

# APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTERIZADA AL ESTUDIO DE MATERIALES Y PIEZAS FABRICADAS

**P. M. Bravo<sup>1</sup>, J. M. Alegre<sup>1</sup>, I. I. Cuesta<sup>1</sup>, M. Preciado<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior,  
Universidad de Burgos C/Villadiego s/n 09001 Burgos, Spain  
Email: pmbravo@ubu.es

## RESUMEN

La tomografía axial computerizada es una técnica que permite el análisis no destructivo de piezas y materiales en todo su volumen.

En general, es una técnica que genera una imagen de una sección delgada transversal de una pieza. El haz de energía habitualmente de Rayos X y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se va a obtener la imagen. La señal del detector se obtiene mientras la muestra gira en el eje perpendicular al plano considerado. Mediante un procedimiento de cómputo se calcula y representa la atenuación relativa de la energía del haz que pasa a través de las estructuras de la sección delgada de la pieza.

La imagen de TC representa punto a punto los coeficientes de atenuación lineal en la sección, que dependen de la densidad del material, del número atómico efectivo del material y de la energía del haz de rayos X.

Posteriormente las imágenes de TC pueden ser procesadas mediante programas de análisis de imagen plana o tridimensional. Se puede utilizar un conjunto de imágenes de TC para caracterizar el volumen de la pieza, geometría, porosidad, fases materiales, grietas.

En el presente trabajo se presenta la aplicación de esta técnica a diferentes tipos de estudios:

- Determinación de porcentajes de fases minerales en materiales pétreos.
- Obtención de mapas de porosidad en piezas de inyección de aleaciones de magnesio o aluminio.
- Estudio de grietas en probetas de hormigón ensayadas a fatiga.
- Extracción de superficies para un análisis geométrico detallado o su mallado mediante programas de elementos finitos.
- Medida de geometrías sobre el volumen extraído.
- Comparación entre geometría teórica y real de piezas fabricadas.
- Separación de piezas, materiales o partes de materiales de diferente densidad.

En estos trabajos se ha utilizado el tomógrafo instalado en la Universidad de Burgos de la marca YXLON y el programa de análisis de imagen tridimensional VGStudio MAX.

La aplicación de esta técnica es de gran interés para diferentes tipos de estudios no solo en el campo de aplicación industrial sino también en investigación y permite obtener información mas detallada, de forma menos costosa o a veces imposible de obtener por otros medios.

**PALABRAS CALVE:** Tomografía axial computerizada, análisis de imagen, medida de porosidad, obtención de superficies.

## ABSTRACT

Computed tomography CT is a technique that allows non-destructive analysis of parts and materials throughout its volume.

This technique generates an image of a transverse thin section of a piece. The X-ray energy beam and detector are in the same plane as the surface of the obtained picture. The detector signal is collected while the sample rotates in the axis perpendicular to the plane considered. The relative attenuation of the beam energy passing through the structures of the thin section of the piece is calculated and represented using a computational procedure.

The CT image represents point by point the linear attenuation coefficients in the section, which depend on the density of the material, the effective atomic number of material and the X-ray beam energy.

Then the CT images can be processed using an image analysis software bi- or three-dimensional. A set of CT images can be used to characterize the sample volume, geometry, porosity, material phases, and cracks.

This paper presents the application of this technique to different types of studies:

- Determination of percentages and distribution of mineral phases in stone materials.
- Obtaining maps of porosity injection parts made of magnesium or aluminium alloys.

- Study of cracks in concrete specimens tested in fatigue.
- Extraction of surfaces for a detailed geometric analysis or meshing with finite element programs.
- Measure the volume extracted geometries.
- Comparison between theoretical and real geometry of produced parts.
- Separation of parts, materials or parts of materials with different densities.

The CT installed at the University of Burgos (YXLON brand) and the three-dimensional image analysis software VGstudio MAX have been used in this work.

The application of this technique is of great interest for different types of studies, not only in the field of industrial application but also in research. It allows obtaining more detailed information, less expensive or sometimes impossible to obtain by other means.

**KEY WORDS:** Computed tomography, image analysis, porosity measurement, surface extraction.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tomografía industrial computerizada puede ser una herramienta de gran ayuda para el investigador o el ingeniero a la hora de caracterizar o simular el comportamiento mecánico de materiales y piezas.

Las propiedades mecánicas de los materiales y de los diseños fabricados con ellos dependen directamente de su estructura, de su composición y de los defectos inducidos por el proceso de fabricación.

Si se quieren introducir modelos micromecánicos basados en la distribución de fases cristalinas o minerales, en la distribución de porosidad, o en la distribución del refuerzo en un material compuesto es necesario obtener un mapa de distribución que permita obtener los datos suficientes para aplicar los correspondientes modelos.[1],[5]

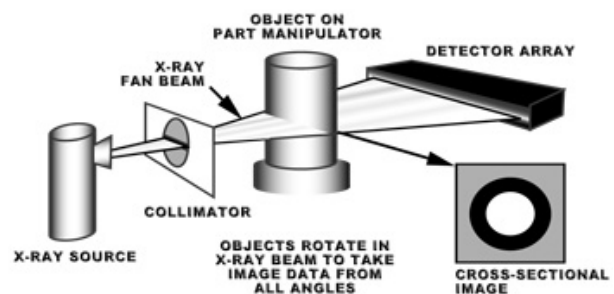
Habitualmente se requiere la utilización de técnicas destructivas para la aplicación de cortes que permitan la posterior aplicación de un modelo estadístico.

Desde el punto de vista de inspección y control de calidad esta técnica permite obtener un mapa de porosidad de toda la pieza analizada pudiendo observarse su distribución espacial dentro de la pieza y la medida del tamaño de los diferentes poros observados. Desde el punto de vista dimensional se puede, previa calibración, realizar medidas directamente sobre la imagen de la pieza tomografiada.[7]

Si lo que se pretende es realizar una simulación, la obtención de la geometría de la pieza mediante la extracción de superficies puede ser de gran ayuda a la hora de mallar un modelo en 3D. También puede ser viable la introducción de la distribución de porosidad de la pieza tomografiada con la finalidad de observar su influencia. [2]

## 2. TOMOGRAFIA INDUSTRIAL COMPUTERIZADA DE RAYOS X

La tomografía computerizada (TC) es una técnica que genera imágenes de secciones transversales de una pieza. Esta técnica difiere de la radiografía en que el haz de energía y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se va a obtener la imagen.



*Figura 1. Esquema de la tomografía computerizada.*

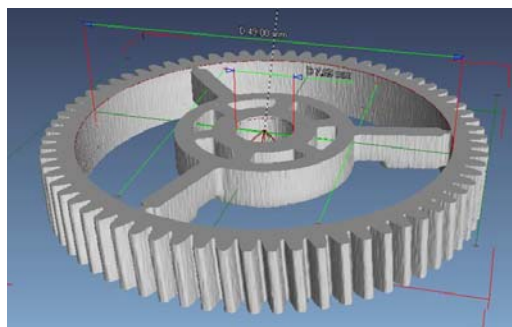
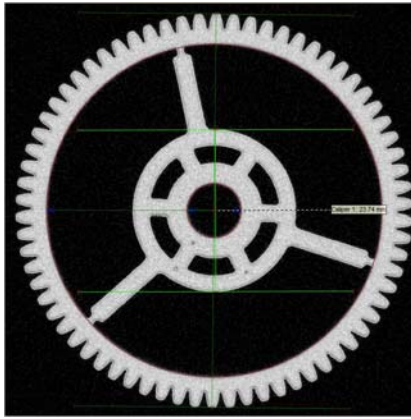
Esta técnica genera las imágenes a partir de la señal de atenuación del haz obtenida para diferentes ángulos de proyección de la sección considerada. La atenuación que sufre el haz está directamente relacionada con la densidad, el espesor atravesado y la composición del material así como la energía del haz de rayos X.

La TC utiliza esta información obtenida desde diferentes ángulos para determinar la configuración de la sección transversal con ayuda de un algoritmo de reconstrucción. De esta manera se determina cuantitativamente la distribución punto a punto de los coeficientes de atenuación. La imagen de la sección se puede visualizar asignando un nivel en una escala de grises a cada valor de atenuación.

Posteriormente las imágenes pueden ser procesadas mediante programas de análisis de imagen plana o tridimensional. Se puede utilizar un conjunto de imágenes de TC para caracterizar el volumen total de la pieza.

Con los datos transformados se pueden representar planos a través de la pieza, superficies tridimensionales o estructuras dentro de la misma [7].

Partiendo de la misma calidad de imagen de TC será el potencial del sistema de análisis de imagen el que nos permita obtener mayor o menor rendimiento. También la habilidad del analista permitirá alcanzar mejores resultados.



*Figura 2. Sección transversal de una pieza tomografiada y su reconstrucción 3D.*

Habitualmente las limitaciones de los equipos de TC vienen derivadas de los siguientes puntos:

1. Tamaño del manipulador y por lo tanto de la pieza que se puede introducir.
2. Capacidad de penetración del haz de RX. Depende del material de la pieza y de la potencia del tubo de RX del equipo utilizado.
3. Resolución del sistema. Depende del sistema de detección del equipo, del tamaño del foco del tubo de RX, del número de proyecciones y de los algoritmos de reconstrucción de la imagen.

### 3. LAS IMÁGENES

El proceso de reconstrucción da lugar a una matriz bidimensional de números que corresponden a la sección transversal del objeto. Cada número es un punto (píxel) de la imagen.

El valor de cada píxel es proporcional al coeficiente de atenuación lineal medio en el correspondiente volumen (voxel). El coeficiente de atenuación lineal es

aproximadamente proporcional a la densidad del material y es función del número atómico efectivo del material y de la distribución del espectro del haz de rayos X.

Para permitir la interpretación de la información contenida en la matriz de datos, esta información es representada como una imagen.

Las imágenes de TC son mucho más fáciles de interpretar que las imágenes radiográficas convencionales porque los detalles de la imagen no se superponen. Se puede identificar la posición concreta de cada detalle.

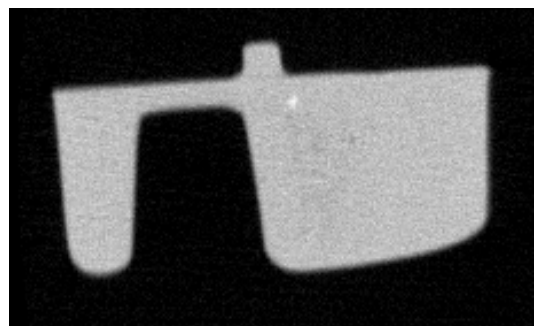
Además, las diferencias de densidad dentro del objeto son fácilmente identificables y cuantificables y pueden ser relacionadas con características deseables o no deseables del objeto o material analizado.

Los parámetros de funcionamiento como es el espesor de la sección (distancia entre secciones) o los tiempos de recogida de datos pueden ser ajustados para obtener la combinación más adecuada entre tiempo de inspección y calidad de la imagen.

La capacidad de la tomografía computerizada para mostrar determinadas características variara con el equipo utilizado y los parámetros utilizados.

Suponiendo unas condiciones adecuadas se pueden hacer algunas consideraciones sobre la idoneidad del método para la observación de varios tipos de defectos:

- Huecos e inclusiones. Observar las figuras 2 y 3. Son defectos fácilmente detectables y de alto contraste. Defectos de menor tamaño que la resolución del sistema se pueden observar pero con menos contraste respecto del material base.
- Porosidad y microrechupes como los de la Figura 4. Reducen la densidad del material y son visibles si están distribuidos sobre un área con muchos píxels. El porcentaje de porosidad puede cuantificarse con procedimientos controlados.



*Figura 3. Inclusión en una sección de una pieza tomografiada.*



Figura 4. Porosidad visible en una sección de una pieza tomografiada

- Densidad relativa entre materiales con el mismo número atómico efectivo.
- Grietas abiertas o desplazadas como las de la Figura 5. Se pueden detectar. Como en los poros, la separación de la grieta puede estar por debajo de la resolución del sistema. El contraste disminuirá al reducir la apertura de la grieta.

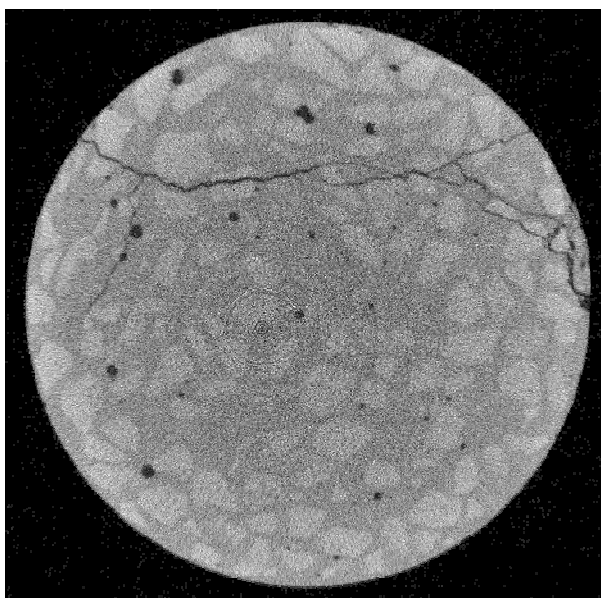


Figura 5. Grieta en una probeta de hormigón ensayada. Se puede observar la distribución del árido grueso y el camino que ha seguido la grieta.

- Despegues y delaminaciones en materiales compuestos son detectables si están suficientemente separadas. La orientación similar de las estructuras del material puede dificultar aun más su detección. [4]
- Material residual en las fundiciones se ve fácilmente en el material en masa. Las capas delgadas superficiales pueden ser difíciles de detectar tal como se observa en la figura 6.
- Los defectos de mecanizado como el sobre-taladrado o los defectos de ensamblaje se pueden ver fácilmente.

## 4. ANALISIS DE IMAGEN 2D Y 3D.

### 4.1. Reconstrucción 3D

Para transformar el conjunto de imágenes obtenidas en el equipo de TC en un volumen 3D se ha de utilizar un programa de análisis de imagen tridimensional. Las imágenes presentadas en el presente trabajo han sido obtenidas mediante el programa VGStudioMax 2.0.

Cuando se importan las imágenes se indica el tamaño del pixel y la distancia entre cortes de manera que el volumen reconstruido tenga las dimensiones correctas. Se ha de asignar además el tamaño de la escala de grises que se quiere utilizar para representar los datos de las secciones.

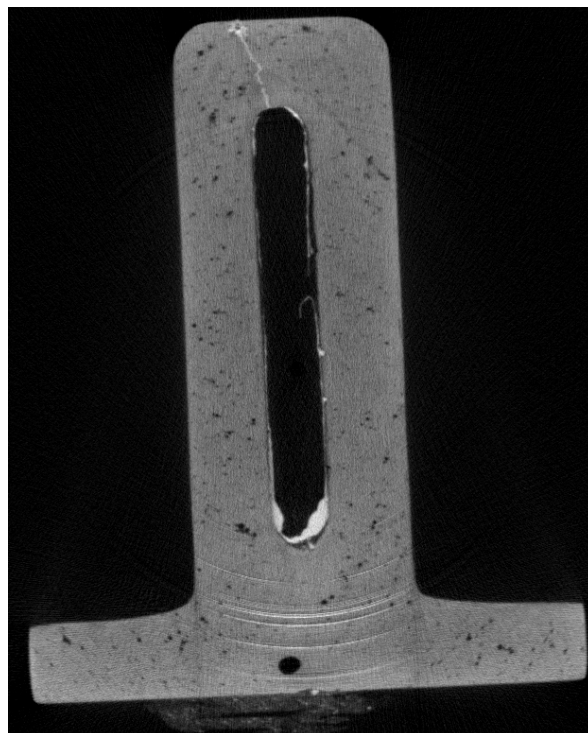


Figura 6. Sección de una pieza de cerámica con restos de fundición de aluminio. Se observa porosidad y una grieta rellena de fundición de aluminio.

La calibración de las imágenes en cuanto a los rangos de la escala de grises que corresponden al material o materiales y al fondo de las imágenes permite determinar la superficie de la pieza como una iso-superficie en la escala de grises. Este paso es fundamental ya que todos los análisis posteriores se basan en esta calibración.

### 4.2. Medidas geométricas en 2D y 3D.

Apoyándonos en esta superficie y utilizando las herramientas disponibles en el programa de análisis se pueden definir elementos geométricos auxiliares (puntos, planos, rectas, cilindros, conos) que nos permitan definir ejes de referencia y realizar medidas

geométricas (ángulos, distancias, radios, espesores. ver figura 7).

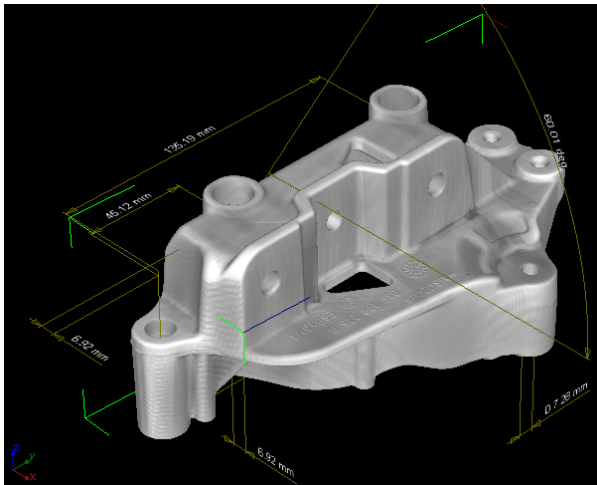


Figura 7. Reconstrucción 3D de una pieza sobre la que se han realizado diferentes medidas.

#### 4.3. Análisis de porosidad.

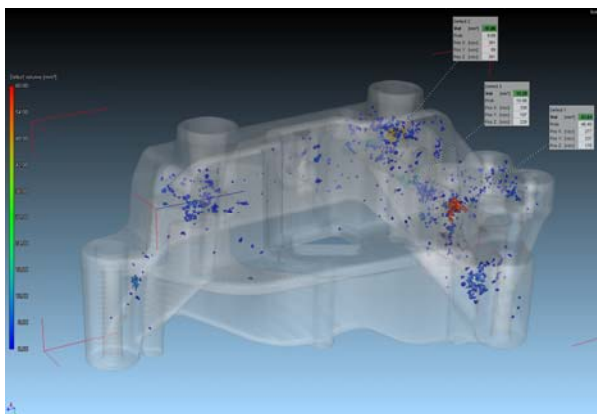


Figura 8. Vista 3D de la distribución de porosidad en una pieza inyectada.

La determinación de la porosidad se basa en la calibración inicial realizada. Esta calibración permite determinar aquellas zonas que no están dentro del rango de densidades (niveles de gris) que corresponden al material y que por lo tanto pueden considerarse como poros. Estas zonas tienen que estar dentro del volumen delimitado por la superficie de la pieza que es la región de interés considerada. Si realizamos esta selección a partir del histograma podremos obtener el volumen total de porosidad. En la figura 8 se puede observar un análisis de porosidad de este tipo sobre una pieza de magnesio inyectada.

El programa utilizado en este trabajo dispone de una subrutina específica que determina la conectividad de los diferentes puntos considerados como porosidad y delimita la extensión de cada poro, su volumen y su posición.

Este mismo resultado se podría obtener manualmente utilizando herramientas disponibles que permiten

seleccionar áreas crecientes a partir de un punto en función del rango de grises considerado y realizando este trabajo para cada uno de los poros. Generando una región de interés para cada poro. A partir de ahí obtener todos los datos necesarios. Evidentemente este trabajo es mucho más costoso.

#### 4.4. Extracción de superficies.

Desde el punto de vista del análisis estructural se pueden extraer superficies a partir de la calibración realizada para posteriormente mallar el volumen interior y realizar los análisis que se consideren necesarios mediante el programa de cálculo (MEF) correspondiente.

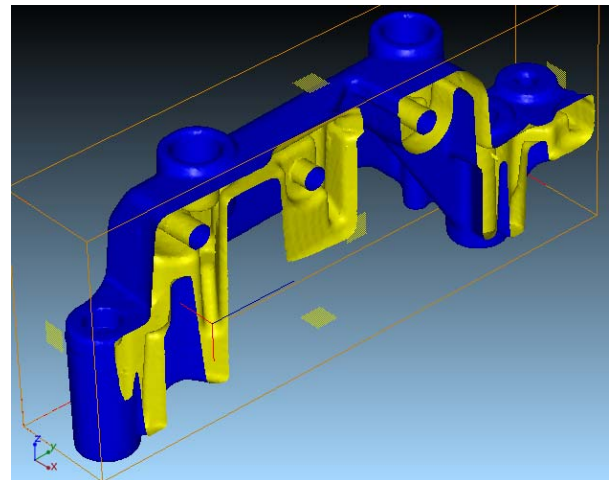


Figura 9. Superficie extraída de la pieza 3D calibrada. Sección según el plano YZ

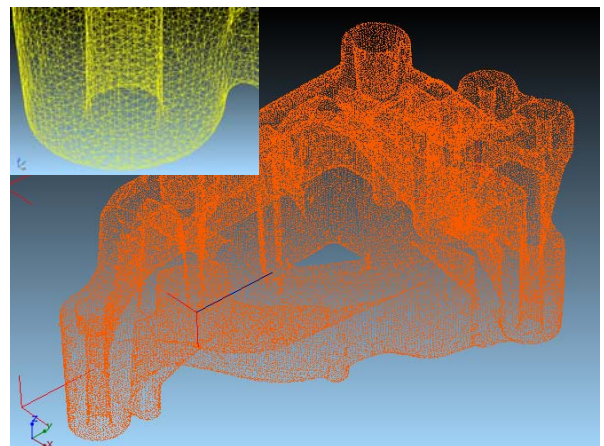


Figura 10. Nube de puntos de la superficie de la pieza. Detalle de la malla triangulada generada.

La presencia de porosidad se puede tener en cuenta de dos maneras distintas:

1. Generando las superficies de los poros dentro del volumen de la pieza. Este método es adecuado para poros de tamaño grande.
2. Seleccionando zonas de micro-porosidad con diferente nivel en la escala de grises y



asignando a estas zonas diferentes propiedades mecánicas.

#### 4.5. Separación de zonas con diferente absorción.

Este tipo de separación es factible cuando se pueden observar partes de una pieza o de un material con densidades suficientemente diferenciadas en la escala de grises.

En estos casos se pueden extraer los volúmenes y las geometrías de las diferentes partes (fases minerales, componentes de una pieza, etc.) como se puede ver en las imágenes de la figura 11.

En estos casos las operaciones (sustracción, adición) realizadas con las diferentes regiones de interés permiten obtener modelos complejos que se pueden exportar a programas de cálculo o de diseño.

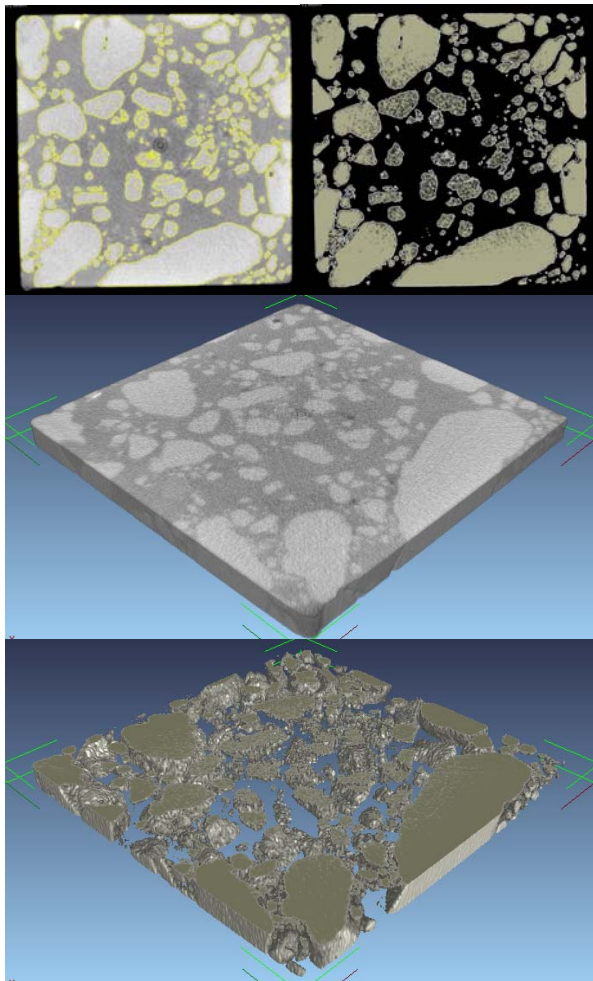


Figura 11. Separación de fases minerales de una piedra.

## 5. CONCLUSIONES.

La tomografía axial computerizada de rayos X es una técnica disponible con un grado desarrollo importante que permite su aplicación en es campo de los materiales y el estudio estructural de piezas.

Una parte importante de su aplicabilidad depende del uso de programas de análisis de imagen con herramientas adecuadas. Sin ellas no se podría obtener un rendimiento elevado.

Las principales limitaciones que tiene esta técnica dependen del equipo de tomografía en cuanto a sus prestaciones del tamaño máximo de la pieza, capacidad de penetración del haz de rayos X, resolución y calidad de la imagen. Dependiendo de la resolución necesaria se deberán utilizar los equipos de tomografía o microtomografía adecuados.

La posibilidad o no de aplicación de esta técnica a un determinado tipo de estudio dependerá directamente

## REFERENCES

- [1] H. A. Crostack, et al., "Analysis of the material behaviour of metal-matrix composites under tension by synchrotron radiation based microtomography and FE-calculations," Developments in X-Ray Tomography Iv, vol. 5535, pp. 493-504, 2004.
- [2] J. P. Weiler and J. T. Wood, "Modeling fracture properties in a die-cast AM60B magnesium alloy II- The effects of the size and location of porosity determined using finite element simulations," Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, vol. 527, pp. 32-37, 2009.
- [3] W. Y. Jang and S. Kyriakides, "On the crushing of aluminum open-cell foams: Part II analysis," International Journal of Solids and Structures, vol. 46, pp. 635-650, 2009.
- [4] C. C. Tsao and H. Hocheng, "Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills," International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, pp. 1282-1287, 2005.
- [5] Z. P. You and Q. L. Dai, "Dynamic complex modulus predictions of hot-mix asphalt using a micromechanical-based finite element model," Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 34, pp. 1519-1528, 2007.
- [6] ASM Handbook vol. 17. Non-destructive Evaluation and Quality Control. Metals Park, Ohio: ASM International, 1996
- [7] VGstudioMax v2.0 Manual.