL RENDIMIENTO Y EL COSTO EN OBRAS DE CIMENTACIONES(*)

Por MANUEL VIDAL HEREDERO
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Dos conceptos fundamentales se manejan constantemente en toda obra: el rendimiento (velocidad con que se lleva a cabo la misma o alguna de sus unidades) y el costo del producto terminado.*

*Estos dos conceptos se encuentran intimamente relacionados, como todos sabemos; se habla, por ejemplo, de que "al aumentar el rendimiento decrece el costo" o de que "al aumentar el volumen de obra (medición) disminuye el costo unitario". Ello puede dejar de ser cierto en algunos casos, como se recoge en el presente artículo.*

*Este relaciona matemáticamente estos conceptos tan vagos (a veces deliberadamente vagos) de rendimiento y costo y deduce las fórmulas fundamentales que enlazan a ambos, y todo ello aplicado a cimentaciones, aunque los conceptos que se manejan en este artículo son de aplicación y validez generales.*

*Se incluyen unos gráficos generales y otros de aplicaciones muy concretas, así como unos resultados estadísticos sobre costo-rendimiento obtenidos en obras de pilotaje por el autor a lo largo de varios años de dedicación a dicha especialidad.*

## 1. Introducción.

El presente artículo trata de relacionar de una manera clara dos conceptos familiares para el ingeniero y el técnico: el rendimiento de una obra (velocidad con que se lleva a cabo la misma o alguna de sus unidades) y el costo del producto terminado, justificando alguna de las ideas que manejamos en nuestra actuación económica, cada día más importante: "al aumentar el rendimiento, decrece el costo"; "al aumentar el volumen de obra (medición), disminuye el costo de la unidad"; etc.

El hecho de haber circunscrito el tema de este artículo a las obras de cimentaciones, tiene un doble motivo. De una parte, la dedicación al mismo desde el año 1964 y, de otra, el que dada la especialización en este tipo de trabajos, con unidades definidas naturalmente y muy repetidas (metros lineales de pilote, sondeo, etcétera; metros cuadrados de pantalla continua, etcétera) y generalmente únicas para cada obra, es más clara para dichos casos, a efectos de exposición, la aplicación de los conceptos que se manejan seguidamente, que son, sin embargo, de validez general.

Y sin más consideraciones previas, entramos en materia.

## 2. Costos parciales de una obra.

El costo total de una obra está provocado por diversas partidas:

a) *Costo diario,* motivado principalmente por la mano de obra empleada y la amortización de la maquinaria utilizada. En este apartado pueden incluirse, y de hecho algunas veces se hace, los Seguros de la maquinaria y hasta una partida de reparaciones para la misma. Al costo diario provocado por mano de obra y maquinaria, se pueden añadir otros asimilables, como el de las visitas periódicas a obra, traslados diarios del personal, y, a veces, incluso se disponen partidas diarias en concepto de consumo de gas-oil y aceite (esto último algo impropio, como se ve en el punto b).

Sea, en definitiva, $K_1$ (ptas./día) este coste diario.

Si llamamos $d$ al número de días trabajados, incluyendo paradas por averías y, en general,

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1972.

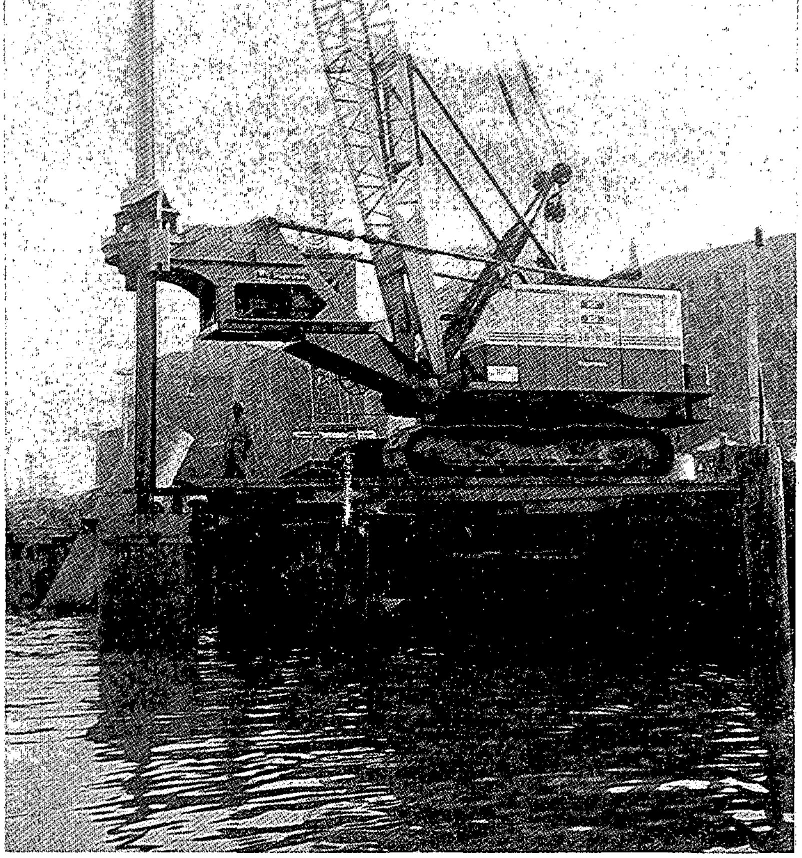


Foto 1. — Amortización de maquinaria y personal: principales componentes del costo diario $K_1$ (ptas./día). El costo de la unidad producida depende del rendimiento, y vale $K_1/R$.

paradas por cuenta propia, y $d_M$ al número de días empleados en operaciones de montaje y desmontaje, el costo de la obra por este motivo será:

$$C_1 = K_1 d + K_1 \cdot d_M \qquad \text{ptas.}$$

b) *Costo proporcional* al número de unidades producidas, provocado en primer lugar por el valor de *los materiales incorporados* en la unidad considerada (hormigón, hierro, etc.), materiales gastados (bentonita, por ejemplo) o material deteriorado o perdido. En esta partida deberían incluirse también el gas-oil, aceite, grasa, etcétera, mejor que en el punto *a*).

Si $K_2$ (ptas./unidad) es el costo directo de la unidad y $\eta$ el número de unidades producidas (medición), el costo de la obra por este concepto será:

$$C_2 = K_2 \cdot \eta \qquad \text{ptas.}$$

c) *Costo independiente* de la duración de la obra y de la medición. El más claro exponente de este apartado es el coste del transporte ($K_3$). Hay, además, otro componente importante que es el producido por las paradas que se abonan a precio inferior al de coste ($K_1$ pesetas/día). En efecto, si $d_c$ es el número de días de paradas por causa del cliente y $\alpha K_1$ (pesetas/día) lo que se abona por dicho concepto ($\alpha \leq 1$, generalmente), existe un coste adi-

Foto 2. — La partida más clara que incide en el costo directo $K_2$ (ptas./ud.): los materiales incorporados en la unidad, que en el caso de la foto son hormigón y acero. A éstos se añadirán materiales gastados, consumos, etc.

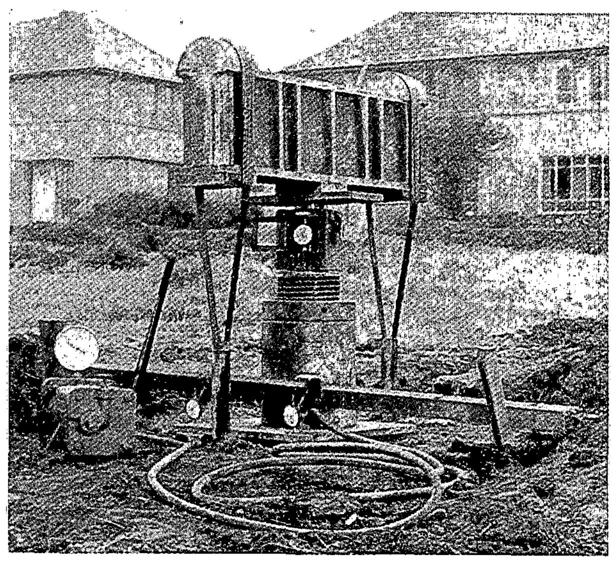


Foto 3. — Una prueba de carga, ejemplo típico, con el transporte, de coste independiente $K_3$ (ptas.). Su incidencia en el costo unitario puede ser grande para pequeñas mediciones, ya que éste será $K_3/n$.

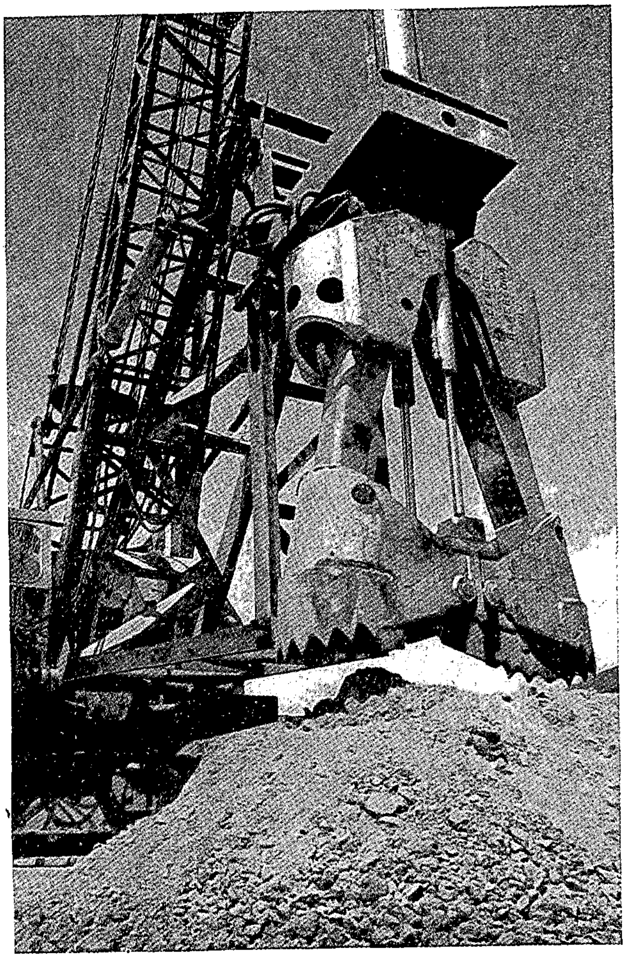


Foto 4. — La maquinaria parada incide en el coste de la unidad. Si $d_c$ son los días de parada, el coste unitario es $\frac{K_1 \cdot d_c}{n}$. Normalmente el cliente paga $\frac{\alpha \cdot K_1 \cdot d_c}{n}$ ($\alpha \leq 1$) (ley de mercado) y el resto el contratista de cimentaciones. Por ello, las paradas en obras de cimentaciones no interesan a ninguno de los dos.

cional que vale $(K_1 - \alpha K_1)\, d_c$ pesetas, y el costo independiente será:

$$C_3 = K_3 + (K_1 - \alpha K_1)\, d_c \qquad \text{ptas.}$$

## 3. Costo total de una obra.

El costo total de una obra, suma de los tres costos parciales determinados en el punto 2, será:

$$\boxed{\begin{aligned} C = C_1 + C_2 + C_3 = K_1 \cdot d + K_1\, d_M + \\ + K_2 \cdot \eta + K_3 + (K_1 - \alpha K_1)\, d_c \end{aligned}} \qquad [1]$$

en el que, como hemos dicho, es:

$K_1$ = Ptas./día, coste diario.

$d$ = n.° de días de trabajo mas paradas propias.

$d_M$ = n.° de días de montaje y desmontaje.

$K_2$ = Ptas./ud., coste directo de la unidad producida (con o sin materiales incorporados)

$\eta$ = n.° de unidades producidas (medición)

$K_3$ = Ptas. coste independiente (Transporte y otros eventuales).

$\alpha K_1$ = Ptas./día cobradas por paradas debidas al cliente ($\alpha \leq 1$).

$d_c$ = n.° de días de parada debidos al cliente.

## 4. Costo unitario.

A partir de la fórmula general [1] que proporciona el coste global de la obra, podemos deducir el coste de la unidad producida, coste unitario, más ingenieril que el coste total que podríamos denominar "coste contable". Basta para ello dividir el coste global $C$ por número de unidades producidas $\eta$ (medición) y tendremos así:

$$c\ (\text{Ptas./ud.}) = \frac{C}{\eta} = \frac{K_1}{\eta/d} + \frac{K_1 \cdot d_M}{\eta} + K_2 + \\ + \frac{K_3}{\eta} + \frac{(K_1 - \alpha K_1)\, d_c}{\eta}$$

Si observamos que $\eta/d$ es el rendimiento efectivo de la obra (ref.), es decir, número de unidades producidas dividido por días de trabajo más paradas propias, y lo introducimos así en la fórmula anterior, llegamos a la expresión fundamental del costo unitario:

$$\boxed{\begin{aligned} C\ (\text{Ptas./ud.}) = \frac{K_1}{\text{Ref.}} + K_2 + \frac{K_1 \cdot d_M}{\eta} + \\ + \frac{K_3}{\eta} + \frac{(K_1 - \alpha K_1)\, d_c}{\eta} \end{aligned}} \qquad [2]$$

Este costo unitario comprende, como vemos, varios sumandos:

$C_1 = \frac{K_1}{\text{Ref.}}$ Costo unitario por producción.

$C_2 = K_2$ Costo unitario directo.

$C_M = \frac{d_M\, K_1}{\eta}$ Costo unitario por montaje y desmontaje.

$C_3 = \frac{K_3}{\eta}$ Costo unitario por transporte, y otras P. A.

$C_c = \frac{(K_1 - \alpha K_1)\, d_c}{\eta}$ Costo unitario por paradas debidas al cliente.

Analizando la fórmula fundamental [2], y aplicándola a obras de cimentaciones, vemos que para una obra o tipo de obra dada, $K_1$ (pesetas/día) es o debe ser fijo (coste diario de una maquinaria específica y el personal necesario para su manejo, principalmente); $d_M$ número de días de montaje y desmontaje es prácticamente constante para cada tipo de trabajo y maquinaria.

$\eta$ = medición o número de unidades a producir, es conocido en cada obra.

$K_3$ = Costo del transporte, no presenta interés «científico» en este momento y suele considerarse aparte.

$\alpha K_1$ = Ptas. / día cobradas por paradas debidas al cliente, es conocido, y en teoría debería cubrir gastos ($\alpha = 1$), con lo que esta partida no incidiría en el costo unitario.

$d_c$ = Número de días de parada debidos al cliente' es una incognita «a priori», aunque en una obra bien programada no deberían existir ($d_c = 0$) con lo que de nuevo esta partida no debería gravar la unidad producida.

En todo caso, para nuestros propósitos, en el estudio que sigue, prescindimos del costo del transporte (generalmente facturado aparte) y del costo por posibles paradas debidas al cliente, quedándonos solamente con los tres primeros sumandos de la fórmula [2], costo por producción, costo directo y costo de montaje:

$$\boxed{C\,(\text{Ptas./ud.}) = \frac{K_1}{\text{Ref}} + K_2 + \frac{d_M \cdot K_1}{\eta}} \qquad [3]$$

Hemos hablado ya de $K_1$ (coste diario), que se puede considerar constante para una obra dada, y estudiemos ahora el coeficiente $K_2$ (costo directo) en relación con aquél.

En primer lugar, $K_2$ es esencialmente variable, dependiendo de las características del terreno fundamentalmente, todo ello considerando que comprende todos los apartados recogidos anteriormente: materiales gastados, repuestos, reparaciones y consumos principalmente. Prescindimos de los materiales incorporados a la unidad por ser perfectamente conocidos para una unidad determinada, aunque pueden en ocasiones experimentar ligeras variaciones (ejemplo, exceso de consumo de hormigón sobre el teórico en un pilote).

Sin embargo, cuantas menos "atribuciones" damos a $K_2$, al incluir como hemos dicho en $K_1$ (coste diario) partidas de reparaciones e incluso consumos de gas-oil y aceite, más limitamos su campo de variación, y para un $K_1$ "completo" podemos estudiar estadísticamente la variación de $K_2$ y determinar sus límites, viendo que llegamos a un valor prácticamente constante dentro de los márgenes de error que nos interesan para, por ejemplo, estudiar un presupuesto.

De esta forma, con $K_2$ (costo directo) constante, la fórmula [3].

$$C = \frac{K_1}{\text{Ref.}} + K_2 + \frac{d_M \cdot K_1}{\eta}$$

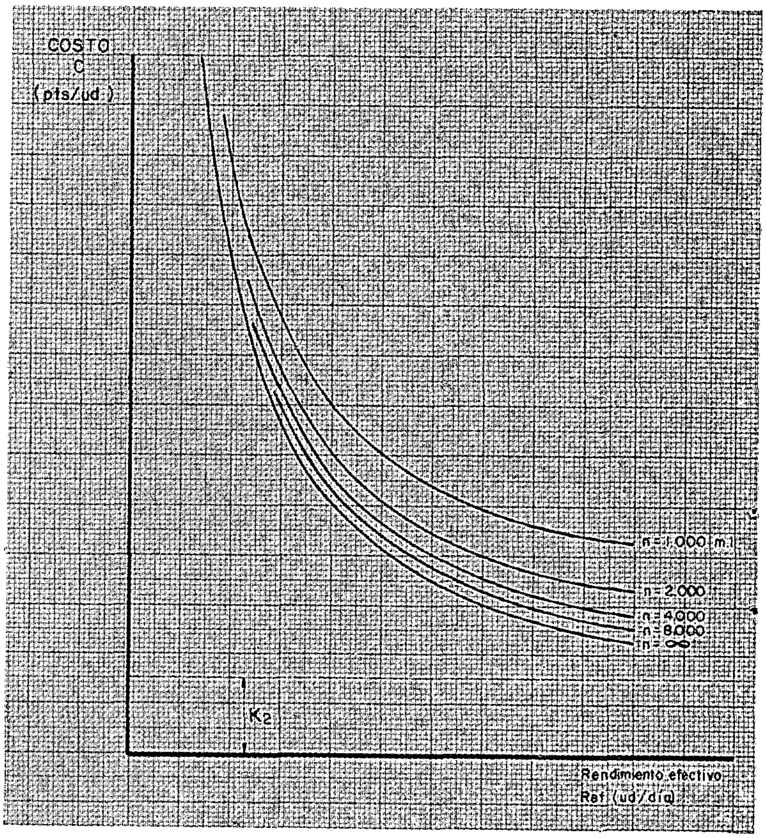



Figura 1.

puede representarse en un gráfico, figurando el costo unitario $c$ en ordenadas y el rendimiento efectivo Ref. en abscisas, dejando $\eta$ (medición) como variable explícita, y siendo constantes el resto de los factores ($K_1$, $K_2$ y $d_M$), dando lugar a curvas hiperbólicas del tipo siguiente: (ver figura 1).

De esta forma, estimado el rendimiento previsible para una obra dada, con una medición $\eta$ conocida, conocemos inmediatamente el coste unitario de ejecución material. Añadiendo gastos generales y beneficio, obtenemos el precio de venta de la unidad considerada.

Queremos resaltar el hecho de que cualquier

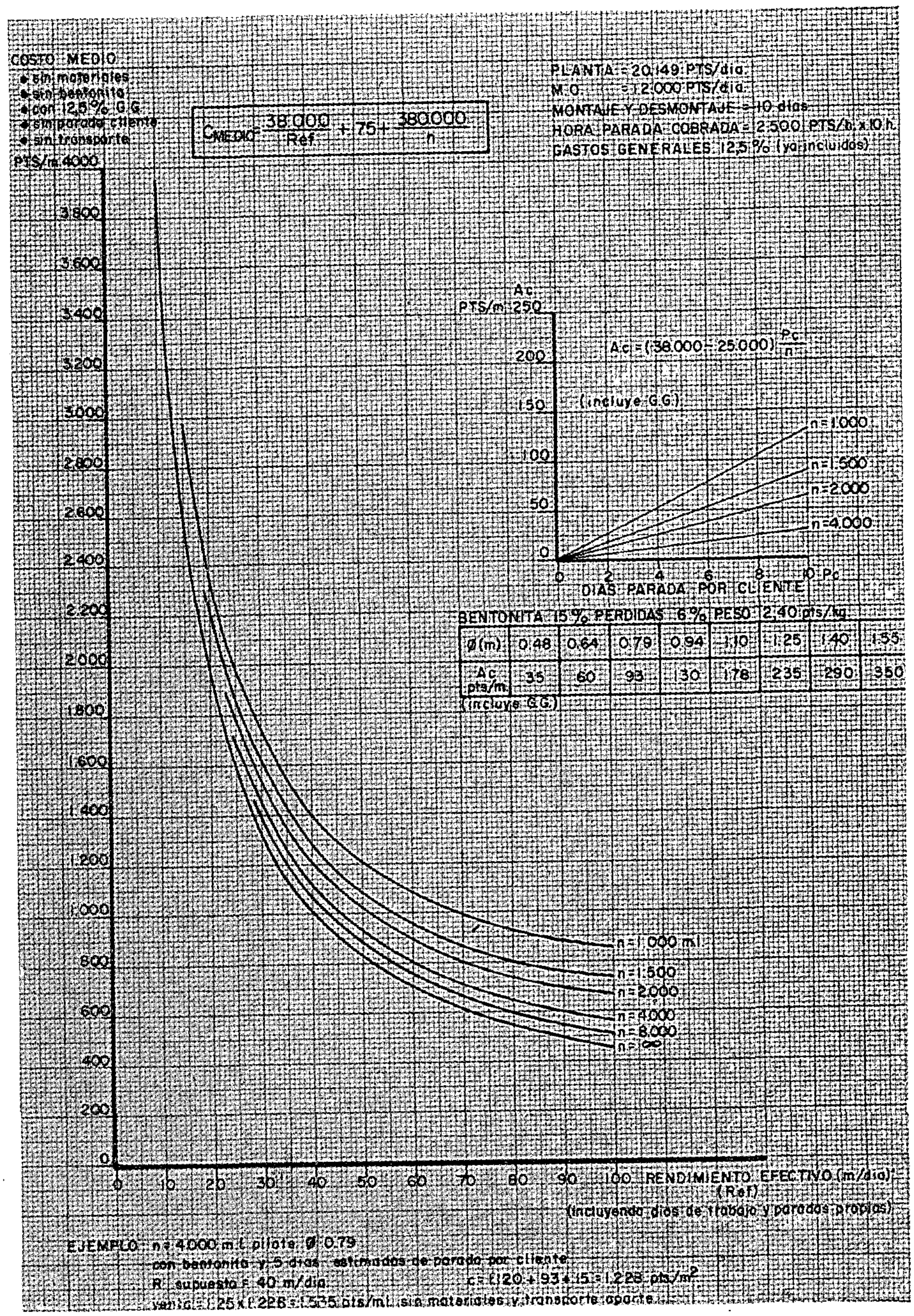



Gráfico A. — PILOTES

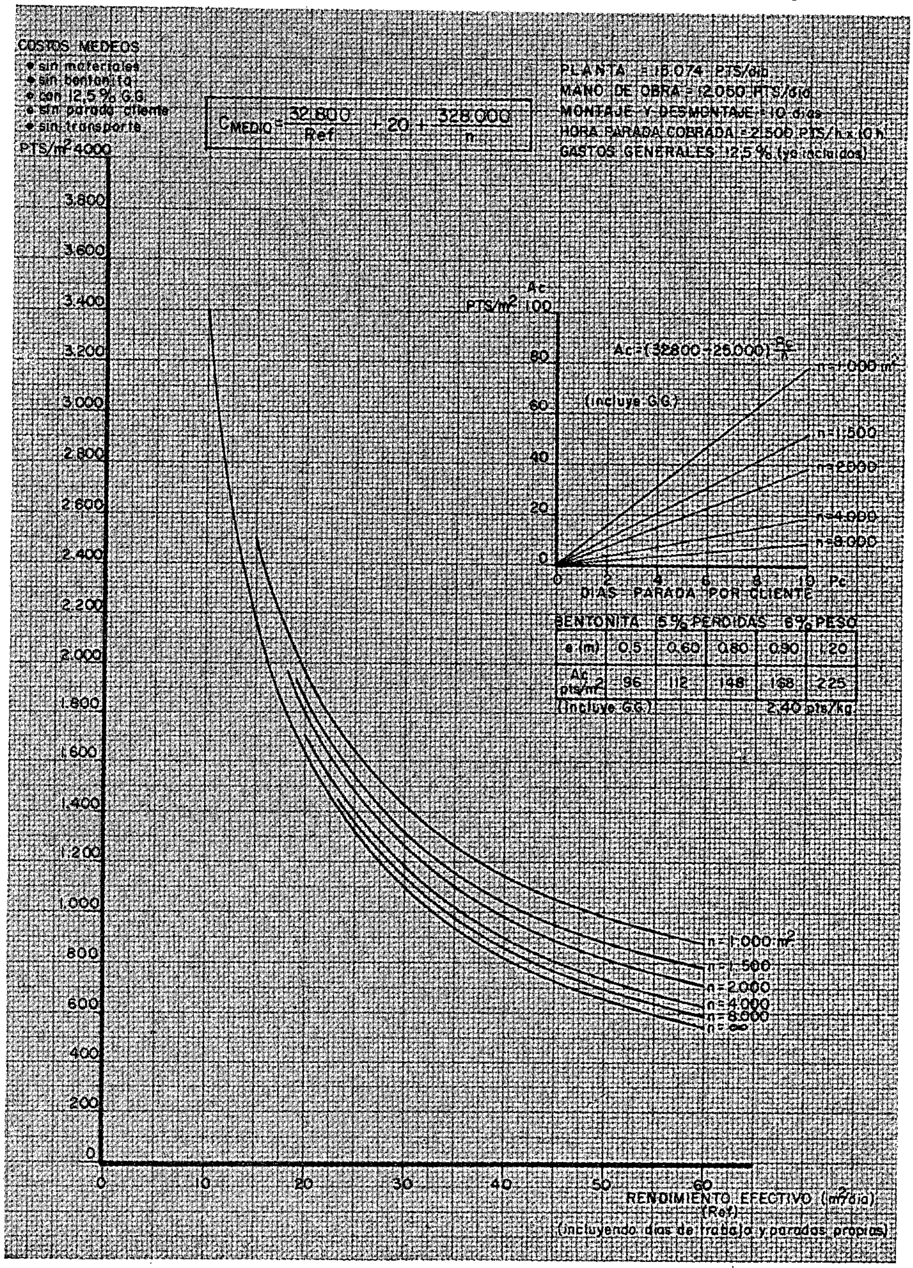



Gráfico B. — PANTALLAS

cálculo del costo de una obra se basa en la estimación de un rendimiento a lo largo de la misma, y que precisamente las mayores desviaciones del costo real obtenido con respecto al cálculo, se deben a las variaciones de ese rendimiento estimado *a priori* en relación con el realmente conseguido al final de la obra.

Como ejemplo de lo establecido hasta el momento adjuntamos dos gráficos de costos, preparados para pilotes perforados y pantallas continuas, con unas hipótesis de base concretas que se recogen en el mismo, y en el que se han añadido gráficos y tablas para estudiar la incidencia en el coste de las paradas debidas al cliente y el consumo de bentonita.

Con estos y otros gráficos semejantes a la vista se justifican las ideas elementales recogidas al principio:

"Al aumentar el redimiento, disminuye el cos- unitario" (para una curva $\eta$ = constante).

"Al aumentar el volumen de obra $\eta$, disminuye el costo unitario" (para el mismo rendimiento Ref.).

Para estudios de costos para presupuestos es cómodo y rápido el preparar de una vez para todas uno o dos de estos gráficos para cada especialidad o tipo de trabajo que se realice y ahorrar tiempo posteriormente en el estudio de cada caso concreto.

Con objeto de generalizar el uso de la fórmula [2] hemos preparado una serie de gráficos parciales con los diferentes sumandos del coste unitario:

*Gráfico 1:* Costo por producción $c_1 = \frac{K_1}{\text{Ref.}}$.

*Gráfico 2:* Costo por montaje y costo por transporte $c_M = \frac{K\, d_M}{\eta}$; $c_3 = \frac{K_3}{\eta}$.

*Gráfico 3:* Costo por paradas de cliente $c_c = \frac{(K_1 - \alpha K_1)\, d_c}{\eta}$.

Como hemos dicho, el costo directo $K_2$ (sin materiales) deberá determinarse estadísticamente.

Estos gráficos, más completos y generales, son, sin embargo, menos intuitivos. Comprenden los límites normales en que oscilan los diversos coeficientes en obras especiales de sondeos y cimentaciones en general.

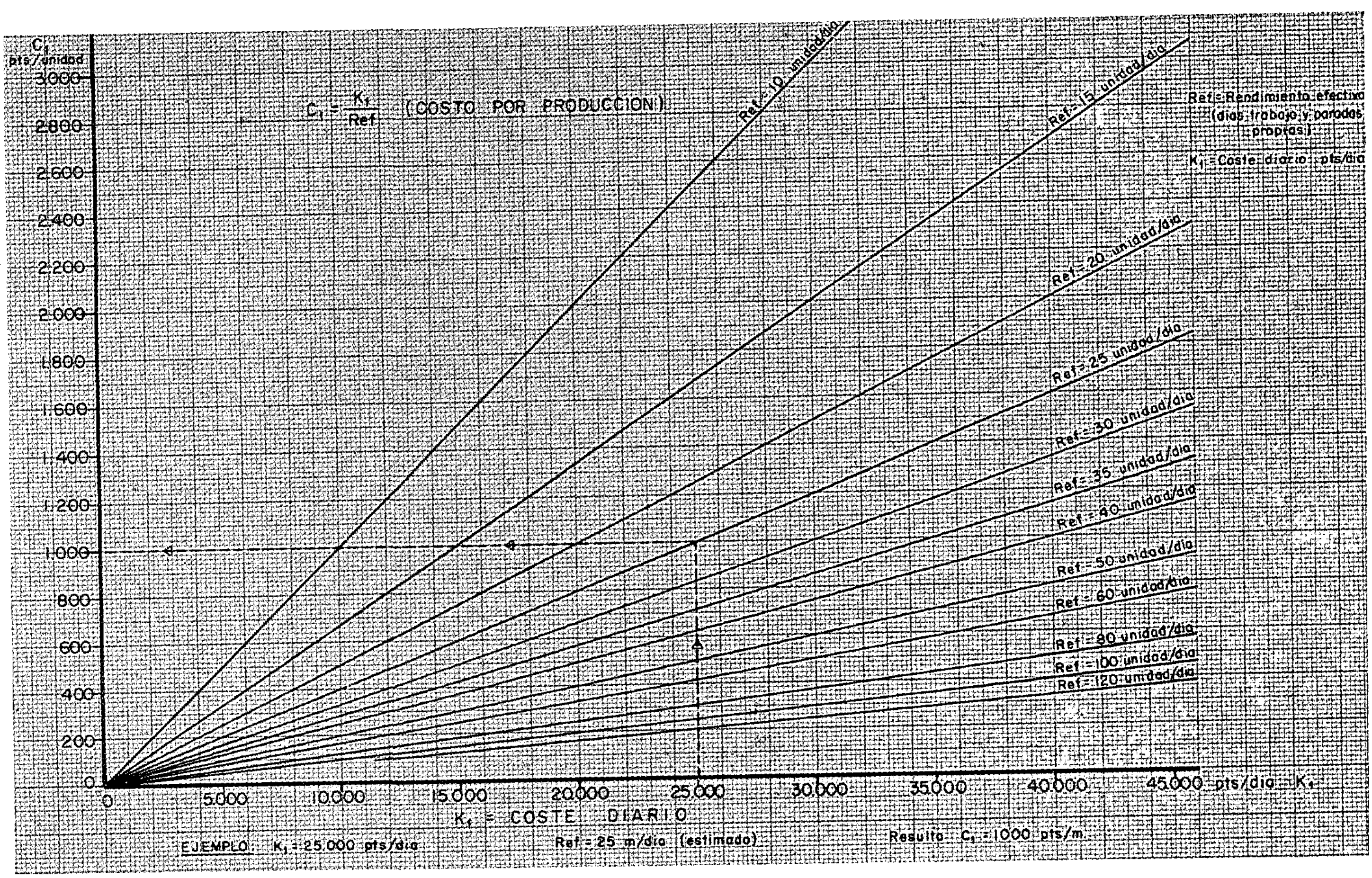
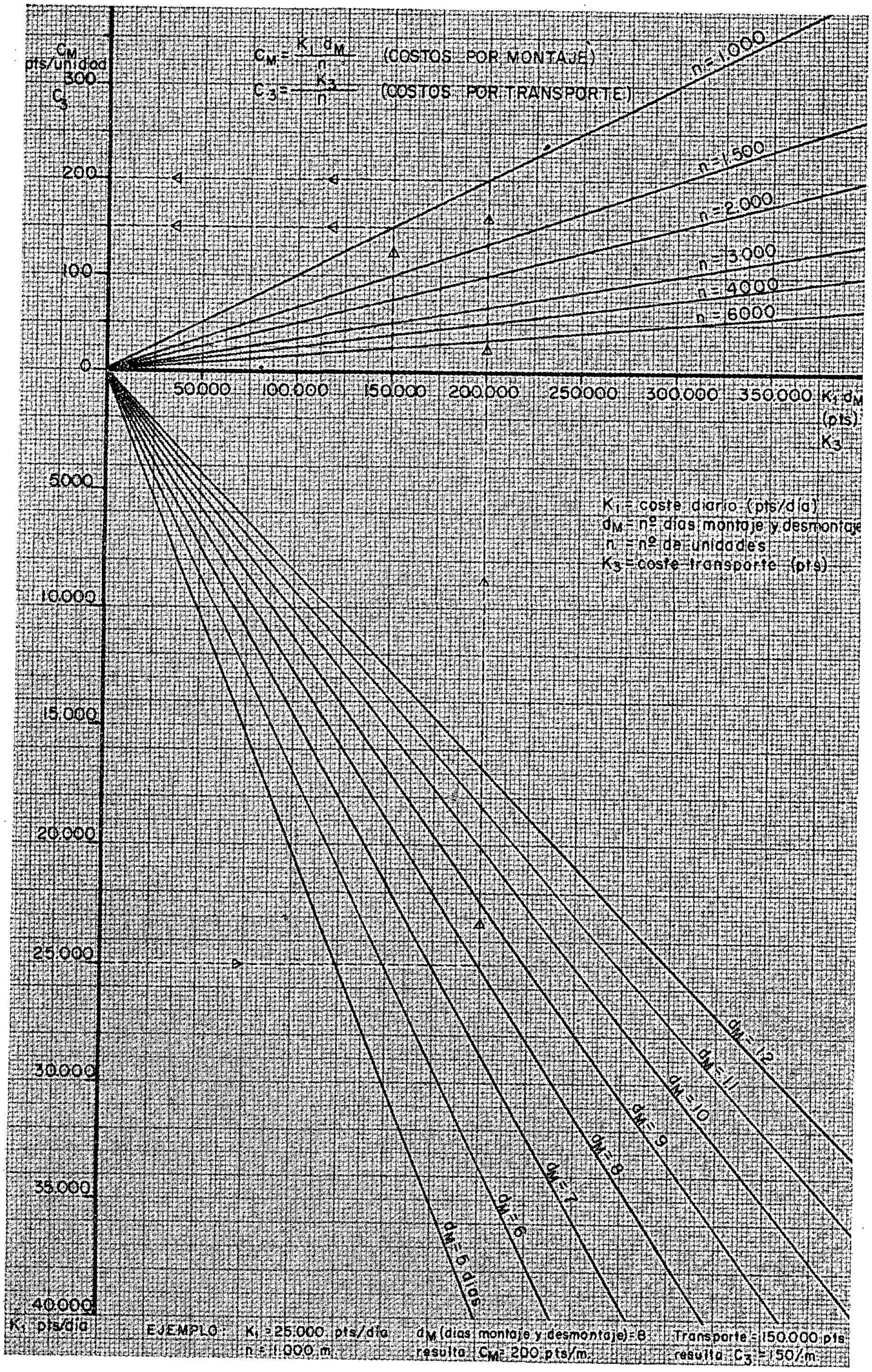



Gráfico 1.



$C_M$ pts/unidad $C_3$
300
200
100
0
$C_M = \frac{K_1 \, d_M}{n}$ (COSTOS POR MONTAJE)
$C_3 = \frac{K_3}{n}$ (COSTOS POR TRANSPORTE)
n = 1.000
n = 1.500
n = 2.000
n = 3.000
n = 4000
n = 6000
50.000
100.000
150.000
200.000
250000
300.000
350.000
$K_1 d_M$ (pts). $K_3$
$K_1$ = coste diario (pts/día)
$d_M$ = nº días montaje y desmontaje
n = nº de unidades
$K_3$ = coste transporte (pts)
5000
10.000
15.000
20.000
25.000
30.000
35.000
40.000
$K_1$ pts/día
$d_M$ = 12
$d_M$ = 11
$d_M$ = 10
$d_M$ = 9
$d_M$ = 8
$d_M$ = 7
$d_M$ = 6
$d_M$ = 5 días
EJEMPLO: $K_1$ = 25.000 pts/día
n = 1.000 m
$d_M$ (días montaje y desmontaje) = 8
resulta $C_M$ = 200 pts/m.
Transporte = 150.000 pts
resulta $C_3$ = 150/m.


Gráfico 2.

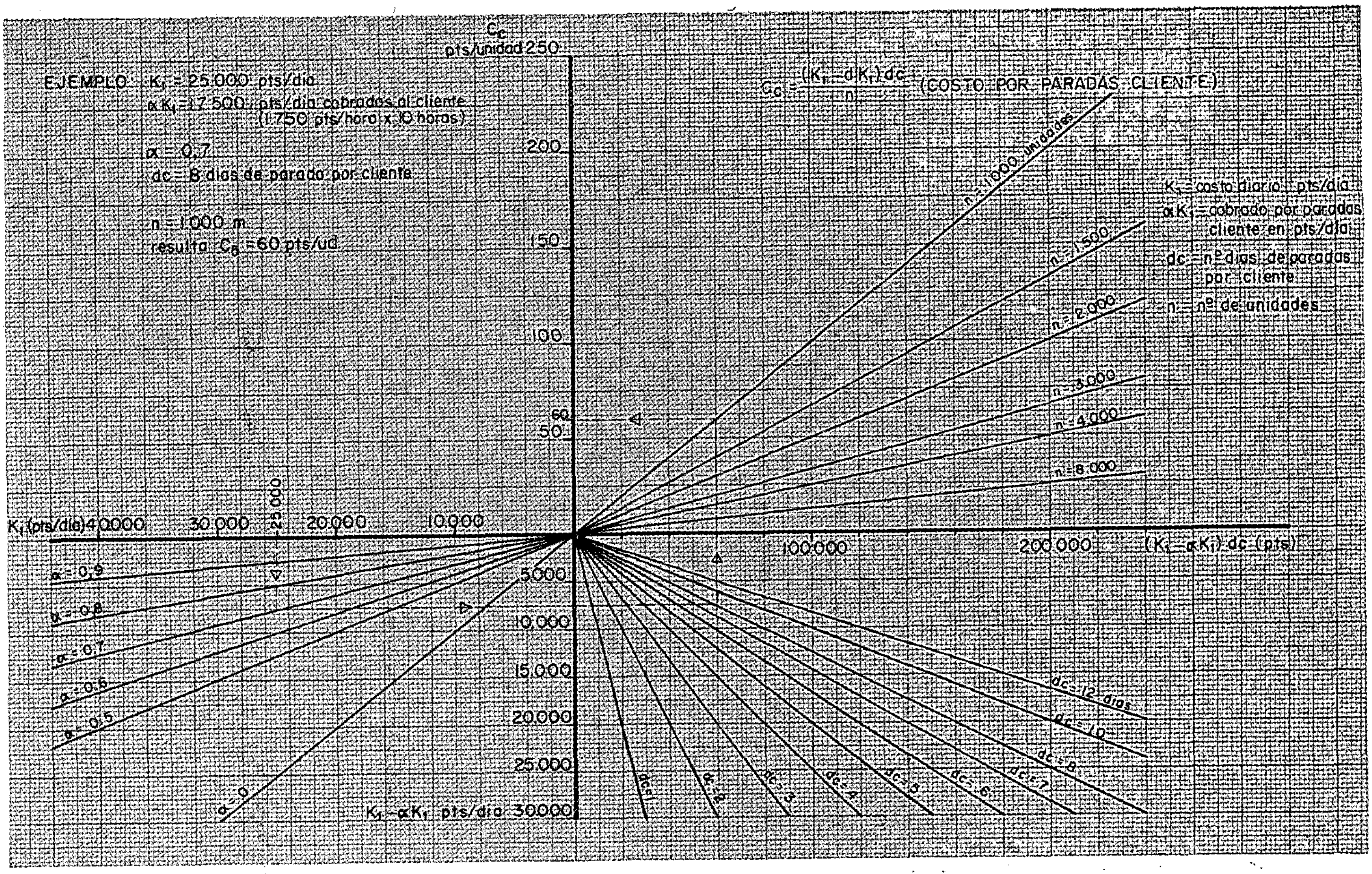



Gráfico 3.

## 5. Costos reales. Estadística.

Hasta este momento, hemos estado suponiendo que $K_2$ (ptas./m), coste directo por producción, es constante, para lo cual es preciso que se hayan incluido en $K_1$ (ptas./día), coste diario, algunas partidas generales, como son: cuenta de reparaciones de maquinaria, cuenta de fuel y otros, que en rigor deberían incluirse en $K_2$.

Naturalmente, sin un estudio estadístico con suficiente número de datos, el establecimiento del valor de $K_2$, considerado constante, debe ser conservador.

Un caso interesante, y en rigor, el que se ajusta al funcionamiento real del problema, se presenta cuando en el costo diario $K_1$ no incluimos las partidas generales de cobertura o dilución de riesgos, como la de reparaciones de maquinaria y consumo de fuel principalmente. En ese caso, $K_2$, coste directo, se ve afectado de grandes variaciones al pasar de una obra a otra, al incidir en él directamente, por ejemplo, las averías de maquinaria, los consumos variables, etc., función del terreno, dificultades de producción, etc., y el considerarlo constante en ese caso, tomando por ejemplo el máximo de una serie de observaciones, daría lugar a una sobrestimación importante y no competitiva de los costos en muchas obras.

Existe, por tanto, indudablemente una variación del costo directo $K_2$ (ptas./m) cuando éste comprende realmente los apartados que le son propios, pero ¿cuál es esa variación, y de qué depende?

Esbocemos una hipótesis. Para un rendimiento dado, o un entorno del mismo, variable con cada tipo de maquinaria y para cada unidad considerada, el costo directo debe ser mínimo, correspondiendo a un consumo mínimo de gas-oil,

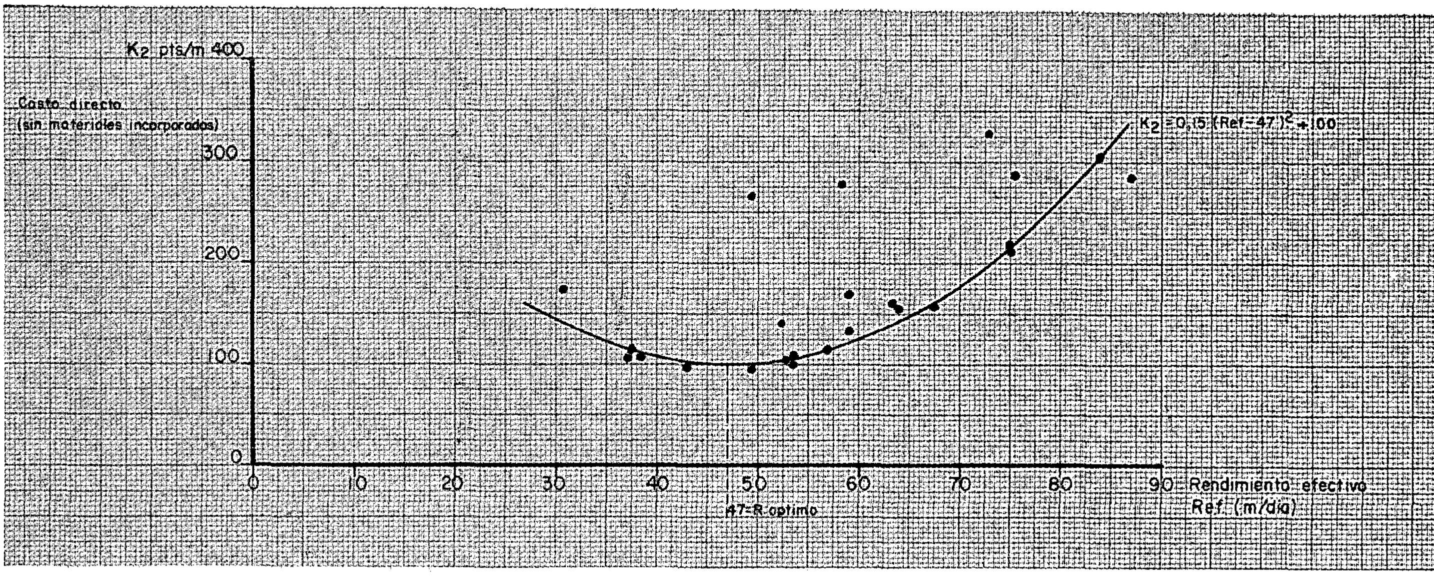



Figura 2.

desgaste de material escaso, pocas pérdidas o roturas, etc. Podríamos decir que este costo directo mínimo se produciría para un terreno bueno y un escaso esfuerzo de la maquinaria empleada.

Cuando el terreno es duro o presenta dificultades, el rendimiento disminuye, y nos vemos obligados a forzar la maquinaria; los desgastes y las averías aumentan, el consumo también, y en definitiva $K_2$ coste directo (ptas./unid.) crece.

Igualmente, cuando hacemos aumentar el *rendimiento muy por encima del que hemos denominado* "óptimo", es preciso igualmente forzar la maquinaria, aumentar el consumo, los desgastes, etc., y $K_2$ crece igualmente.

¿Qué aspecto tiene la curva $K_2$-Ref. (rendimiento efectivo)?

En la *figura* 2 *hemos recogido los costos* directos $K_2$ que se han obtenido en diversas obras para pilote apisonado, considerando un $K_2$ completo (sin materiales incorporados) y observando que salvo tres o cuatro puntos, que nos recuerdan que en obras de cimentaciones la sorpresa puede surgir en cualquier momento (sobre todo si los estudios previos son escasos o nulos), el resto se ajusta bastante bien, en el intervalo en que nos hemos movido, a una ley parabólica, con un mínimo (un entorno en realidad) que corresponde por definición al "rendimiento óptimo" (en este caso, aproximadamente, 47 m/día) y una ley de variación que podemos expresar analíticamente así:

$$K_2 = K_{2\ \text{mín.}} + A\ [R - \text{Rop.}]^{\eta} \qquad [4]$$

($R$-Rop.) deberá tomarse en valor absoluto.

Siendo $A$ y $\eta$ coeficientes a establecer en cada caso ($\eta$ oscila normalmente de 1 a 2) y que en el presente ejemplo resultan ser de 0,15 y 2, respectivamente, con lo que la curva de variación de $K_2$ queda así:

$$K_2 = 100 + 0{,}15\ (R - 47)^2$$

Volviendo a la fórmula [3] que proporciona el costo unitario, prescindiendo ahora del costo por montaje constante, y considerando el valor de $K_2$ contenido en la fórmula [4], tendríamos como expresión del costo unitario $C$ en función del rendimiento $R_{EF}$ (se ha quitado el subíndice por comodidad):

$$c\ (\text{ptas /ud}) = \frac{K_1}{R} + K_{2\ \text{mín}} + A\ (R - \text{Rop.})^{\eta} \qquad [5]$$

Esta curva presenta un mínimo, obtenido al igualar a cero la derivada de $c$ respecto a $R$, siendo constante los demás coeficientes de la fórmula, es decir:

$$\frac{d_c}{d_R} = \frac{-K_1}{R^2} + \eta\, A\, (R - \text{Rop.})^{\eta - 1} = 0$$

que puede resolverse analítica o gráficamente.

Para el caso concreto de pilote apisonado

En la figura 3 hemos dibujado esta curva, y la serie de puntos correspondientes a los costos reales de una serie de obras, que como vemos, y salvo las 3 excepciones ya comentadas, se agrupan razonablemente a la curva indicada. En el mismo gráfico se han marcado las curvas límites considerando $K_2$ constante, e igual al mínimo y al máximo obtenidos en una serie de observaciones (ver figura 2). Como puede verse, para rendimientos normales, alrededor del óp-

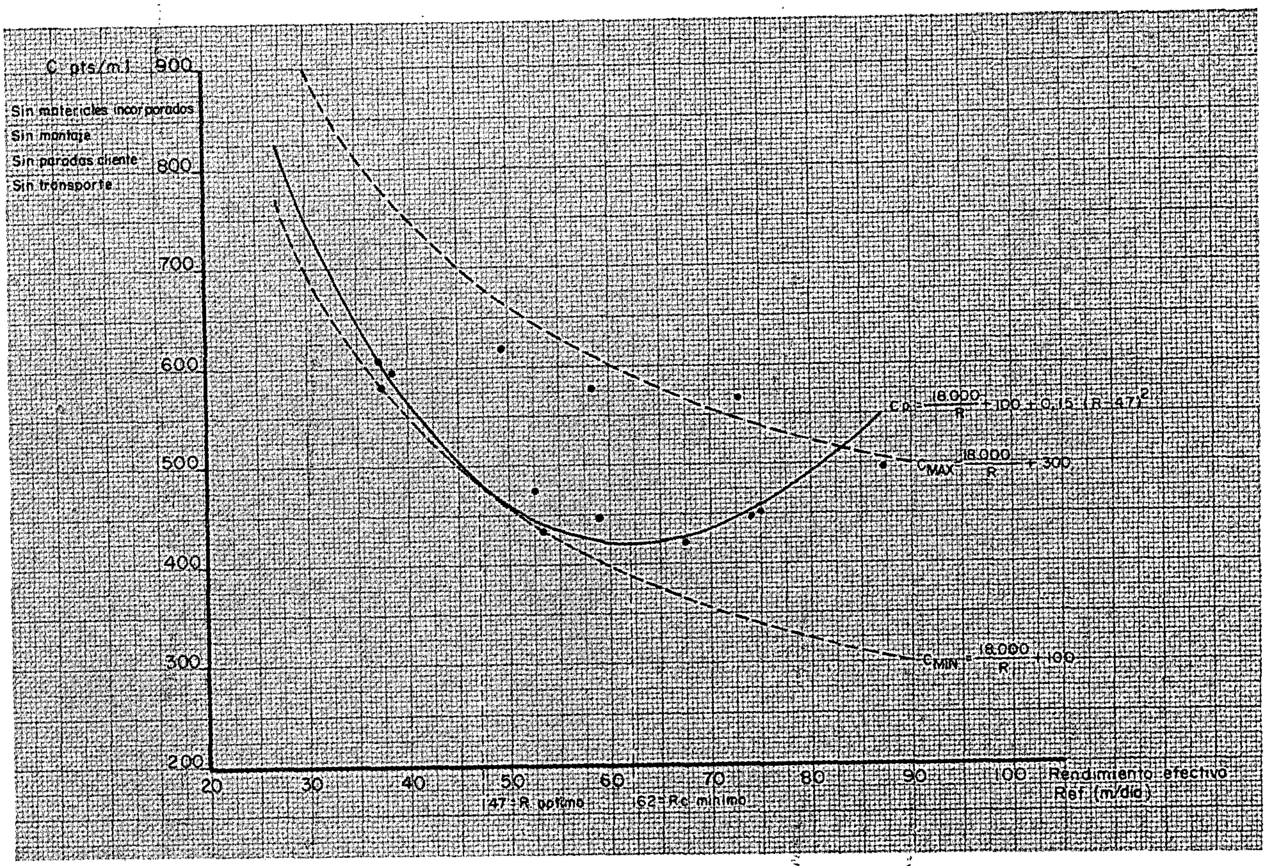



Figura 3.

que acabamos de estudiar teníamos $K_2 = 100 + 0{,}15\,(R - 47)^2$, y el coste unitario (sin montaje) para esas mismas obras sería:

$$c = \frac{18.000}{R} + 100 + 0{,}15\,(R - 47)^2 \text{ Ptas./ml.}$$

($K_1$ = 18.000 ptas./día comprende amortización de maquinaria, personal y visitas a obra).

timo, el considerar $K_2$ constante no supone un gran error a la hora de determinar el costo, error que puede llegar a ser importante, por el contrario, cuando el rendimiento aumenta notablemente.

Vemos también que existe un intervalo amplio de rendimientos, el normal para las obras "normales" (valga la expresión), en los que por la forma de la curva de costo éste se mantiene prácticamente constante en dicho intervalo (en el ejemplo considerado, entre 55 y 70 m/día), aspecto confirmado por la estadística para la unidad estudiada, en que vemos que los costos reales obtenidos en dicho entorno han variado en menos de 30 pesetas por metro lineal, y todos cerca del mínimo teórico.

Todo lo expuesto hasta el momento necesita naturalmente apoyarse en estudios estadísticos de costos de numerosas obras para poder relacionar los conceptos que se han manejado, y ello para las diversas unidades y diferentes tipos de maquinaria utilizada en obras de cimentaciones, lo que no siempre es posible hacer, generalmente, por falta de tiempo.

Para terminar, y refiriéndome al objeto del presente artículo, quisiera redactar de nuevo uno de los primeros párrafos del mismo, dejándolo así: "en unidades de obra de sondeos y cimentaciones, al aumentar el rendimiento (sin exagerar), decrece el costo unitario".

Permítaseme este final tan poco ingenieril para un tema tan árido como el recogido en el presente artículo.