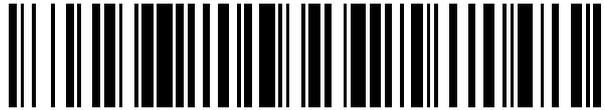


19



OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 597 454**

21 Número de solicitud: 201690013

51 Int. Cl.:

G01N 23/04 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

19.08.2013

43 Fecha de publicación de la solicitud:

18.01.2017

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE BURGOS (100.0%)
Hospital del Rey
09001 Burgos ES**

72 Inventor/es:

**VICENTE CABRERA, Miguel Ángel;
GONZÁLEZ CABRERA, Dorys Carmen y
MÍNGUEZ ALGARRA, Jesús**

54 Título: **MÉTODO IMPLEMENTADO POR ORDENADOR PARA OBTENER LAS ORIENTACIONES DE FIBRAS DENTRO DE MATERIALES COMPUESTOS USANDO EXPLORACIÓN POR TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA**

57 Resumen:

Método implementado por ordenador para obtener las orientaciones de fibras dentro de materiales compuestos usando exploración por tomografía computarizada, que comprende:

- obtener imágenes de exploración por tomografía de diferentes secciones transversales del material compuesto;
- convertir dichas imágenes en un conjunto de puntos, representando cada punto un píxel de la imagen con un valor de escala de grises y coordenadas 3D;
- extraer los píxeles correspondientes al material de fibra mediante el uso de un valor de escala de grises umbral;
- agrupar los píxeles del material de fibra correspondientes a la misma sección transversal en fibras individuales según criterios de distancia entre píxeles;
- reunir las fibras individuales ubicadas en diferentes secciones transversales y correspondientes a la misma fibra unitaria mediante la estimación de la posición del centroide de cada fibra individual en una sección transversal inmediata;
- obtener la recta de interpolación de cada nube de píxeles que pertenece a una fibra unitaria y, a partir de dicha recta de interpolación, obtener la orientación de cada fibra unitaria.

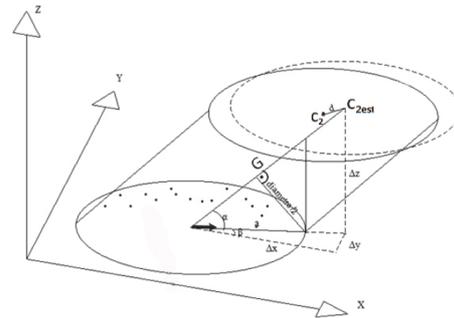


FIG. 1

**MÉTODO IMPLEMENTADO POR ORDENADOR PARA OBTENER LAS
ORIENTACIONES DE FIBRAS DENTRO DE MATERIALES COMPUESTOS USANDO
EXPLORACIÓN POR TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA**

5

DESCRIPCIÓN

Campo de la invención

La invención está incluida en el campo técnico de materiales compuestos, en los que un
10 componente es un material filamentosos o fibroso. En particular, se refiere a un método
para obtener las orientaciones de componentes fibrosos o filamentosos contenidos dentro
de un material compuesto, a través del procesamiento posterior de imágenes exploradas
mediante exploración por tomografía computarizada.

15 **Antecedentes de la invención**

El principal objetivo de la incorporación de materiales fibrosos y filamentosos en una
matriz es mejorar las características mecánicas de este material compuesto. La densidad
y la orientación de las fibras o filamentos son los parámetros principales que definen el
20 factor de eficacia para la mejora de la respuesta estructural en un material compuesto.

Habitualmente, el elemento fibroso adopta la capacidad de esfuerzo de tracción mientras
que el material que contiene este material fibroso adopta los esfuerzos de compresión.
Por tanto, la posición más eficiente del material fibroso debe ocupar las zonas de material
25 compuesto que están sometidas a tracción, y también debe orientarse paralelo a esos
esfuerzos de tracción.

Conocer la orientación real de las fibras dentro de un material compuesto puede ayudar a
optimizar el proceso de diseño y fabricación. El resultado final es un uso más eficiente de
30 la fibra, y por tanto un diseño óptimo, desde los puntos de vista tanto estructural como
económico.

Hay algunos métodos indirectos que permiten la evaluación de orientaciones de
materiales metálicos basándose en la diferencia electromagnética en el comportamiento
35 entre el material fibroso (metálico) y el material de matriz (no metálico). Estos métodos
existentes son imprecisos, es decir se obtienen valores aproximados con un grado de

incertidumbre, y su campo de aplicación se limita exclusivamente a los materiales fibrosos metálicos.

5 Usando tecnología de exploración por tomografía computarizada hay un método semidirecto para evaluar la orientación de las fibras dentro de un material compuesto. Consiste en determinar la orientación usando la longitud aparente en las tres direcciones espaciales. Esta longitud aparente se obtiene a partir de las imágenes proyectadas de las fibras en cada uno de los tres planos espaciales. Se basa en la hipótesis de que la orientación es perpendicular a aquella en la que la longitud total de la fibra muestra
10 aparentemente un valor mínimo. Este método semidirecto es más preciso que el indirecto, pero no puede identificar la orientación exacta de las fibras.

Hay un método directo que consiste en obtener la orientación individual de cada fibra mediante imágenes de tomografía. A través del software de análisis de imágenes es
15 posible obtener la segmentación de cada fibra de manera independiente, pero sin proporcionar una información automatizada de la orientación de la fibra.

Por tanto, existe la necesidad de obtener un método automatizado para evaluar de manera precisa la densidad y las orientaciones de fibras dentro de materiales
20 compuestos.

Descripción de la invención

La presente invención es un método implementado por ordenador para evaluar de
25 manera precisa, a partir del procesamiento posterior de imágenes exploradas mediante exploración por tomografía computarizada (denominada exploración por TC), las orientaciones de componentes fibrosos o filamentosos contenidos dentro de un material compuesto. Un material compuesto contiene materiales de diferentes densidades (material fibroso y matriz) y estos tienen diferente capacidad de absorción de rayos X,
30 que generan diferentes niveles de grises en las imágenes exploradas. Esto permite la identificación y separación posteriores.

El material que va a analizarse se segmenta o separa de las imágenes exploradas. Cada uno de los píxeles de imágenes que corresponde al componente especificado se
35 identifica con coordenadas tridimensionales. Entonces se agrupan los puntos en fibras independientes usando un algoritmo matemático. A continuación, se obtiene la recta de

interpolación de cada nube de puntos que pertenece a una fibra unitaria. Esta recta da la orientación de cada una de las fibras dentro del espacio tridimensional.

El método para obtener las orientaciones de fibras dentro de materiales compuestos usando exploración por tomografía computarizada comprende las siguientes etapas:

- obtener imágenes de exploración por tomografía de diferentes secciones transversales del material compuesto;
- 10 - convertir dichas imágenes en un conjunto de puntos (preferiblemente dispuestos en una matriz 3D), representando cada punto un píxel de la imagen con su valor de escala de grises y coordenadas tridimensionales correspondientes;
- extraer del conjunto de puntos los píxeles correspondientes al material de fibra mediante el uso de al menos un valor de escala de grises umbral;
- 15 - agrupar los píxeles del material de fibra correspondientes a la misma sección transversal en fibras individuales según criterios de distancia entre píxeles;
- 20 - reunir las fibras individuales ubicadas en diferentes secciones transversales y correspondientes a la misma fibra unitaria mediante la estimación de la posición del centroide de cada fibra individual en una sección transversal inmediata;
- obtener la recta de interpolación de cada nube de píxeles que pertenece a una fibra unitaria y, a partir de dicha recta de interpolación, obtener la orientación de cada fibra unitaria.
- 25

Las imágenes de exploración por tomografía de las secciones transversales se toman preferiblemente con una distancia de paso determinada entre imágenes. Pueden fijarse diferentes valores de escala de grises umbrales para diferentes zonas del material compuesto.

Los criterios de distancia para la agrupación de píxeles en fibras individuales pueden comprender comprobar aquellos píxeles en la misma sección transversal que están dentro de un determinado umbral de distancia. La agrupación de píxeles en fibras individuales comprende preferiblemente un proceso de filtración mediante el cual los

grupos de píxeles que tienen un tamaño menor que un tamaño umbral no se consideran fibras individuales.

En una realización preferida, se considera que las fibras individuales en secciones
5 transversales inmediatas pertenecen a la misma fibra unitaria si la distancia entre el
centroide real de la fibra individual de una sección transversal y el centroide estimado
para dicha sección transversal está dentro de un determinado umbral. Sólo puede
considerarse la reunión de fibras individuales en una fibra unitaria cuando hay al menos
tres fibras individuales diferentes ubicadas en diferentes secciones transversales
10 adyacentes que cumplen con los requisitos de umbral.

Si la distancia máxima entre los píxeles de una fibra individual es mayor que la mitad de
la longitud de la fibra, se considera esta fibra individual como fibra unitaria.

15 El método puede comprender además obtener la densidad de fibras dentro del material
compuesto mediante el cálculo de la suma de las longitudes de las fibras unitarias y sus
volúmenes correspondientes, y comparar el volumen de las fibras con el volumen total del
material compuesto.

20 La presente invención proporciona ventajas importantes con respecto a la técnica
anterior:

- Automatización: Usar un único algoritmo implementado en un software de análisis
matemático (MATLAB, OCTAVE, SCILAB o similar), de manera que se automatizan
25 todos los procesos de procesamiento posterior de las exploraciones tomográficas.

- Más precisión: La segmentación de las fibras es más precisa porque este método usa
una técnica de detección predictiva que agrupa los puntos espaciales en diferentes fibras
para obtener posteriormente las orientaciones de fibra. El hecho de usar una técnica
30 predictiva, es decir, de predecir la posición del grupo de puntos que están en la misma
fibra, posibilita separar puntos que pertenecen a diferentes fibras, incluso si hay una
pequeña distancia entre ellos. Agrupando los puntos que pertenecen a una fibra unitaria,
puede determinarse automáticamente la orientación dominante de cada una de estas
fibras usando la recta de interpolación de los puntos.

35

- Ajustable, configurable: Todo el proceso se agrupa en un único algoritmo. Se introducen

criterios de tolerancia como valor de entrada. Por tanto, la precisión del protocolo de análisis puede ajustarse basándose en las dimensiones de la fibra y en la precisión de la exploración por tomografía computarizada.

- 5 La presente invención puede aplicarse a todas las industrias que fabrican o desarrollan cualquier tipo de productos de materiales compuestos en los que un material es un material fibroso y también este material tiene diferente densidad del resto de los materiales por lo que puede segmentarse en la exploración por TC.

10 **Breve descripción de los dibujos**

A continuación se describen muy brevemente una serie de dibujos que ayudan a entender mejor la invención y que están relacionados expresamente con una realización de dicha invención, presentada como ejemplo no limitativo de la misma.

15

La figura 1 muestra la predicción de centroide de un grupo de puntos en una sección.

La figura 2 muestra una explicación del sistema de coordenadas cartesianas tanto globales como locales.

20

La figura 3 muestra la correlación entre el sistema de coordenadas cartesianas globales y locales.

La figura 4 muestra un flujo de diagrama de las etapas realizadas por la presente
25 invención.

La figura 5 muestra imágenes en sección de rayos X superpuestas obtenidas para un ejemplo de aplicación.

30 Las figuras 6A y 6B muestran el número de sección 3 antes y después de la segmentación de las fibras de acero, respectivamente, para el ejemplo de aplicación.

Las figuras 7A y 7B muestran la imagen de la muestra antes de la segmentación de fibras y las fibras separadas del hormigón tras la segmentación, respectivamente, para el
35 ejemplo de aplicación.

La figura 8 muestra grupos de puntos separados en fibras individuales, para el ejemplo de aplicación.

La figura 9 muestra el centroide y el vector de dirección en el plano XY de un conjunto de
5 puntos, para el ejemplo de aplicación.

La figura 10 muestra una imagen de las fibras segmentadas dentro de la muestra completa.

10 La figura 11 representa la recta de interpolación de una fibra.

Las figuras 12A, 12B y 12C muestran los histogramas de ángulos obtenidos a partir de cada una de las fibras con los ejes X, Y y Z, respectivamente.

15 Las figuras 13A, 13B y 13C muestran histogramas de ángulos obtenidos a partir de cada una de las fibras con los ejes radial, circunferencial y longitudinal.

Descripción de una realización preferida de la invención

20 La presente invención se refiere a un método automatizado para evaluar de manera precisa las orientaciones de componentes fibrosos o filamentosos contenidos dentro de un material compuesto, mediante el procesamiento posterior de imágenes exploradas por tomografía computarizada. El método se divide en dos procesos diferentes:

25 1. Exploraciones por tomografía del material compuesto que va a analizarse.

2. Identificación de imágenes.

3. Segmentación de imágenes.

30

4. Agrupación de los puntos.

5. Reunión de los grupos de puntos en diferentes secciones transversales en una misma fibra.

35

6. Obtención de orientaciones.

En primer lugar, se obtienen exploraciones por tomografía del material compuesto. Esta exploración consiste en obtener las imágenes de secciones transversales de la parte o componente que va a analizarse con emisión de rayos X. La separación entre cada
5 sección dependerá del nivel de detalle requerido. Las imágenes obtenidas tienen un formato de escala de grises. Los materiales con densidades superiores tienen absorción aumentada de la radiación emitida y los valores de escala de grises están más próximos al blanco, mientras que los materiales menos densos tienen valores más oscuros en la escala de grises.

10

Desde este punto, todos los procedimientos se llevan a cabo implementando algoritmos matemáticos en un software de análisis matemático (MATLAB, OCTAVE, SCILAB o similar). Se genera un algoritmo para renombrar los archivos de imágenes con un número consecutivo para automatizar el procesamiento de imágenes.

15

En segundo lugar, se realiza una etapa de identificación de imágenes. Las imágenes obtenidas durante el proceso de exploración se convierten en una matriz numérica en la que cada elemento de la serie representa un píxel de la imagen con un valor de escala de grises. Usando un algoritmo se identifican todos los puntos, usando cuatro parámetros:
20 coordenada X, coordenada Y, coordenada Z y el valor de color de gris. La coordenada Z se define como el resultado de multiplicar el número del corte (n) por la distancia de paso entre cortes (Δz).

$$Z = \Delta z \cdot n$$

25

Las coordenadas X e Y se calculan multiplicando la posición de píxel dentro de la matriz por el tamaño de píxel de la imagen.

En tercer lugar, se lleva a cabo una etapa de segmentación de imágenes. La
30 segmentación consiste en separar los diferentes materiales con diferentes densidades, es decir extraer de la matriz el material de fibra. El valor umbral de la escala de grises debe fijarse en el algoritmo. Este valor marca el límite entre un material y otro.

Usando este valor umbral, se separan los puntos de la imagen que corresponden
35 exclusivamente al material fibroso del material compuesto. El resultado final de este proceso es un grupo de secciones que contiene los puntos de material fibroso.

Dependiendo de las densidades de los materiales y del tamaño de la pieza que va a analizarse, la escala de grises de la imagen explorada puede ser variable para el mismo material ubicado en diferentes zonas. Habrá diferencias entre las zonas superficiales y profundas debido a la absorción de rayos X dentro del material. En este caso, para una mejor segmentación, deben fijarse dos o más valores de escala de grises umbrales para cada zona diferente.

En una cuarta etapa, se agrupan los puntos. En cada sección transversal de la parte que va a analizarse se separa cada fibra independientemente. El algoritmo implementado toma un punto arbitrario de la nube de puntos y busca aquellos puntos de los puntos totales que están más próximos a éste, con un límite de tolerancia. El punto dentro de este límite se agrupa con el punto de partida. El algoritmo de búsqueda comienza de nuevo buscando un nuevo punto comparando las distancias con cada punto de la agrupación generada.

Entonces, se eliminan los puntos agrupados del motor de búsqueda. Se repite el proceso hasta que no hay puntos dentro de la tolerancia. Los puntos que están en el límite de separación corresponden a puntos de la misma fibra.

Una vez que los puntos de fibra están agrupados, se toma otro nuevo punto y se repite el proceso de modo que se obtiene un nuevo conjunto de puntos que representan una nueva fibra. Si cualquiera de los grupos tiene menor tamaño que el tamaño esperado, entonces se eliminan del proceso porque corresponden a píxeles que van a ignorarse en el proceso.

En una quinta etapa, se reúnen los grupos de puntos en diferentes secciones transversales correspondientes a la misma fibra. Un algoritmo busca los grupos de puntos de fibra usando una técnica de predicción que predice la posición del centroide de un grupo de puntos en una fibra en una sección inmediatamente por encima de la inicial.

Si se analizan fibras cilíndricas, la imagen de sección transversal de estas fibras produce cortes más o menos inclinados en las fibras dependiendo del grado de orientación con el plano horizontal.

Por tanto, el centroide del nivel superior no estará en las mismas coordenadas X e Y sino que más bien éstas se desplazarán a un valor diferente dependiendo del grado de

inclinación de la fibra cortada. Por tanto, a partir del centroide de un grupo de puntos correspondientes a una fibra y de las dimensiones de la elipse generada en el corte oblicuo de la fibra, es posible estimar las coordenadas del centroide del grupo de puntos de una fibra en el siguiente nivel, tal como se muestra en la figura 1.

5

Usando un algoritmo, se obtiene el centroide C_1 del grupo de puntos inicial. El valor “a” se obtiene mediante el cálculo de la distancia máxima entre todos los puntos y el centroide (por tanto, “a” sería el eje semimayor de la elipse). Se obtiene el ángulo “ α ”:

10

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{\text{diámetro}/2}{a}\right)$$

en el que “diámetro/2” es el radio de la fibra cilíndrica. “L” se define como la proyección de la generatriz G de la fibra en el plano XY. Su valor viene dado por la siguiente expresión:

15

$$L = \frac{\Delta z}{\tan(\alpha)}$$

en la que Δz es el valor de la distancia entre los cortes de exploración (es decir, entre secciones transversales). Los valores de Δx y Δy se obtienen con la recta de interpolación

20 \vec{v} de la nube de puntos que pertenece a dicha sección transversal que da el vector que define el valor del ángulo β con respecto a los ejes X e Y.

$$\beta = \arccos\left(\overline{v_x}\right)$$

25

$$\Delta x = \cos(\beta) \cdot L$$

$$\Delta y = \text{sen}(\beta) \cdot L$$

30 Hay dos posibles soluciones de centroide estimado, puesto que la orientación del corte oblicuo puede ser hacia un lado o hacia el otro. Por tanto, se genera un algoritmo para comprobar cuál de las dos soluciones es correcta. Se establece un nivel de tolerancia para comparar la distancia “d” entre el centroide real C_2 de los grupos de puntos en la

siguiente sección transversal y el centroide estimado C_{2est} .

Para validar el grupo de puntos, es necesario que en el siguiente nivel haya un conjunto de puntos cuyo centroide esté dentro de la tolerancia. Una vez verificado que los tres
5 grupos de puntos en diferentes secciones están en el límite de tolerancia del centroide, se agruparán en una fibra unitaria.

Para aquellas fibras con una orientación paralela al plano XY y su sección transversal genera sólo un único grupo de puntos, y por tanto el proceso anterior puede no ser válido,
10 debe establecerse un nuevo criterio. Si la distancia 2-a (distancia máxima entre los puntos del grupo) es mayor que la mitad de la longitud de la fibra (la longitud de la fibra se conoce previamente) se aísla este grupo como fibra unitaria y su orientación se define por los ángulos α y β .

15 Cuando el algoritmo no encuentra grupos de puntos que estén dentro de la tolerancia, el proceso concluirá y la fibra se determinará completamente. El proceso termina cuando no hay puntos que agrupar.

Finalmente, se obtienen las orientaciones. Una vez que las nubes de puntos están
20 agrupadas en una fibra, se obtiene una recta de ajuste usando un algoritmo. Esta recta define el vector de la orientación de la fibra en los tres ejes de coordenadas.

El algoritmo facilita los dos siguientes datos:

25 1. Vector de orientación: $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$

2. Centro de gravedad: $c = (c_x, c_y, c_z)$

Con esta información, puede obtenerse la orientación de la fibra. Puede mostrarse en dos
30 sistemas de coordenadas diferentes: sistema de coordenadas cartesianas globales y sistema de coordenadas cartesianas locales (véase la figura 2).

A continuación se explican ambos sistemas de coordenadas cartesianas:

35 a. Sistema de coordenadas cartesianas globales

Se obtiene la orientación de la fibra, según los ejes cartesianos globales X, Y y Z:

1. orientación en el eje X α_x : correspondiente al ángulo entre la fibra y el eje X.

5

2. orientación en el eje Y α_y : correspondiente al ángulo entre la fibra y el eje Y.

3. orientación en el eje Z α_z : correspondiente al ángulo entre la fibra y el eje Z.

10 La orientación de esta fibra se obtiene de la siguiente forma:

$$\alpha_x = \frac{v_x}{|\vec{v}|}$$

$$\alpha_y = \frac{v_y}{|\vec{v}|}$$

$$\alpha_z = \frac{v_z}{|\vec{v}|}$$

15 Mediante la repetición de este proceso para todas las fibras, se obtiene la orientación de todas ellas. Para evaluar la orientación dominante de las fibras, se representa un histograma para cada una de las tres direcciones. En la abscisa se recoge el ángulo y en la ordenada, la frecuencia de aparición.

20 La dirección dominante de las fibras corresponde a los ángulos que muestran la mayor frecuencia de aparición.

Además, se define la eficiencia de las fibras en cada una de las tres direcciones:

1. eficiencia en el eje X e_x : según el eje X.

25

2. eficiencia en el eje Y e_y : según el eje Y.

3. eficiencia en el eje Z e_z : según el eje Z.

Estos valores se obtienen según las siguientes ecuaciones:

$$e_x = \sum_{i=1}^{N_b} (2 \cdot f_x(\alpha_{x,i}) \cdot \cos(\alpha_{x,i}))$$

$$e_y = \sum_{i=1}^{N_b} (2 \cdot f_y(\alpha_{y,i}) \cdot \cos(\alpha_{y,i}))$$

$$e_z = \sum_{i=1}^{N_b} (2 \cdot f_z(\alpha_{z,i}) \cdot \cos(\alpha_{z,i}))$$

5

en las que:

N_b : número de barras del histograma

10 $f_x(\alpha_{x,i})$: frecuencia de cada barra del histograma correspondiente a la orientación en el eje X.

$f_y(\alpha_{y,i})$: frecuencia de cada barra del histograma correspondiente a la orientación en el eje Y.

15

$f_z(\alpha_{z,i})$: frecuencia de cada barra del histograma correspondiente a la orientación en el eje Z.

20 El valor de eficiencia puede variar entre 0 y 2. Un valor de 2 indica que las fibras están completamente alineadas con respecto al eje correspondiente. Un valor de 1 indica que las fibras no están orientadas en este eje en absoluto. Y un valor de 0 indica que las fibras están orientadas en una dirección perpendicular al eje correspondiente.

b. Sistema de coordenadas cartesianas locales

25

En algunas aplicaciones puede ser interesante conocer la dirección dominante de la fibra en un sistema de coordenadas cartesianas locales, en el que el eje X' corresponde a la dirección radial, el eje Y' corresponde a la dirección circunferencial y el Z' corresponde a la dirección vertical. Esto ocurre, por ejemplo, en muestras que tienen un contorno

circular exterior y/o interior. En este caso, la fibra debe orientarse en las direcciones radial y circunferencial. Usando este sistema de coordenadas cartesianas locales puede observarse esta orientación, pero este fenómeno no puede observarse usando un sistema de coordenadas cartesianas globales.

5

En primer lugar, es necesario definir el sistema de coordenadas cartesianas locales. La figura 3 muestra la correlación entre el sistema de coordenadas cartesianas globales y locales.

10 A continuación, es necesario redefinir el vector de orientación $\vec{v}' = (v_{x'}, v_{y'}, v_{z'})$, según este sistema de coordenadas:

Se obtiene la orientación de la fibra, según los ejes cartesianos locales X', Y' y Z':

15 1. orientación en el eje X' $\alpha_{x'}$: correspondiente al ángulo entre la recta y el eje X'.

2. orientación en el eje Y' $\alpha_{y'}$: correspondiente al ángulo entre la recta y el eje Y'.

3. orientación en el eje Z' $\alpha_{z'}$: correspondiente al ángulo entre la recta y el eje Z'.

20

La orientación de esta fibra se obtiene de la siguiente forma:

$$\alpha_{x'} = \frac{v_{x'}}{|\vec{v}'|}$$

$$\alpha_{y'} = \frac{v_{y'}}{|\vec{v}'|}$$

$$\alpha_{z'} = \frac{v_{z'}}{|\vec{v}'|}$$

25 Mediante la repetición de este proceso para todas las fibras, se obtiene la orientación de todas ellas. Además, se define la eficiencia de las fibras en cada una de las tres direcciones:

1. eficiencia en el eje X' $e_{x'}$: según el eje X'.

2. eficiencia en el eje Y' $e_{y'}$: según el eje Y'.

3. eficiencia en el eje Z' $e_{z'}$: según el eje Z'.

5

Estos valores se obtienen según las siguientes ecuaciones:

$$e_{x'} = \sum_{i=1}^{N_b} (2 \cdot f_{x'}(\alpha_{x',i}) \cdot \cos(\alpha_{x',i}))$$

$$e_{y'} = \sum_{i=1}^{N_b} (2 \cdot f_{y'}(\alpha_{y',i}) \cdot \cos(\alpha_{y',i}))$$

$$e_{z'} = \sum_{i=1}^{N_b} (2 \cdot f_{z'}(\alpha_{z',i}) \cdot \cos(\alpha_{z',i}))$$

10 en las que:

N_b : número de barras del histograma

15 $f_{x'}(\alpha_{x',i})$: frecuencia de cada barra del histograma correspondiente a la orientación en el eje X.

$f_{y'}(\alpha_{y',i})$: frecuencia de cada barra del histograma correspondiente a la orientación en el eje Y.

20 $f_{z'}(\alpha_{z',i})$: frecuencia de cada barra del histograma correspondiente a la orientación en el eje Z.

El valor de eficiencia puede variar entre 0 y 2. Un valor de 2 indica que las fibras están completamente alineadas con respecto al eje correspondiente. Un valor de 1 indica que las fibras no están orientadas en este eje en absoluto. Y un valor de 0 indica que las fibras están orientadas en una dirección perpendicular al eje correspondiente.

La figura 4 muestra esquemáticamente las diferentes etapas del presente método.

Todo el proceso está completamente automatizado, por lo que la determinación de las orientaciones dominantes en una muestra puede realizarse en un tiempo muy corto y con alta fiabilidad (sin incertidumbres humanas).

5

Además, el volumen de las fibras se obtiene multiplicando la longitud medida de las fibras por su diámetro y por el número de fibras obtenidas. La densidad de fibra es la razón del volumen de fibra y el volumen total de la muestra.

10

Se desarrolló una aplicación práctica del proceso en una muestra cilíndrica de 100x200 mm. El material usado para obtener la muestra es hormigón reforzado con fibras de acero. Las fibras son DRAMIX 45/50 con un diámetro de 1,05 mm y el contenido en fibra es del 1% del volumen de hormigón.

15

En primer lugar, se explora la muestra usando tomografía computarizada en un equipo de rayos X (equipo Y.CT Compact de YXLON). Se realiza un corte en sección de la muestra horizontalmente con un intervalo de hueco de 1 mm. Como la muestra tiene 200 mm de alto, la exploración proporciona 200 imágenes en sección transversal. Las imágenes obtenidas son de 8 bit con una resolución de 1024x1024 píxeles. La figura 5 muestra las

20

imágenes de cortes en sección por rayos X superpuestas obtenidas.

En segundo lugar, se obtienen los puntos en nube de cada una de las imágenes de las secciones transversales. En este caso, el tamaño de píxel es de 0,12445 mm; la coordenada Z de cada imagen es de entre 1 y 200 mm.

25

En tercer lugar, se realiza la segmentación de fibras del hormigón, usando 90 como valor umbral de grises dentro de un intervalo de entre 0 y 255 en la escala de grises. Las figuras 6A y 6B muestran el número de sección 3 antes y después de la segmentación de las fibras de acero, respectivamente. Las figuras 7A y 7B muestran la imagen de la muestra antes de la segmentación de las fibras y las fibras separadas del hormigón tras la segmentación, respectivamente.

30

En cuarto lugar, se lleva a cabo la segmentación de los grupos de puntos en fibras individuales, fijando una distancia máxima entre puntos de 0,40 mm. La figura 8 muestra

35

grupos de puntos separados en fibras individuales.

A continuación, se agrupan las fibras usando el algoritmo de predicción de los centroides de grupos de puntos. La figura 9 muestra el centroide y el vector de dirección en el plano XY de un conjunto de puntos. La figura 10 muestra una imagen de las fibras segmentadas dentro de la muestra completa.

5

En una etapa posterior, se obtiene la recta de interpolación de cada fibra, tal como se muestra en la figura 11.

10 A continuación, se obtienen los histogramas de orientación según los ejes de coordenadas. Las figuras 12A, 12B y 12C muestran los histogramas de ángulos obtenidos a partir de cada una de las fibras con los ejes X, Y y Z.

15 Con los resultados obtenidos pueden tenerse las direcciones del sistema de coordenadas cartesianas locales con respecto al eje central de la muestra, tal como se muestra en las figuras 13A, 13B y 13C (histogramas de ángulos obtenidos a partir de cada una de las fibras con los ejes radial, circunferencial y longitudinal, respectivamente).

REIVINDICACIONES

1. Método implementado por ordenador para obtener las orientaciones de fibras dentro de materiales compuestos usando exploración por tomografía computarizada, caracterizado porque comprende:
- 5
- obtener imágenes de exploración por tomografía de diferentes secciones transversales del material compuesto;
- 10
- convertir dichas imágenes en un conjunto de puntos, representando cada punto un píxel de la imagen con su valor de escala de grises y coordenadas tridimensionales correspondientes;
- 15
- extraer del conjunto de puntos los píxeles correspondientes al material de fibra mediante el uso de al menos un valor de escala de grises umbral;
- 20
- agrupar los píxeles del material de fibra correspondientes a la misma sección transversal en fibras individuales según criterios de distancia entre píxeles;
- 25
- reunir las fibras individuales ubicadas en diferentes secciones transversales y correspondientes a la misma fibra unitaria mediante la estimación de la posición del centroide de cada fibra individual en una sección transversal inmediata;
- 30
- obtener la recta de interpolación de cada nube de píxeles que pertenece a una fibra unitaria y, a partir de dicha recta de interpolación, obtener la orientación de cada fibra unitaria.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el conjunto de puntos se dispone en una matriz 3D.
- 30
3. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las imágenes de exploración por tomografía de las secciones transversales se toman con una distancia de paso determinada (Δz) entre imágenes.
- 35
4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se fijan diferentes valores de escala de grises umbrales para diferentes zonas del material

compuesto.

5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los criterios de distancia para la agrupación de píxeles en fibras individuales comprenden comprobar
5 aquellos píxeles en la misma sección transversal que están dentro de un determinado umbral de distancia.

6. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la agrupación de píxeles en fibras individuales comprende un proceso de filtración mediante el cual los
10 grupos de píxeles que tienen un tamaño menor que un tamaño umbral no se consideran fibras individuales.

7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se considera que las fibras individuales en secciones transversales inmediatas pertenecen a la misma fibra
15 unitaria si la distancia entre el centroide real (C_2) de la fibra individual de una sección transversal y el centroide estimado (C_{2est}) para dicha sección transversal está dentro de un determinado umbral (d).

8. Método según la reivindicación 7, en el que sólo se considera la reunión de fibras
20 individuales en una fibra unitaria cuando hay al menos tres fibras individuales diferentes ubicadas en diferentes secciones transversales adyacentes que cumplen con los requisitos de umbral (d).

9. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que si la distancia
25 máxima (2a) entre los píxeles de una fibra individual es mayor que la mitad de la longitud de la fibra, se considera esta fibra individual como fibra unitaria.

10. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además obtener la densidad de fibras dentro del material compuesto mediante el cálculo de la
30 suma de las longitudes de las fibras unitarias y sus volúmenes correspondientes, y comparar el volumen de las fibras con el volumen total del material compuesto.

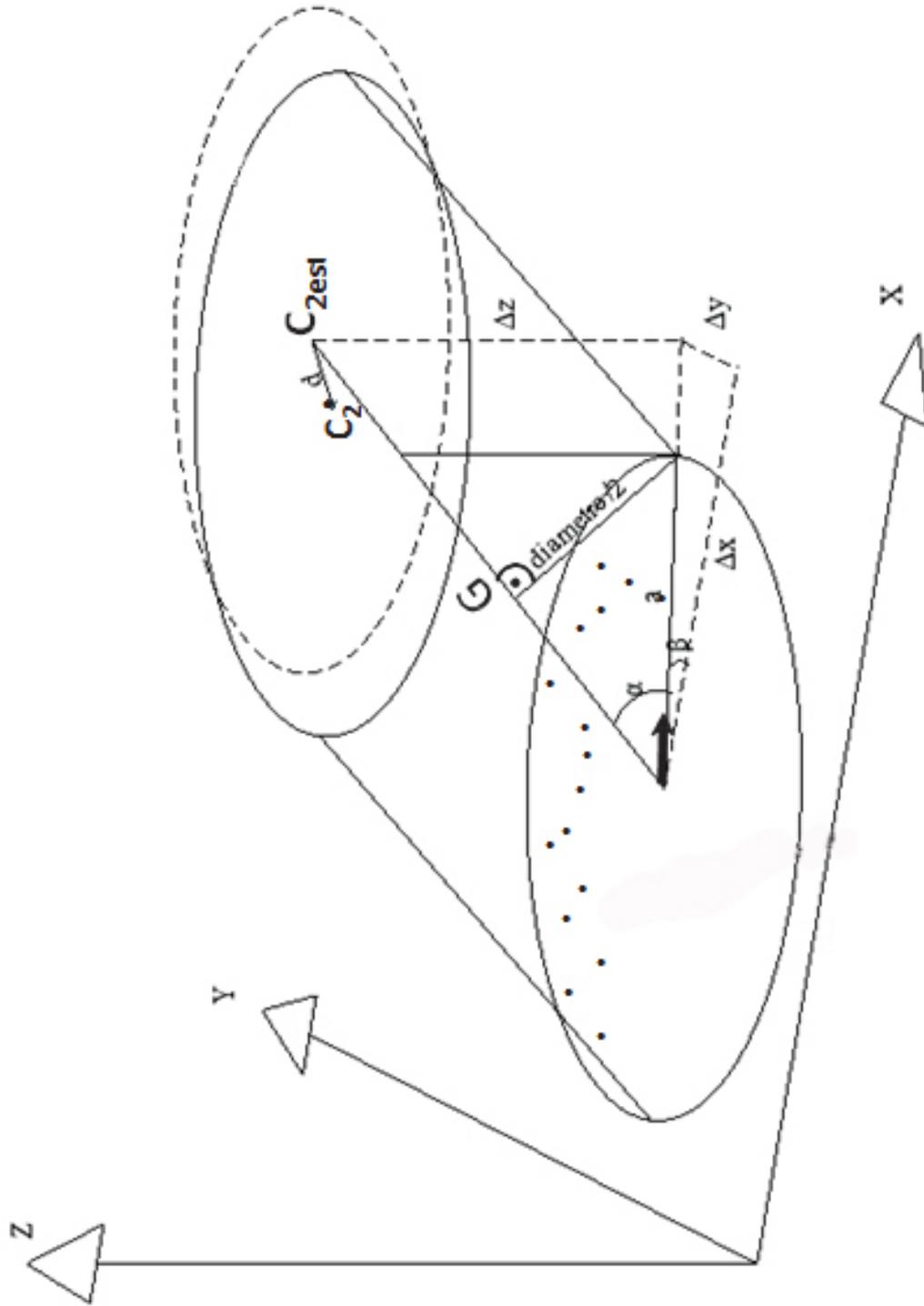


FIG. 1

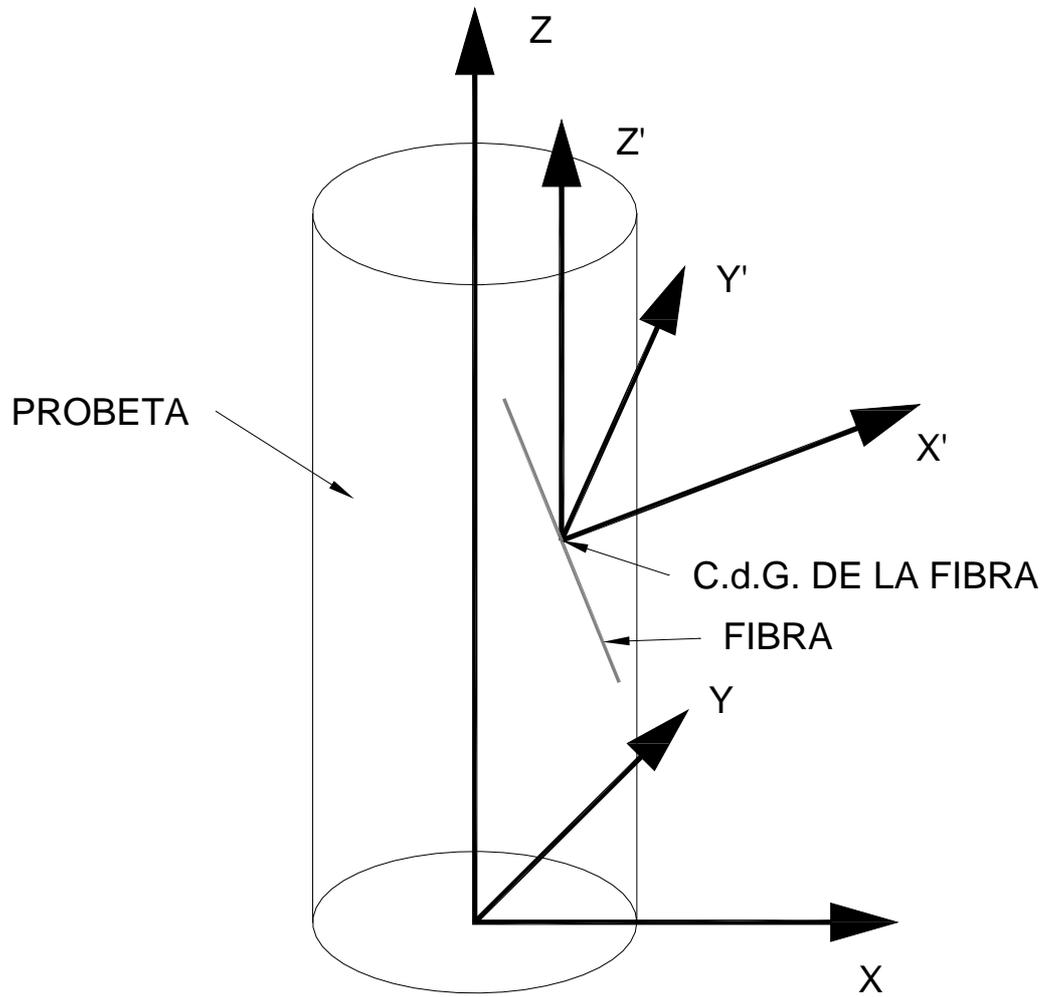


FIG. 2

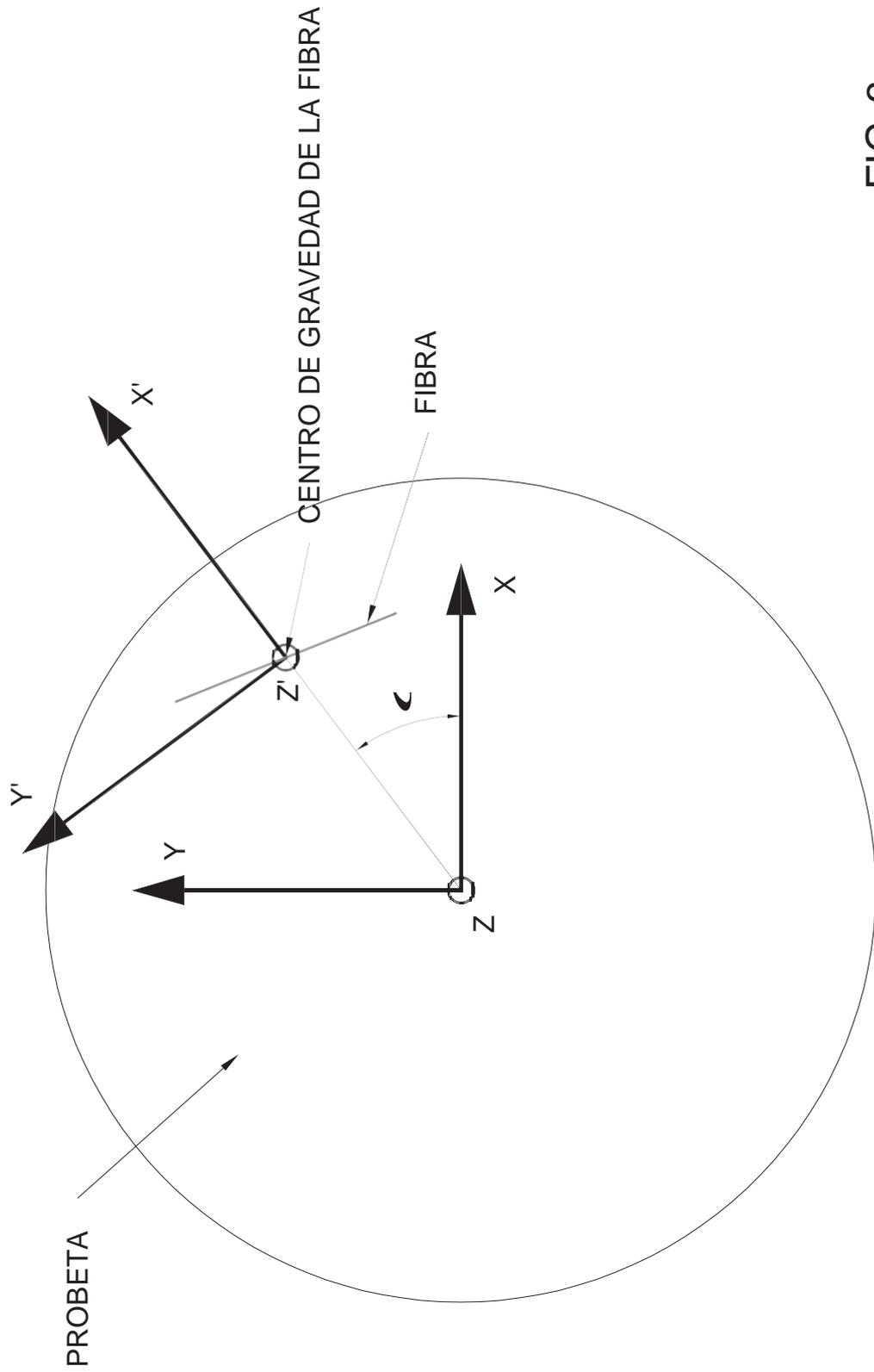


FIG. 3

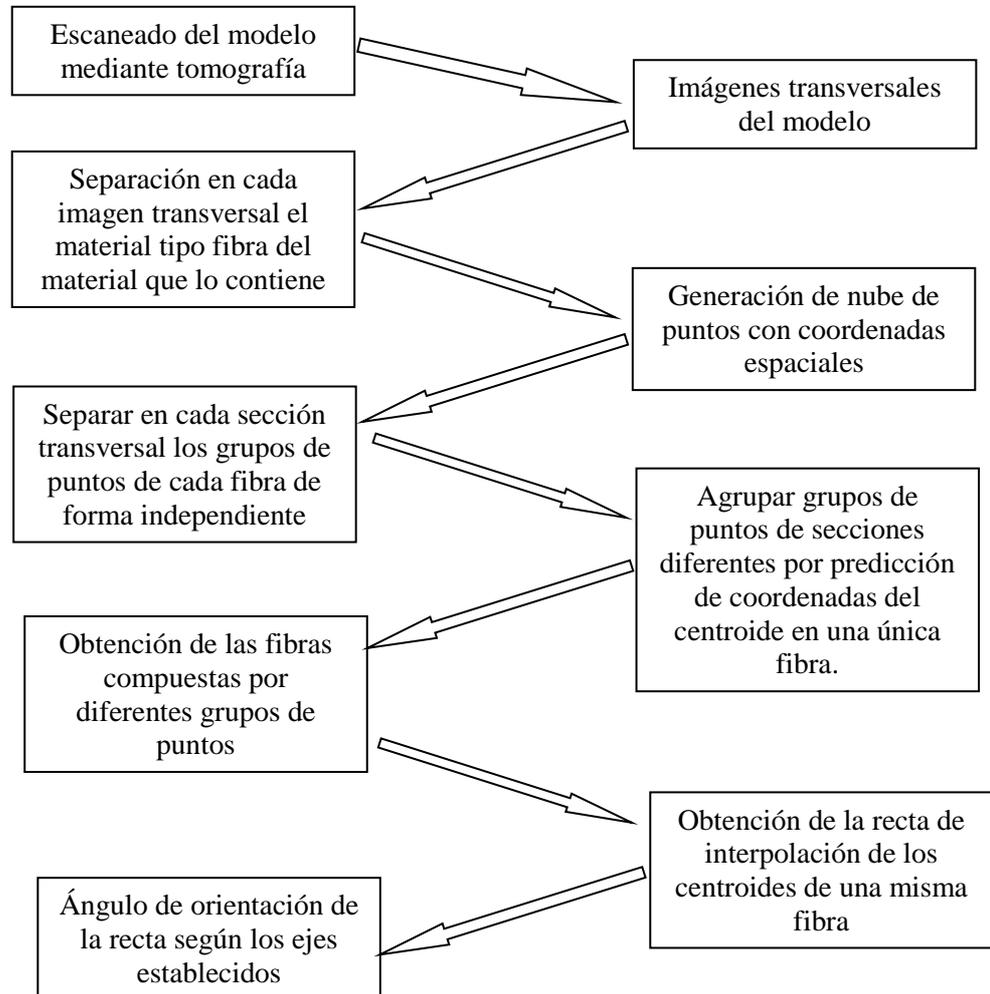


Fig 4

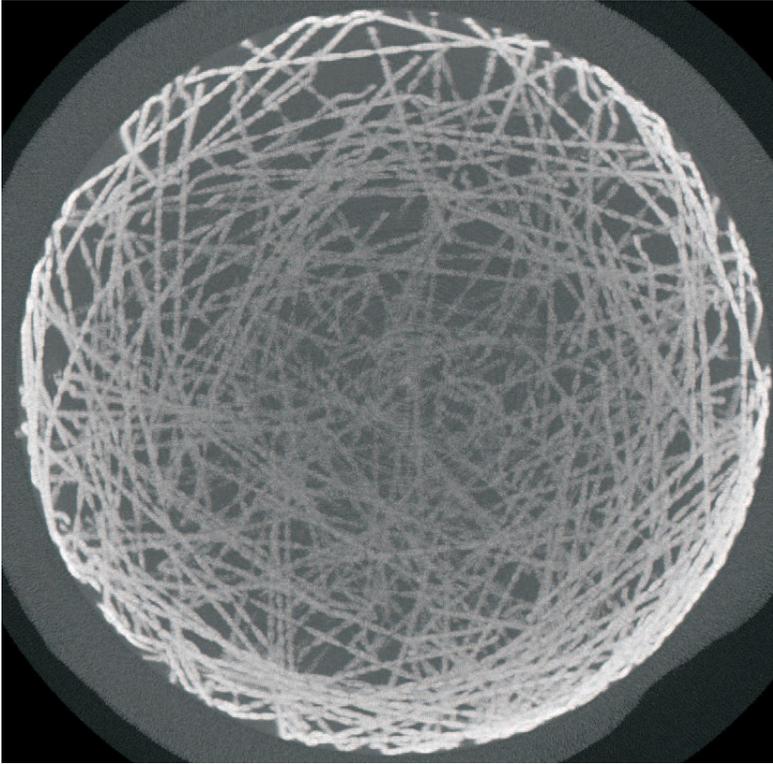


FIG. 5

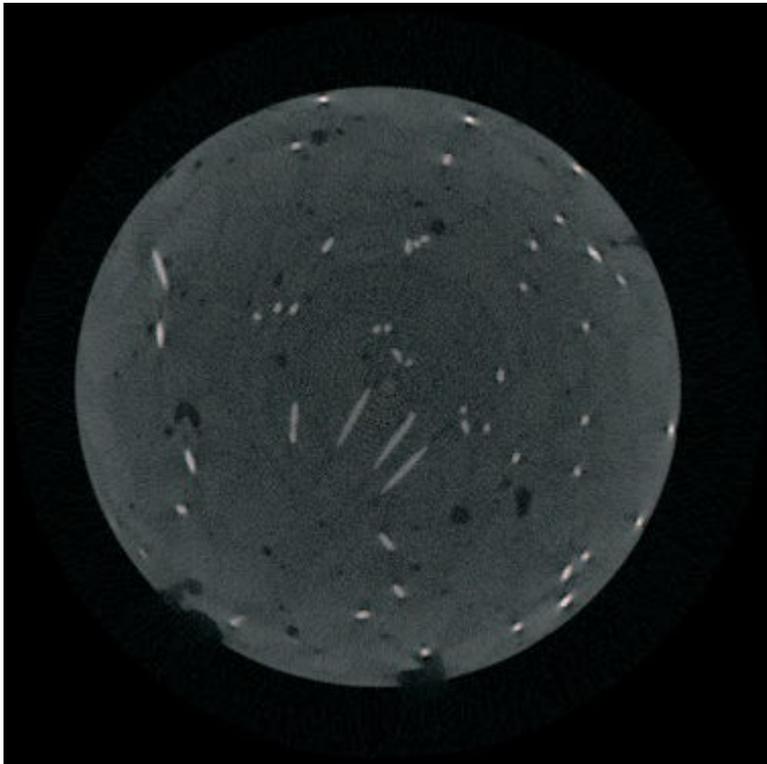


FIG. 6A

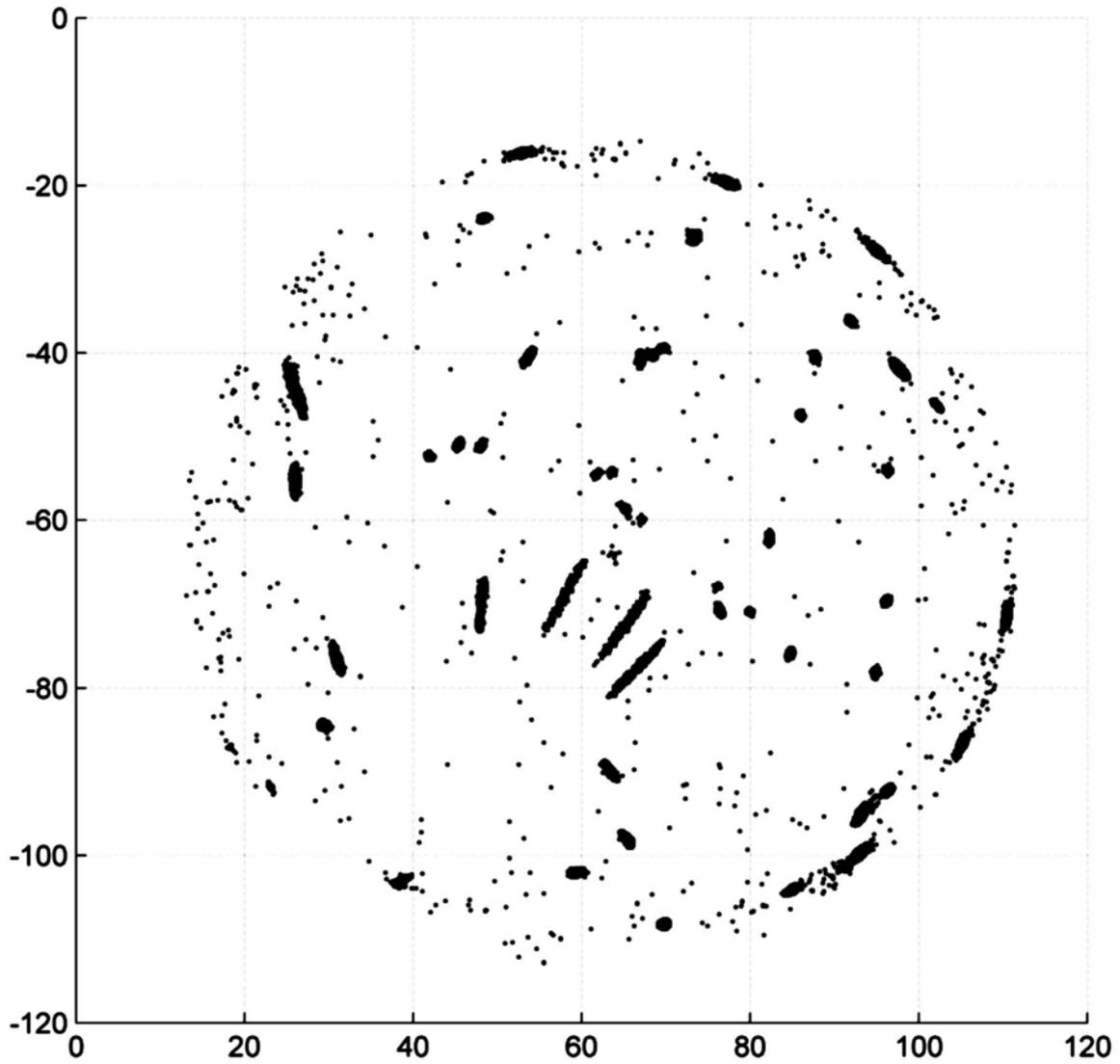


FIG. 6B



FIG. 7A

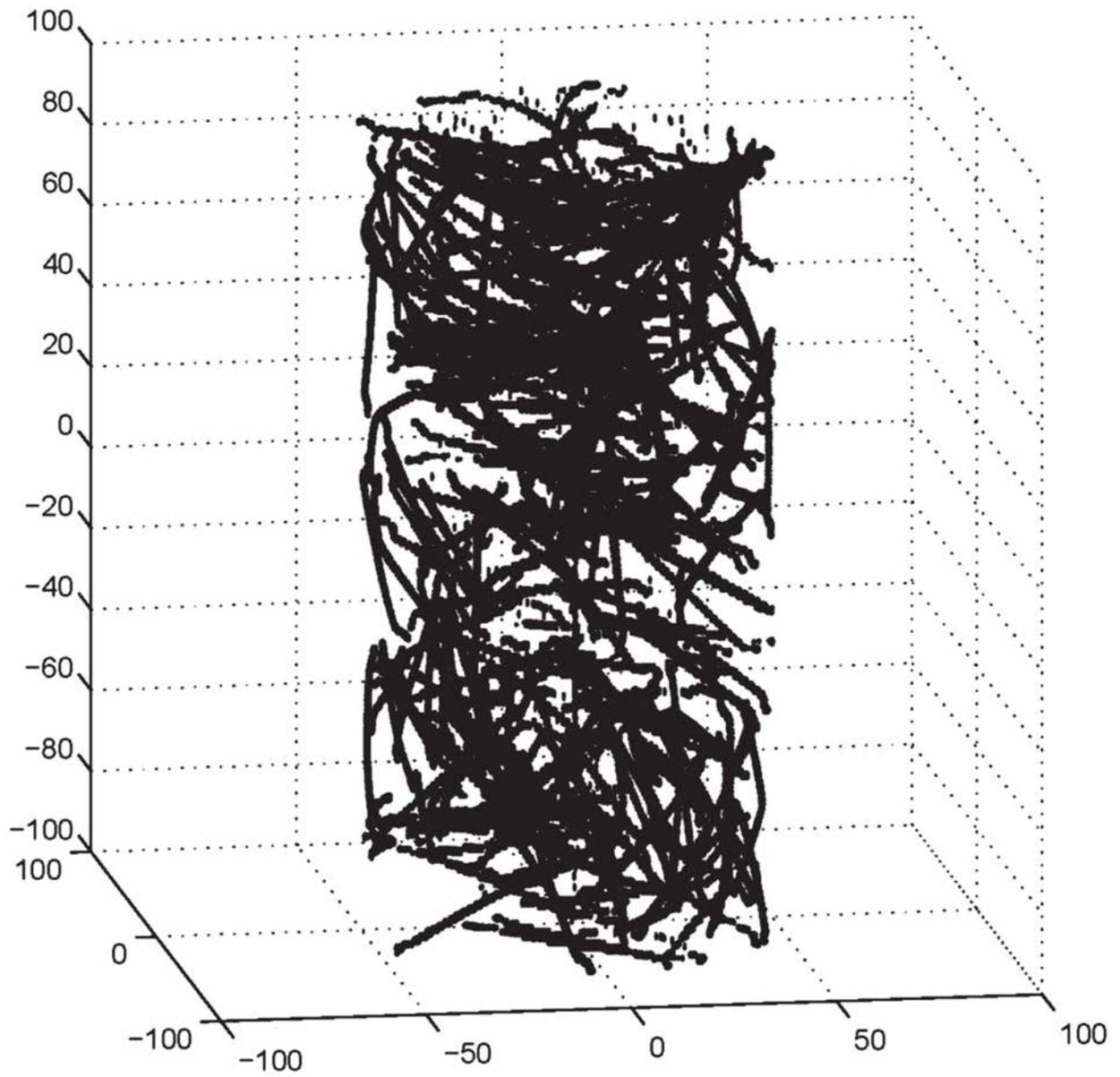


FIG. 7B

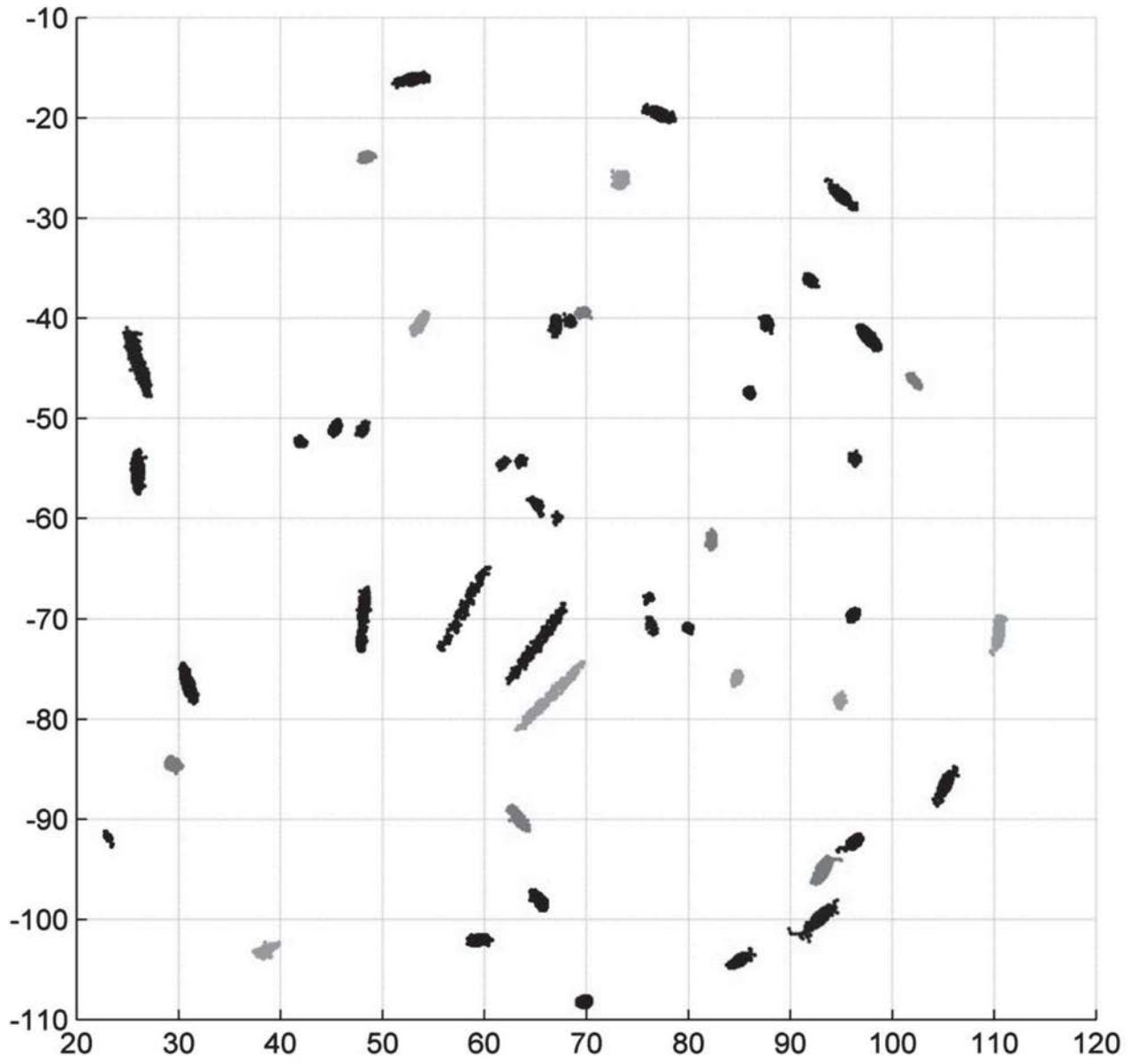


FIG. 8

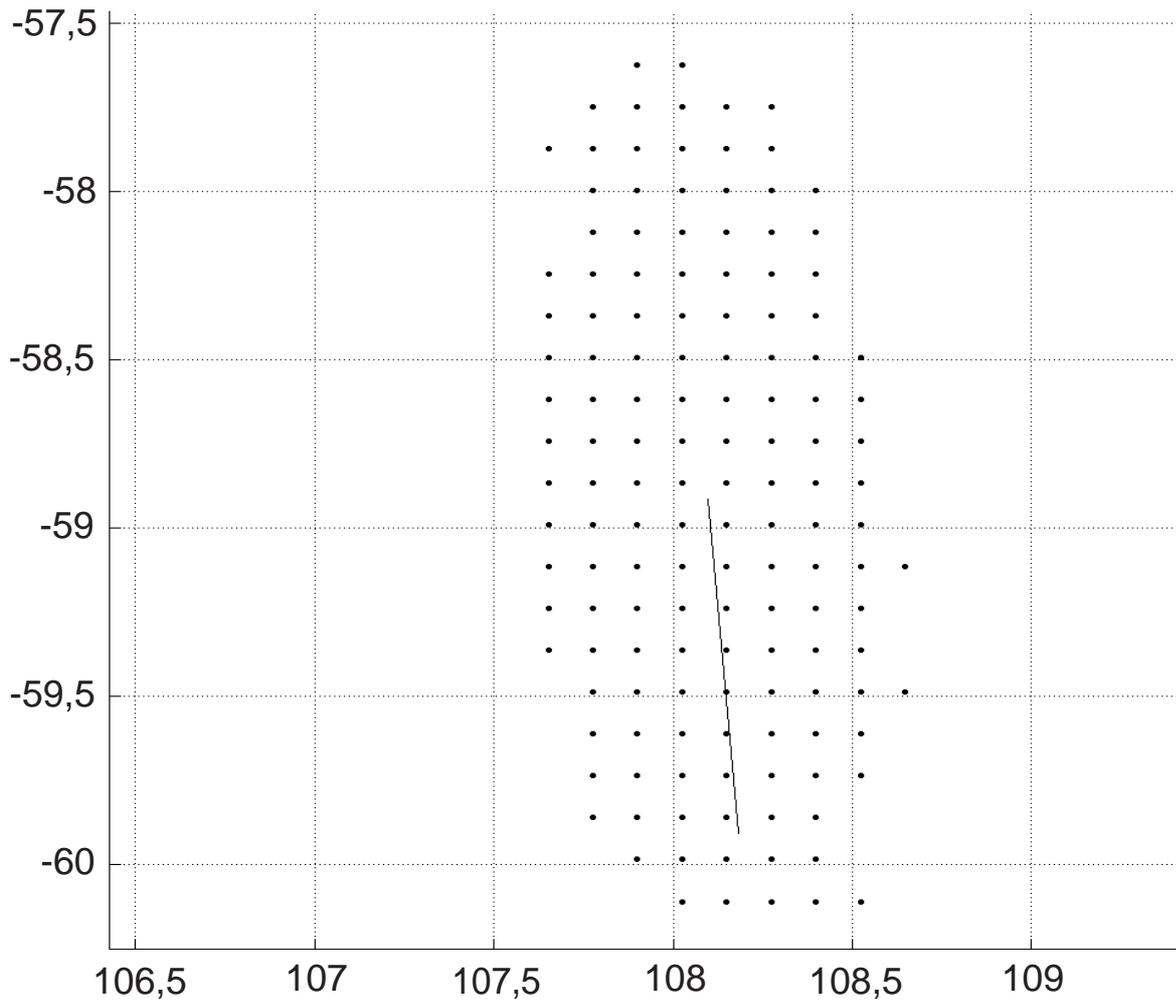


FIG. 9

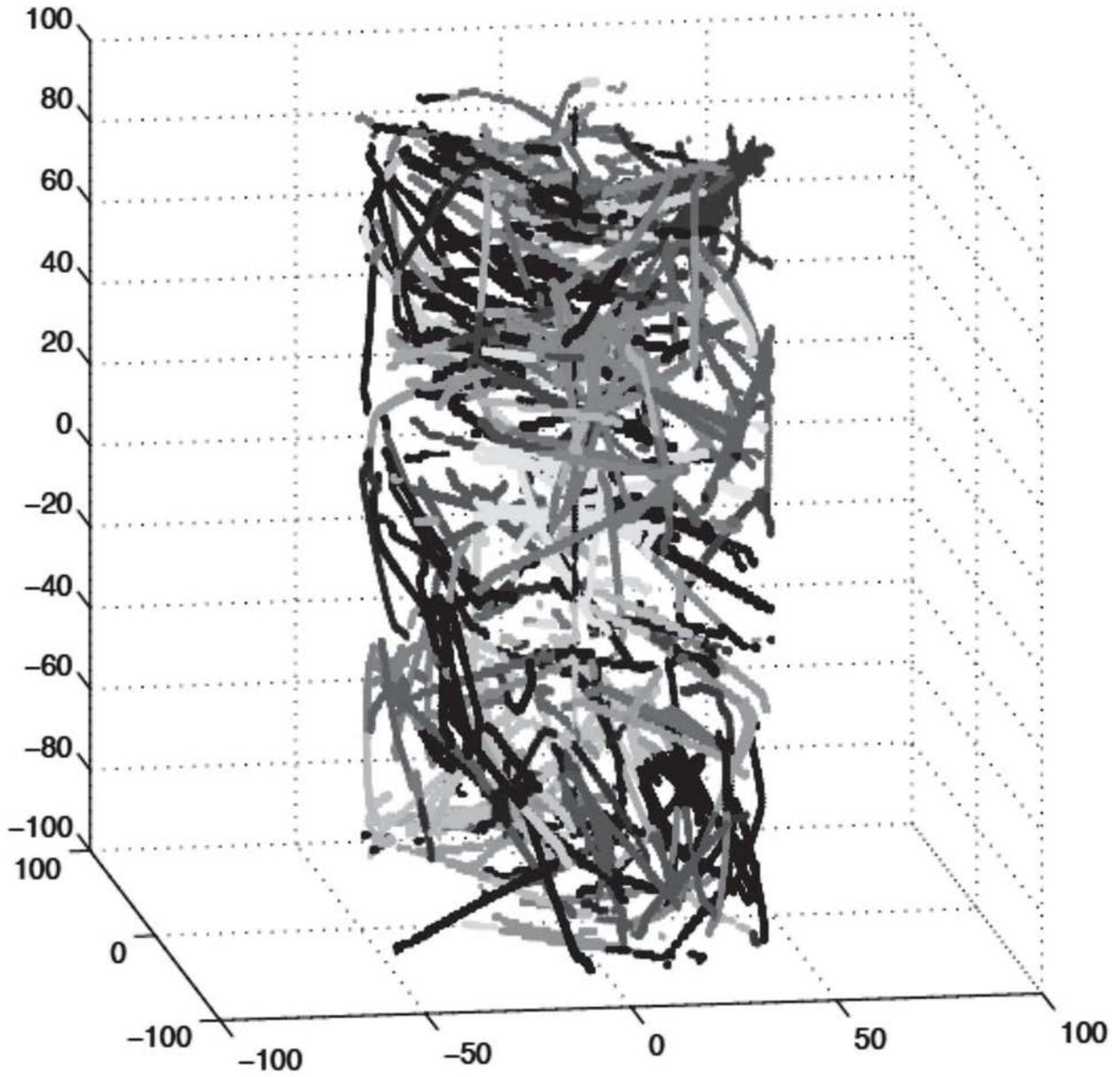


FIG. 10

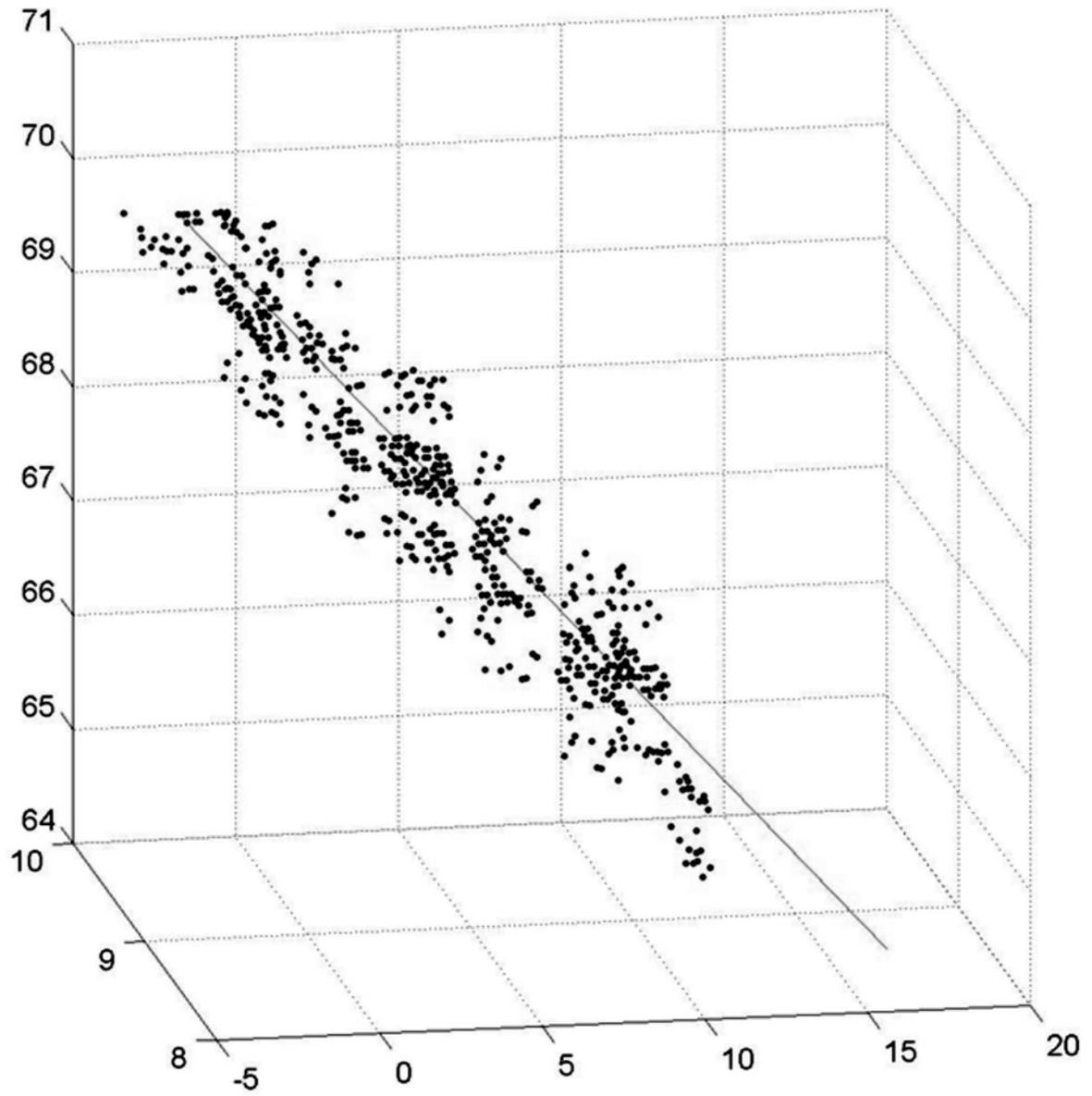


FIG. 11

Histograma X

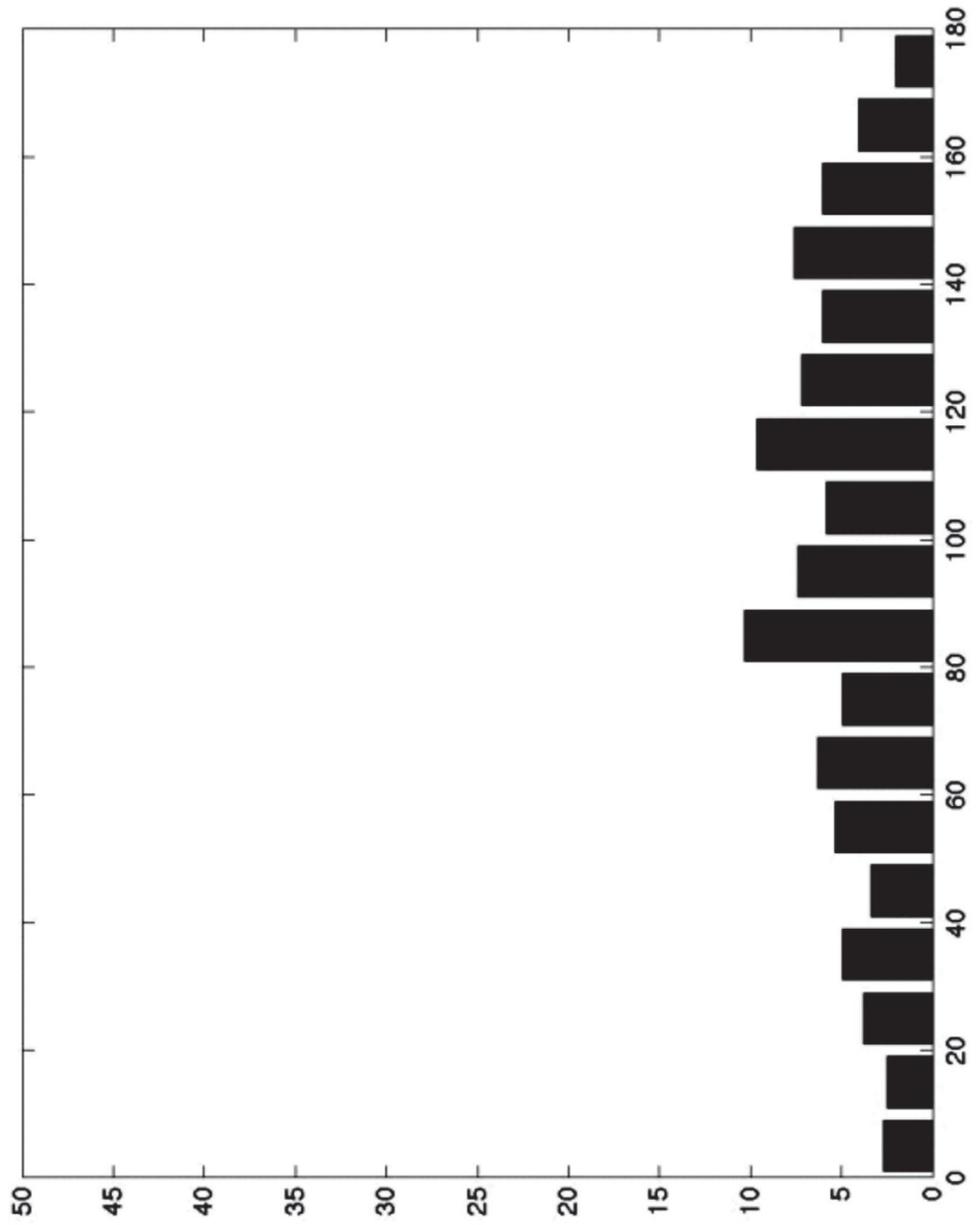


FIG. 12A

Histograma Y

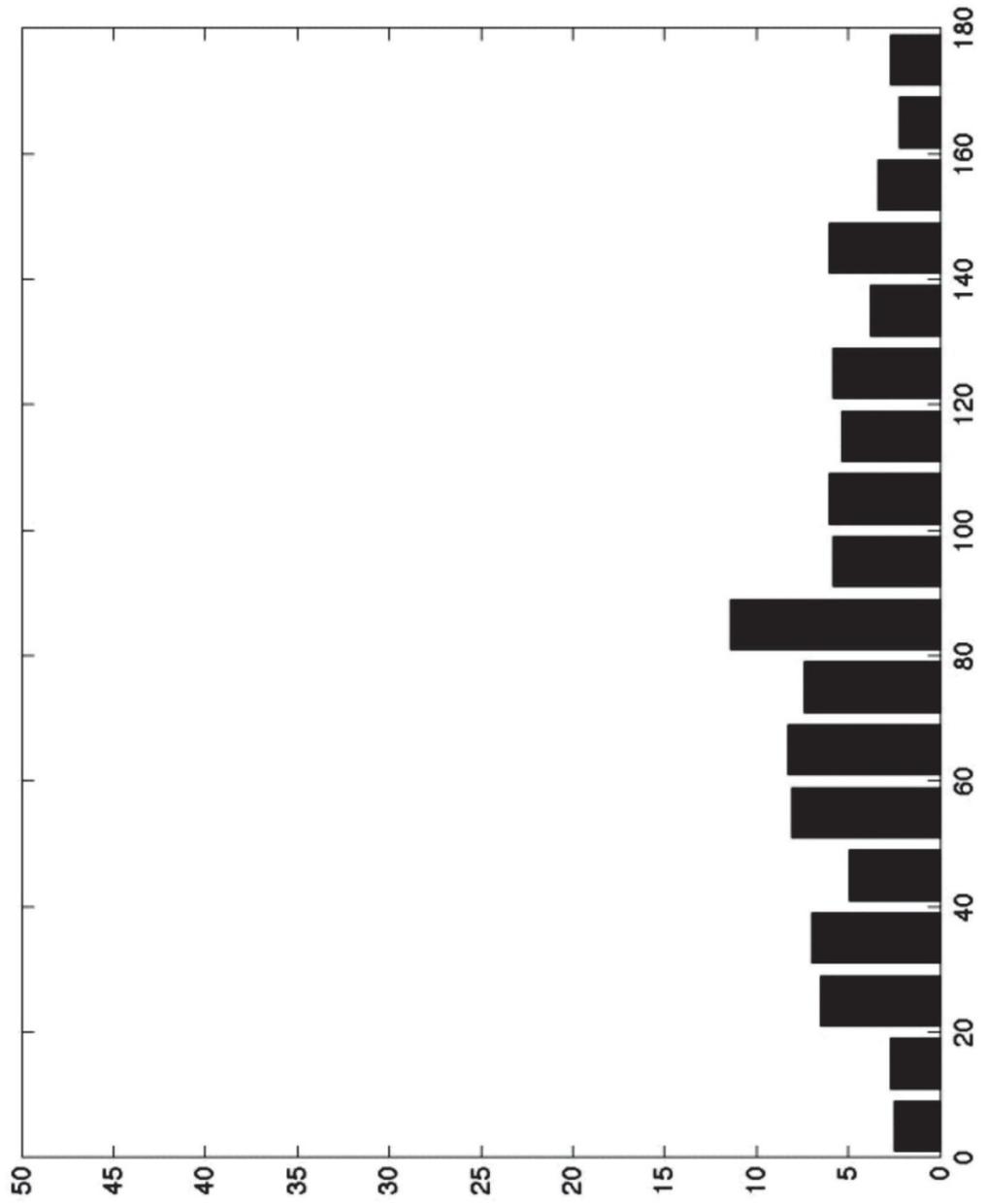


FIG. 12B

Histograma Z

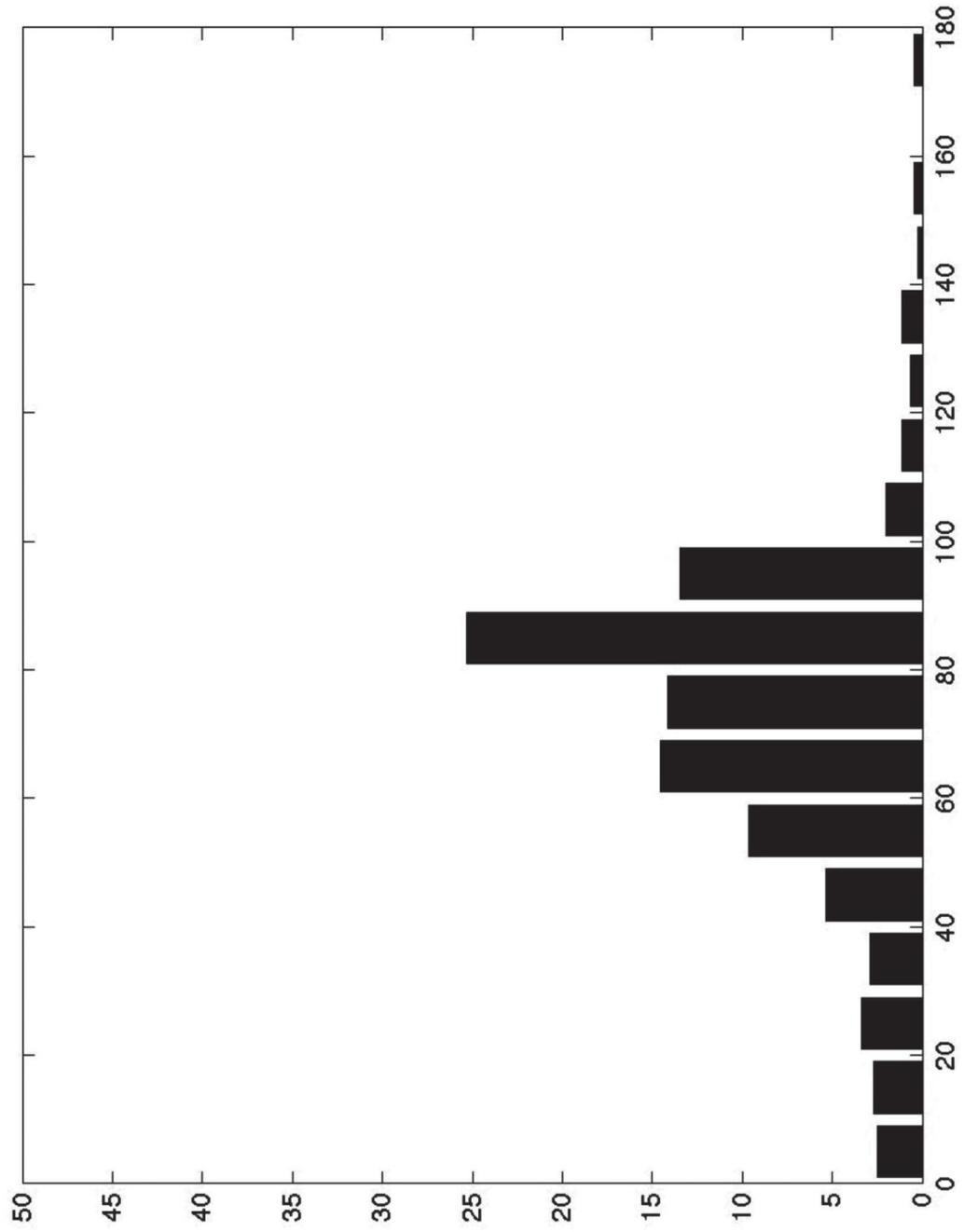


FIG. 12C

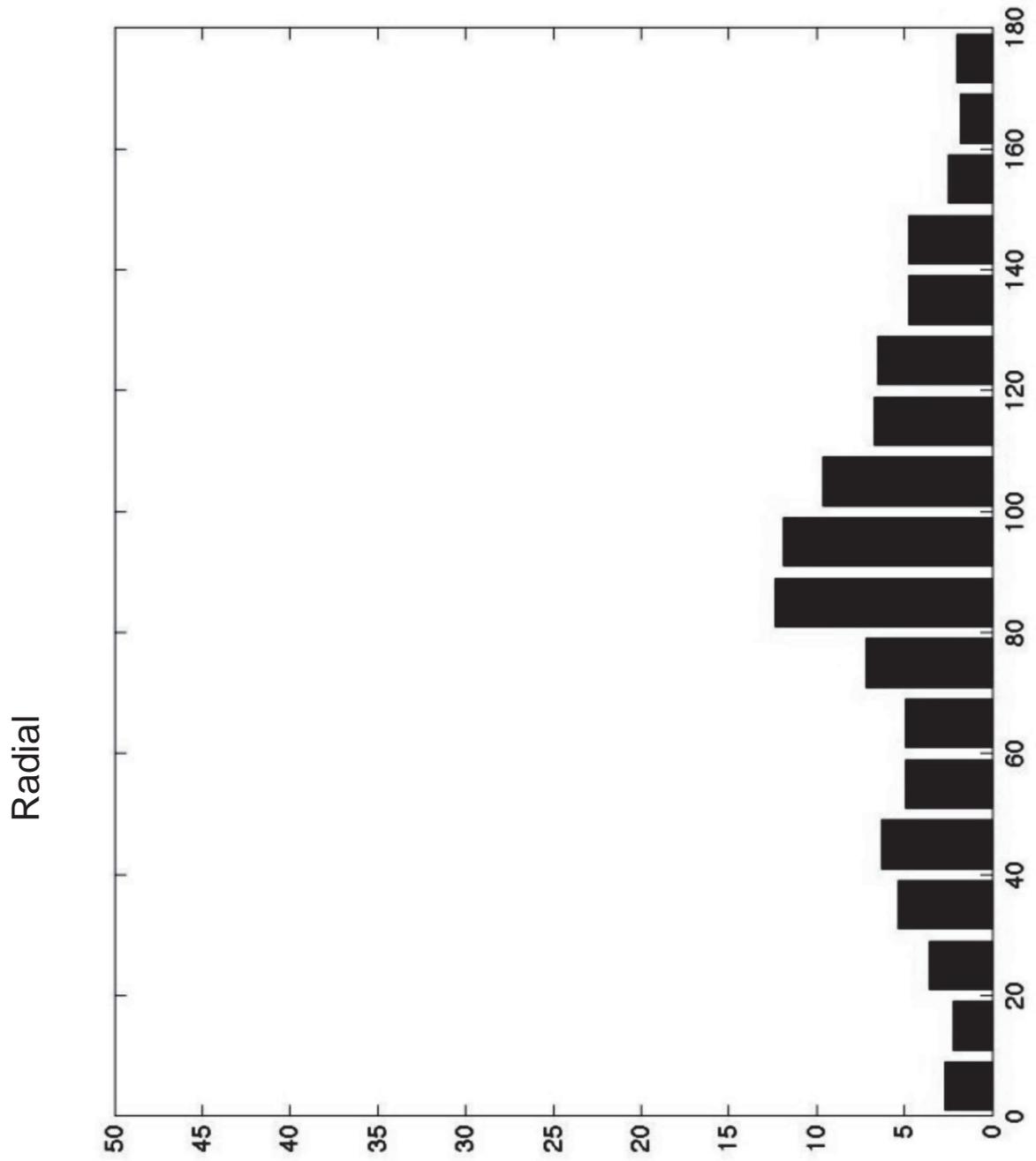


FIG. 13A

Circunferencial

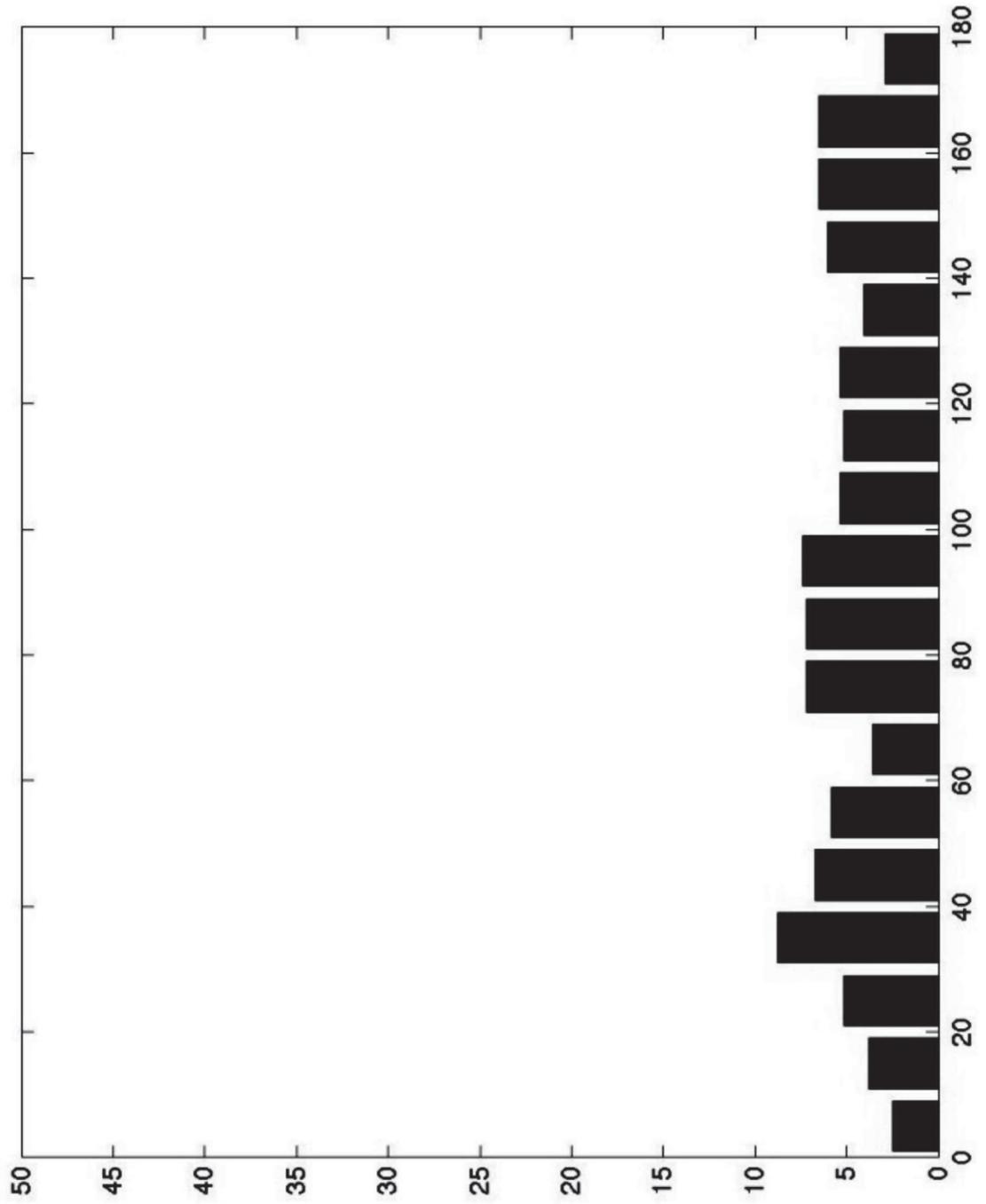


FIG. 13B

Longitudinal

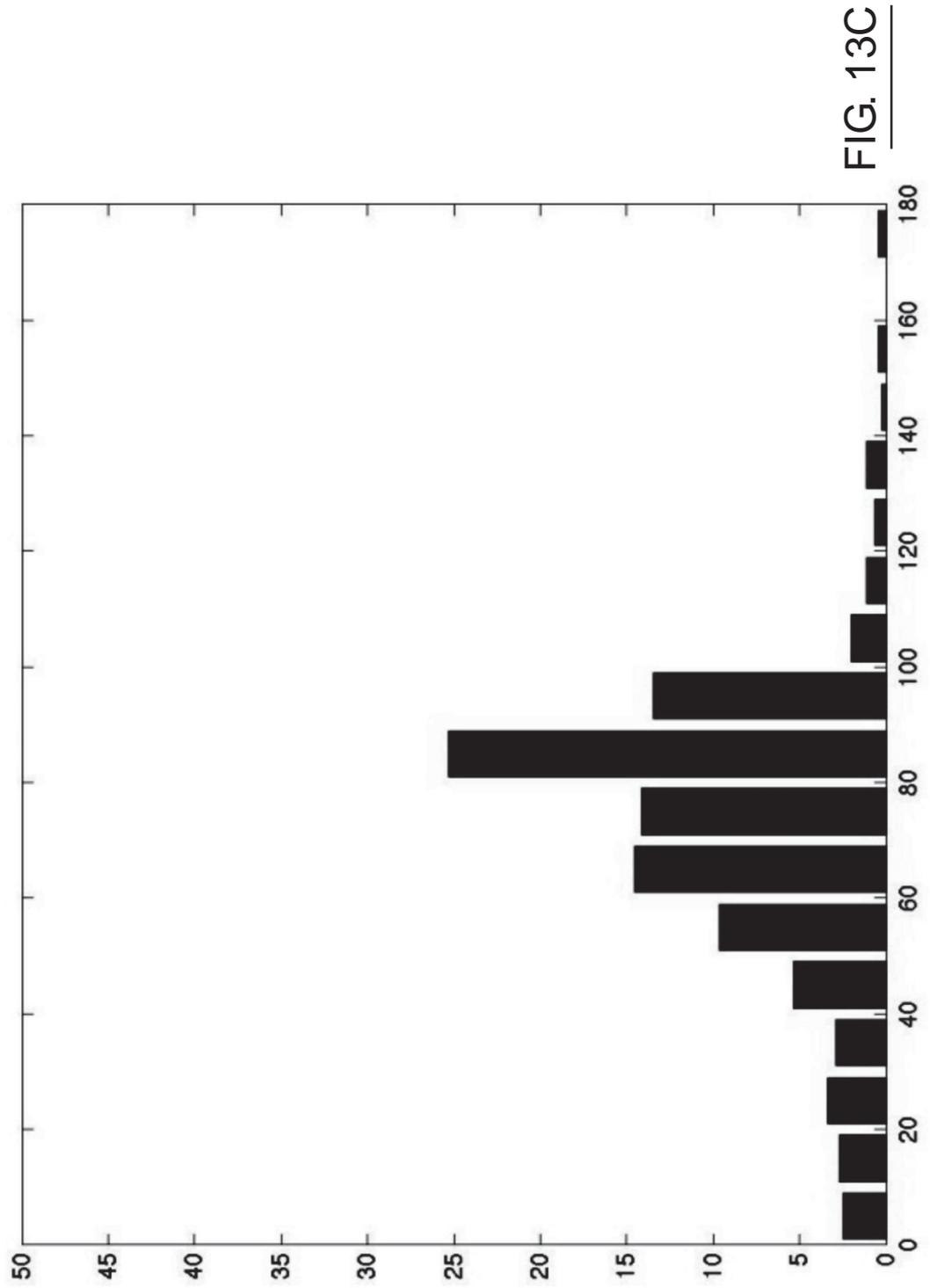


FIG. 13C