



Identificación de la anisotropía en componentes de automoción mediante ensayos dinámicos

David Miñón¹, Jon García-Barruetabeña¹, Beatriz Achiaga¹

¹Departamento de Mecánica, Diseño y Organización Industrial, Universidad de Deusto, david.minon@deusto.es, jgarcia.barruetabena@deusto.es, beatriz.achiaga@deusto.es

Este artículo presenta una metodología de identificación de la anisotropía introducida por el proceso de fabricación mediante ensayos dinámicos. Se fundamenta en la identificación del comportamiento no lineal en puntos críticos de componentes de automoción. Una ventaja de esta metodología es que es especialmente útil para componentes manufacturados, donde queremos considerar el impacto del proceso de fabricación, especialmente en puntos críticos del componente, como cambios de secciones y curvaturas. Como resultado, podemos identificar cambios en las propiedades dinámicas derivado de la anisotropía en componentes de automoción clave para garantizar el confort de los usuarios, así como el comportamiento dinámico del vehículo.

1. Introducción

La anisotropía en los componentes de automoción, asociada a los procesos de forja y fundición, afecta significativamente a las propiedades mecánicas y dinámicas de los componentes manufacturados. Esta característica, inherente a los procesos de fabricación, tiene un impacto crucial en el rendimiento estructural y funcional de los componentes, especialmente bajo condiciones dinámicas, de fatiga y carga dinámica. En la forja, la deformación plástica orienta los granos del material, generando anisotropía favorable en resistencia y tenacidad, lo que mejora el desempeño en direcciones específicas [1]. En la fundición, la solidificación no uniforme y las tensiones residuales producen anisotropía estructural, la cual impacta en la resistencia y durabilidad resultante del componente fabricado [2].

En el proceso de forja, el material se somete a deformación plástica controlada, lo que orienta los granos de manera preferencial. Este flujo de material genera una estructura con propiedades mecánicas que varían según la dirección respecto a la orientación de los granos. Factores como la temperatura de forjado, la velocidad de deformación y las condiciones de enfriamiento contribuyen a esta anisotropía. En la forja, la orientación de los granos suele incrementar la resistencia y la ductilidad en la dirección de deformación, mejorando la capacidad del material para soportar cargas. Sin embargo, puede haber debilidades en las direcciones perpendiculares [3].

La anisotropía en la fundición surge principalmente de la solidificación no uniforme del material. Durante este proceso, los gradientes térmicos generan estructuras dendríticas y tensiones residuales, así como segregación de elementos químicos. Estas variaciones microscópicas introducen propiedades no homogéneas en el material, especialmente en componentes grandes o complejos. En la fundición, las tensiones residuales y las zonas de menor cohesión derivadas de la anisotropía pueden reducir tanto la resistencia como la ductilidad, particularmente en áreas con porosidad o segregación química. En componentes fundidos, las imperfecciones estructurales, como inclusiones y micro fisuras, actúan como concentradores de tensión que aceleran la iniciación y propagación de grietas, disminuyendo la vida útil [4, 5].

En el presente trabajo se analiza el comportamiento dinámico de un componente de automoción creado por dos vías de fabricación: forja y fundición. En los componentes forjados, el módulo de elasticidad puede mostrar variaciones según la dirección, debido a la orientación preferencial de los granos y la distribución de las fases metálicas, lo cual afecta a la rigidez y la respuesta vibratoria del componente. En los componentes fundidos, la heterogeneidad estructural puede introducir fluctuaciones locales en el módulo de elasticidad, afectando la capacidad de soportar vibraciones de alta frecuencia.

La identificación de la anisotropía, introducida en el proceso de fabricación, mediante pruebas dinámicas es esencial para predecir el comportamiento del componente y garantizar su rendimiento en condiciones operativas. Con un diseño y control adecuados, es posible aprovechar las ventajas de la anisotropía en lugar de considerarla una limitación.

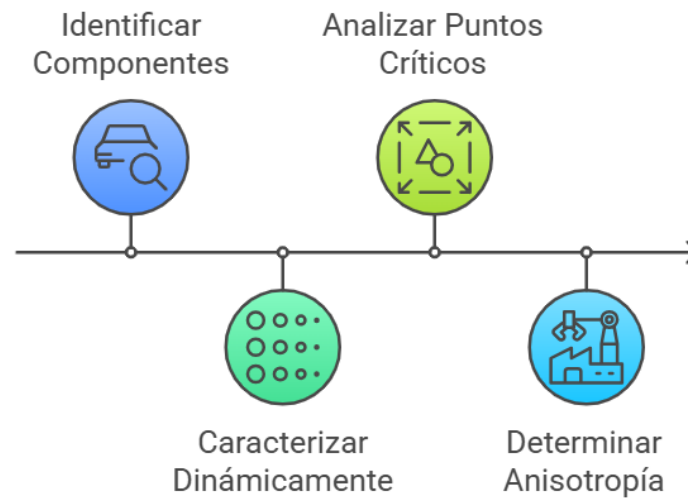


Figura 1: Metodología para determinar anisotropía en la fabricación.

Esta investigación tiene la finalidad de desarrollar una metodología experimental para la identificación de la anisotropía asociada a los procesos de fabricación de componentes de automoción. Esta metodología se fundamenta en la no linealidad de la respuesta dinámica de componentes de automoción como un indicador de anisotropía. Para ello, se analizarán componentes de automoción fabricados a partir de inyección a alta presión y por forja y se obtendrá la respuesta dinámica en puntos críticos del componente, donde hay cambios de secciones, ángulos, cambios de curvaturas. De esta manera se puede comprobar la influencia en el comportamiento del material asociada a la anisotropía generada tras su fabricación.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presenta el procedimiento experimental utilizado para caracterizar el comportamiento dinámico de dos portamanguetas mediante funciones de transmisibilidad. Los portamanguetas se han fijado a un excitador electrodinámico y los ensayos se han llevado a cabo de acuerdo a la norma ASTM E 756-05 [6]. En la Figura 2 se puede observar de una forma esquemática la configuración experimental.

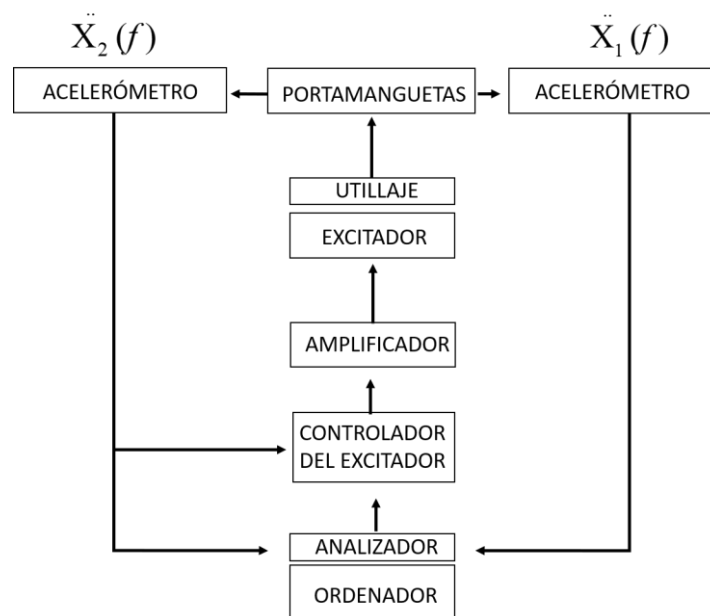


Figura 2: Esquema de la configuración experimental.

El material de ambos componentes es aluminio: el caso del componente forjado, se trata de una aleación 6063, mientras que en el caso del componente fundido, es una aleación Al 356 T6.

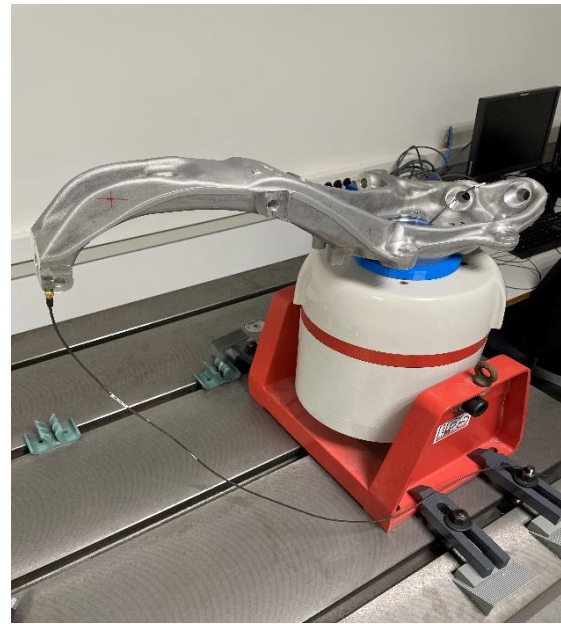
Los ensayos experimentales se han realizado a temperatura ambiente en un rango de frecuencias 0 – 1000 Hz, con una resolución de 0,25 Hz. El excitador electrodinámico utilizado ha sido un LDS V455-M5 de Brüel and Kjaer (B&K) y se ha utilizado el valor medio la densidad de potencia espectral (PSD), en unidades de $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$, como medida de la distribución de potencia de la excitación en el rango de frecuencia medido. Para la realización de los ensayos, se han utilizado valores de PSD comprendidos entre 0,001 y 0,3 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$, seleccionados según la capacidad operativa del excitador para cada portamanguetas, ya que estos tienen masas diferentes, garantizando la repetibilidad de las mediciones obtenidas en el laboratorio. Las señales de aceleración se han adquirido utilizando dos acelerómetros triaxiales 4535-B de la misma compañía en un analizador de cuatro canales también de B&K. Los datos de aceleración se han procesado mediante el software BK Connect, donde la señal temporal se ha transformado al dominio de la frecuencia y se ha obtenido la función de transmisibilidad del portamanguetas, definida como la relación entre las aceleraciones obtenidas mediante los dos acelerómetros, tal que:

$$T^*(f) = \frac{\ddot{X}_1^*(f)}{\ddot{X}_2^*(f)}, \quad (1)$$

donde f es la frecuencia, $\ddot{X}_1(f)$ la transformada de Fourier de la aceleración en el punto de medida en el portamanguetas y $\ddot{X}_2(f)$ es la transformada de Fourier de la aceleración de la base del excitador, que es ruido blanco dentro del rango de frecuencia medida 0 – 1000 Hz. El asterisco * indica que se trata de una cantidad compleja. Para adquirir la función de transmisibilidad, según la Figura 3, se han situado dos acelerómetros: uno sobre un punto crítico del portamanguetas y el otro, el de referencia, sobre la base del excitador.



(a) Portamanguetas de fundición



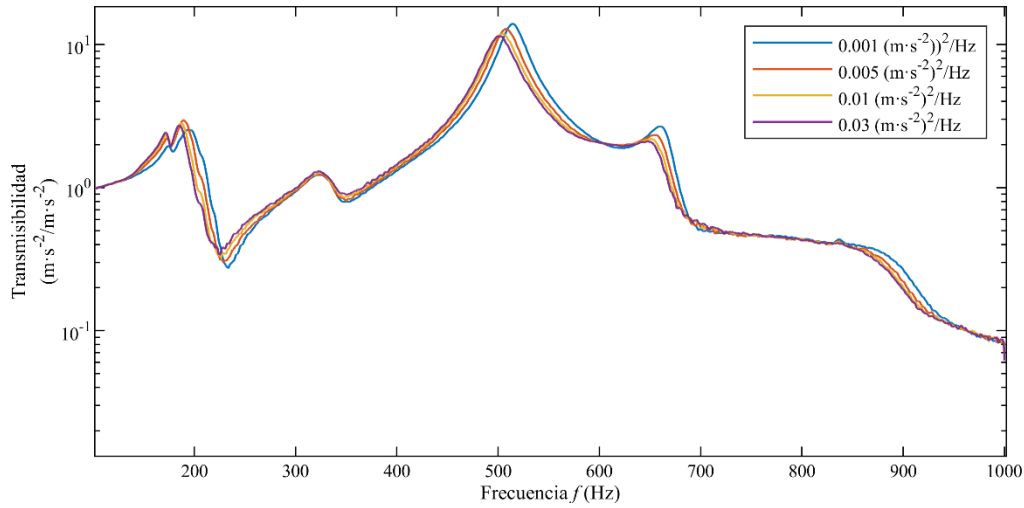
(b) Portamanguetas forjado

Figura 3: Configuración experimental instalada sobre una mesa rígida aislada por soportes neumáticos.

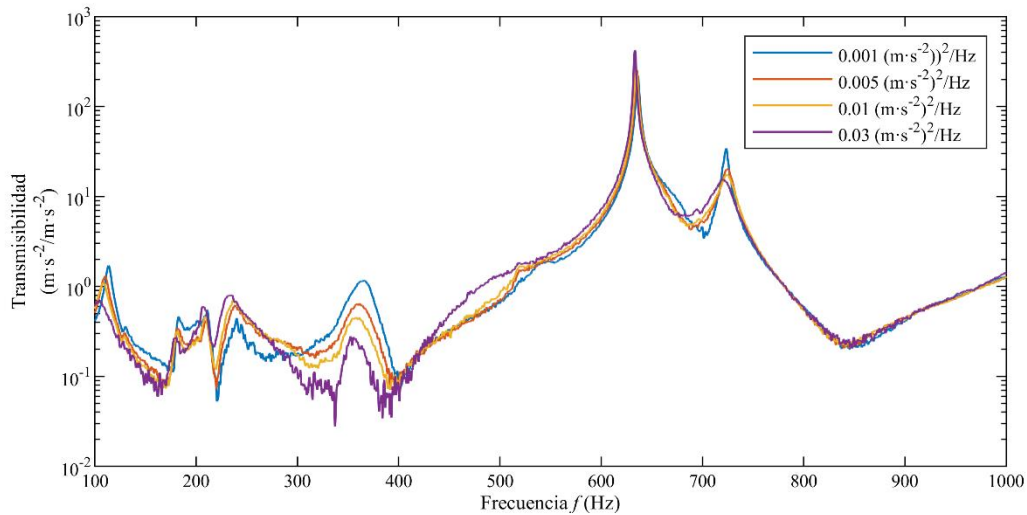
En la Figura 3 se puede observar la localización del acelerómetro situado en el punto crítico de ambos portamanguetas, en el extremo izquierdo de las piezas, donde se aprecia una forma de “brazo”.

3. Resultados y discusión

Como resultado de los métodos experimentales previamente descritos se han obtenido funciones de transmisibilidad de los portamanguetas fabricados mediante fundición y forja. En la Figura 4 se muestran las funciones de transmisibilidad de ambos portamanguetas para diferentes niveles de excitación, medida según la PSD.



(a) Transmisibilidad del portamanguetas de fundición.

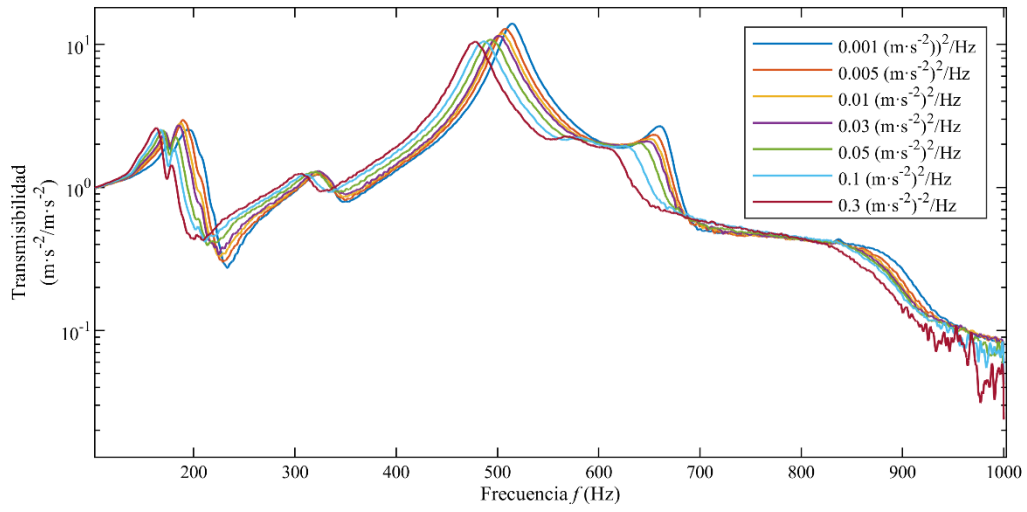


(b) Transmisibilidad del portamanguetas de forja.

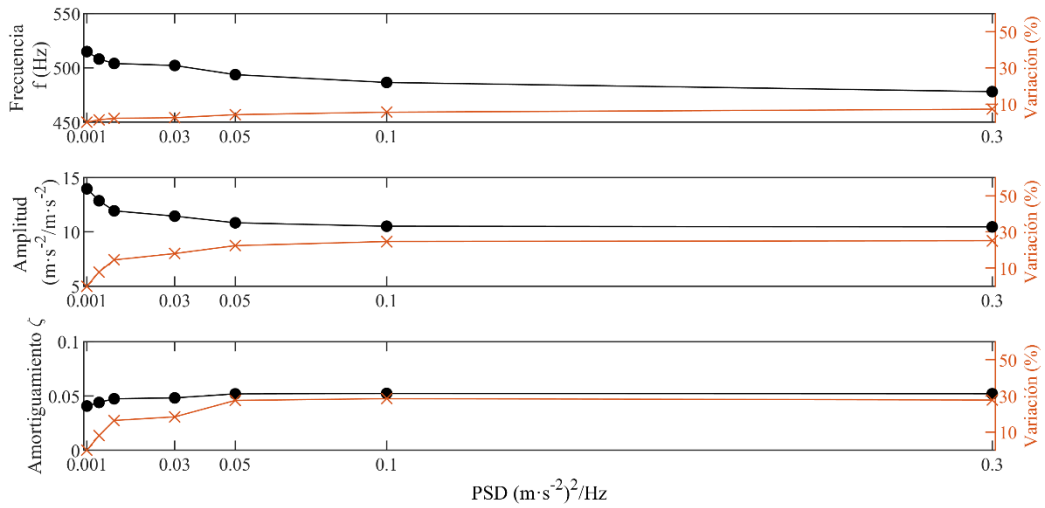
Figura 4: Transmisibilidad para diferentes valores de excitación, en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 4 (a) se puede observar que las frecuencias de resonancia $f = 515$ Hz y $f = 665$ Hz en el nivel de excitación de $0,001 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$, se desplazan a frecuencias menores con el aumento del nivel de excitación, lo que indica una gran sensibilidad de la respuesta en frecuencia del componente ante diferentes niveles de excitación. Además, se observa también una disminución de la amplitud de la resonancia y un aumento del amortiguamiento. Por otro lado, en la Figura 4 (b), donde se observa la transmisibilidad del portamanguetas de forja, se han identificado dos frecuencias de resonancia a $f = 635$ Hz y $f = 718$ Hz en el nivel de excitación de $0,001 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$. En el caso, aunque se observe un aumento del amortiguamiento en la segunda resonancia, no se ve una tendencia clara de las propiedades dinámicas del componente con el nivel de excitación. Además, debido a que la masa del portamanguetas de forja es mayor a la del portamanguetas de fundición, no se ha podido seguir aumentando el nivel de excitación debido a la capacidad operativa del excitador.

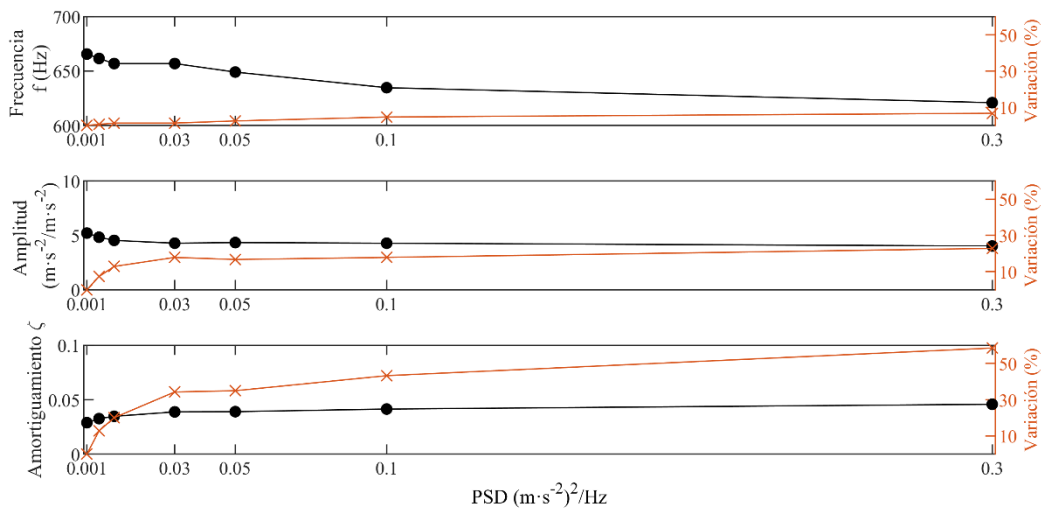
En cambio, para el portamanguetas de fundición se ha podido aumentar el nivel de excitación hasta un valor de $0,3 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$. En la Figura 5 (a) se muestran los resultados de transmisibilidad para el rango completo de niveles de excitación ensayados. En la Figura 5 (b) y 5(c) se muestra la tendencia de las propiedades dinámicas, frecuencia de resonancia, amplitud y amortiguamiento, y su variación porcentual en función del nivel de excitación.



(a) Transmisibilidad del portamanguetas de fundición.



(b) Frecuencia, amplitud y amortiguamiento de la primera resonancia.



(c) Frecuencia, amplitud y amortiguamiento de la segunda resonancia.

Figura 5: Frecuencia, amplitud y amortiguamiento, y su variación porcentual para el portamanguetas de fundición.

Con los resultados mostrados en la Figura 5, se puede comprobar que tenemos una respuesta no lineal y que tiene un impacto considerable en las frecuencias de resonancia, amplitud y amortiguamiento del portamanguetas de fundición. El amortiguamiento es el parámetro con una mayor variación porcentual, hasta un 50 % en el rango de excitaciones observado. Además, las frecuencias de resonancia tienen una variación porcentual de entorno al 10 % y la amplitud de las resonancias sufre una variación entorno al 30%.

4. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto un método experimental para identificar la anisotropía debida a diferentes procesos de fabricación de componentes de automoción mediante el análisis de la respuesta dinámica de dos portamanguetas, fabricados mediante forja y fundición. Se ha presentado la configuración experimental y los resultados de transmisibilidad en un punto crítico del componente.

Por un lado, aunque se han observado un aumento del amortiguamiento en la segunda resonancia, no se puede concluir que el portamanguetas fabricado mediante forja presente anisotropías según las funciones de transferencia obtenidas experimentalmente. En cambio, el portamanguetas de fundición se ha podido analizar en un rango de excitaciones mayor y muestra una respuesta no lineal, cuantificada mediante las propiedades dinámicas del componente. Se ha comprobado que el amortiguamiento tiene una variación del 50 %, la amplitud del 30 % y las frecuencias de resonancia entorno al 10 % en el rango de excitaciones medido.

El comportamiento no lineal observado del componente de fundición, se puede considerar como un indicador para identificar la anisotropía generada por este proceso de fabricación, y determinar si el proceso utilizado es adecuado para garantizar el rendimiento del componente en diferentes condiciones operativas.

5. Referencias

- [1] Narender G., Ramjee E., Prasad N. E., “In-plane anisotropy and tensile deformation behaviour of aluminium alloy AA 2014 forge plates”, *Sādhanā* **44**, (2019)
- [2] Yang Q., Wu X., Qiu X., “Microstructural Characteristics of High-Pressure Die Casting with High Strength–Ductility Synergy Properties: A Review”, *Materials* **16**, 51954 (2023)
- [3] Wang D., Yi Y., Li C., Huang S., He H., Zhang J., “Effects of different multidirectional forging processes on the microstructure and three-dimensional mechanical properties of ultra-high strength aluminum alloys”, *Materials Science and Engineering A* **826**, 141932 (2021)
- [4] Dash S. S., Li D. J., Zeng X. Q., Chen D. L., “Heterogeneous microstructure and deformation behavior of an automotive grade aluminum alloy”, *Journal of Alloys and Compounds* **870**, 159413 (2021)
- [5] Hofer P., Kaschnitz E., Schumacher P., “Distortion and Residual Stress in High-Pressure Die Castings: Simulation and Measurements”, *JOM* **66**, 1638–1646 (2014)
- [6] ASTM E756-17, West Conshohocken, PA, USA, 2005.