

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 712 189**

51 Int. Cl.:

**G01N 3/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.09.2015 PCT/EP2015/072611**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.04.2016 WO16050871**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.09.2015 E 15778244 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.11.2018 EP 3201597**

54 Título: **Procedimiento de caracterización del mecanismo de fisura de un material a partir de su superficie de rotura**

30 Prioridad:

**03.10.2014 FR 1459525**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**09.05.2019**

73 Titular/es:

**SORBONNE UNIVERSITÉ (33.3%)**

**21 Rue de l'Ecole de Médecine**

**75006 Paris, FR;**

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE**

**SCIENTIFIQUE (33.3%) y**

**VERNEDE, STÉPHANE (33.3%)**

72 Inventor/es:

**VERNEDE, STÉPHANE y**

**PONSON, LAURENT**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 712 189 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Procedimiento de caracterización del mecanismo de fisura de un material a partir de su superficie de rotura

**Campo técnico**

5 El invento se sitúa en el campo de la caracterización de los materiales y, de una manera más particular, en el campo del análisis fractográfico de la rotura de una estructura a partir de al menos una de sus superficies de rotura. Se aplica especialmente para la determinación de una longitud característica en los procesos de daño puestos en juego en el transcurso de la fisura de la estructura, permitiendo la determinación de la tenacidad y de la energía de rotura del material que constituye la estructura, y la determinación de la causa de la fractura. De una manera más precisa, el invento se refiere a un procedimiento de caracterización de una superficie de rotura en una estructura sólida que  
10 haya sufrido una fisura, apoyándose el procedimiento en el análisis estadístico de los datos de un mapa topográfico que representa, por un conjunto de puntos situados en un plano medio de la superficie de rotura, la altura de la superficie de rotura con respecto a este plano medio.

**Estado de la técnica anterior**

15 El estudio de la morfología de una superficie de rotura en una pieza permite sacar numerosas informaciones de las propiedades del material de esta pieza, y del mecanismo de fisura que haya producido la rotura de la pieza. En particular, se ha demostrado que, para una gran variedad de materiales heterogéneos, las superficies de rotura presentan unas propiedades universales, a pesar de que los mecanismos de rotura a escala microscópica sean muy diferentes de un material a otro (Bouchaud, E.: Scaling properties of cracks, J. Phys. Condens. Matter 9, 4319-4344, 1997). Numerosos estudios experimentales han sugerido, en efecto, que las superficies de rotura son autoafines en una amplia gama de escalas de longitud, es decir que la evolución espacial de la función de correlación de las  
20 alturas a lo largo de una dirección dada de la superficie evoluciona con respecto a las abcisas según una ley de potencia. De esta manera, anotando la función de correlación de las alturas a lo largo de una dirección dada como sigue:

$$\Delta h(\Delta r) = \langle (h(r + \Delta r) - h(r))^2 \rangle_r^{1/2}$$

25 la evolución espacial de esta función puede escribirse:

$$\Delta h/l = (\Delta r/l)^H$$

en donde h es la altura con la abcisa r, Δh es la diferencia de alturas media entre dos puntos distantes de Δr, el exponente H es el exponente de rugosidad, también llamado exponente de Hurst, y l es la topotesía o longitud para la cual Δh(Δr =l) = l. Varios estudios han llegado a la conclusión de que el valor de H sería universal e isótropo,  
30 sensiblemente igual a 0.75.

En la solicitud de patente FR 2 892 811, se ha descrito que el exponente de Hurst es de hecho anisótropo. De una manera más particular, presenta, en la dirección de propagación de una fisura, un valor β sensiblemente igual a 0.60 y, en la dirección paralela al frente de la fisura, un valor ζ sensiblemente igual a 0.75. El valor del exponente de Hurst es así inferior en la dirección de propagación de la fisura. Esta anisotropía permite, por lo tanto, remontar en la  
35 dirección de propagación de la fisura.

La solicitud de patente US 2013/013223 describe un método de determinación de las propiedades mecánicas de una estructura a partir de un análisis de sus superficies de rotura. De una manera más precisa, el método está basado en una medida por estereografía de una densidad de las líneas de estriación. Estas líneas de estriación son unos motivos específicos del modo de rotura por fatiga, como consecuencia de la aplicación de un gran número de ciclos de carga y descarga. Cada línea de estriación corresponde a una variación relativamente importante de la altura de los puntos sobre una superficie de rotura. Los inventores proponen unas relaciones entre la densidad de las líneas de estriación y de las propiedades mecánicas del material caracterizando su resistencia a la fatiga. En particular, la densidad de las líneas de estriación está unida a la variación ΔK del factor de intensidad de los problemas impuestos en el transcurso de un ciclo de carga y descarga. Debido a la naturaleza de los datos extraídos sobre las superficies de rotura, este método se aplica únicamente en el marco de una rotura por fatiga. Además, la determinación de las líneas de estriación implica la fijación de un umbral para diferenciar, sobre las superficies de rotura, los saltos de mayor amplitud de los demás saltos. Este umbral debe ser fijado con unas precauciones particulares con el fin de obtener unos resultados fiables. Finalmente, el número de líneas de estriación sobre una superficie de rotura es relativamente pequeño, típicamente del orden de una veintena de líneas. El método de basa, por lo tanto, en una  
40 pequeña cantidad de informaciones, lo que impide un tratamiento de las superficies de rotura en diferentes zonas, y limita la precisión de los resultados.

Entre las técnicas conocidas del estado de la técnica, ninguna permite deducir del análisis morfológico de la superficie de rotura, la dimensión de la zona dañada. Esta zona dañada corresponde a la zona de punta de la fisura

en donde los mecanismos disipativos de las cavitaciones y de las micro-fisuras tienen lugar. La dimensión de la zona dañada está relacionada con la energía de rotura del material, y, por lo tanto, con su tenacidad. Por tenacidad, se entiende la capacidad de un material para resistirse a la propagación de una fisura.

5 Técnicas de imagen sofisticadas permiten observar el proceso de fisura durante su realización. Sin embargo, debido a la rapidez del proceso, y a las dimensiones en juego, en la práctica es muy difícil observar y cuantificar este proceso. Además, la previsión de la fractura, en cuanto a su localización y el instante en el que se produce, es raramente posible. Tal es especialmente el caso cuando se busca analizar el origen de la fractura de una pieza de una máquina industrial o de una aeronave, por ejemplo, después de estrellarse.

10 Como consecuencia, existe una necesidad de proporcionar un procedimiento que permita determinar, a partir del análisis de la superficie de rotura de una pieza, al menos un dato relativo a los mecanismos de rotura del material del que está hecha la pieza, incluso de datos relativos a su resistencia. Estas informaciones podrán ser utilizadas para determinar post mortem, en el transcurso de una fase de análisis, las condiciones y las causas de la rotura de una pieza. Hay que observar que la determinación de los datos relativos al modo de rotura de un material y su resistencia por medio del análisis de la superficie de rotura permite tener información de la rotura del material a nivel local, en el mismo lugar en el que la pieza se ha fracturado, y en diferentes emplazamientos de la superficie fracturada.

### Exposición del invento

Un primer objetivo del invento es así proporcionar un procedimiento de caracterización de una superficie de rotura de una estructura sólida, que permita determinar una dimensión característica de la zona dañada.

20 Otro objetivo del invento es el de proporcionar informaciones sobre el proceso de fisura que ha llevado a la fractura de la estructura. Estas informaciones conciernen, por ejemplo, a la forma y/o la longitud de las micro-fisuras, su densidad e incluso a la velocidad a la que se ha producido la fisura.

25 Incluso otro objetivo del invento es el de permitir la determinación post mortem de las informaciones relativas al proceso de fisura después de la conclusión completa de este proceso. En la práctica, este objetivo se alcanza analizando la superficie de rotura formada en la estructura.

30 El invento será mejor comprendido después de recordar algunas de las consideraciones siguientes. El proceso de fisura en una estructura se desarrolla por la formación de micro-cavidades y de micro-fisuras que, juntas, forman una fisura principal cuya superficie de rotura es el trazo. Este proceso de coalescencia de micro-fisuras/micro-cavidades, deja en la superficie de rotura unas marcas que se presentan bajo la forma de riscos, es decir zonas cuya pendiente local es particularmente elevada. Como describe C. Guerra, J. Scheibert, D. Bonamy y D. Dalmas: "Understanding fast microscale fracture from microcrack post mortem patterns", PNAS 109, 390-394 (2012), estos motivos se explican por el hecho de que las diferentes micro-fisuras/micro-cavidades se desarrollan en diferentes planos geométricos, y dan lugar, por lo tanto, a roturas de la pendiente o a variaciones rápidas de la altura cuando se encuentran durante la evolución del proceso de rotura. En un momento dado del proceso de fisura, todos los mecanismos de formación y de coalescencia de las micro-cavidades y de las micro-fisuras se producen en una zona delimitada, llamada zona de daños, situada alrededor del punto de fisura. En el invento se basa en el principio según el cual la dimensión de la zona de daños viene dada por la longitud de la correlación de la red de riscos presente en la superficie de rotura. Una de las aplicaciones del invento es, por lo tanto, la determinación de esta dimensión a partir del análisis de las superficies de rotura.

40 De una manera más precisa, el invento tiene como objetivo un procedimiento de caracterización, en una estructura sólida que ha sufrido una fisura, de una superficie de rotura de esta estructura resultante de la fisura. El procedimiento incluye, a partir de un mapa topográfico que representa, por un conjunto de puntos  $[x]$  situados en un plano medio de la superficie de rotura, una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto al plano medio:

45 • una etapa de determinación, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  representativa de la diferencia media de alturas  $(\langle \delta h(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x}) \rangle)_{|\delta \mathbf{x}| \leq \epsilon}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta \mathbf{x})$  de la superficie de rotura en o en varios puntos  $(x + \delta \mathbf{x})$  situados en el interior de un círculo formado en el plano medio, de radio  $\epsilon$ , y centrado en el punto  $x$  considerado. El conjunto de magnitudes  $\omega_\epsilon(x)$  define una función en el conjunto de puntos  $[x]$ .

50 El procedimiento de caracterización según el invento puede incluir una etapa de adquisición del mapa topográfico. Esta etapa de adquisición se efectúa entonces previamente a la etapa de determinación de las magnitudes  $\omega_\epsilon(x)$ , y el mapa topográfico obtenido se utiliza para esta etapa de determinación de las magnitudes  $\omega_\epsilon(x)$ .

55 En la presente solicitud, se entiende por "estructura" o bien una pieza única, o bien un conjunto solidario de varias piezas, por ejemplo, por soldadura o por pegadura. El material de cada pieza puede ser homogéneo o no. Por otra parte, por "superficie de rotura" de la estructura, se entiende la zona de esta superficie para la cual está establecido el mapa topográfico. En la práctica, esta zona puede cubrir toda la superficie de rotura de la estructura, o solamente una parte. El plano medio de la superficie de rotura es entonces el plano medio de esta zona.

El mapa topográfico de la superficie de rotura da, para un conjunto de puntos  $[x(x); y]$  que pertenece al plano medio, un valor de la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto al plano medio en cada uno de estos puntos. Los puntos  $x$  están definidos con respecto a una referencia del plano medio que incluye un eje X, y un eje Y, no colineal con el eje X. Según una primera variante de realización del invento, el mapa topográfico es bidimensional. Dicho de otra manera, los puntos  $x$  están repartidos en el plano medio según dos direcciones no paralelas, por ejemplo, los ejes X e Y. Los puntos  $x$  están repartidos de manera preferente sobre el plano medio según una matriz regular. En este caso, se anota  $dx$  como la resolución espacial del mapa topográfico según el eje X, y  $dy$ , la resolución espacial según el eje Y. Estas resoluciones pueden ser iguales. La altura  $h(x)$  está definida según un eje Z no colineal con los ejes X e y. este eje es, por ejemplo, ortogonal a los ejes X e Y. La resolución  $dh$  del mapa topográfico según el eje Z depende de la técnica de adquisición. De una manera general, las resoluciones  $dx$ ,  $dy$  y  $dh$  deben estar adaptadas al material de la pieza a analizar. De una manera más particular, estas resoluciones deben ser determinadas de tal manera que el mapa topográfico ilustre la rugosidad de la superficie de rotura a las escalas del daño. Sea  $L_c$  la extensión de la zona de daño, se elegirá  $dx \ll L_c$  y  $dy \ll L_c$ . A título de ilustración, para un material metálico, las resoluciones serán elegidas de una manera ventajosa próximas al centímetro, incluso a la milésima del tamaño medio de los granos. Para un material de madera, las resoluciones pueden ser sensiblemente inferiores al tamaño de las células, y para el hormigón a la de los granos de arena. De una manera general, será preferible elegir una resolución más pequeña que el tamaño de los objetos micro-estructurales más grandes que caracterizan al material (ejemplo: grano, célula, etc.). La técnica de adquisición del mapa topográfico depende del o de los materiales de la estructura a analizar. Se trata, por ejemplo, de una técnica de perfilometría mecánica, de perfilometría óptica o de microscopía.

Según una segunda variante de realización del invento, el mapa topográfico es mono-dimensional. Los puntos  $x$  están repartidos entonces en el plano medio sobre una recta que pertenece a este plano. Se considera por convención que se trata de la recta  $x$ . Los puntos  $x$  pueden estar sensiblemente repartidos por igual sobre la recta, es decir repartidos con la resolución espacial  $dx$ .

Los círculos de radio  $\epsilon$ , centrados en los puntos  $x$  definen una proximidad de estos puntos. Los puntos  $[x + \delta x]$  pueden ser elegidos no importa con qué proximidad. En particular, pueden ser elegidos sobre una curva cerrada que rodee al punto  $x$  considerado. La curva cerrada es, por ejemplo, una elipse, un círculo, o un polígono, especialmente un rectángulo o un cuadrado. Preferentemente, la curva cerrada es un polígono regular o es sensiblemente un círculo. Los puntos  $[x + \delta x]$  considerados están preferentemente y de manera sensible repartidos por igual sobre la curva cerrada, de tal manera que son representativos del "entorno" del punto  $x$  considerado. En el caso de un mapa topográfico mono-dimensional, los círculos de radio  $\epsilon$  definen de hecho una zona de longitudes centrada en el punto  $x$  considerado.

Según una forma particular de realización, el radio  $\epsilon$  del círculo está comprendido sensiblemente entre alrededor de dos veces una resolución espacial del mapa topográfico en el plano medio y alrededor de diez veces esta resolución espacial. La resolución espacial considerada es, por ejemplo, la resolución espacial  $dx$ , la resolución espacial  $dy$ , o una media de las resoluciones espaciales  $dx$  y  $dy$ . El radio  $\epsilon$  es de una manera ventajosa igual a la mayor de las dos resoluciones espaciales  $dx$  y  $dy$ .

Debido a su definición, los puntos  $[x + \delta x]$  no se corresponden necesariamente con los puntos  $x$  del mapa topográfico. Así, la altura  $h(x + \delta x)$  de un punto  $x + \delta x$  puede ser determinado o bien considerando la altura del punto del mapa topográfico situado más cerca de este punto, o bien calculando la altura de este punto, por ejemplo, a partir de una media de las alturas de los puntos adyacentes.

La magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa de la diferencia media de la altura  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \leq \epsilon}$  entre la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $\{x + \delta x\}$  situados en el interior (especialmente en el perímetro) de un círculo de radio  $\epsilon$ , perteneciendo el círculo al plano medio y estando centrado en el punto  $x$  considerado. Dicho de otra manera, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa de una intensidad media de las variaciones de altura en las cercanías del punto  $x$  considerado. En el caso de un mapa topográfico mono-dimensional, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una diferencia media de la altura  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \leq \epsilon}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados a ambos lados del punto  $x$  considerado a una distancia inferior o igual al radio  $\epsilon$ . La magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  se llama "representativa" de una diferencia media de la altura para indicar que está determinada a partir de esta diferencia de altura media según una relación predeterminada. Esta relación puede definir a la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  como siendo igual a la diferencia media de alturas. Puede también incluir la multiplicación de la diferencia media de alturas por una constante, o por la suma de una constante. Dicho de otra manera, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está determinada por una función afín que toma como variable la diferencia media de alturas. En la medida en la que la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa de una media relativa a un conjunto de puntos tomados en el interior de un círculo, nos informa de manera fiable de la presencia de "riscos" en las cercanías de este punto. En el conjunto de puntos  $[x]$ , la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  define una función o un campo de diferencias de altura. Esta función  $\omega_\epsilon(x)$  presenta especialmente la ventaja de ser poco impactada por eventuales artefactos de medida. La función  $\omega_\epsilon(x)$  permite

también dar una información sobre el reparto espacial de las variaciones de altura de mayor amplitud, y, por lo tanto, de la forma y la dimensión de las micro-fisuras y de las micro-cavidades formadas en la zona de daños.

- 5 Según una primera variante de realización, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una diferencia media de las alturas  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \sim \epsilon}$  entre la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado, y la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados sensiblemente en el perímetro del círculo de radio  $\epsilon$  centrado en el punto  $x$  considerado. Dicho de otra manera, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está definida por la relación:

$$\omega_\epsilon(x) = f([\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \sim \epsilon})$$

- 10 en donde la función  $a \rightarrow f(a)$  es una función afín, en donde la cantidad  $\delta h(x, \delta x)$  define la diferencia de alturas  $h(x + \delta x) - h(x)$ , en donde el signo  $\approx$  indica una cantidad sensiblemente igual, y el operador  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \sim \epsilon}$  reenvía un valor medio de las diferencias de alturas para el conjunto de los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  del mapa topográfico tales que la distancia  $|\delta x|$  es sensiblemente igual al radio  $\epsilon$ . Los puntos  $\{x + \delta x\}$  pueden estar repartidos equitativamente sobre el perímetro del círculo. La función  $\omega_\epsilon(x)$  es entonces isótropa.

- 15 Según una segunda variante de realización, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está determinada, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, por la relación:

$$\omega_\epsilon(x) = f(\frac{1}{2} \log([\delta h^2(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}))$$

- 20 en donde la función  $a \rightarrow f(a)$  es una función afín, en donde la cantidad  $\delta h(x, \delta x)$  define la diferencia de altura  $h(x + \delta x) - h(x)$ , en donde el signo  $\approx$  indica una cantidad sensiblemente igual, en donde el operador  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  reenvía un valor medio de las diferencias de altura para el conjunto de los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  del mapa topográfico tales que la distancia  $|\delta x|$  es sensiblemente igual al radio  $\epsilon$  y, en donde la función  $a \rightarrow \log(a)$  es una función logarítmica. Puede tratarse especialmente de un logaritmo decimal. Esta variante de realización presenta la ventaja de leer las diferencias de altura y de hacer más robusto el indicador formado por la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$ . La elevación al cuadrado de la magnitud  $\delta h(x, \delta x)$  permite obtener un valor positivo de la diferencia de alturas. Es especialmente útil en ausencia de una normalización de las alturas  $h(x)$ .

- 25 Según una tercera variante de realización, la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está determinada, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, por la relación:

$$\omega_\epsilon(x) = f(\text{sign}([\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}))$$

- 30 en donde la función  $a \rightarrow \text{sign}(a)$  es una función que toma el valor 1 si  $a$  es estrictamente positiva, -1 si  $a$  es estrictamente negativa, y 0 si  $a$  es nula, en donde la cantidad  $\delta h(x, \delta x)$  define la diferencia de alturas  $h(x + \delta x) - h(x)$ , en donde el signo  $\approx$  indica una cantidad sensiblemente igual, y donde el operador  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  reenvía un valor medio de las diferencias de altura para el conjunto de los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  del mapa topográfico tales que la longitud  $|\delta x|$  es sensiblemente igual al radio  $\epsilon$ .

- 35 En cada una de las variantes de realización, la relación que define la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  puede incluir una constante real  $\Omega_\epsilon$  determinada de tal manera que una media de la función  $\omega_\epsilon(x)$  sea sensiblemente nula en el conjunto de puntos  $(x)$  del mapa topográfico. La constante real se determina entonces por la relación:

$$\Omega_\epsilon = [\omega_\epsilon(x)]_x$$

Las relaciones que definen la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  se convierten respectivamente de esta manera:

$$\omega_\epsilon(x) = \langle \delta h(x, \delta x) \rangle_{|\delta x| \sim \epsilon} - \Omega_\epsilon$$

$$\omega_\epsilon(x) = \frac{1}{2} \log(\langle \delta h^2(x, \delta x) \rangle_{|\delta x| \sim \epsilon}) - \Omega_\epsilon$$

$$\omega_\epsilon(x) = \text{sign}(\langle \delta h(x, \delta x) \rangle_{|\delta x| \sim \epsilon}) - \Omega_\epsilon$$

- 40 Cualquiera que sea la forma de la función  $\omega_\epsilon(x)$ , es posible estudiar la autocorrelación en función de una distancia entre dos pares de puntos. El procedimiento según el invento puede incluir de esta manera una etapa de determinación, en función de una distancia de prueba  $\delta r$ , de una función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$  representativa de una correlación espacial entre la función  $\omega_\epsilon(x)$  determinada para el conjunto de puntos  $[x]$ , y la

función  $\omega_\epsilon(x + \delta x)$  determinada para el conjunto de puntos  $\{x + \delta x\}$  tales que  $|\delta x| = \delta r$ . La función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$ , se escribe:

$$C_\epsilon(\delta r) = \langle \omega_\epsilon(x) \cdot \omega_\epsilon(x + \delta x) \rangle_{x, |\delta x| = \delta r}$$

5 La función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$  permite poner en evidencia una longitud característica, llamada longitud de correlación  $\xi$ , delimitando dos zonas de distancias. En la zona de distancias  $\delta r < \xi$ , se observa una correlación espacial entre las funciones  $\omega_\epsilon(x)$  y  $\omega_\epsilon(x + \delta x)$ . Esta correlación tiene como significado la presencia de variaciones de altura de la misma amplitud en las distancias  $\delta r$ . Dicho de otra manera, traduce la presencia de riscos cuya dimensión es igual a  $\delta r$ . En la zona de distancias  $r > \xi$ , la correlación espacial entre las funciones  $\omega_\epsilon(x)$  y  $\omega_\epsilon(x + \delta x)$  es nula, lo que significa la presencia de riscos cuya dimensión es superior a  $\xi$ .

10 El procedimiento según el invento puede incluir así una etapa de determinación de la longitud de la correlación  $\xi$  a partir de la función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$ , siendo igual la longitud de correlación  $\xi$  a la distancia máxima  $\delta r = |\delta r|$  que separa los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  más allá de la cual la función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$  se hace sensiblemente igual a  $\Omega^2_\epsilon$ . Para distancias  $\delta r < \xi$ , la función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$  toma valores superiores a  $\Omega^2_\epsilon$ . Cuando la relación que define la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está definida de tal manera que la función  $\omega_\epsilon(x)$  sea de media nula, la función de correlación espacial  $C_\epsilon(\delta r)$  se anula para unas distancias  $\delta r > \xi$ .

15 Mejor que estudiar globalmente la autocorrelación de la función  $\omega_\epsilon(x)$  en todas las direcciones, es posible estudiar su autocorrelación espacial en unas direcciones determinadas del plano medio. Cada dirección, llamada igualmente dirección de análisis, está referenciada por un ángulo  $\theta$  definido en el plano medio. El procedimiento puede incluir entonces una etapa de determinación, en función de una distancia de prueba  $\delta r$  y de una dirección de análisis  $\theta$ , de una función de correlación espacial  $C_{\epsilon,\theta}(\delta r)$  representativa de una correlación espacial entre la función  $\omega_\epsilon(x)$  determinada para un conjunto de puntos  $[x]$  y la función  $\omega_\epsilon(x + \delta x)$  determinada para el conjunto de puntos  $[x + \delta x]$  situados a la distancia  $\delta r$  en la dirección de análisis  $\theta$ .

20 Una longitud de correlación dependiente de la dirección  $\theta$ , llamada longitud de correlación  $\xi_\theta$ , puede entonces ser determinada a partir de la función de correlación espacial  $C_{\epsilon,\theta}(\delta r)$ . De manera análoga a la longitud de correlación, cada longitud de correlación  $\xi_\theta$  está determinada como siendo igual a la distancia máxima  $\delta r = |\delta x|$  que separa los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  más allá de la cual la función de correlación espacial  $C_{\epsilon,\theta}(\delta r)$  correspondiente se hace sensiblemente igual a  $\Omega^2_\epsilon$ .

25 Los inventores han podido poner en evidencia que la variación de la longitud de correlación  $\xi_\theta$  en función de la dirección de análisis  $\theta$  permite remontar a la dirección de propagación de la fisura. En particular, la longitud de correlación  $\xi_\theta$  es máxima en la dirección de propagación de la fisura, y mínima en la dirección ortogonal a la dirección de propagación. El procedimiento según el invento puede incluir así una etapa suplementaria de determinación de la dirección de propagación de la fisura a partir de las longitudes de correlación  $\xi_\theta$ .

30 La tenacidad  $K_c$  del material de una estructura al estar ligada al tamaño de la zona de daños, y, por lo tanto, para el presente invento, a la longitud de correlación  $\xi$ , es posible determinar esta tenacidad  $K_c$  a partir de la medida de  $\xi$  hecha sobre las superficies de rotura. Por tenacidad, se entiende la capacidad de un material para resistirse a la propagación de una fisura. Según una forma particular de realización, el procedimiento incluye entonces una etapa de determinación de una tenacidad  $K_c$  de la estructura a partir de la longitud de correlación  $\xi$ . A título de ejemplo, para un material cuya zona de daños de extensión  $L_c$  está descrita para una zona característica por una tensión de rotura  $\sigma_c$ , la tenacidad sigue a la relación:

$$K_c = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_c \sqrt{L_c}$$

35 Esta relación procede de la publicación G. I. Barrenblatt, "The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle solids", Avd. Appl. Mech. 7. 55 (1962). La longitud de correlación  $\xi$  determinada a partir de las superficies de rotura a través del presente invento corresponde a la extensión  $L_c$  de la zona de daños, y, por lo tanto, la tenacidad del material puede ser determinada a través de la relación:

$$K_c = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_c \sqrt{\xi}$$

40 La tensión de rotura  $\sigma_c$  del material estudiado puede entonces ser determinada de manera independiente, o bien utilizando unos métodos experimentales clásicos, o bien utilizando los valores proporcionados en la literatura. La

tensión de rotura de un material está en general dentro de la gama  $E/10 < \sigma_c < E/5$  en donde E es el módulo de Young del material.

Según otra forma particular de realización, el procedimiento incluye:

- 5   ▪ una etapa de determinación, para cada punto x del mapa topográfico, de una magnitud  $\omega_\xi(x)$  representativa de una diferencia media de alturas  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x|=\xi}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto x considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en un o en varios puntos  $(x + \delta x)$  situados sensiblemente sobre el perímetro de un círculo de radio  $\xi$  o  $\xi_\theta$  centrado en el punto x considerado, y
- una etapa de determinación de una magnitud  $h_\xi$  correspondiente a una media de las magnitudes  $\omega_\xi(x)$  sobre el conjunto de los puntos [x].
- 10 Esta magnitud  $h_\xi$  representa la extensión de la zona de daños en la dirección ortogonal al plano medio de la superficie de rotura.

El procedimiento puede incluir, además:

- una etapa de determinación de una tenacidad  $K_c$  de la estructura a partir de la magnitud  $h_\xi$

- 15 El procedimiento puede igualmente incluir una etapa de determinación de la energía de rotura  $G_c$  del material. En efecto, éste sigue la relación  $G_c = K_c^2/E$  lo que permite relacionar la energía de rotura del material con la longitud de correlación extraída a partir de las superficies de rotura a través de la relación:

$$G_c = \frac{8 \sigma_c^2}{\pi E} \xi$$

- 20 Otra aplicación de la medida de la extensión del tamaño de la zona de daños a partir del análisis de una superficie de rotura es la determinación de la velocidad de la fisura. Esta determinación se basa en las siguientes observaciones. Para un material dado, roto a una temperatura dada, existe una función monótona  $v = g(\xi)$  que relaciona la longitud de correlación  $\xi$  con la velocidad de la fisura  $v$  del material: cuando mayor es la zona de daños  $\xi$  mayor es la velocidad de la fisura igualmente. Esta función puede ser determinada diferentes maneras. Según una primera aproximación, la función  $v = g(\xi)$  puede ser determinada por unas pruebas de rotura clásicas a partir de una máquina de tracción. En el transcurso de estas pruebas, una fisura a velocidad controlada  $v$  se impone al material estudiado. La superficie de rotura obtenida es analizada a continuación utilizando el método descrito en esta patente, y se determina la longitud  $\xi$ . Esta prueba se realiza entonces a diferentes velocidades de la fisura, con el fin de determinar la relación  $v = g(\xi)$ . Esta calibración puede ser utilizada a continuación en un contexto en el que la velocidad de la fisura no es conocida a priori y debe ser determinada a partir del valor de  $\xi$  medido sobre la superficie de rotura.
- 30 Otra aproximación que trata de determinar la función  $v = g(\xi)$  consiste en utilizar una expresión explícita de la función  $g$  que ha sido o bien determinada previamente por experiencias, o bien establecida a partir de otra modelización del proceso de fisura. Esta modelización debe entonces ser adaptada al material estudiado. Por ejemplo, la fisura por corrosión bajo una tensión que ha tenido lugar en un gran número de materiales como los vidrios o las rocas da lugar a una variación de la ley de la potencia de la velocidad de la fisura con el tamaño de la zona de daños, a través de la fórmula fenomenológica de Charles (R. J. Charles "Static fatigue of glass", J. Appl. Phys. 29, 1554 (1958).

$$V = A \xi^n$$

- 40 La constante A y el exponente n no dependen nada más que del material considerado. Es posible en un gran número de casos utilizar las medidas hechas por otros autores y publicadas en las revistas científicas con el fin de obtener los valores de estas dos constantes sin haberlas determinado por experiencias. En otros casos, será necesario proceder a unas pruebas de rotura clásicas que permitirán la determinación de estas dos constantes.

El procedimiento según el invento puede incluir así, además:

- una etapa de determinación de una velocidad de fisura  $v$  a partir, por una parte, de la longitud de correlación  $\xi$  o de al menos una longitud de correlación  $\xi_\theta$  y, por otra parte, de una función  $v = g(\xi)$  que relacione la longitud de correlación  $\xi$  o  $\xi_\theta$  con la velocidad de la fisura  $v$ .
- 45 Una posible aplicación de la medida de la velocidad de la fisura es la determinación de la carga K aplicada durante la rotura de la pieza analizada. Cuanto mayor sea la carga aplicada, mayor será la velocidad de la fisura. La relación  $v(K)$  es conocida para un gran número de materiales (véase, por ejemplo, B. Lawn, "Fracture of brittle solids", Cambridge Univ. Press, 1993). La carga aplicada durante el transcurso de la rotura de la pieza representa una información preciosa para apreciar las condiciones y las causas que han precipitado la ruina de la estructura.

Finalmente, hay que observar que los métodos descritos precedentemente pueden ser aplicados de dos maneras diferentes

5 (i) o bien el conjunto de la superficie de rotura es analizado según el procedimiento descrito precedentemente. Esta metodología permite determinar una longitud de correlación  $\xi$  media sobre el conjunto de la superficie de rotura. A partir de este valor, de puede determinar entonces la tenacidad media o la velocidad de la fisura media sobre el conjunto de la pieza.

10 (ii) o bien se aplica el método de medida de  $\xi$  sobre diferentes zonas de la superficie de rotura. En efecto, el método propuesto da unos resultados incluso a partir de una superficie relativamente limitada de la superficie de rotura. La superficie de rotura estudiada puede entonces ser dividida en varias zonas, y cada zona estudiada individualmente. El mapa topográfico puede ser determinado considerando un único plano medio para toda la región de la superficie de rotura, o considerando un plano medio para cada zona. Diferentes etapas del procedimiento descritas anteriormente se realizan entonces para cada una de las zonas de la superficie de rotura, de tal manera que proporcionen informaciones locales relativas a la superficie de rotura. En este caso, diferentes longitudes de correlación  $\xi$  o  $\xi_0$  pueden ser determinadas para las diferentes zonas. Se puede hablar de un campo de longitudes de correlación  $\xi(x)$  o  $\xi_0(x)$ . La utilización de las relaciones entre  $\xi$  y la tenacidad  $K_c$  por una parte, y  $\xi$  y la velocidad de la fisura  $v$  por otra, permiten determinar no ya un valor de  $K_c$  o de  $v$ , sino su campo  $K_c(x)$  y  $v(x)$  en función de la posición en la superficie de rotura. Incluso, es posible igualmente determinar el campo de la dirección local de la fisura. Estos campos de las propiedades de la rotura pueden demostrarse ser muy apreciados para determinar el comportamiento a la rotura del material estudiado o las razones de la rotura de una pieza, remontando, por ejemplo, el punto débil del material revelado o bien por el origen de las direcciones de propagación de la fisura, o bien por una zona de menor tenacidad.

### Descripción de las figuras

Otras ventajas y particularidades del invento aparecerán con la lectura de la descripción detallada de las puestas en marcha y de los modos de realización de ninguna manera limitativos, a la vista de los dibujos anexos, en los cuales:

- 25 - la figura 1 representa un ejemplo de las etapas que pueden ser puestas en marcha en el procedimiento de caracterización de una superficie de rotura según el invento;
- la figura 2 representa, en su parte superior, unos ejemplos de mapas topográficos que dan una altura de una superficie de rotura con respecto a un plano medio para diferentes ejemplos de materiales y, en su parte inferior, de los campos  $\omega_\epsilon(x)$  de las diferencias medias de las alturas determinadas a partir de estos mapas topográficos;
- 30 - la figura 3 representa, bajo la forma de gráficos, una función de correlación espacial de los campos  $\omega_\epsilon(x)$  representados en la figura 2;
- la figura 4 representa, bajo la forma de gráficos, unas funciones de correlación espacial determinadas a partir de las diferentes relaciones para los campos  $\omega_\epsilon(x)$ ;
- 35 - la figura 5 representa una función de correlación espacial determinada para una misma superficie de fractura según dos direcciones distintas;
- la figura 6 representa una evolución de una longitud de correlación en función de una dirección de la correlación espacial.

### Descripción de modos de realización

40 Al ser los modos de realización descritos anteriormente de ninguna manera limitativos, se podrán considerar especialmente unas variantes del invento no incluyendo nada más que una selección de las características descritas, a continuación aisladas de otras características descritas (incluso si esta selección está aislada en el seno de una frase que incluye otras características), si esta selección de características es suficiente para conferir una ventaja técnica o para diferenciar el invento con respecto al estado de la técnica anterior. Esta selección incluye al menos una característica, preferentemente funcional sin detalles estructurales, o con únicamente una parte de los detalles estructurales si esta parte únicamente es suficiente para conferir una ventaja técnica o para diferenciar al invento con respecto al estado de la técnica anterior.

50 La figura 1 representa un ejemplo de las etapas que pueden ser puestas en marcha en el procedimiento de caracterización de una superficie de rotura según el invento. En una primera etapa 11, se establece un mapa topográfico para la superficie de rotura a analizar. Un mapa topográfico representa, para un conjunto de puntos  $[x]$  repartidos regularmente en un plano medio de la superficie de rotura considerada, una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto a este plano medio. Ejemplos de mapas topográficos están ilustrados en la parte superior de la figura 2 para unas superficies de rotura formadas por fisura en unas piezas constituidas por materiales diferentes. El mapa topográfico de la izquierda ilustra la superficie de rotura de una pieza de aluminio, la de medio ilustra la superficie de rotura de una pieza de mortero, y la de la derecha ilustra la superficie de rotura de una pieza de cerámica. Los puntos  $[x]$  o  $x [x; y]$  están definidos con respecto a una referencia del plano medio que incluye un eje

X, correspondiente en la figura 2 al eje horizontal, y un eje Y, correspondiente al eje vertical. La altura  $h(x)$  está definida según un eje Z ortogonal a los ejes X e Y. Está representada en la figura 2 por una escala de niveles en gris, cuanto más pequeña es la altura, más bajo está el punto. Con el fin de representar de manera pedagógica estos mapas topográficos y los campos  $\omega_{\epsilon}(x)$ , la altura  $h(x)$  y  $\omega_{\epsilon}(x)$  han sido normalizados. Todas las alturas  $h(x)$  son llevadas a una zona de valores comprendidos entre 0 y 1, en donde el valor 0 corresponde a la altura más pequeña (situada debajo del plano medio), y el valor 1 corresponde a la altura máxima (situado por encima del plano medio). El mismo procedimiento se aplica para el campo  $\omega_{\epsilon}(x)$ .

Cada mapa topográfico se establece según una técnica de adquisición apropiada para el material considerado. En este caso, el mapa topográfico de la figura 2 para la pieza de aluminio ha sido establecido a partir de un par estereoscópico de imágenes obtenidas por un microscopio electrónico de barrido, el mapa topográfico para la pieza de mortero ha sido establecido por perfilometría óptica, y el mapa topográfico para la pieza de cerámica ha sido establecido con la ayuda de una perfilometría mecánica. Las resoluciones espaciales según los ejes X e Y, anotadas como  $dx$  y  $dy$ , son sensiblemente iguales y valen  $3\mu\text{m}$  (micrómetros),  $50\mu\text{m}$  y  $8\mu\text{m}$ , para el aluminio, el mortero y la cerámica, respectivamente. La precisión de las medidas según el eje de las alturas, es decir según el eje Z, es igual a alrededor de  $1\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  y  $0,2\mu\text{m}$  para el aluminio, el mortero y la cerámica, respectivamente.

En una segunda etapa 12 del procedimiento según el invento, una magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  se determina para cada punto  $x$  del mapa topográfico. Esta magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  se determina de tal manera que sea representativa de una diferencia media de alturas  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \leq \epsilon}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $\{x + \delta x\}$  situados en el interior de un círculo de radio  $\epsilon$  centrado en el punto  $x$  considerado. La longitud del radio  $\epsilon$  se determina preferentemente en función de la resolución espacial del mapa topográfico, es decir en función de la escala de rugosidad de la superficie de rotura. El radio  $\epsilon$  está comprendido, por ejemplo, entre alrededor de una vez la resolución espacial del mapa topográfico, y alrededor de diez veces esta resolución. Preferentemente, el radio  $\epsilon$  es igual a la resolución espacial  $dx$  y/o  $dy$ . En los ejemplos de la figura 2, la longitud del radio  $\epsilon$  se elige igual a las resoluciones  $dx$  y  $dy$  de los relieves topográficos. En el conjunto de los puntos  $[x]$ , las magnitudes  $\omega_{\epsilon}(x)$  definen una función. De una manera más precisa, definen una función espacial en dos dimensiones. Se llama igualmente a esta función un campo de diferencias de altura, en particular cuando hace referencia a su representación gráfica.

La magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  puede ser determinada de diferentes maneras. Según una primera variante de realización, la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  se determina como siendo igual a la diferencia media de las alturas entre la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado, y la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios de los puntos  $[x + \delta x]$  situados sensiblemente en el perímetro del círculo de radio  $\epsilon$  centrado en el punto  $x$  considerado. La magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  se define entonces por la relación:

$$\omega_{\epsilon}(x) = [\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon} \quad (1)$$

en donde  $\delta h(x, \delta x) = h(x + \delta x) - h(x)$  y en donde el operador  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  reenvía un valor medio de las diferencias de alturas para el conjunto de los pares de puntos  $[x, x + \delta x]$  del mapa topográfico tales como  $|\delta x| \approx \epsilon$ .

Según una segunda variante de realización, la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  se determina, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, por la relación:

$$\omega_{\epsilon}(x) = \frac{1}{2} \log ([\delta h^2(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}) \quad (2)$$

en donde la función  $a \rightarrow \log(a)$  es una función logarítmica, por ejemplo, una función logarítmica decimal.

Según una tercera variante de realización, la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  se determina, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, por la relación:

$$\omega_{\epsilon}(x) = \text{sign} ([\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}) \quad (3)$$

en donde la función  $a \rightarrow \text{sign}(a)$  es una función que toma el valor 1 si  $a$  es estrictamente positiva, y -1 si  $a$  es estrictamente negativa, y 0 si  $a$  es nula.

En cada una de las variantes de realización, la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  puede ser determinada de tal manera que la función  $\omega_{\epsilon}(x)$  sea sensiblemente nula en el conjunto de puntos  $[x]$  del mapa topográfico. Una constante real  $\Omega_{\epsilon}$  se substraee en las relaciones (1), (2) y (3). Esta constante  $\Omega_{\epsilon}$  se define a partir de la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  correspondiente por la relación:

$$\Omega_{\epsilon} = [(\omega_{\epsilon}(x))]_x$$

Las relaciones (1), (2) y (3) se convierten ahora entonces en:

$$\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) = \langle \delta h(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x}) \rangle_{|\delta \mathbf{x}| \sim \epsilon} - \Omega_{\epsilon} \quad (1')$$

$$\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \log(\langle \delta h^2(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x}) \rangle_{|\delta \mathbf{x}| \sim \epsilon}) - \Omega_{\epsilon} \quad (2')$$

$$\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) = \langle \text{sign}(\delta h(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x})) \rangle_{|\delta \mathbf{x}| \sim \epsilon} - \Omega_{\epsilon} \quad (3')$$

La parte inferior de la figura 2 ilustra los campos  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  determinados por los mapas topográficos de la parte superior. De esta manera, de izquierda a derecha, los campos  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  están representados por las superficies de rotura de las piezas de aluminio, de mortero y de cerámica. Estos campos están definidos con la misma referencia que los mapas topográficos y están determinados por la relación (2'). En la representación de la figura 2, los campos  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  están, además, normalizados llevando cada valor de  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  a una zona de valores comprendida entre 0 y 1, en donde el valor 0 corresponde a la diferencia mínima de alturas, y el valor 1 corresponde a la diferencia máxima de alturas. Como se ve en la figura 2, los campos  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  dan informaciones sobre la forma y la dimensión de las micro-fisuras que se hayan conducido a la formación de la superficie de rotura. En particular, las líneas cuya intensidad es la más clara dan la forma de las micro-fisuras en el momento de su coalescencia con otras micro-fisuras o con la fisura principal.

En una tercera etapa 13 del procedimiento según el invento, se determina una función de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$ . Esta función se determina en función de una distancia de prueba  $\delta r$ . Esta distancia de prueba  $\delta r$  varía preferentemente entre la resolución espacial del mapa topográfico, y la mayor dimensión del mapa topográfico en el plano medio. Es representativa de una correlación espacial entre la función  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  determinada para el conjunto de puntos  $[\mathbf{x}]$ , y la función  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x} + \delta \mathbf{x})$  determinada para el conjunto de puntos  $[\mathbf{x} + \delta \mathbf{x}]$  tales que  $|\delta \mathbf{x}| = \delta r$ . La función de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$  se escribe:

$$C_{\epsilon}(\delta r) = [\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) \cdot \omega_{\epsilon}(\mathbf{x} + \delta \mathbf{x})]_{|\delta \mathbf{x}| = \delta r} \quad (4)$$

La figura 3 representa, bajo la forma de gráficos, la función de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$  para las superficies de rotura de las piezas de aluminio, de mortero y de cerámica. El eje de las abscisas representa la distancia de prueba  $\delta r$ , y el eje de las ordenadas representa el valor de la correlación espacial para esta distancia. Para cada material, la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$  ha sido trazada para diferentes longitudes del radio  $\epsilon$ . En particular, para la pieza de aluminio, la función de correlación,  $C_{\epsilon}(\delta r)$  ha sido determinada para unos radios de 3, 6, 9, 15 y 24  $\mu\text{m}$ . Los gráficos ponen en evidencia el hecho de que la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$  toma un valor nulo más allá de una cierta distancia. Esta distancia se llama longitud de correlación  $\xi$ . Informa de la longitud de la zona de daños del proceso de fisura. Hay que remarcar que la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$  toma un valor nulo más allá de la longitud de correlación  $\xi$  cualquiera que sea la longitud del radio  $\epsilon$ , siempre que la longitud sea inferior a la longitud de correlación  $\xi$ . Los gráficos de la figura 3 muestran igualmente que la longitud del radio  $\epsilon$  tiene una influencia relativamente limitada sobre la forma de la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$ . Esto es particularmente cierto para las distancias  $\delta r$  superiores a una distancia umbral. De esta manera, la elección de la longitud del radio  $\epsilon$  utilizado para la determinación de la función  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$  no tiene una influencia crítica en la continuación del procedimiento, y en particular en la precisión de la longitud de correlación  $\xi$ .

La figura 4 representa diferentes funciones de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$  para las superficies de rotura de las piezas de aluminio, de mortero y de cerámica. El eje de las abscisas representa la distancia de prueba  $\delta r$ , y el eje de las ordenadas representa el valor de la correlación espacial para esta distancia. Para cada material, la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$  ha sido determinada y trazada para diferentes funciones  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$ , anotadas como (a), (b) y (c), y definidas como sigue:

$$\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) = \frac{\langle \delta h(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x}) \rangle_{|\delta \mathbf{x}| = \epsilon} - \Omega_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}} \quad (a)$$

$$\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \log(\langle \delta h^2(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x}) \rangle_{|\delta \mathbf{x}| = \epsilon}) - \Omega_{\epsilon} \quad (b)$$

$$\omega_{\epsilon}(\mathbf{x}) = \langle \text{sign}(\delta h(\mathbf{x}, \delta \mathbf{x})) \rangle_{|\delta \mathbf{x}| = \epsilon} - \Omega_{\epsilon} \quad (c)$$

en donde  $\sigma_{\epsilon}$  designa la separación tipo de la función  $\omega_{\epsilon}(\mathbf{x})$ . En la función (a), la división por  $\sigma_{\epsilon}$  permite la representación de la función de correlación en un mismo gráfico que las funciones de correlación obtenidas con (b) y (c). Hay que remarcar que la función (c) podría tomar una forma alternativa, como sigue:

$$\omega_{\epsilon}(x) = \text{sign}([\partial h(x, \delta x)]_{|\delta x|=\epsilon}) - \Omega_{\epsilon}$$

El procedimiento según el invento incluye una cuarta etapa 14, en la cual la longitud de correlación  $\xi$  está determinada a partir de la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$ . Esta etapa puede realizarse de diferentes maneras. Consiste, por ejemplo, en determinar el valor más pequeño de  $\delta r$  para el cual el valor de la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$  es inferior a un valor umbral predeterminado. En otro modo de realización, esta etapa se realiza seleccionando a un conjunto de puntos cuyo valor es superior a un umbral predeterminado, sensiblemente igual a  $\Omega_{\epsilon}^2 = [\omega_{\epsilon}(x)]_x^2$ , trazando una recta lo más cerca posible de los puntos seleccionados, y determinando la distancia  $\delta r$  para la cual esta recta intersecta a la recta de ecuación  $C_{\epsilon}(\delta r) = \Omega_{\epsilon}^2$ . La figura 4 pone en evidencia el hecho de que la longitud de correlación  $\xi$  es relativamente independiente de la relación elegida para la función  $\omega_{\epsilon}(x)$ .

La figura 5 representa una función de correlación espacial determinada según dos direcciones distintas para una superficie de fractura sobre una pieza de mortero. Una primera dirección, anotada como X, corresponde a la dirección de propagación de la fisura. Una segunda dirección, anotada como Y, corresponde a una dirección perpendicular a la dirección de propagación, en el plano medio. Como es claramente visible en la figura 5, la longitud de correlación  $\xi_x$  en la dirección x de propagación de la fisura es superior a la longitud de correlación  $\xi_y$  en la dirección Y.

La figura 6 representa de una manera más precisa la variación de la longitud de correlación  $\xi_{\theta}$  en función de la dirección de la correlación espacial. Puede observarse que la longitud de correlación  $\xi_{\theta}$  pasa por un máximo para un ángulo de cero grados, correspondiente a la dirección de propagación de la fisura.

El procedimiento según el invento puede incluir unas etapas suplementarias de determinación de las propiedades mecánicas del o de los materiales de la estructura a partir de la función  $\omega_{\epsilon}(x)$ , de la función de correlación  $C_{\epsilon}(\delta r)$  y/o de la longitud de correlación  $\xi$  (o de al menos una longitud de correlación  $\xi_{\theta}$ ).

La tenacidad  $K_c$  de un material puede ser determinada especialmente a partir de la longitud de correlación  $\xi$  o de al menos una longitud de correlación  $\xi_{\theta}$ . A título de ejemplo, para un material cuya zona de daños de extensión  $L_c$  es descrita para una zona cohesionada caracterizada por una tensión de rotura  $\sigma_c$ , la tenacidad  $K_c$  sigue la relación:

$$K_c = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_c \sqrt{L_c}$$

Esta relación procede de la publicación G. I. Barrenblatt, "The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle solids", Avd. Appl. Mech. 7. 55 (1962). La longitud de correlación  $\xi$  determinada a partir de las superficies de rotura a través del presente invento da la extensión  $L_c$  de la zona de daños, y, por lo tanto, la tenacidad del material a través de la relación:

$$K_c = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_c \sqrt{\xi}$$

La tensión de rotura  $\sigma_c$  del material estudiado puede ser determinada entonces de manera independiente, o bien utilizando unos métodos experimentales clásicos, o bien utilizando los valores proporcionados en la literatura. La tensión de rotura de un material está en general dentro de la gama  $E/10 < \sigma_c < E/5$ , en donde E es el módulo de Young de material.

El procedimiento puede de la misma manera incluir una etapa de determinación de la energía de rotura  $G_c$  del material. En efecto, ésta sigue la relación  $G_c = K^2/E$ , lo que permite relacionar la energía de rotura del material con la longitud de correlación extraída a partir de unas superficies de rotura a través de la relación:

$$G_c = \frac{8}{\pi} \frac{\sigma_c^2}{E} \xi$$

Por supuesto que, el invento no está limitado a los ejemplos que acaban de ser descritos y pueden aportarse numerosas adaptaciones a estos ejemplos sin salirnos del marco del invento tal y como está definido en las reivindicaciones. Además, pueden asociarse diferentes características, formas, variantes y modos de realización de invento unos con otros según diversas combinaciones en la medida en la que no sean incompatibles o excluyentes unos de otros.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de caracterización, en una estructura sólida que ha sufrido una fisura, de una superficie de rotura de esta estructura resultante de la fisura, incluyendo el procedimiento, a partir de un mapa topográfico que representa, para un conjunto de puntos  $[x]$  situados en un plano medio de la superficie de rotura, una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto al plano medio.
- 5
- una etapa (12) de determinación, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  representativa de una diferencia media de alturas  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \leq \epsilon}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados en el interior de un círculo formado en el plano medio, de radio  $\epsilon$ , y centrado en el punto  $x$  considerado, definiendo el conjunto de magnitudes  $\omega_{\epsilon}(x)$  una función en el conjunto de los puntos  $[x]$ .
- 10
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el cual la relación que define la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  incluye una constante real  $\Omega_{\epsilon}$  determinada de tal manera que una media de la función  $\omega_{\epsilon}(x)$  sea sensiblemente nula en el conjunto de puntos  $[x]$  del mapa topográfico.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 y 2 que incluye, además:
- 15
- una etapa (13) de determinación, en función de una distancia de prueba  $\delta r$ , de una función de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$  representativa de una correlación espacial entre la función  $\omega_{\epsilon}(x)$  determinada para el conjunto de puntos  $[x]$ , y la función  $\omega_{\epsilon}(x + \delta x)$  determinada para el conjunto de puntos  $[x + \delta x]$  tales que  $|\delta x| = \delta r$ .
4. Procedimiento según la reivindicación 3 que incluye, además:
- 20
- una etapa (14) de determinación de una longitud llamada de correlación  $\xi$  a partir de la función de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$ , siendo igual la longitud de correlación  $\xi$  a la distancia máxima  $\delta r = |\delta x|$  que separa los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  más allá de la cual la función de correlación espacial  $C_{\epsilon}(\delta r)$  se hace sensiblemente igual a  $\Omega_{\epsilon}^2 = [\omega_{\epsilon}(x)]_x^2$ .
- 25
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual el mapa topográfico representa una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto al plano medio para un conjunto de puntos  $[x]$  situados en una recta que pertenece al plano medio, siendo la magnitud  $\omega_{\epsilon}(x)$  representativa, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una diferencia media de altura  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \leq \epsilon}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados a ambos lados del punto  $x$  considerado a una distancia inferior o igual al radio  $\epsilon$ .
- 30
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el cual el mapa topográfico representa una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto al plano medio para un conjunto de puntos  $[x]$  repartidos en el plano medio según dos direcciones paralelas.
7. Procedimiento según la reivindicación 6, que incluye:
- 35
- una etapa de determinación, en función de una distancia de prueba  $\delta r$  y de una dirección de análisis  $\theta$  en el plano medio, de una función de correlación espacial  $C_{\epsilon, \theta}(\delta r)$  representativa de una correlación espacial entre la función  $\omega_{\epsilon}(x)$  determinada para el conjunto de puntos  $[x]$ , y la función  $\omega_{\epsilon}(x + \delta x)$  determinada para el conjunto de puntos  $[x + \delta x]$  situados a la distancia  $\delta r$  en la dirección de análisis  $\theta$ .
8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el cual la función de correlación espacial  $C_{\epsilon, \theta}(\delta r)$  es determinada para diferentes direcciones de análisis  $\theta$ , incluyendo el procedimiento además:
- 40
- una etapa de determinación de una longitud de correlación  $\xi_{\theta}$  para cada dirección de análisis  $\theta$  a partir de la función de correlación espacial  $C_{\epsilon, \theta}(\delta r)$  correspondiente, siendo la longitud de correlación  $\xi$  igual a la distancia máxima  $\delta r = |\delta x|$  que separa los pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  más allá de la cual la función de correlación espacial  $C_{\epsilon, \theta}(\delta r)$  se hace sensiblemente igual a  $\Omega_{\epsilon}^2 = [\omega_{\epsilon}(x)]_x^2$ .
9. Procedimiento según la reivindicación 8 que incluye, además:
- 45
- una etapa de determinación de una dirección de propagación de la fisura a partir de las variaciones de la longitud de correlación  $\xi$  con la dirección de análisis  $\theta$ .
10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4, 8 y 9 que incluye, además:
- una etapa de determinación de una tenacidad  $K_c$  de la estructura a partir de la longitud de correlación  $\xi$  o de al menos una longitud de correlación  $\xi_{\theta}$ .
11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 y 8 a 10, que incluye, además:

• una etapa de determinación de una velocidad de la fisura  $v$  a partir, por una parte, de la longitud de correlación  $\xi$  o de al menos una longitud de correlación  $\xi_0$  y, por otra parte, de una función  $v = g(\xi)$  que relaciona la longitud de correlación  $\xi$  o  $\xi_0$  con la velocidad  $v$  de la fisura.

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 y 8 a 11, que incluye, además:

5 • una etapa de determinación, para cada punto  $[x]$  del mapa topográfico, de una magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  representativa de una diferencia media de alturas  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \xi}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados sensiblemente en el perímetro de un círculo de radio  $\xi$  o  $\xi_0$  centrado en el punto  $x$  considerado, y

10 • una etapa de determinación de una magnitud  $h_\xi$  correspondiente a la media de las magnitudes  $\omega_\xi(x)$  en el conjunto de puntos  $[x]$ .

13. Procedimiento según la reivindicación 12 que incluye, además:

• una etapa de determinación de una tenacidad  $K_c$  de la estructura a partir de la magnitud  $h_\xi$

15 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual el radio  $\epsilon$  del círculo está comprendido sensiblemente entre alrededor de una vez una resolución espacial del mapa topográfico en el plano medio y alrededor de diez veces esta resolución espacial.

20 15. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual la superficie de rotura está dividida en varias zonas, representando el mapa topográfico una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto a un plano medio en cada una de las zonas, siendo realizadas las etapas (12, 13, 14) del procedimiento individualmente para cada una de las zonas de la superficie de rotura, de tal manera que proporcione informaciones locales relativas a la superficie de rotura, y en particular, un campo de longitudes de correlación  $\xi(x)$  o  $\xi_0(x)$ , un campo de tenacidad  $K_c(x)$ , un campo de velocidad de la fisura  $v(x)$ , y un campo de dirección local de la fisura.

25 16. procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una diferencia media de la altura  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  entre, por una parte, la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y, por otra parte, la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados en la curva cerrada que rodea al punto  $x$  considerado.

17. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  es representativa, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, de una diferencia media de la altura  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  entre la altura  $h(x)$  de la superficie de rotura en el punto  $x$  considerado y la altura  $h(x + \delta x)$  de la superficie de rotura en uno o en varios puntos  $[x + \delta x]$  situados sensiblemente en el perímetro del círculo de radio  $\epsilon$  centrado en el punto  $x$  considerado.

30 18. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, en el cual la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está determinada, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, por la relación:

$$\omega_\epsilon(x) = f\left(\frac{1}{2} \log(\langle \delta h^2(x, \delta x) \rangle_{|\delta x| \sim \epsilon})\right)$$

35 en donde la función  $a \rightarrow f(a)$  es una función afín, en donde la función  $a \rightarrow \log(a)$  es una función logarítmica, en donde la cantidad  $\delta h(x, \delta x)$  define la diferencia de alturas  $h(x + \delta x) - h(x)$ , en donde el signo  $\approx$  indica una cantidad sensiblemente igual, y en donde el operador  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  reenvía un valor medio de las diferencias de altura para el conjunto de pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  del mapa topográfico tales que la distancia  $|\delta x|$  es sensiblemente igual al radio  $\epsilon$ .

19. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, en el cual la magnitud  $\omega_\epsilon(x)$  está determinada, para cada punto  $x$  del mapa topográfico, por la relación:

$$\omega_\epsilon(x) = f\left(\text{sign}(\langle \delta h(x, \delta x) \rangle_{|\delta x| \sim \epsilon})\right)$$

40 en donde la función  $a \rightarrow \text{sign}(a)$  es una función que toma el valor 1 si  $a$  es estrictamente positiva, -1 si  $a$  es estrictamente negativa, y 0 si  $a$  es nula, en donde la cantidad  $\delta h(x, \delta x) = h(x + \delta x) - h(x)$ , y en donde el operador  $[\delta h(x, \delta x)]_{|\delta x| \approx \epsilon}$  reenvía un valor medio de las diferencias de altura para el conjunto de pares de puntos  $[x; x + \delta x]$  del mapa topográfico tales que la longitud  $|\delta x|$  es sensiblemente igual al radio  $\epsilon$ .

45 20. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, que incluye, previamente a la etapa (12) de determinación de las magnitudes  $\omega_\epsilon(x)$ , una etapa (11) de adquisición de un mapa topográfico que representa, para un conjunto de puntos  $[x]$  situados en un plano medio de la superficie de rotura, una altura  $h(x)$  de la superficie de rotura con respecto al plano medio, siendo utilizado el citado mapa topográfico para la etapa (12) de determinación de las magnitudes  $\omega_\epsilon(x)$ .

50

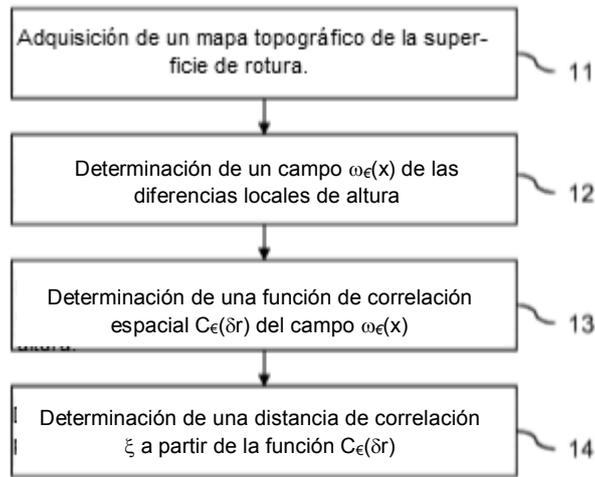


FIG. 1

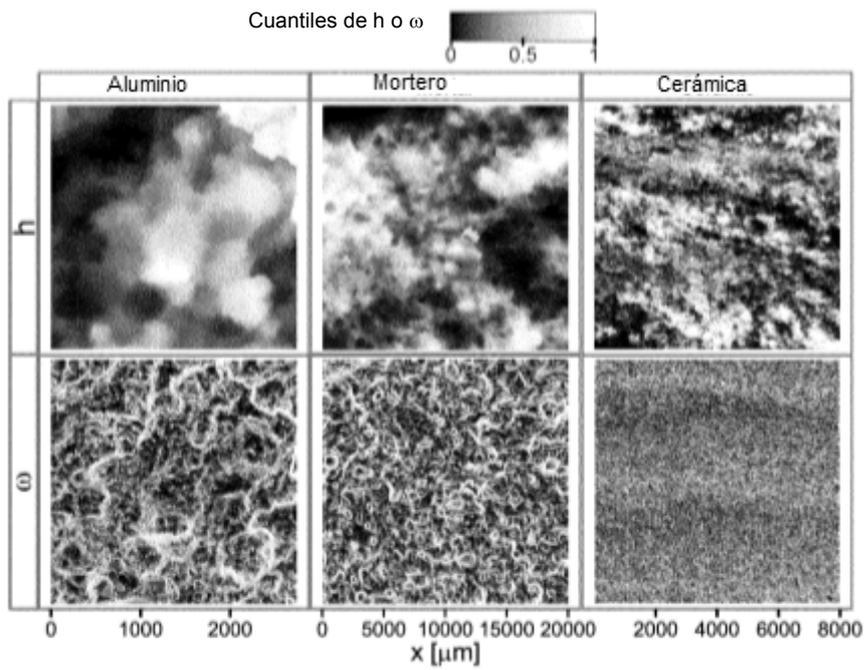


FIG. 2

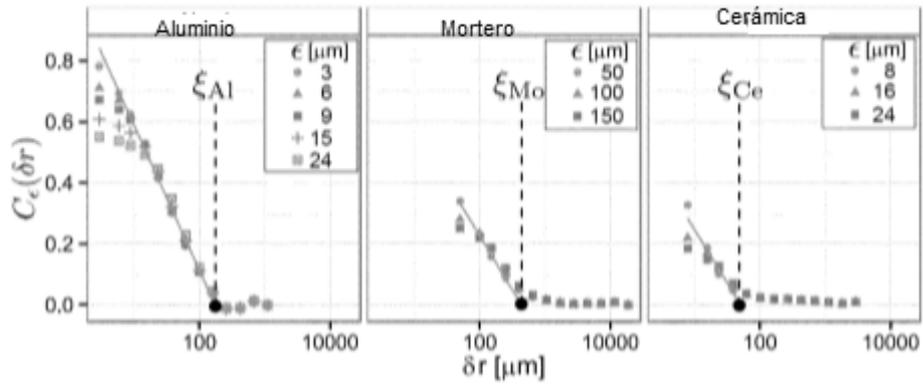


FIG. 3

Fórmula para  $\omega$ : (a) (b) (c)

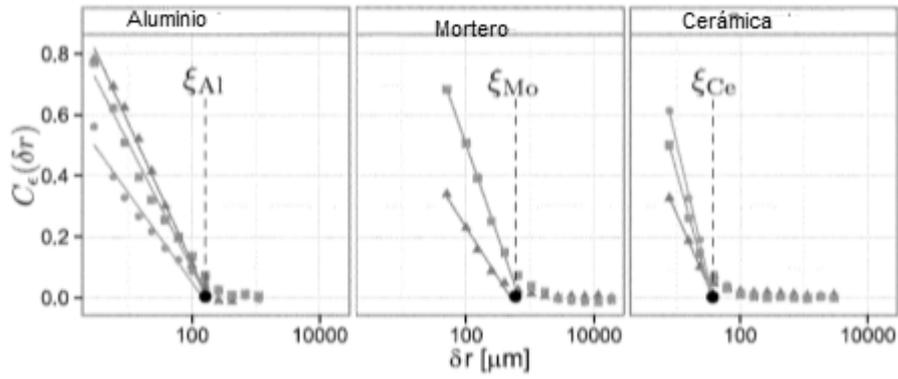


FIG. 4

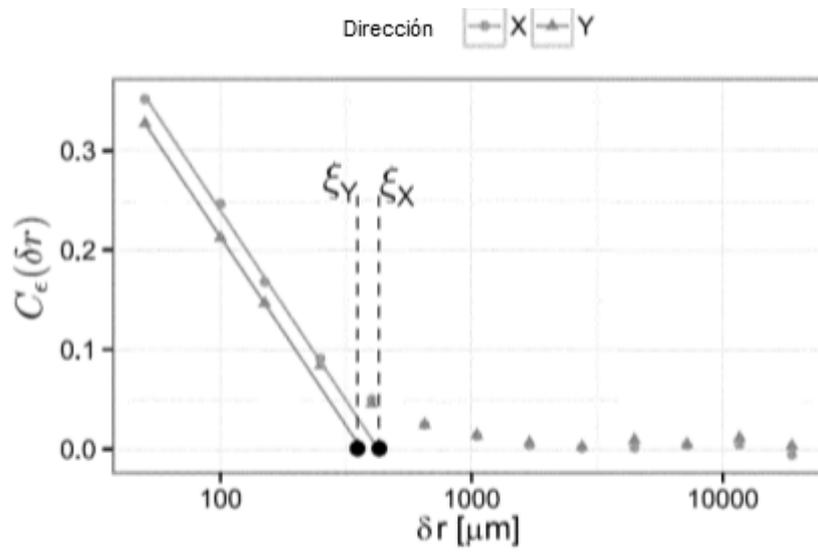


FIG. 5

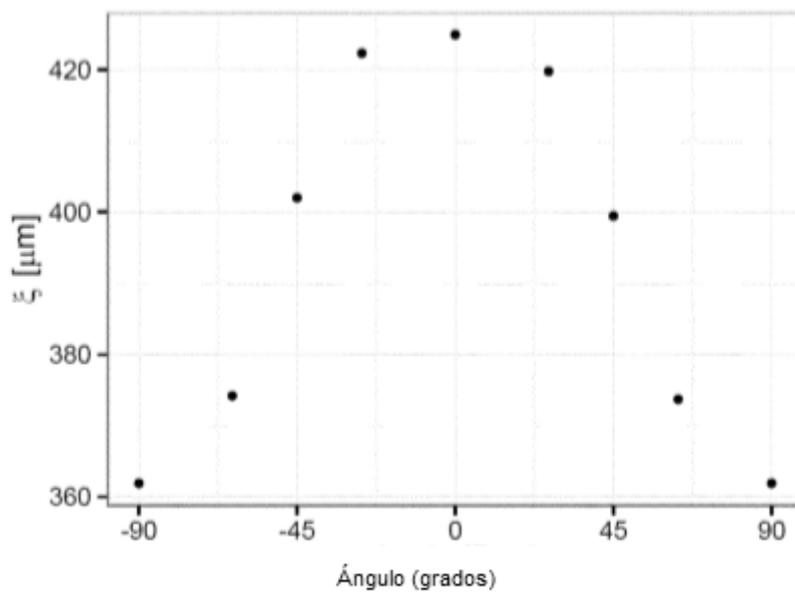


FIG. 6