

CONSIDERACIONES SOBRE LA GRANULOMETRIA DE LOS "FILLERS"

Por JUAN P. ALCARAZ PAVIA,
Ingeniero de Caminos.

Propone el autor la aplicación de una fórmula, que estudia en el presente artículo, para determinar la superficie específica de aplicación de un "filler".

El concepto de función rellenadora, que se desprende del nombre "filler", dado en su día a los elementos pulverulentos que se agregan a los ligantes hidrocarbonados en la técnica moderna, no alcanza ya, dado el estado de ésta, a definir más que una parte y no la más importante, de la compleja función que éstos desempeñan.

La mejora que se obtiene con la adición de "filler" a los alquitranes y betunes, que se traduce en aumento de consistencia de los ligantes fluidos, disminución de la sensibilidad o susceptibilidad a las variaciones de temperatura, el aumento virtual de viscosidad y la muy importante función de absorción parcial de los coloides y aceites densos, o sean las resinas disueltas en los aceites y los mismos aceites cuyo conjunto forma el ligante hidrocarbonado, de tanta importancia en el retardo del envejecimiento de los firmes, por restituir en forma retardada estos elementos el medio ligante hasta restablecer el equilibrio, no puede conseguirse por el solo hecho de disponer de un rellenedor.

Todo el conjunto de éste actuará como economizador de ligante, pero la parte de éste que actúe de forma activa en los fenómenos citados será sólo debida a los granos que tengan un tamaño inferior a una cierta dimensión, que puede ser aquélla a partir de la cual habida cuenta su peso específico no decanta, sin que entre en juego el movimiento browniano, y se mantiene en suspensión indefinidamente en el medio ligante a la temperatura que se estime conveniente, reforzando la acción de los coloides en solución de este tipo en dicho medio, con aumento de la viscosidad por interposición de corpúsculos rígidos entre los distintos planos de deslizamiento y actuando como puntos de apoyo y enlace entre las ramificaciones de coloides para formar una red de rigidez eventual, con incremento de la consistencia.

Si, por otra parte, vemos que la eficacia de un "filler", en relación con los fenómenos de absorción, está en relación directa con la superficie de los granos contenidos en la unidad de peso y que ésta está en la misma relación con la finura de los granos en las anteriores acciones, llegaremos a la conclusión de que no basta definir la eficacia de un "filler" la condición de que su tamaño máximo no rebasa cierta dimensión en micrones, como no basta

para definir la viscosidad o penetración de un ligante el definirla para una sola temperatura, ya que las leyes de variación con ésta que se aplican (Evans y Pickard, Duriez, etc.) contienen dos constantes.

La segunda condición puede ser la de la superficie específica por unidad de peso, ya que engloba la eficacia de un "filler" en todas las acciones modificantes citadas.

La obtención de una fórmula, de posible aplicación práctica que permita la evaluación de esta superficie específica, es el objeto que nos proponemos en la presente exposición:

Para ello partimos de lo siguiente:

Consideramos un prisma recto o paralelepípedo de dimensiones a , b , y c , compuesto por un material de un peso específico real, δ . Su superficie será:

$$S = 2 \times [ab + ac + bc].$$

Su volumen:

$$V = abc;$$

su peso:

$$P = \delta \times abc,$$

y su superficie por unidad de peso:

$$S_e = \frac{2 \times [ab + ac + bc]}{\delta \times abc}.$$

Si dividimos cada una de las dimensiones por n , obtendremos n^3 prismas semejantes al primitivo, cuya superficie total será:

$$S_t = n^3 \times 2 \times \frac{ab + ac + cd}{n^3} = S \times n,$$

y la total específica $S_{e,t} = S_e \times n$.

Si la dimensión media b , que es la que define el tamaño de los granos, la hacemos igual a 1 cm., la superficie vendrá expresada por:

$$S = 2 \times [a + ac + c] \text{ cm.}^2,$$

y la específica:

$$S_e = \frac{2 \times [a + ac + c]}{\delta \times ac} = \frac{2 \times \left[\frac{1}{c} + 1 + \frac{1}{a} \right]}{\delta} \text{ cm.}^2/U_p,$$

siendo U_p la unidad de peso.

Si sustituimos los valores de c y a por sus relaciones con el valor $b = 1$, de modo que $\frac{a}{b} = \alpha$ y $\frac{c}{b} = \gamma$, siendo α y γ , en este caso, unos coeficientes de alargamiento y aplastamiento de las dimensiones a y c respecto a b , tendremos ($b = 1$) que la expresión de la superficie específica se transformará en la siguiente:

$$S_e = \frac{2 \times \left[\frac{1}{\gamma} + 1 + \frac{1}{\alpha} \right]}{\delta} \text{ cm.}^2/\text{gramo};$$

si δ se expresa en $\frac{\text{gramos}}{\text{cm.}^3}$.

En los poliedros regulares, cubo, esfera, etc., $\alpha = \gamma = 1$, con lo que este coeficiente de superficie por dimensión unidad media de 1 cm. es:

$$S_e = \frac{2 \times 3}{\delta} = \frac{6}{\delta} \text{ cm.}^2/\text{gramo} = \frac{6000}{\delta} \text{ cm.}^2/\text{Kg.} = \frac{0,6}{\delta} \text{ m.}^2/\text{Kg.}$$

En el caso general de a , b y c distintas habría que hacer la evaluación de α y γ , que puede hacerse directamente en los granos de tamaño superior, obtenidos por fragmentación natural o por machaqueo, o bien asignar unos límites máximos a estos valores, dado que en la práctica no se separan mucho del unitario b o dimensión media, puesto que no es corriente una fragmentación en agujas o placas, ya que son quebradizas y se fragmentan a su vez con tendencia a formar cuemplos más resistentes y, por lo tanto, más regulares.

Los granos tenderán a adoptar una forma tipo, que en los "fillers" normales o calizos dependerá de su proceso de formación (cristalización, sedimentación, etc.) en los procedentes de fragmentación natural, y de estas condiciones y el tipo de esfuerzo empleado en su machaqueo o molturación, en el caso general.

Esta forma tipo tenderá a reproducirse indefinidamente a medida que se reduzca el tamaño, y con más regularidad en los elementos finos, ya que tenderán a dominar las condiciones de cristalización, y estar constituidas las rocas, en esencia, por una aglomeración de cristales de pequeñas dimensiones.

Un criterio de aproximación (para el caso de que no se haga uso de determinar las relaciones α y γ por observación del tipo más general de grano) *a priori*, será el de admitir que las relaciones varíen entre los límites siguientes:

$$\begin{aligned} 1 &< \alpha < 1,5, \\ 1 &> \gamma > 0,5, \end{aligned}$$

con lo que, tomando las medias, podremos suponer, con mucha aproximación:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,25, \\ \gamma &= 0,75, \end{aligned}$$

con lo que:

$$S_e = \frac{2 \times \left[\frac{1}{1,25} + 1 + \frac{1}{0,75} \right]}{\delta} = \frac{6,26}{\delta} \text{ cm.}^2/\text{gramo} = \frac{0,626}{\delta} \text{ m.}^2/\text{Kg.},$$

para $b = 1$ cm.

Podrá objetarse que las caras de los paralelepípedos supuestos no serán, en general, planos perfectos y que su rugosidad hará variar en más el coeficiente deducido, pero hay que tener en cuenta que este posible aumento tiene su contrapartida en el chaflanamiento de sus aristas y vértices, que reducen la superficie teórica.

Como consecuencia, creemos que la superficie del Kg. de granos de roca de peso específico real δ y de dimensión media de 1 cm., puede admitirse *a priori* sea el de $S = \frac{0,626}{\delta} \text{ m.}^2$ con mucha aproximación.

El centímetro no es unidad práctica para las dimensiones de los granos de "filler", por lo que elegiremos el micrón [$1 \text{ cm.} = 10\,000 \mu$], y si hacemos $\frac{1 \text{ cm.}}{n} = m$ micrones, la superficie específica tendrá la forma:

$$S_e = \frac{0,626}{\delta} \times n = \frac{0,626}{\delta \times \frac{m}{10\,000}} = \frac{6\,260}{\delta \times m} \text{ m.}^2/\text{Kg.}$$

En general, la granulometría no es de tipo uniforme y queda determinada por una ley o curva granulométrica, deducida por ensayos de velocidad de sedimentación en un líquido (fórmula de Stokes), curva que determina los porcentajes en peso hasta cada tamaño respecto al total.

Si la variación entre dos tamaños es un porcentaje Δ_p y corresponde una dimensión media en μ a este intervalo, la superficie que corresponde a esta fracción Δ_p será:

$$S_{e\Delta} = \frac{6\,260}{\delta \times m_{\Delta p}} \times \frac{\Delta_p}{100} = \frac{62,6}{\delta \times m} \times \Delta_p \text{ m.}^2/\text{Kg.}$$

La superficie total del Kg. de "filler" será:

$$S_e = \sum_0^{100} \frac{62,60}{\delta \times m_{\Delta p}} \times \Delta_p \text{ m.}^2/\text{Kg.} \quad [1]$$

Bastará dividir el total en tantas fracciones Δ como grado de aproximación se requiera y sumar los valores parciales.

En general, la ley de variación granulométrica de un árido es una curva parabólica del tipo

$$p = 100 \left[\frac{d}{D} \right]^q,$$

o sea la deducida por Wilhelmi con valores de q entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{3}$, más adaptada para los hormigones asfálticos que las de Bolomey y Füller, de la que son un caso particular $\left[q = \frac{1}{2} \right]$, teniendo los valores d , D y p el mismo significado.

Según Duriez, la fragmentación natural de un árido después de puesto en obra en revestimientos asfálticos adquiere el valor $q = \frac{1}{3}$.

En general podremos asimilar la curva granulométrica a una parábola del tipo Wilhelmi, y todo se reducirá a hallar el valor de q para un punto de la misma, y la superficie total se podrá deducir con una sola operación con la fórmula

$$S_e = \int_{\alpha}^M \frac{62,60}{\delta \times m} dp,$$

entre los límites α (que luego analizaremos) y M , o sea el tamaño máximo en micrones que corresponde al valor $p = 100$.

La integración no resulta fácil más que para valores enteros de q y como, en general, el valor de q no coincidirá con estos tipos enteros, proponemos emplear como valor de p el de la fórmula:

$$p = 100 \times \left[\frac{d}{D} \right]^{\frac{r}{q}} \quad [2]$$

Siendo r y q números enteros cuyo cociente se aproxime al valor obtenido para el exponente. La fórmula propuesta es una generalización de la de Wilhelmi, y resulta fácilmente integrable.

El valor p es equivalente al de

$$p = 100 \times \left[\frac{m}{M} \right]^{\frac{r}{q}},$$

siendo m y M los valores de las dimensiones d y D expresadas en micrones. El valor de dp es:

$$dp = 100 \times \frac{r}{q} \times \left[\frac{m}{M} \right]^{\frac{r}{q}-1} \times \frac{1}{M} dm,$$

con lo que:

$$S_e = \frac{6260 \times r}{\delta \times q \times M^{r/q}} \int_{\alpha}^M m^{\frac{r-2q}{q}} dm.$$

Haciendo $m = Z$.

Se integra fácilmente, resultando, después de eliminar el valor Z :

$$S_e = \frac{6260 \times r}{\delta \times M \times (r-q)} \left[m^{\frac{r-q}{q}} \right]_{\alpha}^M \text{ m.}^2/\text{Kg.} \quad [3]$$

Como vemos, la fórmula no es aplicable para el caso límite $r = q$, o sea, para cuando p es una función lineal de m .

En este caso el valor de p es:

$$p = 100 \frac{m}{M} \quad \text{y} \quad dp = 100 \times \frac{1}{M} dm.$$

La integral que resulta es:

$$S_e = \frac{6260}{\delta \times M} - \int_{\alpha}^M \frac{1}{m} dm,$$

y la expresión queda de la forma:

$$S_e = \frac{6260}{\delta \times M} \times \left[\ln \cdot m \right]_{\alpha}^M \text{ m.}^2/\text{Kg.} \quad [4]$$

Las fórmulas [3] y [4] dan valores infinitos de S_e cuando α tiende a cero. (En la [3], por ser

$$m^{\frac{r-q}{q}} = m^{\frac{q-r}{q}} = \frac{1}{m^{\frac{q-r}{q}}}$$

y $q > r$ como debía suceder, pero el valor de α no puede ser físicamente cero.)

Lo más práctico sería aceptar el límite mínimo que arroje el ensayo granulométrico por velocidad de sedimentación, pero como a partir de los tamaños del orden de $0,44 \mu$ las partículas en suspensión empiezan a estar animadas por el movimiento "browniano" (según tabla I de *Coloidequímica*, de R. Zsigmondy), no obedecerán la ley de velocidades de decantación de Stokes y pasarán desapercibidas en el ensayo.

Resulta, por lo tanto, interesante, conocer el orden de influencia en la magnitud de la superficie específica, que estos ultrafinos pueden tener y que no existirá, naturalmente, más que en los "fillers" de muy buena composición granulométrica.

El límite mínimo absoluto de α es la magnitud de la molécula, ya que a partir de éste supone la desaparición de la materia de la roca como tal, para descomponerse en los cuerpos simples que químicamente la forman.

A título de orientación de magnitudes, podemos suponer que la molécula media de las sustancias que constituyen la roca tenga un radio de

$$5 \times \frac{1}{10^8} \text{ cm.} = 0,5 \times \frac{1}{10^8} \mu,$$

y su diámetro, por lo tanto,

$$\frac{1}{10^8} \mu.$$

El orden de la superficie específica en parábolas de $\frac{r}{q} = \frac{1}{2}$ es de los 8 000 m.²/Kg.

Naturalmente, este límite de dispersión no se alcanza más que en soluciones de cristaloides, y no puede ser nunca el caso de un "filler".

Otro límite más restringido puede ser el de las soluciones coloidales, y a este respecto el autor citado, en su libro *Coloidequímica*, considera como límite superior para los soles el de 0,2 μ , y ya en este caso el orden de magnitud de la superficie específica para el valor $\alpha = 0,2 \mu$ es de

$$S_e = 550 \text{ m.}^2/\text{Kg. para } \frac{r}{q} = \frac{1}{2},$$

y de

$$S_e = 760 \text{ m.}^2/\text{Kg. para } \frac{r}{q} = \frac{1}{3}.$$

Sin embargo, no parece probable que en una preparación de tipo industrial de "filler" se llegue a dimensiones de orden coloidal, y quizá el límite tipo práctico para α fuera el citado para el movimiento browniano, o sea, el de $\alpha = 0,44 \mu$, que además resulta un punto fácil de determinar en la curva granulométrica por evaporación del líquido que contiene a la parte no sedimentada.

Por otro lado, las partículas de orden inferior a 0,44 μ lo probable es que no se comporten como un "filler" normal, tal y como se concibe éste, o sea, en partículas inertes, debido al movimiento browniano, ya que su extrema finura puede dar lugar a que sean absorbidas por los mismos soles orgánicos del ligante.

En consecuencia, estimamos que podría aceptarse como valor de tipo para definir la superficie específica el valor $\alpha = 0,44 \mu$, siempre que el grado de finura del "filler" rebasara este límite inferior, lo que podrá conocerse por evaporación del líquido después de la sedimentación normal y agregar a los índices de calidad, o sean los de tamaño máximo y superficie específica, el del % en peso de residuo no sedimentado.

Para este valor de α , el de 74 μ (tamiz número 200); para M y δ es 2,8, como en los casos anteriores, el valor de S_e es:

$$\left. \begin{array}{l} r = 1 \\ q = 2 \end{array} \right\} S_e = 360 \text{ m.}^2/\text{Kg.} \quad \left. \begin{array}{l} r = 1 \\ q = 3 \end{array} \right\} S_e = 445 \text{ m.}^2/\text{Kg.}$$

Estos valores son algo superiores a los evaluados por Ewers (citados por Duriez), para deducir el espesor óptimo de la película ligante que envuelve a los "fillers", y son del orden siguiente:

Filler calizo, $S_e = 289,0 \text{ m.}^2/\text{Kg.}$

Idem de cuarzo, $S_e = 285,0 \text{ id.}$

Idem de pórfido, $S_e = 46,5 \text{ id.}$

Desconocemos las características granulométricas de estos "fillers" y el procedimiento de la evaluación, pero son comparables, en orden de magnitud, a los deducidos.

Otro camino a seguir, para una evaluación aproximada de la cantidad de elementos de gran finura en los "fillers", o sean los más activos, sería el de la consideración de que partiendo, para comparar dos tipos de éstos, de su igualdad de tamaño máximo, el que tenga un peso específico aparente mayor será, en general, lógicamente de mejor calidad (habida cuenta de sus pesos específicos reales), ya que esto supone un relleno de los huecos entre los granos superiores por otros de tamaño fino o ultrafino, con aumento de la compacidad y peso específico aparente.

Sería, pues, de gran valor el índice

$$i = \frac{\text{peso específico aparente}}{\delta}$$

El peso específico aparente podría medirse en probetas de forma y dimensiones determinadas, sometido el conjunto a un vibrado producido por un cierto número de golpes de mazo y altura de caída tipo.