

CARACTERÍSTICAS MORFOMETRICAS DE LAS CENIZAS VOLANTES

GONZALEZ MORADAS, M. R. (*)
TORRES ALONSO, M. (**)

RESUMEN. Se analizan las características morfológicas de los componentes que constituyen las cenizas volantes, procedentes de dos balsas de ENSIDESA (Avilés).

El análisis morfológico se ha realizado de forma visual y por comparación con tablas estandarizadas, determinando el grado de esfericidad y redondeamiento los granos, así como el tamaño de los mismos; permitiendo su posterior tratamiento estadístico y clasificación.

En base al estudio morfológico realizado se analiza su influencia sobre fenómenos erosivos, ángulo de fricción interna del material, coeficiente de rozamiento, etc.

ABSTRACT. *The physical characteristics of fly ash from ENSIDESA (Avilés) are studied with a detailed analysis of particle morphology.*

Morphology analysis was verified visually and by comparison with the tables of POWERS (1953) and KRUMBEIN & SLOSS (1955) and with the use of a binocular magnifier and petrographic microscope, thus determining percentage component content, sphericity and roundness, which then permitted statistical treatment and classification. The evolution of sphericity and roundness as particle size increased was studied.

On the basis of the morphological study carried out, the direct influence on internal friction angle, abrasiveness, etc. is analysed.

INTRODUCCION

En la actualidad, y como consecuencia de varios factores (ecológicos, energéticos, económicos, etc.), cada día cobran mayor importancia los materiales residuales, entre los que destacan las cenizas volantes.

Debido a la problemática planteada por dicho tipo de residuo, que cada vez adquiere mayores dimensiones y dado que los volúmenes implicados se incrementan rápidamente, se ha pensado que una de las mejores soluciones sería destinarlos a diversos usos. Ello implica el conocimiento exhaustivo de sus propiedades, para lo cual son necesarios estudios de diversa naturaleza. Este artículo se centrará en uno concreto, el referente a la morfología de las partículas y a su influencia sobre otras propiedades.

Se ha creído interesante un estudio de esta índole, precisamente por el origen «no natural» de las cenizas volantes. Este hecho constituye una marcada diferencia con respecto a las partículas naturales, dado que les confiere ciertas peculiaridades que pudieran parecer, en principio, relativamente anómalas.

METODOLOGIA

Los materiales estudiados han sido las cenizas volantes procedentes de dos balsas pertenecientes a la factoría de ENSIDESA (Avilés). Tales balsas se han muestreado en dos puntos esencialmente diferentes: en el frente la A-LC-011-B, mientras que la A-LC-012-B en la zona de playa. (Denominación de las balsas según el Inventario Nacional de Balsas y Escombreras, elaborado por el I.G.M.E., 1984).

Como la granulometría de la balsa A-LC-011-B (figura 1) no presentaba una dispersión tan marcada como en el caso de la A-LC-012-B, se decidió tratar el material conjuntamente. Únicamente los materiales comprendidos entre 1 y 0,15 mm han sido sometidos al análisis morfológico, y a tal conjunto se le denominará «finos». Debido a la pequeña dimensión de las partículas, resultó difícil diferenciar sus componentes, por lo que las determinaciones individualizadas, según componentes, se obviaron.

En la balsa A-LC-012-B que presentaba una granulometría más heterométrica (figura 2), el material se dividió en dos grupos, los denominados:

- «Gruesos», cuyos tamaños están incluidos en el intervalo entre 4,50 y 0,15 mm.
- «Finos», de tamaños comprendidos entre 1,50 y 0,15 mm.

(*) Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo, Oviedo.

(**) Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

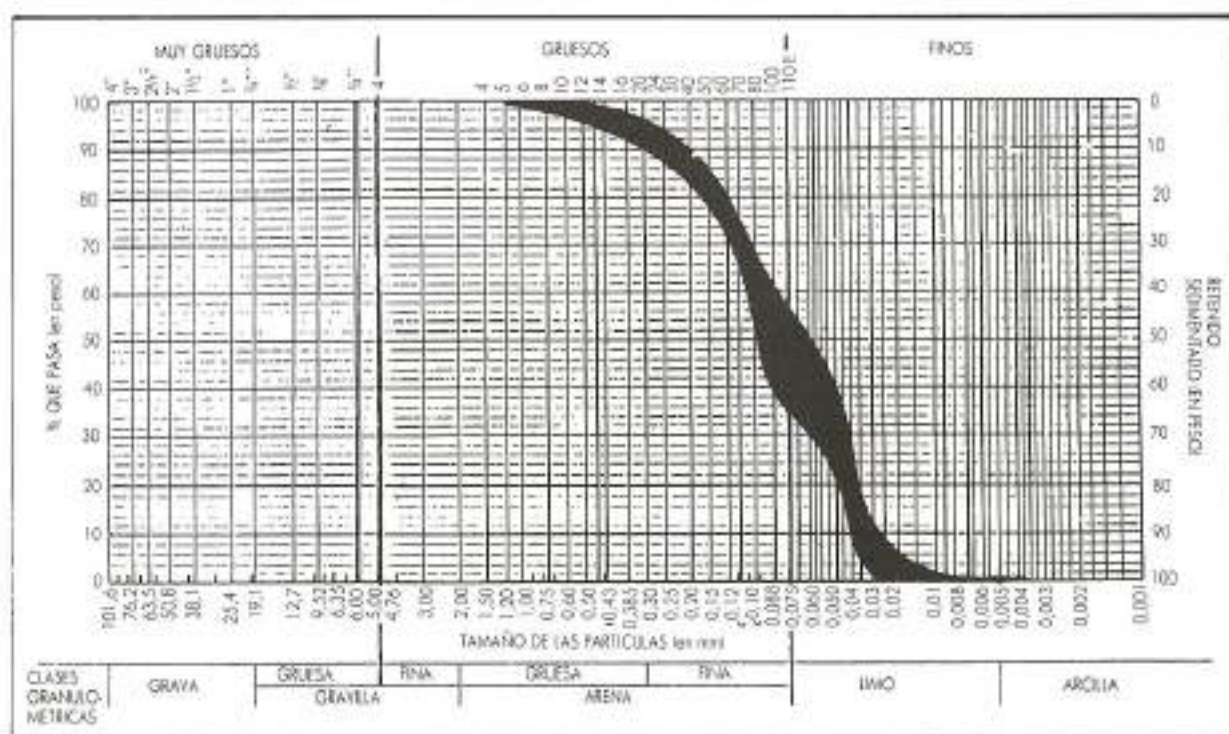


FIGURA 1. Envolventes granulométricas correspondientes a los materiales de la bolsa ALC-011-B, muestreado en el frente.

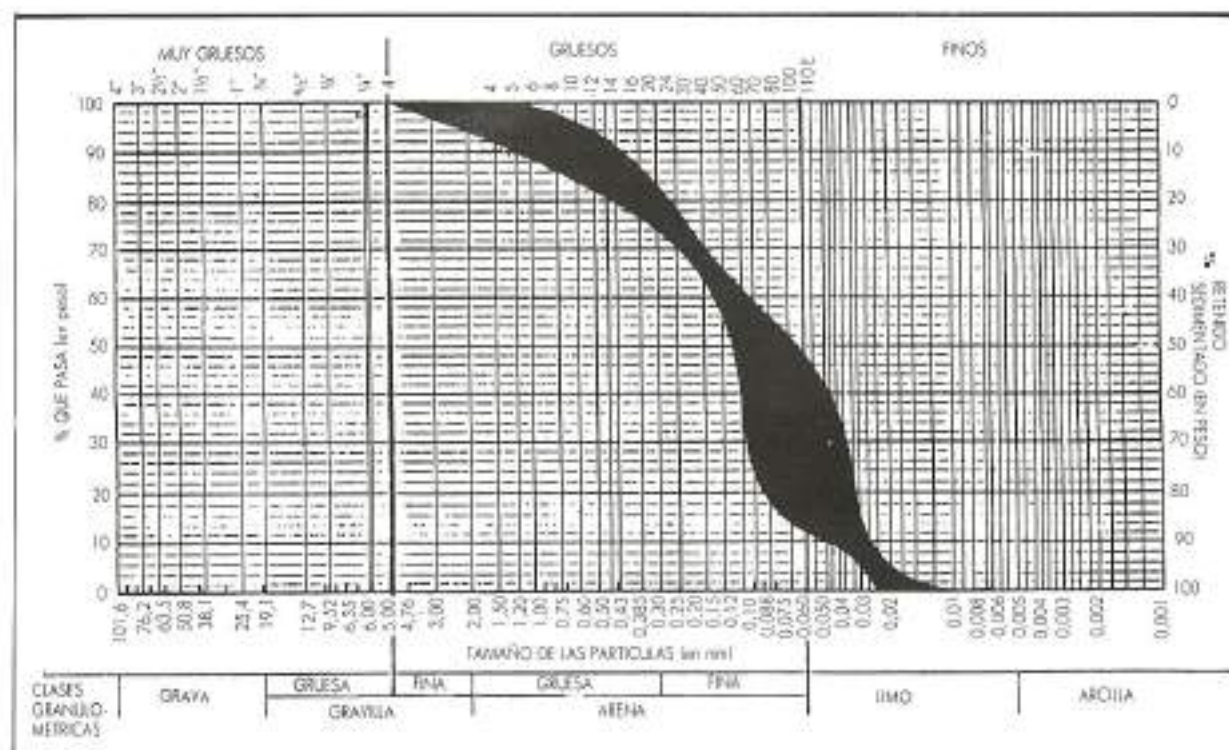


FIGURA 2. Envolventes granulométricas correspondientes a las cerizas valientes de la bolsa ALC-012-B. El muestreo se ha realizado en la zona de playa, muy próxima al punto de vertido.

Una vez dividido el material, fue necesario realizar una serie de preparaciones en láminas. Las hay de dos tipos según el método de observación para el que se hayan destinado: láminas delgadas y pulidas, y láminas sin pulimentar, empleadas en las observaciones al microscopio o lupa, respectivamente.

El instrumental de laboratorio empleado ha sido simple:

- Lupa binocular estereoscópica, modelo MBC-2.
- Microscopio binocular petrográfico tipo ULTRA-PHOT.

El microscopio se utilizó fundamentalmente en los estudios donde se requería la diferenciación de componentes.

Las observaciones han tenido por objeto la determinación de tres parámetros:

- La *esfericidad*.
- El *redondeamiento*.
- El *eje mayor* (que se ha tomado, arbitrariamente, como tamaño de grano).

La *esfericidad*, concepto introducido por WADELL (1932), relaciona la forma del grano con una esfera de igual volumen. El *redondeamiento* expresa la suavidad de los contornos y describe su grado de curvatura.

La determinación exacta de la *esfericidad* sobre cada partícula, requeriría el conocimiento de la dimensión de los tres ejes principales. Pero las dificultades de medir en tres dimensiones, e incluso en dos, sobre los tamaños que aquí se analizan, conlleva a la determinación de la *esfericidad* por gráficas visuales. Asimismo, el *redondeamiento* se ha determinado con este tipo de gráficas.

El método consiste en ir comparando cada partícula con unos modelos de los que se conocen su *esfericidad* y *redondeamiento*. Cada partícula se ajustará en mayor o menor medida a uno de estos modelos; aquel que se aproxime más será asignado a la partícula y por tanto esta habrá adquirido su mismo valor de *esfericidad* y *redondeamiento*. Las gráficas visuales empleadas en este estudio han sido las de POWERS (1953) y KRUMBEIN & SLOSS (1955).

Las estimaciones visuales de la *esfericidad* así como las del *redondeamiento* están sujetas a variaciones. Este efecto, conocido como *variación del observador*, ha sido analizado estadísticamente por ROSENFELD y GRIFFITHS (1953), y resumido por GRIFFITHS y ROSENFELD (1954) y apuntado asimismo por SNEED y FOLK (1958). En general, a pesar de que las estimaciones de granos individuales puedan variar significativamente, los valores medios basados en 50 partículas o más tienden a ser similares, porque los errores de estimación son en su mayoría compensables.

Una vez determinada la *esfericidad* y *redondeamiento* de la manera descrita previamente, sobre cada una de las partículas que constituyen una muestra representativa de una población (en todo caso superior a 50

elementos, por lo apuntado anteriormente) se pasaría al tratamiento estadístico.

El primer paso es establecer la *esfericidad* y *redondeamiento* general de la población, para lo cual se confeccionan dos histogramas de frecuencias relativas, uno con los resultados de *esfericidad* y otro con los de *redondeamiento*. Aquellos valores de *esfericidad* y *redondeamiento* que se correspondan con los picos de los histogramas serán asumidos como los valores para tal población, independientemente de la angulosidad de la curva inferida a partir del histograma. O sea, cuando existan valores de *esfericidad* o *redondeamiento* con frecuencias relativas muy próximas, no se tendrá en cuenta este aspecto, a la población se le asignará aquel cuya presencia obtenga el máximo porcentaje.

Una vez conocidos los valores de la *esfericidad* y el *redondeamiento* generales para cada población, se pasará a la clasificación del material. Para ello se utilizará la clasificación establecida por POWERS (1953) y KRUMBEIN & SLOSS (1955) (figura 3).

Otro aspecto importante es observar las variaciones en *esfericidad* y *redondeamiento* a medida que el tamaño de grano aumenta o disminuye. Para ello el método a seguir consiste en determinar el tamaño de grano medio que le corresponde a cada valor de *esfericidad* y *redondeamiento*. Fijando un determinado valor de *esfericidad*, se analizan todos los tamaños que la poseen y a partir de los mismos el tamaño de grano medio que corresponde a la *esfericidad* fijada. El mismo procedimiento se aplicará a la hora de calcular el tamaño de grano medio que corresponde a todos y cada uno de los valores de *esfericidad* y *redondeamiento*. Con tales resultados se establece la correlación entre tamaño de grano y *esferi-*

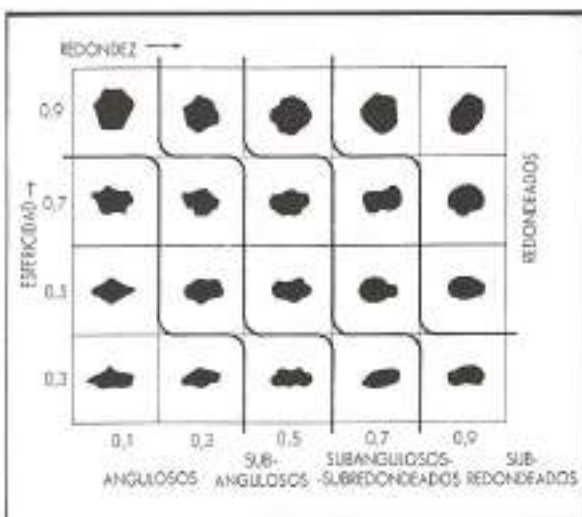


FIGURA 3. Gráficas visuales empleadas en la determinación de la *esfericidad* y el *redondeamiento*, así como las posteriormente utilizadas en la clasificación de los materiales. POWERS (1953) y KRUMBEIN & SLOSS (1955).

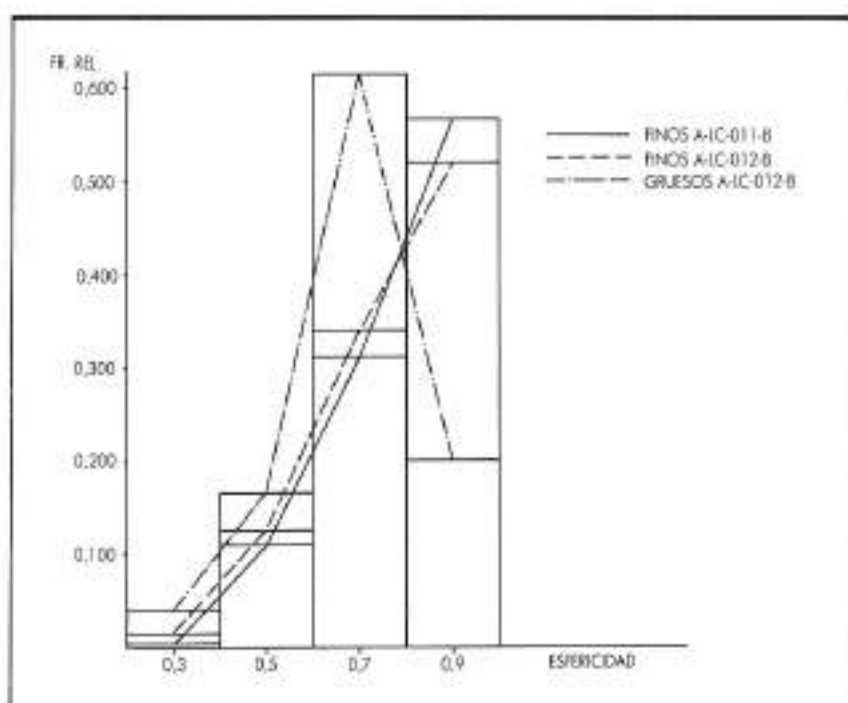


FIGURA 4. Histograma de frecuencias relativas para distintas esfericidad. Tanto los «finos» para la bolsa A-IC-011-B como para la A-IC-012-B presentan la misma esfericidad, si bien en los materiales «gruesos» de la A-IC-012-B ésta disminuye.

cidad o redondeamiento. El ajuste de las rectas se hace teniendo en cuenta el tamaño de la muestra que ha dado lugar a cada punto; representando, en cierto modo, el grado de fiabilidad de tal valor.

RESULTADOS

Los resultados a los que se hace mención corresponden a cada uno de los grupos, independientemente. Los puntos de muestreo y los tamaños de grano que los constituyen ya se han definido anteriormente.

«Finos de la bolsa A-IC-011-B». Los resultados fueron establecidos tras el análisis de 185 granos tomados al azar, pero siempre en el intervalo de tamaños citado.

La esfericidad general que corresponde a esta fracción es de 0,9 (figura 4). En este valor coinciden tanto la moda como la media. Si se confeccionan histogramas, donde el intervalo de tamaños se hace más pequeño, tal hecho también se observa.

Si se analiza la relación entre el tamaño de grano y la esfericidad, vemos que ésta disminuye a medida que

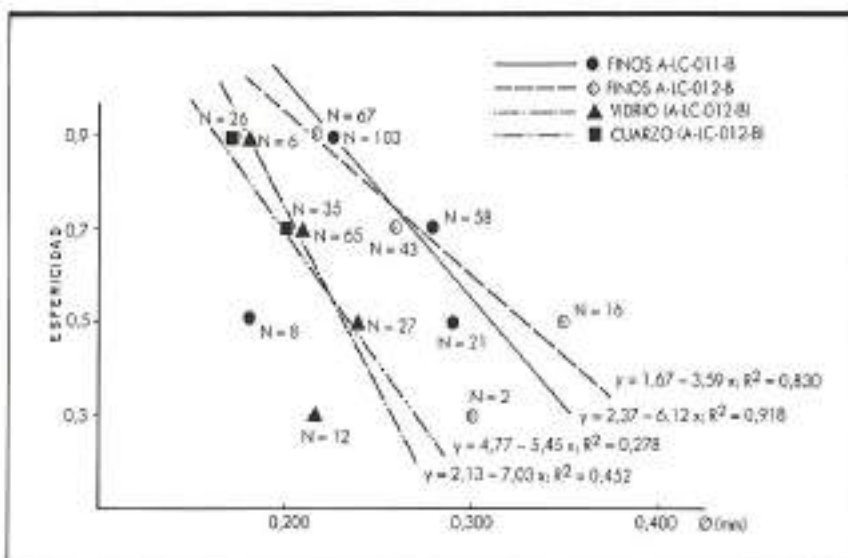


FIGURA 5. Relación entre el tamaño de grano y la esfericidad. En todos los casos, a medida que el tamaño de grano aumenta, la esfericidad disminuye.

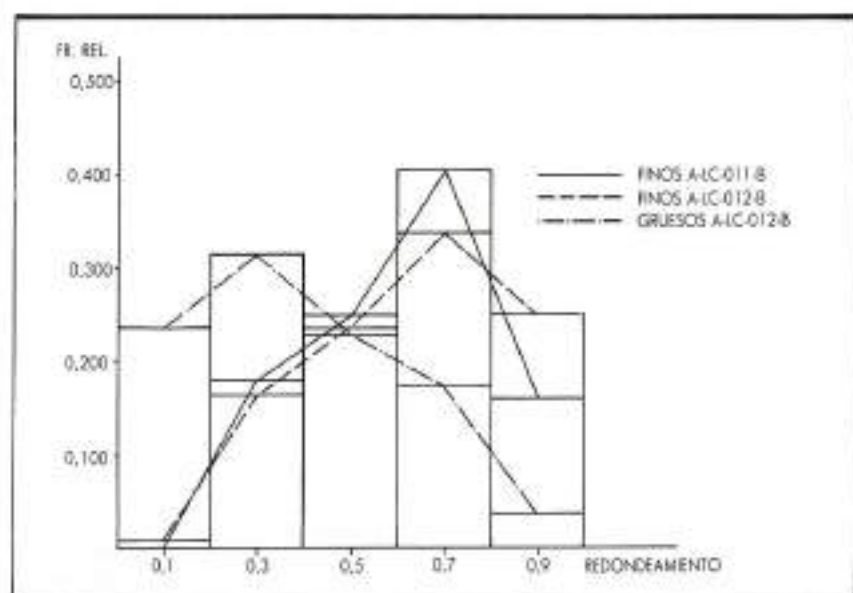


FIGURA 6. Histograma de frecuencias relativas para los distintos valores de redondeamiento. La fracción de «finos» para ambos balsos presentan el mismo redondeamiento; en cambio, es menor en los materiales «gruesos» de la balsa ALC-012-B.

el tamaño de grano aumenta. La recta de regresión se estableció en base a tres puntos que se ajustan bastante bien (figura 5).

En cuanto al redondeamiento, el valor general para el conjunto es de 0,7 (figura 6). En el redondeamiento, como en la esfericidad, coinciden los valores de la media y la moda.

Si analizamos los histogramas para intervalos pequeños de tamaños de grano, ya no en todos ellos la moda se asocia al valor de 0,7. Parece haber una tendencia de desplazamiento de la moda hacia valores menores del redondeamiento, a medida que tomamos inter-

valos en donde los tamaños incluidos son mayores. Esta tendencia se hace más manifiesta al considerar la media.

La relación entre el tamaño de grano y el redondeamiento se estableció en base a cuatro puntos. Al contrario que con la esfericidad, el ajuste ya no se pudo hacer de forma tan precisa como en el otro caso. De todas formas, la relación parece evidente, hay una disminución del redondeamiento a medida que el tamaño de grano aumenta. La relación es la misma que con la esfericidad, incluso las pendientes de las rectas son muy parecidas (figura 7).

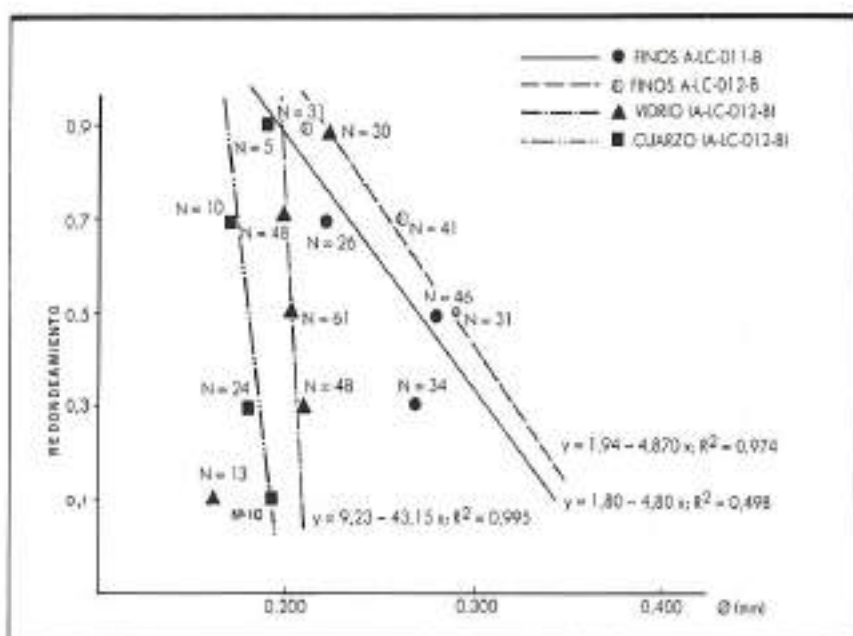


FIGURA 7. Relación entre el tamaño de grano y el redondeamiento. Se puede observar que en todos los casos, el redondeamiento disminuye a medida que el tamaño de grano aumenta.

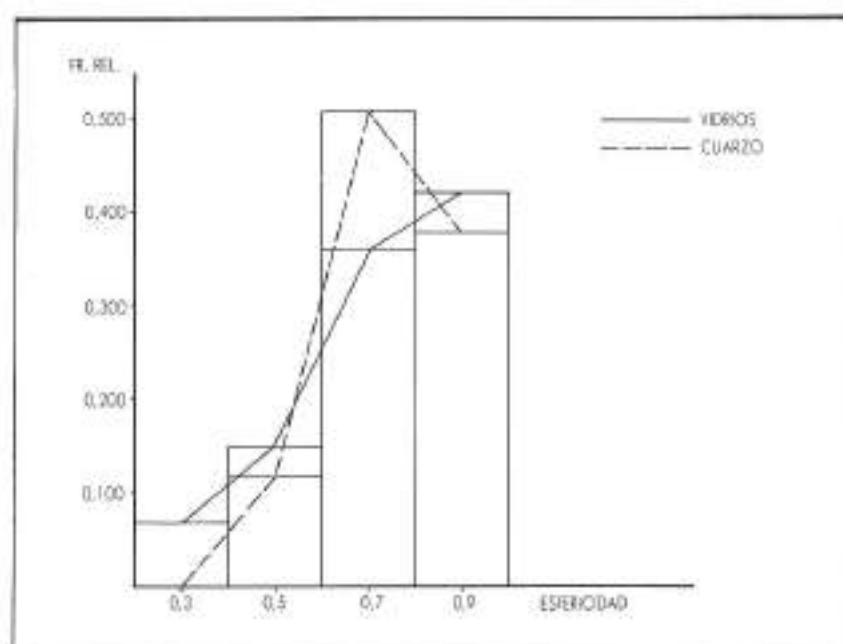


FIGURA 8. Histograma de frecuencias relativas para distintos esfericidades. Materiales de la A-IC-012-B. Existe una marcada diferencia entre las esfericidades que presentan los vidrios y la del cuarzo.

«Finos de la balsa A-IC-012-B». Los resultados se establecieron en base a más de 130 mediciones.

La esfericidad resultó ser de 0,9 en el histograma general (figura 4); mientras que en los histogramas para pequeños intervalos de tamaño de grano las esfericidades no siempre coinciden con la general. Puede vislumbrarse una cierta tendencia de las modas, y más claramente de las medias, a desplazarse hacia valores de esfericidad menor, cuando los tamaños involucrados en cada intervalo se hacen mayores.

Al discernir componentes, los vidrios poseen esfericidad de 0,9; mientras que la media ya se desplaza hacia valores inferiores (figura 8). Para intervalos de tamaños cada vez mayores la moda se desplaza hacia valores de esfericidad menor.

El cuarzo ya no posee una esfericidad general igual a la del conjunto, situándose en 0,7 (figura 8).

Para el vidrio, el cuarzo y la muestra en su conjunto, a medida que aumenta el tamaño de las partículas, la esfericidad se va haciendo menor. La diferencia entre

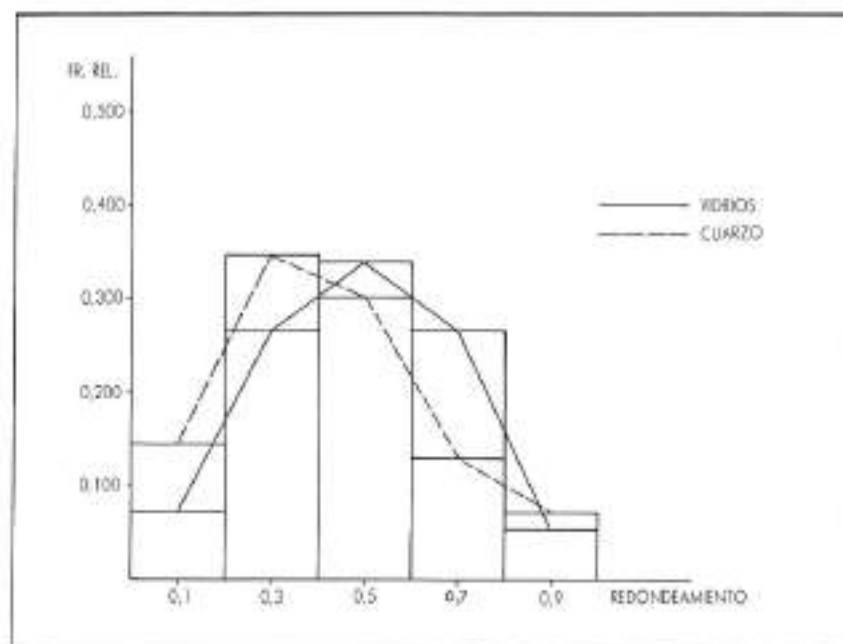


FIGURA 9. Histograma de frecuencias relativas para los distintos valores de redondeamiento de los «finos» de la balsa A-IC-012-B. Como se puede observar el cuarzo es mucho menos redondeado que los vidrios.

ellos viene dada por la pendiente de la recta de regresión para cada caso (figura 5).

Las cenosferas, en cuanto a morfología se refiere, se definen como «esferas huecas de paredes más o menos delgadas». La definición ya nos indica el máximo grado de esfericidad (0,9); y para ellas no tiene sentido hablar de la existencia de variaciones del parámetro con respecto al tamaño de grano, puesto que todas ellas presentan el mismo valor de esfericidad, por definición. Su presencia condiciona que, en la esfericidad global, la moda y la media coincidan.

En cuanto al redondeamiento, el valor general para el conjunto es de 0,7 (figura 6); y para este parámetro también coinciden, en líneas generales, la moda y la media. En cambio, para los vidrios es de 0,5 (figura 9), para los cuarzos de 0,3 (figura 9) y en las cenosferas evidentemente de 0,9. El conjunto adquiere el valor medio de redondeamiento de 0,7, puesto que la presencia de cenosferas lo condiciona en gran medida.

Las correlaciones entre el tamaño de grano y el redondeamiento son rectas de pendiente negativa en todos los casos (figura 7).

«Gruesos de la balsa A-IC-012-B». Dentro de este grupo se incluyen las partículas de tamaños comprendidos entre 0,15 y 4,50 mm. En realidad, es un conjunto constituido por lo que anteriormente se han denominado «finos», a los que se les unió una fracción mayor, comprendida en el intervalo 1,60 y 4,50 mm. Por ello, las diferencias en los resultados, con respecto a los anteriormente reseñados, son debidas esencialmente a los nuevos tamaños incluidos.

A diferencia con los «finos», no se han realizado determinaciones discerniendo componentes y los resultados fueron establecidos a partir de 185 medidas.

La esfericidad general para este grupo es de 0,7; en este valor confluyen tanto la moda como la media (figu-

ra 4). Al igual que sucedía con las fracciones «finas», existe una correlación entre el tamaño de grano y su esfericidad. El tipo de correlación es igual que las analizadas hasta ahora, rectas de pendiente negativa. Es evidente que, a medida que el tamaño de grano aumenta, la esfericidad disminuye (figura 10). A esta misma conclusión se llega comparando los resultados entre los «finos» y «gruesos»; mientras que para los primeros la esfericidad es de 0,9, para los segundos es de 0,7.

El redondeamiento de los «gruesos» ha resultado ser de 0,3 (figura 6), significativamente menor que el correspondiente a los «finos». Por tanto, a medida que el tamaño de grano se hace más grande, el redondeamiento disminuye. Esta tendencia es clara al observar la recta de regresión que relaciona tamaño de grano y el redondeamiento (figura 11).

En base a los resultados generales obtenidos y atendiendo a la clasificación de POWERS (1953) y KRUMBEIN y SLOSS (1955), los materiales presentan la morfología que se muestra en la tabla 1.

VALORACION DE LOS RESULTADOS

Lo primero que llama la atención es que la fracción «finos», independientemente de la balsa considerada, presenta una morfología idéntica, son granos redondeados; incluso tal identidad se hace extensiva a los parámetros de esfericidad y redondeamiento. Las partículas de mayor tamaño incrementan sus características angulosas.

El cuarzo presenta morfología más angulosa que el conjunto; el vidrio es más subredondeado. Para el caso del vidrio esto puede ser debido a que son materiales de notable dureza, sin direcciones predominantes de fractura; no olvidemos que los vidrios «sensu estricto» son sustancias isotropas, y al ser resistentes necesitan grandes períodos de acción erosiva para que adquieran un

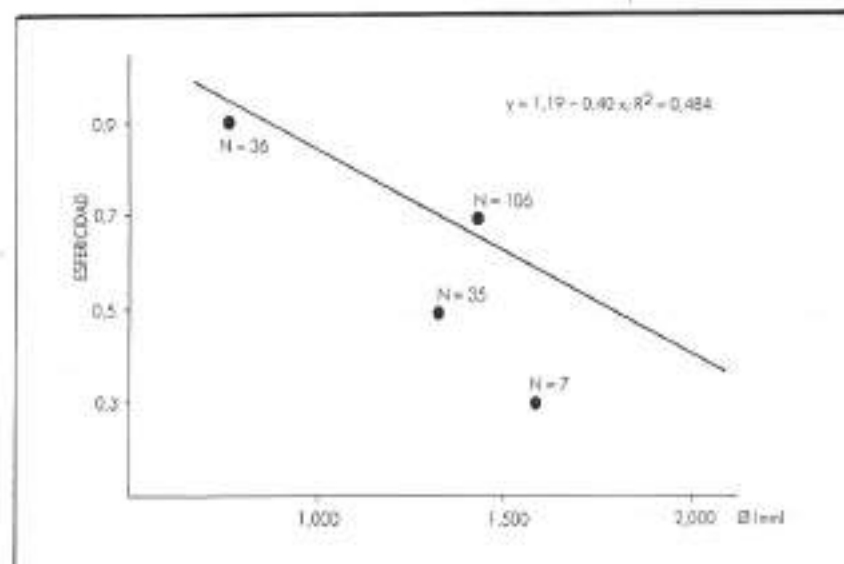


FIGURA 10. Relación entre el tamaño de grano y la esfericidad para los «gruesos» de la balsa A-IC-012-B. A medida que el tamaño de grano aumenta la esfericidad disminuye.

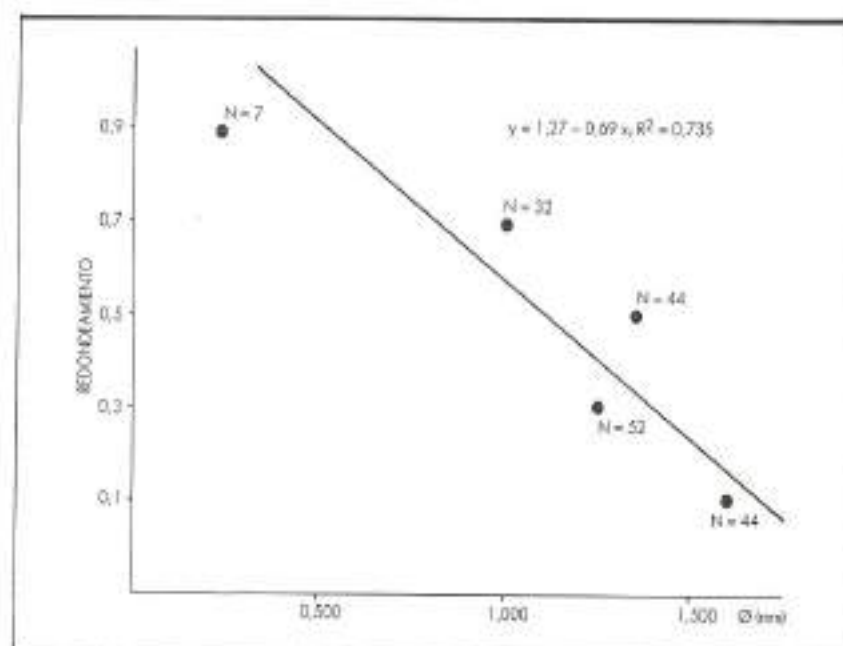


FIGURA 11. Relación entre el redondeamiento y el tamaño de grano para los materiales «gruesos» de la bolsa A-IC-012-B. Como sucede con la esfericidad, cuanto mayor es el tamaño de grano menor es el redondeamiento que presenta.

aspecto altamente redondeado. La diferencia entre ambos (vidrio y cuarzo) es debida a su naturaleza, ya que las condiciones de transporte son idénticas para ambos. Evidentemente, el cuarzo es menos susceptible a ser redondeado que el vidrio. Otro factor que puede influir, es el proceso a que han sido sometidas las partículas en los hornos; mientras que el cuarzo no ha sido fundido o, si lo fue, sólo de forma parcial, los vidrios se originaron por solidificación de fundidos. Al solidificarse, probablemente, las partículas adquieran un aspecto más redondeado; y es más, en algunos casos se originan cenosferas. En cambio el cuarzo continúa con la morfología que adquirió en los molinos, o sea, una morfología angulosa.

La morfología de las partículas influye en ciertas características del material, como son: la granulometría, sobre todo de finos, el coeficiente de rozamiento, el ángulo de rozamiento interno, la abrasividad, etc.

Las partículas aquí analizadas presentan, en su mayor parte, morfología redondeada; y por tanto se ajustan razonablemente a la base teórica de los métodos para el análisis granulométrico de finos, basados en la

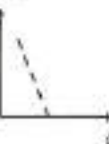
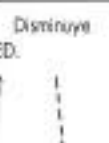
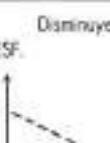
Ley de Stokes. Los resultados de este tipo de análisis pueden considerarse válidos, aun cuando no se trate de esferas propiamente dichas.

En cuanto al coeficiente de rozamiento, éste será menor que el que se obtendría para partículas más angulosas. De todas formas, en base al muestreo realizado se puede precisar que el coeficiente de rozamiento disminuye con el tamaño de las partículas; y por tanto, con respecto a la posición que se considere dentro de una determinada bolsa. De tal modo que, a medida que nos separamos del punto de vertido, este parámetro se irá haciendo menor.

La forma de las partículas condicionan el valor del ángulo de rozamiento interno; para partículas esféricas este ángulo ha de ser menor que para las más angulosas, puesto que al ser menor el número de contactos entre ellas, se requiere un menor esfuerzo para removernizarlas, lo que implica una menor presión tangencial. Los casos aquí estudiados lo pueden corroborar, mediante los resultados de los ensayos de corte directo realizados (ensayos sobre muestras inalteradas, con

MATERIALES	GLOBAL	VIDRIO	CUARZO	CENOSFERAS
«FINOS» A-IC-011-B	REDONDEADO	—	—	—
«FINOS» A-IC-012-B	REDONDEADO	SUBREDONDEADO	SUBANGULOSO	REDONDEADO
«GRUESOS» A-IC-012-B	SUBANGULOSO	—	—	—

TABLA 1.

		BALSAS DE CENIZAS VOLANTES (ENSIDESA-AVILES)											
		ALC-012-B										ALC-011-B	
		GRUESOS		FINOS								FINOS	
		SIN DIFERENCIAR COMPONENTES		DIFERENCIANDO COMPONENTES						SIN DIFERENCIAR COMPONENTES		SIN DIFERENCIAR COMPONENTES	
				VIDRIO		CUARZO		CENOSFERAS					
COMPOSICION (%)		—		41 (%)		24 (%)		15 (%)		—		—	
ESFERICIDAD		0,7		0,9		0,7		0,9		0,9		0,9	
REDONDEAMIENTO		0,3		0,5		0,3		0,9		0,7		0,7	
MORFOLOGIA		Subangulosas		Subredondeadas		Subangulosas		Redondeados		Redondeados		Redondeados	
A MEDIDA QUE AUMENTA EL TAMAÑO DE GRANO	LA ESFERICIDAD	Disminuye ESF. 		Disminuye ESF. 		Disminuye ESF. 		— 		Disminuye ESF. 		Disminuye ESF. 	
	EL REDONDEAMIENTO	Disminuye RED. 		Disminuye RED. 		Disminuye RED. 		— 		Disminuye ESF. 		Disminuye ESF. 	

CUADRO 1. Resumen de las características morfológicas.

consolidación previa y drenaje); así los valores del ángulo de rozamiento interno para la balsa A-LC-011-B (representados por las fracciones «finas») son inferiores a los obtenidos para la balsa A-LC-012-B (constituidos por una mezcla de «finos» y «gruesos»). En el primer caso el valor del ángulo de rozamiento interno está próximo a 40°, mientras que para el segundo éste es ligeramente superior a 41°.

La geometría de las partículas también influye en la abrasividad de las tuberías de conducción; siendo las más angulosas las que presentan un mayor índice. Las cenizas volantes, en su conjunto, no plantean una problemática especial; aunque la existencia de partículas de cuarzo de forma angulosa actuarán como abrasivo de las tuberías, dependiendo de la proporción de cuarzo y del tamaño del mismo.

En cambio, esta forma general para las partículas es perjudicial a efectos de su transporte en cintas, puesto que parte de las partículas, por no decir todas, comenza-

rán a rodar sobre la cinta, originando el desgaste de la misma.

CONCLUSIONES

- Las cenizas volantes de tamaños comprendidos entre 0,15 y 1,60 mm poseen morfología subredondeada. En los tamaños superiores la forma es ya más subangulosa.
- Los diversos componentes de las cenizas volantes presentan diferencias morfológicas. El cuarzo es el más anguloso, respecto a los restantes componentes, provistos de un notable grado de redondeamiento.
- Tanto la esféricidad como el redondeamiento son parámetros correlacionables con el tamaño de grano. A medida que el tamaño de grano aumenta, tanto la esféricidad como el redondeamiento disminuyen.
- La morfología de las partículas influye en ciertas características del material, como son: la granulometría, el ángulo de fricción interno, su abrasividad,

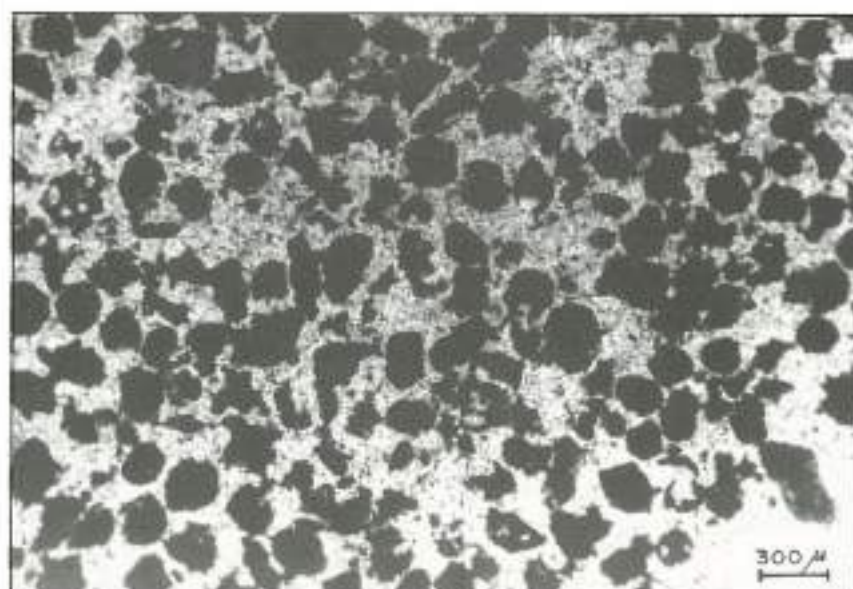


FIGURA 12. Aspecto general del microscopio con nicols paralelos de la forma de las cenizas volcánicas de la bolsa A-IC-011-B. El grado de redondeamiento es considerablemente alto.

etc. Comprobándose que la forma de las partículas se ajusta bastante bien a las consideraciones teóricas de los análisis granulométricos. Los materiales de granulometría más fina (los más redondeados, en conjunto) presentan ángulos de fricción internos menores respecto a los de granulometría más grosera (más subangulosos).

- Las cenizas volantes no presentarán grandes problemas de abrasividad en las tuberías por poseer formas redondeadas, salvo que haya un incremento apreciable en el contenido en cuarzo. Sin embargo,

esta forma favorecería el desgaste de cintas transportadoras.

BIBLIOGRAFIA

- GRIFFITHS, J. C., y ROSENFELD, M. A. (1954). «Operator variation in experimental research». Jour. Geol. Vol. 62, pp. 74-91.
- I.G.M.E. (1984). «Revisión crítica de la nomenclatura y nivel de actuación del Inventario Nacional de Balsas y Escombreras —Huelva y Asturias—». Tomo II, I.G.M.E., julio.
- KRUMBEIN, W. C., y SLOSS, P. A. (1955). «Stratigraphy

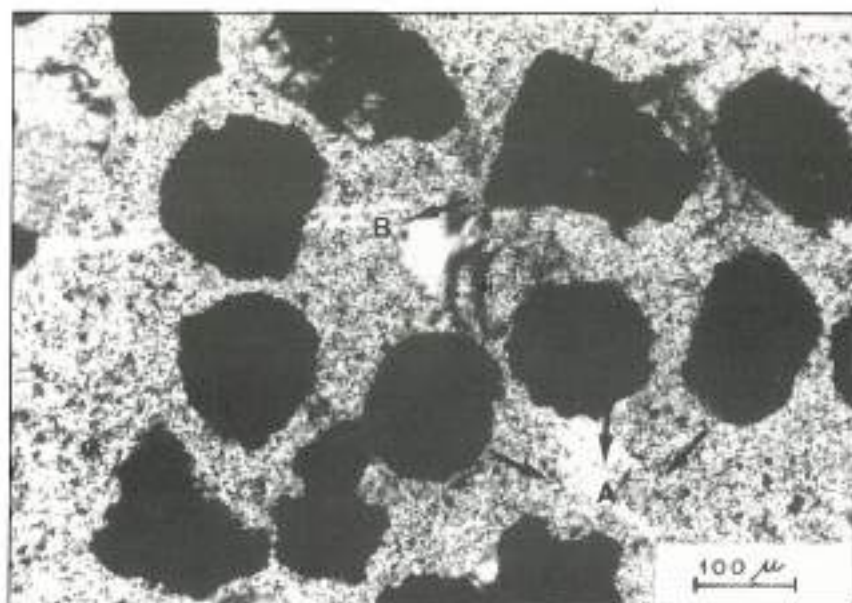


FIGURA 13. Detalle de la forma de los granos de la bolsa A-IC-011-B. El grado de redondeamiento es alto, en general. A) granos redondeados. B) granos subredondeados. (Fotografía de microscopio con nicols paralelos).

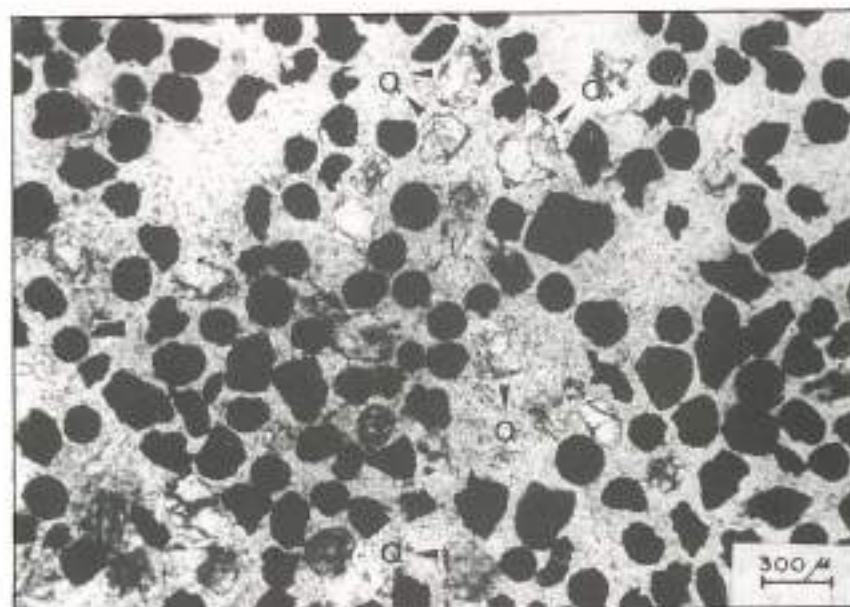


FIGURA 14. Aspecto general de los granos de cenizas volantes de la bolsa A-C-012-B (fracción de «finos»). La forma del conjunto puede decirse que es redondeada, si bien los granos de cuarzo (Q) presentan angulosidad más marcada. (Fotografía de microscopio con nicols paralelos).

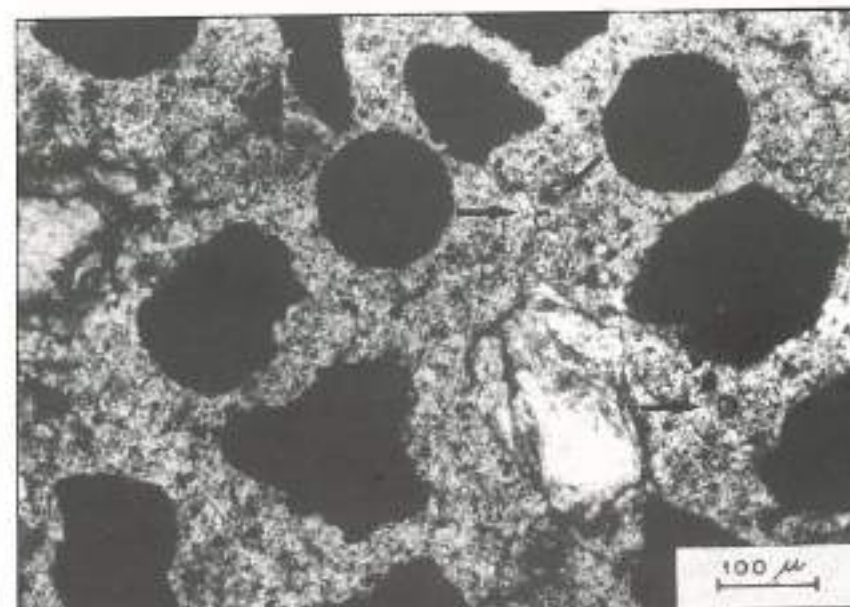


FIGURA 15. Aspecto particular de las cenizas volantes («finos») de la bolsa A-C-012-B. Los cenosferas (C) tienen una forma redondeada, los granos de cuarzo (Q) son más angulosos. (Fotografía de microscopio con nicols paralelos).

and Sedimentations». Feedman & Co., 497 pp. San Francisco.

POWERS, M. C. (1953). «A new roundness scale for sedimentary particles». Jour. Sed. Soc. Geol. Petrology, vol. 23, pp. 117-119.

ROSENFELD, M. A., y GRIFFITHS, J. C. (1953). «An experimental test of visual comparison technique in estimating two

dimensional sphericity and roundness of quartz grains». Am. Jour. Sci., vol. 251, pp. 553-585.

SNEED, E. D., y FOLK, R. (1958). «Pebbles in the Lower Colorado River, Texas a study in particle morphogenesis». Jour. Geol., vol. 66, pp. 114-150.

WADDELL, H. (1932). «Volumen, shape and roundness of rock particles». Jour. Geol., vol. 40, pp. 443-451.