

# Granulometría y Morfometría de materiales granulares por métodos ópticos

Eric PIRARD

*Université de Liège*

*GeomaC*

*“Géoressources, Géotechnologies et Matériaux de Construction »*

*Sart Tilman B52/3*

*4000 LIEGE*

[eric.pirard@ulg.ac.be](mailto:eric.pirard@ulg.ac.be)

<http://www.ulg.ac.be/geomac>

## 1 Introducción

La “imagería” numérica en laboratorio proporciona una gran gama de aplicaciones y se convierte en una opción standard de numerosos equipos de observación científica (binoculares, microscopios ópticos y electrónicos,...) o de mensura (microdurométros, prensas mecánicas, ...). El entusiasmo para utilizar esta técnica es en gran medida debido a las perspectivas de gestión informatizada y de visualización que ella ofrece. Sin embargo, de más en más, aparecen nuevas aplicaciones que permiten de ir más lejos y de desarrollar una verdadera automatización de mensuras simples y repetitivas (tamaño de huellas , altura de niveles, desplazamiento de un cursor,...).

Contrariamente, en lo que se refiere a la producción, que es un freno para el desarrollo de rutinas demasiado complejas, el análisis de imágenes en laboratorio puede, llegado el caso, proporcionar los recursos a las técnicas de adquisición o de tratamiento y proporcionar los resultados en algunos segundos .... a algunos minutos!

Dentro de este artículo, solamente se tomarán en consideración las aplicaciones del análisis de imágenes utilizados en la mensura granulométrica o morfométrica de partículas en laboratorio.

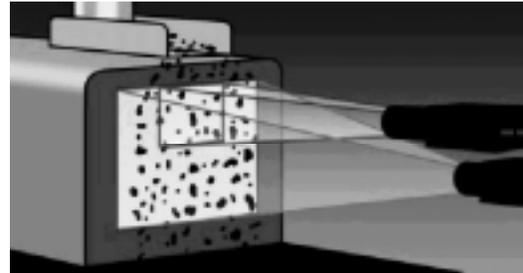
## 2 Granulometría y morfometría óptica.

Estos últimos años se desarrollaron sistemas de visión industrial destinados a estimar la granulometría de un material bruto. Las aplicaciones más corrientes consisten en intentar estimar la granulometría de bloques después de un tiro en una cantera o en una correa transportadora a la salida de una chancadora. Dichos sistemas acceden parcialmente a la granulometría del producto que no proporciona las medidas precisas de los fragmentos individuales.

Para explotar todas las riquezas de las técnicas de imagería de materiales granulares en laboratorio, es indispensable de controlar la forma de presentación del producto bajo el objetivo de la cámara y en lo posible de llegar a individualizar el perfil de cada grano. Conforme a lo que se observa en las técnicas de granulometría por difracción láser, los sistemas de análisis de materiales granulares por imagen (videogranulometría) constan de un sistema de alimentación específica. Los aparatos que exponemos aquí, están desarrollados por lo esencial para una gama de productos « tamisables » (de 10µm a 100 mm)

### 2.1 Presentación del producto

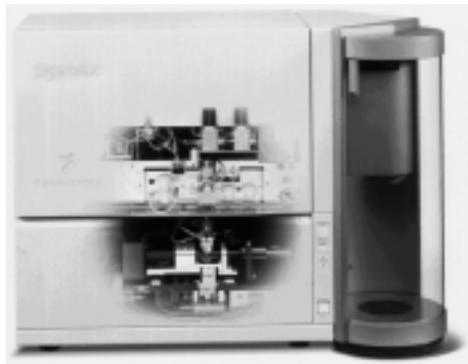
El objetivo principal de un sistema de alimentación es la individualización de cada partícula. Esta separación requiere una gran dispersión del producto, ya que dos partículas netamente separadas en el espacio, por proyección sobre el plano de la imagen pueden llegar a producir sombras que se cabalgan. Según los constructores y según las gamas granulométricas, el principio puede ser muy diferente :



**Figura 1** Principio de toma de imágenes de partículas en caída libre delante un panel luminoso (doc. Retsch).

### 2.1.1 Caída no controlada :

Esta forma de presentación, es adoptada por la mayoría de instrumentos como ser : RapidVue de la sociedad Beckman-Coulter, Optosizer de la sociedad Micromeritics, PCA de la sociedad Haver & Boecker y Camsizer de la sociedad Retsch (Figura 1). Las partículas son alimentadas por un cono de alimentación vibratorio y caen libremente en el espacio comprendido entre la cámara y la fuente de iluminación. El riesgo de una superposición de las partículas dentro la escena es controlado por una gran dispersión del producto. Por principio, la orientación de las partículas individuales no es aleatoria, ni tampoco controlada. Sobre bases rigurosas, es imposible de establecer la relación entre la sombra proyectada de cada partícula y su volumen verdadero. Por la segregación introducida en el vertido del cono de alimentación y en función del tamaño de las partículas, es posible de engendrar una variación en la distancia que existe de la cámara a la partícula y que crea imperfecciones en la focalización.



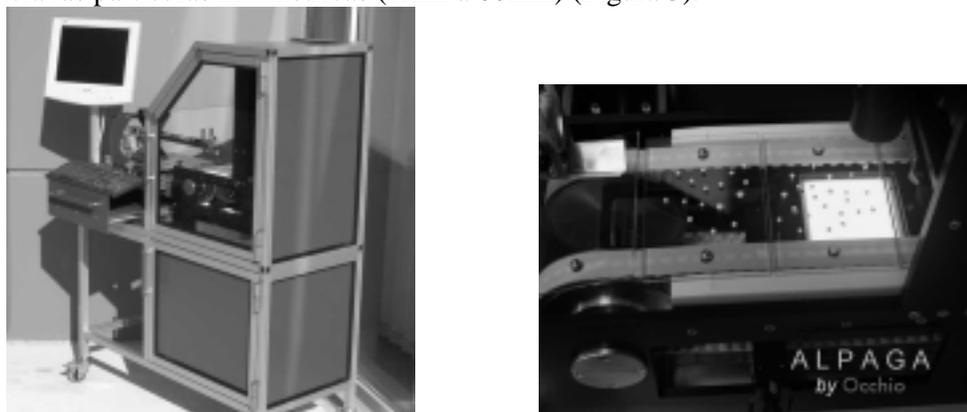
**Figura 2** El sistema Sysmex creado por Malvern, cubre una gama granulométrica de 0.7 a 40  $\mu\text{m}$  ó de 4 a 160  $\mu\text{m}$ . Las partículas son puestas en suspensión dentro un fluido con el fin de controlar mejor su posición dentro el campo de visión de la cámara (doc. Malvern).

**Figura 3** Desarrollado y comercializado por el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées frances, el VDG 40 ante todo es destinado al análisis rápido de granulados de varios milímetros.

### 2.1.2 Caída controlada :

Por controlar la manera de presentar las partículas, algunos constructores como los recientes sistemas Sysmex PCIA 2100 de Malvern (Figura 2), utilizan las propiedades hidrodinámicas de una partícula dentro un fluido (agua o alcohol). El capilar a través del cual pasa la solución, fuerza la partícula a localizarse perfectamente dentro el plano de focalización del objetivo y de esta manera presenta hacia la cámara la cara proyectada (la más grande). Este sistema es conveniente de utilizar en el análisis de partículas finas que tengan una extensión granulométrica relativamente limitada (0.7  $\mu\text{m}$  a 40  $\mu\text{m}$  o 4 $\mu\text{m}$  a 160 $\mu\text{m}$ ). El sistema VDG-40 comercializado desde 1992 por el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) utiliza el principio de un tambor repartidor para acelerar y orientar las partículas antes de su caída. El

VDG-40 ha sido construido para el control de agregados y a dicho grupo se incluyen con preferencia las partículas milimétricas (1mm à 80mm) (Figura 3).



**Figura 4** El granulo-morfómetro Alpaga comercializado por la sociedad Occhio explota la flexibilidad de una correa de laminas de vidrio para optimizar la dispersión, focalización y la disposición de las partículas dentro el campo de toma de imágenes.

### 2.1.3 Reposo:

Cuando la visualización de las partículas necesita recurrir a la microscopía óptica, tradicionalmente se utiliza una lamina de vidrio sobre la cual se dispersa el producto. En este caso, las partículas se presentan en reposo y su tercera dimensión (la más pequeña) necesariamente es paralela al eje óptico. Esta imposición evidente para una observación tridimensional ofrece muchas ventajas significativas para la correlación con los tamices. El sistema BeadCheck de Pharma Vision propone el desplazamiento automatizado de una sola lamina de vidrio cargada de partículas (0.5  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  o 10  $\mu\text{m}$  a 10mm). El sistema patentado Alpaga de la sociedad Occhio (Figura 4). funciona de manera continua con una banda transportadora de laminas de vidrio y/o plástico sobre las cuales vienen a ser vertidas las partículas. Esta técnica proporciona una excelente focalización, permite automatizar los procedimientos utilizados en microscopía óptica y observar una gama granulométrica mucho más amplia.

### 2.1.4 Dispersión sobre un filtro :

Las partículas más finas (< 10 $\mu\text{m}$ ) se comportan muy mal en el seno de los sistemas de dispersión mecánica y desafían los límites de la resolución óptica. En este caso, es indispensable recurrir al microscopio electrónico. Para obtener mejores condiciones de observación es preciso de realizar una dispersión en un medio líquido, en un baño de ultra sonido seguido de un micro filtraje (Millipore). La dificultad de preparación y el número de partículas es un limitante que condicionara también la representatividad del método, el cual es aconsejable de utilizar en casos excepcionales y para el examinar propiedades como el tamaño, la forma, aspecto, superficie,...; características que no son mensurables por la difracción láser.

### 2.1.5 Preparación en secciones:

La sombroscofia de los materiales, es una técnica que tiene la ventaja de que las muestras no necesitan una preparación particular, pero no es la sola técnica de imaginería existente. El examen en secciones permite de unir el análisis granulométrico a la determinación de la naturaleza de los granos. Este examen solamente es posible en un microscopio óptico de reflexión o en un microscopio electrónico a barrido. La técnica presenta grandes similitudes a la estimación microscópica de la granulometría de agregados dentro el hormigón. La “stereología” (ciencia que permite la estimación de la granulometría 3D partiendo de una imagen 2D) necesariamente exige la realización de secciones aleatorias dentro el material. Este requerimiento, no será jamás una garantía en la practica, en razón del difícil control de la sedimentación del producto dentro la resina de montaje. Si se proporciona la más grande

prudencia a la hora de mezclar los granos, dentro de todos los casos la más grande sensatez será siempre comparada con los resultados granulométricos. Es bueno de precisar que la sola estimación no – sesgada realizable mediante la stereología, es la granulometría de esferas.

## **2.2 Toma de imágenes**

### **2.2.1 Cámaras:**

La diversidad de formas para presentar el producto induce también a una gran variedad de sistemas de adquisición de imágenes y como consecuencia diferentes tipos de iluminación. Fundamentalmente existen dos tipos de sistemas, los que utilizan cámaras lineales y los que utilizan cámaras matriciales. Dentro el primer caso la escena es cortada en líneas sucesivas por lo contrario dentro el segundo caso toda la imagen es adquirida simultáneamente.

La diferencia mayor entre los dos sistemas reside en la manera de gestionar los productos en movimiento. Los sistemas lineales deben velar a uniformizar la velocidad de caída de las partículas y de esta manera garantizar una digitalización correcta. Por lo contrario, los sistemas matriciales deben de asegurar que el movimiento de las partículas con relación a la frecuencia de la toma de imágenes sea pequeño (frecuencia video standard de 40 ms); llegado el caso se puede recurrir a la utilización de un flash sincronizador. Las cámaras lineales en teoría tienen una gran resolución espacial (por Ej. 2048 píxeles/línea), la cual es válida en la dirección horizontal mientras que la frecuencia de lectura limita sensiblemente la resolución vertical.

La presentación de las partículas sobre el “tapiz” formado por las láminas de vidrio permite regular la velocidad de circulación, según el caso explotar las ventajas de las cámaras lineales o matriciales y de asegurar una perfecta sincronización, sin necesidad de recurrir a un flash.

### **2.2.2 Iluminación:**

La retro-iluminación es la configuración más corriente dentro los sistemas vidéogranulométricos. La utilización de haces de luz direccionales (colimatados) proporciona una gran nitidez en los contornos de los granos. La forma de presentar el producto en reposo permite de explotar muchos tipos de iluminación y en particular la iluminación episcópica, que permite la mensura granulométrica de las partículas transparentes o de medir las propiedades de color y/o de reflexión de partículas individuales.

### **2.2.3 Óptica:**

Los fabricantes no proporcionan prácticamente ninguna información sobre las características ópticas de sus respectivos sistemas. La distancia focal y el carácter tele-céntrico del instrumento son los elementos determinantes en el cálculo de la resolución efectiva del sistema. Algunos sistemas son construidos con dos cámaras instaladas en paralelo y dotados de instrumentos focales complementarias para de esta manera poder estimar una grande gama granulométrica en un solo pasaje (30µm a 30mm). Sin embargo, su gran defecto es el muestreo correcto del material. Debemos señalar también, que los cálculos por conocer la resolución son generalmente teóricos y necesitan ser validados por una experimentación practica sobre un producto determinado.

## **2.3 Calibración y resolución**

Las técnicas de imaginería de materiales granulométricos presentados a continuación son en la mayoría de los casos basados sobre la sombroscofia de los granos. La gran ventaja de esta técnica es de proporcionar una imagen binaria (negro / blanco) que brinda una delimitación muy neta de cada partícula. Un proceso de umbralización simple bastara para extraer el contorno requerido para el análisis de la talla y la forma.

La resolución de un sistema de adquisición de imágenes puede expresarse por la distancia, en micrones, que separan dos píxeles contiguos dentro la imagen o también se puede expresar, por el numero de píxeles por unidad de longitud (dpi = *dots per inch* = puntos por pulgada). Esta distancia será indispensable en la calibración de los resultados, es decir que es utilizada para convertir las mensuras en número de píxeles a unidades métricas equivalentes. Cabe recalcar que

no se debe confundir la resolución óptica con la dimensión de la partícula más pequeña analizada por el instrumento. Dicho de otro modo, las partículas de diámetro equivalente separadas a una distancia de dos píxeles sucesivos serán materializadas dentro la imagen pero estas no serán mensuradas. En la practica, es más prudente de considerar que solo las partículas delimitadas en superficie por una veintena de píxeles pueden ser el objeto de una mensura del tamaño y que las partículas demarcadas con una centena de píxeles pueden ser tomadas en consideración en la mensura de la forma.



**Figura 5** Mira de calibración de un videogranulómetro en caída libre (doc. Retsch)

Prácticamente, los sistemas de video-granulometría son construidos sobre la base de una distancia focal fija ( $x \text{ píxeles} = x \mu\text{m}$ ) el cual dispone de una mira de calibración (Figure \$). Sin embargo no hay que olvidar, que los sistemas matriciales tienen una resolución en X y Y, que solamente depende de la óptica y del captor; mientras que los sistemas lineales tendrán una calibración óptica en X y una resolución en Y, la cual esta en función de la velocidad de circulación o la caída del producto. Por ej., una cámara de 1024 píxeles por línea que funciona a una frecuencia de 20 Mpíxeles/sec adquiere una imagen con una resolución horizontal de  $5\mu\text{m}$  por una escena de 5 mm de largo; sin embargo la resolución vertical de una partícula que cae a 1 m /sec será de solamente  $50 \mu\text{m}$  y para una velocidad de caída de 9,8m/sec la resolución de la partícula será de  $500 \mu\text{m}$  !. Toda variación dentro las condiciones de circulación tendrán un impacto significativo y no controlable en la calidad de los resultados.

Dado los límites inherentes de la óptica, la resolución de un captor y la talla del campo de la imagen no son parámetros suficientes para calcular la resolución. Cuando la dimensión de una partícula tiene el tamaño igual a la longitud de onda de la luz utilizada (400nm à 1000 nm) la difracción es un problema inherente y es imposible de adquirir imágenes.

#### **2.4 Definición de las medidas**

El término « digital » es muy frecuentemente utilizado en el vocabulario corriente como un sinónimo de precisión. La idea misma de remplazar una operación humana por un proceso asistido por ordenador es frecuentemente percibido como un desarrollo significativo en términos de precisión. Ahora bien, si la maquina se encuentra efectivamente al abrigo de errores humanos, por tanto ella no es independiente de las condiciones operatorias. Ya sea en razón de las fluctuaciones dentro las condiciones de la adquisición de imágenes o en función de los algoritmos utilizados, los resultados serán siempre perturbados por algún error. La elección sensata de un instrumento deberá necesariamente pasar por una serie de validaciones cruzadas: correlaciones entre las mensuras ópticas y otras mensuras físicas, reproducción de la misma mensura sobre una misma muestra, variabilidad de las mensuras en función de las condiciones operacionales (caudal, frecuencia de toma de imágenes, modo de iluminación,...). Los fabricantes jamás mencionan este tipo de información y raros son los trabajos científicos comparativos. La creación de normas, indispensables por el desarrollo de dichos equipos, deberá necesariamente apoyarse sobre este tipo de trabajos.

### 2.4.1 Áreas y diámetros

La stereología demuestra fácilmente que el área de un objeto puede ser estimado por medio de una serie de sondas puntuales, multiplicando el número de puntos positivos por el área de influencia de cada punto. Para el caso de una imagen video binaria, esto se traduce simplemente a contar el número de píxeles conexos que forman una sola partícula y multiplicarlo por el producto de las resoluciones  $\Delta x$  y  $\Delta y$  (Figure 6). La sombra proyectada es una mensura raramente explícita y la presentación de los resultados es proporcionada en término del diámetro de un disco de área equivalente

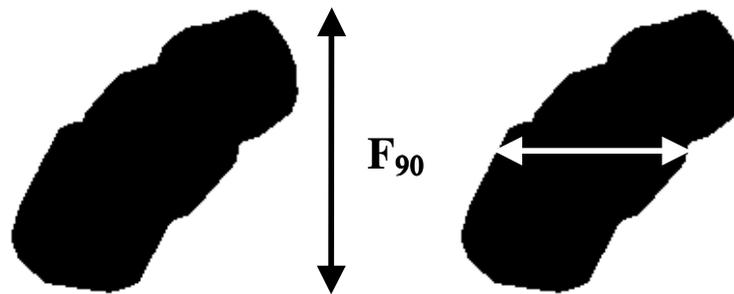
$$(D_o = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}})$$

Esta mensura es utilizada, por ejemplo, por el sistema Malvern Sysmex FPIA-2100 como estimador de la granulometría.



**Figura 6** Para calcular la superficie proyectada de un grano se debe contar el número de píxeles incluidos. Esta mensura de superficie es convertida por la mayoría de los sistemas en un diámetro de disco equivalente.

Existen también otras definiciones de diámetro, una de las más utilizadas es el diámetro de Féret o diámetro de una envoltura convexa. El diámetro de Féret para una orientación dada  $\alpha$ , es la longitud de la proyección de la partícula sobre una recta orientada en la misma dirección  $\alpha$ . Para estimar correctamente el diámetro de Féret de la partícula más pequeña / más grande, se necesita en la practica explorar al menos en dieciséis direcciones diferentes. El diámetro de Feret máximo no será otro, que el diámetro del disco circundante a la partícula. Los sistemas más antiguos miden el diámetro de Féret solamente en la dirección de la caída de las partículas (Figure 7).

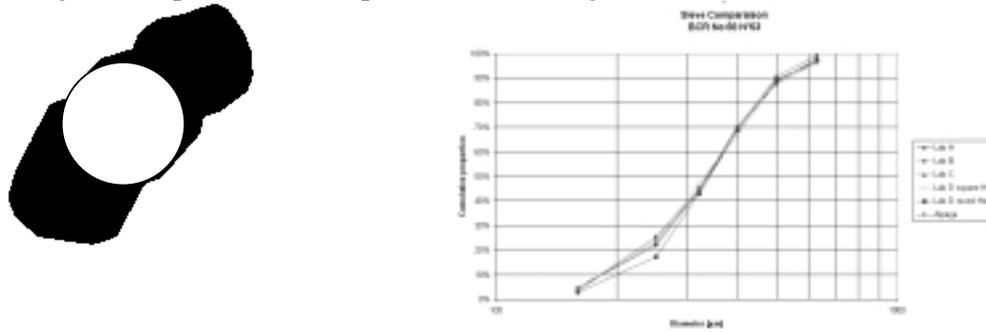


**Figura 7** Mesura del diámetro de Feret (por proyección) según la dirección de caída ó medida del diámetro de Martin (longitud de la máxima intercepta).

Otra manera de estimar el diámetro es medir las longitudes de las interceptas según una dirección; esta técnica es corrientemente utilizada en el análisis de imágenes para cuantificar las orientaciones preferenciales de textura. En razón del tiempo de cálculo, algunos de estos sistemas se contentan de analizar solamente los interceptas horizontales (Figure 7), técnica que tiene poco de interés en la práctica.

La noción de diámetro inscrito, se revela como una técnica muy útil para caracterizar las partículas cóncavas y es la que coincide mejor con la definición física de la malla de un tamiz pasante. Si se realiza una serie de erosiones repetidas sobre una imagen, es posible de determinar el momento de la desaparición de cada partícula. Este concepto se relaciona a la noción de erosión ultima, la cual permite de contar el número de partículas subsistentes después de cada operación y establecer una granulometría de los discos máximos inscritos. Debemos señalar

también, que esta técnica permite de encontrar con exactitud la granulometría de materiales granulares igual a la que es obtenida por los tamices (Figure 8).



**Figura 8** La medida del diámetro del círculo máximo inscrito es la que predice mejor el resultado de un tamizado, como testimonia la correlación perfecta de las curvas granulométricas de arenas europeas de referencia BCR 68 (doc. Occhio).

#### 2.4.2 Perímetros

La noción de perímetro es sin duda el concepto más delicado a utilizar en el mundo de la imagería numérica. Por una parte la estimación de un perímetro esta extremadamente ligado al aumento a utilizar y por otra parte la diversidad de algoritmos existentes conducen a una dispersión suplementaria de los resultados. La variación exponencial de la mensura de un perímetro con relación a la escala de representación esta muy bien conocida y ha dado lugar al nacimiento de la teoría fractal, utilizada si la mencionada variación es lineal. Comparar las mensuras del perímetro (o de superficies especificas si el perímetro es normalizado por el área) en un videogranulómetro que trabaja sobre una basta gama dimensional de partículas, no tiene ningún sentido, puesto que las partículas más finas son materializadas por algunas centenas de píxeles y las grandes por decenas de millones de píxeles!

Aun más, sin que una convención precisa no haya sido establecida, ciertos sistemas miden el perímetro interno y otros el perímetro externo. Por ultimo, para estimar la longitud algunos calculan el perímetro digital (numero de píxeles) y otros estiman la longitud de la línea poligonal.

Bajo toda circunstancia se recomienda ser extremadamente prudente con las mensuras de superficie específica sobre partículas de dimensiones diferentes y de no intentar correlacionar los resultados a los adquiridos por métodos físicos, ya que las escalas de investigación son radicalmente diferentes.

#### 2.4.3 Alargamiento y Aplastamiento

La medida de los diámetros proporciona el acceso a una primera información morfológica, que es la cuantificación del alargamiento (*aspect ratio*). El alargamiento es generalmente denotado por la relación:

$$EI = \frac{F_{\min}}{F_{\max}}$$

La relación de los ejes de inercia provee igualmente excelentes resultados. Sin embargo, muchos sistemas utilizan la relación de los diámetros en función a la orientación de las partículas después de la caída (Ej. Feret en dirección de la caída/ intercepta máxima o también la relación de las partículas dentro el sentido horizontal y vertical). Debemos señalar que la posición de las partículas después de la caída es desconocida, en tales sistemas se anticipa una confusión total entre el alargamiento y el aplastamiento. Por lo contrario, los sistemas que utilizan la caída controlada o el reposo, no pueden medir el aplastamiento. Por ultimo debemos reiterar que las técnicas actualmente comercializadas no permiten la automatización exacta de las mensuras tridimensionales.

#### 2.4.4 Rugosidad y Angulosidad

Sin entrar en detalle sobre las técnicas morfométricas, es conveniente de atraer la atención sobre, la falta de sensibilidad de la mayor parte de los sistemas que actualmente se encuentran en el mercado. Por preocuparse de la prestación, todos se refieren a una medida bautizada según el caso de circularidad, esfericidad o aun redondez. Se trata en realidad de un parámetro derivado de las medidas de base, el área y el perímetro:

$$F = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Según los principios de la geometría euclidiana, F tendrá el valor de uno por un disco. Desgraciadamente este valor no significa nada y en la practica una serie de discos perfectos de una granulometría que varia de 50 a 50000 píxeles tendrán una dispersión en sus resultados de 0,84 a 0,94. A esto debemos añadir, que las tres formas de la figura 9 tienen un valor teórico idéntico de  $F = 0,495$  !. Si consideramos dichos resultados, ellos parecen manifestar que son indispensables elaborar mejores métodos para el análisis morfométrico de polvos y granulados. Inspirándose en los principios de la morfología matemática, el sistema ALPAGA integra las medidas de índice de abrasión y de angulosidad, automatizando perfectamente las medidas realizadas a cada instante por medio de cartas visuales utilizadas dentro la industria del petróleo, abrasivos o de manera general en tribología.

La noción de roundness tendrá un valor de 100% para un disco estrictamente perfecto y se distancia de este valor hasta llegar a 40% para las partículas más angulosas (Figura 10).



Figura 9 Estas tres formas geométrías presentan un factor de forma (F) idéntico, de un valor de 0,495. Ahora bien no existe ningún procedimiento por el cual tales partículas pueden ser consideradas como idénticas.



Figura 10 . Ilustración de algunos granos que provienen de la misma muestra de arena y corresponden a un índice de abrasión creciente: 36 % ; 39 % ; 47% ; 58% y 63 %.

#### 2.4.5 Otros Mensuras

El análisis morfométrico todavía ofrece muchas posibilidades que aun son inexploradas, tal es el caso de la estimación de la concavidad de las partículas o la mensura de su reactividad. Sobre una base estrictamente geométrica, estos conceptos pueden ser útiles al momento de construir nuevos sistemas con un elevado valor agregado.

### **Presentación de los resultados**

Es evidente que los métodos de grano – morfometría óptica abren la perspectiva de una caracterización en laboratorio, más aun si ellas son transferidas sobre una línea de producción sin grandes modificaciones. Vale la pena señalar también, que estas técnicas introducen nuevos conceptos o nuevas medidas, que no son fáciles a relacionar con las normas existentes y en particular aquellas utilizadas por el tamizado.

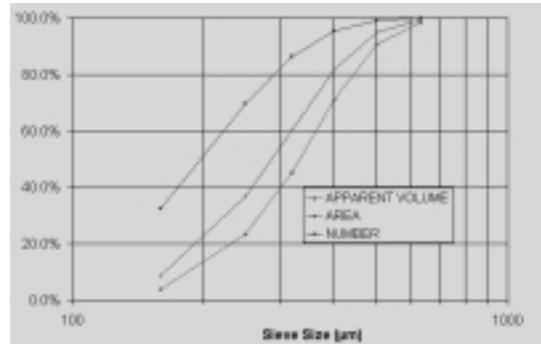
Los elementos que distinguen las mensuras realizadas por un tamiz y las efectuadas mediante las imágenes son :

<b>TAMIZ</b>	<b>IMAGEN</b>
Pesaje	Estimación de un diámetro o de una área proyectada
Mensura parcialmente tridimensional	Mensura estrictamente bidimensional
Estimación en fracciones granulométricas	Estimación individual de cada partícula
Granulometría en peso relativo a las fracciones	Granulometría en numero o en mensura (diámetro) de partículas por clase
Numero de clases muy limitada	Numero de clases elevada.
Estimación en función del tiempo de operación y la frecuencia de vibración	Estimación en función del modo de presentación y de la velocidad de circulación de las partículas.
La cantidad de material requerido esta en función de la precisión del pesaje ( $10^2$ à $10^3$ g)	El numero de partículas requeridas esta en función de la dispersión y de la precisión. Típicamente $10^2$ à $10^3$ partículas !
Mantenión del tamiz	Sin mantenimiento
Limpieza y control del desgaste del tamiz	Sin mantenimiento / limpieza después de cada medida
Evaluación total y codificación de los resultados (decena de min.)	Evolución total y codificación de los resultados (de 1 a 5 min.)
Visualización de los resultados después de la codificación manual	Visualización de las mensuras en tiempo real.
Recuperación de la muestra en fracciones separadas	Recuperación de las muestras sin separación
Sin mensuras complementarias	Posibilidades de medir la forma, el color y la reflexión.
Analogía con el proceso de cribado.	Posibilidades de inserción en línea y dentro de un dispositivo automatizado.

Para poder relacionar exactamente el tamizado y los métodos video granulométricos , es necesario controlar la manera de presentación de las partículas, asegurándose en lo posible de mensurar el diámetro medio o inscrito y de encontrar un estimador no sesgado del peso relativo de cada fracción granulométrica. Este ultimo remarque solamente es aplicado sobre los productos que tengan una densidad homogénea!

#### **2.4.6 Curvas granulométricas en numero o en mensura**

Una curva granulométrica en numero, representa, por cada clase dimensional predeterminada, la cantidad de partículas contadas dentro la mencionada clase. Esta manera de representación, utilizada en algunos casos, es poca intuitiva dentro la industria minera. Para transformar de una granulometría en numero en una granulometría en mensura necesariamente se debe ponderar cada partícula por una mensura dimensional. La ponderación puede realizarse sumando a cada clase dimensional los diámetros medidos, sin embargo los algoritmos intentan de estimar el volumen de cada partícula a partir de las informaciones obtenidas por el área (Figure 11).



**Figura 11** Curvas granulométricas de una arena, elaboradas por el análisis de imágenes, la ponderación es realizada en numero, en area proyectada o en volumen aparente.

La forma de calculo incorporada dentro la mayoría de los instrumentos comerciales no es precisa. Ciertos fabricantes proponen mejorar la correlación entre tamices y videogranulómetros por un procedimiento de calibración basándose en el análisis óptico de un producto cuya granulometría es conocida por el tamizado. Hay que ser muy prudentes en frente de este tipo de técnicas y no olvidar que es posible de convertir de cualquier curva a otra. Esta transformación es posible si se conoce con absoluta certeza las propiedades morfológicas y densitométricas del material.

Por ultimo, un punto que es fuente de error y frecuentemente es ignorado, esta en relación a la probabilidad de inclusión de una partícula dentro la imagen. Más grande es una partícula, más ella se expondrá a interceptar los bordes de la imagen y por consecuencia ser eliminada de la mensura. Existe la posibilidad de realizar una corrección matemática de esta probabilidad, sin embargo en la práctica no esta implementada. Otra solución, consiste en condicionar mecánicamente la caída del producto hacia el centro del objetivo y realizar una imagen con una cámara lineal (imagen sin limite inferior ni superior).