

Caracterización de Poros en Carbones Tratados Térmicamente Empleando Procesamiento Digital de Imágenes y Microscopía Asistida por Computador

JOHN WILLIAM BRANCH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Facultad de Minas.

Escuela de Sistemas.

jwbranch@unalmed.edu.co

HUGO DE JESÚS MESA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA DE ENVIGADO.

Centro de Investigación y Desarrollo (CIDFI)

cidfi@iue.edu.co

Recibido para revisión 30 de Mar de 2004, aceptado May de 2004, versión final recibida 29 de Jun de 2004

Resumen: Este artículo presenta los procesos y la metodología desarrollada para la aplicación de un sistema de inspección visual automática, en la determinación de valores de macroporosidad en carbones tratados térmicamente a partir de imágenes de secciones pulidas, como una alternativa a los métodos tradicionales para la determinación de la porosidad.

Palabras Clave: Inspección Visual Automática, Procesamiento Digital de Imágenes, Microscopía Asistida por Computador, Caracterización de Materiales

Abstract: This paper develops a methodology that uses the application of a system of automatic visual inspection, for the determination of values of macroporosity in coals treated thermally from polished sections images. This proposal is an alternative to the traditional methods for the determination of the porosity.

Keywords: Automatic Visual Inspection, Digital Image Processing, Computer, Computer Aided Microscopy, Materials Characterization

1 INTRODUCCIÓN

Los carbones contienen espacios vacíos o poros que resultan de los procesos de manufactura y otros inherentes a la estructura de la materia original. Estos poros, difieren en tamaño y forma. La distribución de estos poros y sus dimensiones evidencian su comportamiento en diferentes procesos.

Los métodos de elaboración de isotermas de adsorción y de porosimetría de mercurio, han alcanzado gran popularidad en la determinación de la distribución de poros, estos involucran el uso de equipos especializados, reactivos costosos, su aplicación por personal expertos y en general, requieren bastante tiempo para su aplicación.

Este trabajo desarrolló un procedimiento que cap-

tura información de la sección y realiza el procesamiento de la misma, determina los parámetros morfológicos de los poros que posteriormente serán utilizados para la determinación de la porosidad. Se encontró que el parámetro de mayor utilidad en el proceso es el diámetro equivalente ($D.E. \leq 2 \mu$), además el proceso utiliza el parámetro redondez ≤ 1.21 para realizar una corrección a los valores obtenidos con el fin de omitir aquellos poros que por su forma no influyen en la determinación de la porosidad por otros medios.

La integración de técnicas de procesamiento digital de imágenes y microscopía asistida por computador que contemplan elementos para la captura, tratamiento y extracción de información a partir de imágenes de secciones pulidas, desarrolla nuevos marcos conceptuales que ayudan no sólo a comprender los casos observados

empíricamente, sino también a plantear programas de cambio adecuados a cada situación y a diseñar planes de acción para implantarlos.

2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1 Descripción de Parámetros Geométricos Entregados por el Analizador de Imágenes

Las diferentes plataformas de procesamiento digital de imágenes, pueden extraer una gran cantidad de parámetros geométricos de los elementos analizados, estos parámetros pueden ser de utilidad en mayor o menor grado, de acuerdo con el tipo de estudio realizado y de los propósitos del mismo [véase Restrepo (2000), Bedoya, Branch y Restrepo (2002)].

Para el estudio de porosidad en carbones, se utilizan los siguientes parámetros:

- Area: Número total de pixeles que caen dentro del contorno del elemento analizado, multiplicado por el área de un pixel.
- Perimeter (Perímetro): La longitud total de los límites de un cuerpo. Calculado a partir de sus proyecciones horizontales y verticales.
- Roundness (Redondez): Factor de forma, que da el valor mínimo de 1 al círculo. Calculado de la relación del perímetro al cuadrado y el área:

$$\text{Area} = \text{Número de Pixeles} \times \text{Área de 1 Pixel}$$

El factor de ajuste de 1.064 corrige el perímetro para los efectos de las esquinas producidas por la digitalización de la imagen.

- EquivDiam Equivalent Circle Diameter (diámetro del círculo equivalente): El diámetro de un círculo que tiene la misma área del cuerpo medido.
- AspectRatio (Razón de aspecto): Relación de largo dividido por el feret más corto.
- ConvexArea: El área del polígono que circunscribe el cuerpo, formado por las tangentes de sus bordes.
- ConvxPerim: La longitud del polígono que circunscribe el cuerpo, formado por las tangentes de sus bordes. Esto es similar a la longitud de un hilo que rodea al cuerpo.
- CurveLength: La longitud de la cara más larga de un rectángulo que tiene la misma área y perímetro del cuerpo medido:

$$\text{Roundness} = \frac{\text{Perímetro}^2}{4\pi \times \text{Área} \times 1.064}$$

- CurveWidth: La longitud de la cara más corta de un rectángulo que tiene la misma área y perímetro del cuerpo medido:

$$\text{Curve Length} =$$

$$\frac{\text{Perímetro} - \sqrt{\text{Perímetro}^2 - 16 \times \text{Área}}}{4}$$

- DerivOrient: La orientación del cuerpo derivado del largo de sus ferets.
- Feret0: La longitud del feret a 0 grados. Esto corresponde al ancho horizontal del cuerpo.
- Feret90: La longitud del feret a 90 grados. Esto corresponde al ancho vertical del cuerpo.
- FullRatio The Fullness Ratio: Es un factor de forma, igual a la raíz cuadrada de la relación de área al área circunscrita:

$$\text{Fullness Ratio} = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\text{Convex Área}}}$$

- HorizProj: La proyección horizontal del cuerpo. El número de cuerdas horizontales contenidas en el cuerpo.
- Length: La longitud del feret más largo.
- Orientation: El ángulo del feret más largo.
- OrthoFeret Orthogonal feret: La longitud del feret que está en ángulo recto con el feret más largo.
- OrthOrient Orthogonal Orientation: El ángulo del feret que está en ángulo recto con el feret más largo.

2.2 Operaciones Realizadas Sobre la Imagen

Para la obtención de los anteriores parámetros geométricos, se deben efectuar una serie de operaciones sobre la imagen binaria, las cuales permiten mejorar la calidad de esta y corregir algunos problemas presentes en la imagen [véase Branch y Olague (2001), Bedoya et al. (2002)].

Las principales operaciones realizadas sobre la imagen binaria son:

- Outline: Identifica pixeles en los límites de cada objeto.
- Holes: Identifica huecos en la imagen. Hueco es, un grupo de pixeles no detectados y rodeados completamente por un grupo de pixeles detectados.
- Fillholes: Llena los huecos en la imagen. (Esta operación debe ser manipulada con mucho cuidado, ya que los huecos detectados pueden ser realmente poros más pequeños que se encuentran dentro de poros de tamaño mayor)

- Edgefeat: Remueve cuerpos en contacto con el límite del cuadro de imagen.
- Spots: Borra píxeles sueltos o aislados.
- Binmode: Este es un filtro en modo binario de vecindad 3x3. Si 5 o más píxeles son 1, el pixel central será colocado a 1 suavizando la imagen binaria.
- Image Selection
- Input: Es la imagen de entrada.
- Output: Es la salida de la imagen corregida.

3 PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE POROS EMPLEANDO MICROSCOPIA ASISTIDA POR COMPUTADOR

Los principios esenciales del análisis cuantitativo de imágenes y la microscopía óptica asistida por computador, son mostrados en la Figura 1 (Worjanar, 1999). La sección pulida de la muestra de carbón es montada en el microscopio y observada con luz reflejada. Cuando se ilumina con luz blanca, los poros se ven negros o gris oscuro y la matriz del carbón se ve en matices brillantes. La cámara de captura de video convierte la imagen del campo óptico del microscopio en una señal electrónica que es digitalizada y enviada al computador para efectuar el análisis.

La primera etapa es la digitalización de la señal de la cámara. Esto implica la división de la imagen en una matriz de píxeles y la asignación de un número correspondiente al nivel de gris promedio para cada uno de los píxeles que conforman la imagen. En la mayoría de los sistemas de análisis de imagen, el nivel de gris es expresado como una potencia de 2, normalmente los píxeles con un bajo nivel de gris, corresponden a los poros mientras que aquellos píxeles con alto nivel de gris se asocian a la matriz del carbón. Adicionalmente, se almacena la ubicación del centro de cada píxel, mediante un sistema de coordenadas cartesianas (x, y), el cual se debe haber calibrado previamente con unidades convenientes, generalmente en micrómetros m.

La segunda etapa es la conversión de la imagen en escala de grises a una imagen binaria, esto se logra por un proceso llamado segmentación. En este proceso, los objetos de interés en la imagen son identificados por un rango dado de niveles de gris; la imagen resultante de este proceso, posee sólo píxeles blancos o negros, de acuerdo con que cada píxel se encuentre o no en el rango de niveles de grises elegidos previamente.

Con este proceso, los poros son identificados únicamente por sus coordenadas del contorno; estas coordenadas son los datos de entrada para el procesamiento por computador, para obtener la información acerca de

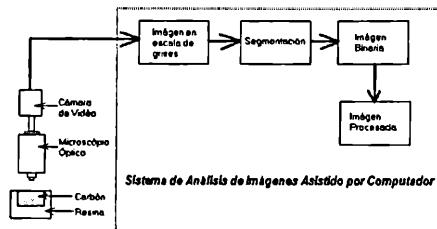


Figura 1: Diagrama esquemático del análisis de imágenes de microscopía óptica cuantitativa asistido por computador

la geometría del poro y sus características dentro de la sección.

Las coordenadas de los píxeles del contorno del poro en la imagen binaria, son consideradas como las coordenadas de los vértices de un polígono irregular el cual se ajusta lo más posible a dicho contorno.

La última etapa del proceso, corresponde a la medición de la geometría del polígono, los parámetros que comúnmente son analizados para la geometría del poro son: Área, Perímetro, Diámetro de Feret Máximo y Mínimo, Diámetro Equivalente, Redondez, Forma, Orientación, entre otras. En la Figura 2, se esquematizan los principales elementos obtenidos por análisis de imagen en el estudio de macroporos de carbón (Russ, 2000).

4 APlicACIÓN DEL METODO

Se implementó un procedimiento sistemático (Macro Program) que permite establecer los patrones de poros predominantes en los pulidos de muestras de carbones, a partir de la determinación de los parámetros área, redondez y diámetro equivalente.

En la Figura 3 se ilustran los pasos a seguir empleando el procedimiento propuesto.

5 RESULTADOS OBTENIDOS

Aplicando el procedimiento descrito, se realizó el estudio de porosidad para cinco series de carbones tratados térmicamente, a los cuales se les efectuó además, el estudio de porosidad por el método de número de melazas, para poder contrastar los resultados por estos dos métodos. En el estudio se determinaron los valores para los parámetros: Número de poros, Área, Perímetro, Redondez y diámetro equivalente, pero se centró el análisis para el número de poros ya que es el que presenta una mayor correlación con el análisis por otros métodos. En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos (Fontoura, 2001).

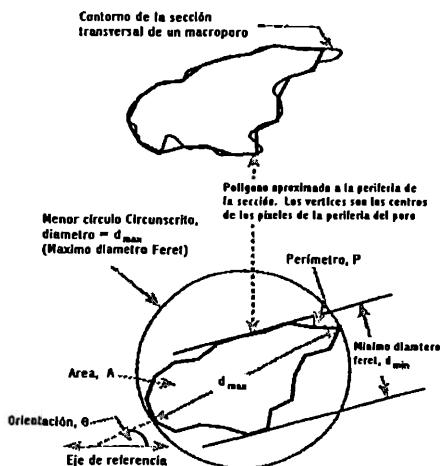


Figura 2: Algunos parámetros geométricos de la sección transversal de macroporos que pueden ser medidos por microscopía asistida por computador (Worjanar, 1999).

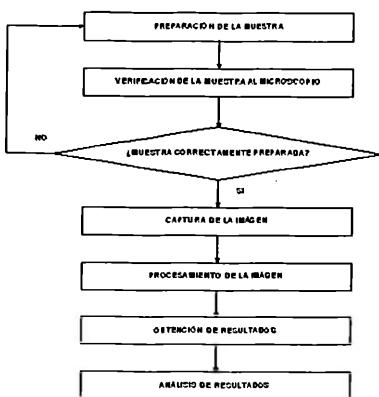


Figura 3: Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.

Tabla 1: Correlación entre Actividad relativa de melaza y número de poros (Total y Diámetro menor a 2 Micras) (Fontoura, 01).

| SERIE | MUESTRA | N. MELAZA | POROS DETECTADOS | | POROS CON D. Eq < 2 μ | |
|-------|---------|-----------|------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | | | # POROS | C CORREL. | # POROS | C CORREL. |
| A1 | A1-2 | 41.4 | 325 | 0.813 | 325 | 0.896 |
| | A1-3 | 32.8 | 301 | | 298 | |
| | A1-4 | 26.0 | 295 | | 280 | |
| | A1-5 | 24.8 | 240 | | 232 | |
| | A2-2 | 43.5 | 125 | | 124 | |
| A2 | A2-3 | 42.0 | 116 | 0.946 | 111 | 0.980 |
| | A2-4 | 39.0 | 113 | | 100 | |
| | A2-5 | 37.5 | 103 | | 84 | |
| A4 | A4-2 | 40.5 | 84 | 0.688 | 81 | |
| | A4-3 | 32.5 | 86 | | 77 | 0.796 |
| | A4-4 | 29.3 | 50 | | 48 | |
| V2 | V2-2 | 42.9 | 365 | 0.965 | 363 | |
| | V2-3 | 38.7 | 363 | | 240 | 0.973 |
| | V2-5 | 22.9 | 143 | | 125 | |
| V4 | V4-2 | 40.2 | 938 | 0.976 | 936 | |
| | V4-3 | 29.9 | 661 | | 655 | |
| | V4-4 | 22.8 | 589 | | 502 | 0.998 |

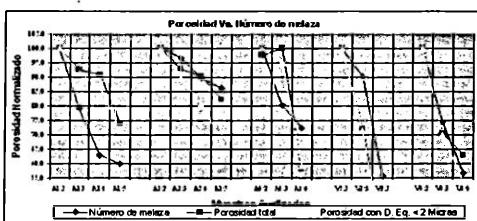


Figura 4: Resultados obtenidos sin corrección por efecto de redondez.

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para ser consistentes con el manejo de unidades tenidas en los dos procesos, se debió realizar una normalización de los datos, proceso que se realizó considerándose al valor máximo de cada serie y recalculando los datos en porcentaje por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{\text{Normalizado}} = (V_1 | V_{\text{Máximo}} \times 100)$$

En la Figura 4, se muestran los gráficos comparativos entre número de poros totales, número de poros con diámetro equivalente inferior a 2 micras y número de melaza [véase Restrepo (2000), Parody (2001)]. Del análisis de esta se puede observar que la correlación mejora al solo considerar los de diámetro inferior a 2 micras, lo cual indica el límite de tamaño de poro hasta el cual se presenta adsorción de las moléculas de melaza.

Al considerarse los poros con diámetro equivalente inferior a 2 micras, se logró mejorar la correlación entre los dos métodos, pero se presentan aun unas discrepancias, las cuales son debidas a la redondez de los poros ya que la forma del poro limita la adsorción de las moléculas

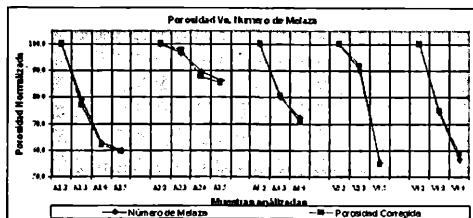


Figura 5: Resultados obtenidos corregidos por efecto de redondez.

de mezcla y por lo tanto, los métodos tradicionales solo reportan los poros que permitan el paso de las moléculas usadas en dicho análisis. Se encontró que el valor óptimo de correlación de los métodos, se lograba al considerar aquellos poros con redondez menor o igual a 1.21, con lo cual se desprecian aquellos poros por los cuales no pueden pasar dichas moléculas. En la Figura 5, compara los resultados de los dos métodos, bajo las condiciones anteriores [véase Restrepo (2000), Parody (2001)].

7 CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican que el procedimiento propuesto es competitivo con respecto a los convencionales y puede ser considerado como un método útil en el estudio de porosidad en carbones, rapidez del proceso, los bajos costos de implementación y confiabilidad en la teoría de la medida, debido al acercamiento que permite a una realidad física del objeto en estudio.

Los valores de tamaño de poro y valor límite de la redondez, fueron sensible a la identificación de la forma de los poros identificados, dominante en las diferentes texturas del material muestreado.

El sistema CAM (microscopía asistida por computador) comparado con el método manual, permite llevar a cabo las mediciones de una forma rápida y con un

grado de precisión superior al obtenido por métodos tradicionales, ya que permite la inclusión de parámetros tales como la forma del poro, los cuales no pueden ser analizados por otros métodos.

El procedimiento propuesto reúne las características de un enfoque sistemico, ya que se integran una serie de herramientas que permiten proponer una nueva manera de clasificar la porosidad en carbonos tratados térmicamente a partir de la correlación de tres parámetros básicos como son: el diámetro equivalente, la distribución de niveles de gris y la redondez de los poros.

REFERENCIAS

- Bedoya, J., Branch, J. y Restrepo, A. (2002), Image analysis to characterize tsp in medellin, in '95th Annual Conference and Exhibition The Air & Waste Management Association's 2002 Annual Conference & Exhibition Proceedings on June 23-27', Baltimore, Maryland, USA. ISBN: 0-923204-45-8.

Branch, J. y Oлагue, G. (2001), 'La visión por computador: Una aproximación al estado del arte', *Revista Dyna* (133). ISSN 0012-7353.

Fontoura, L. E. a. (2001), *Shape Analysis and Classification. Theory and Practice*, CRC Press, USA.

Parody, S. (2001), Descripción morfológica de agregados pétreos gruesos empleando procesamiento digital de imágenes, Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional de Colombia.

Restrepo, A. (2000), Evaluación de la morfología de microestructuras de aleaciones metálicas empleando análisis digital de imágenes y geometría fractal, Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica.

Russ, J. E. a. (2000), *Practical Stereology*, second edn, Kluwer Academic Plenum Publishers.

Worjan, L. (1999), *Image Analysis. Applications in Materials Engineering*, CRC Press, Boca Raton.

