

Uso de estadísticos T^2 de Hotelling para detectar problemas de densidad en una espuma metálica

Use of Hotelling's T^2 Statistics to Detect Density Issues in a Metal Foam

Paula Solano-Leandro¹, Valeria Mayorga-Cervantes²,
Marcela Meneses-Guzmán³, Bruno Chiné-Polito⁴

Fecha de recepción: 31 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 22 de septiembre, 2025

Solano-Leandro, P; Mayorga-Cervantes, V; Meneses-Guzmán, M; Chiné-Polito, B. Uso de estadísticos T^2 de Hotelling para detectar problemas de densidad en una espuma metálica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 91-103.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.8018>



- 1 Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 pasolano@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0001-9178-196X>
- 2 Ingeniera en Producción Industrial. Trabajadora independiente. Costa Rica.
 valemayorgac@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0000-6337-3670>
- 3 Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 mameneses@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5922-0145>
- 4 Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 bchine@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6966-5973>

Palabras clave

Espuma metálica; perfiles de densidad; estadístico de Hotelling; detección de defectos.

Resumen

La estructura interna de una espuma metálica se puede investigar mediante la medición de perfiles de densidad, por ejemplo, usando técnicas de medición no-destructivas, escaneando el material a lo largo de su espesor o a través de alguna dirección representativa. En este estudio se analizan los perfiles de intensidad de la radiación gamma absorbida por una espuma fabricada con una aleación AlSi10. Si los perfiles se caracterizan mediante indicadores de forma del perfil, que reflejan el estado de control de la densidad del material, es posible diseñar un gráfico T^2 de Hotelling para Fase I, identificando cambios en la media de dichos indicadores a lo largo del espacio. La propuesta se basa en observar varios valores del estadístico por arriba del límite establecido y en forma consecutiva, porque estos pueden detectar variaciones de densidad en una zona específica del material. Se ha comprobado que la tasa de falsas alarmas de esta propuesta es muy baja, por lo que se permite planificar su implementación para monitorear posibles defectos internos. Además, proporciona un método para evaluar la uniformidad de la densidad, sin necesidad de recurrir a métodos de control destructivos.

Keywords

Metal foam; density profiles; Hotelling's statistics; defects detection.

Abstract

The internal structure of a metal foam can be investigated by measuring density profiles, using no destructive testing which scans the material across its thickness or along some representative direction. In this study we analyse the profiles of gamma radiation intensity, absorbed by a metal foam manufactured with a AlSi10 alloy. If these profiles are characterized using shape indicators reflecting the state of density control of the material, it is possible to design a Phase I Hotelling's chart to identify changes in the mean of these indicators across the space. The approach is based on observing several statistic values consecutively exceeding the established limit, as these may detect density changes within a specific area of the material. It has been verified that the false alarm rate of this approach is very low, which enables the planning of its implementation for monitoring potential internal defects. Furthermore, it provides a method for assessing density uniformity without the need for destructive testing methods.

Introducción

El Control Estadístico de Procesos (SPC, por su sigla en inglés) proporciona un conjunto de métodos y herramientas accesibles que permiten mejorar el desempeño de un determinado proceso, reduciendo la variabilidad y evaluando su capacidad para cumplir con las especificaciones de un producto. Entre las herramientas más relevantes del SPC se encuentran los gráficos de control estadístico, tanto univariados como multivariados, cuyo propósito es monitorear el proceso y detectar desviaciones [1]. Un gráfico de control se construye a partir de información obtenida de una muestra recolectada mientras el proceso opera bajo condiciones de control estadístico. Al estar diseñado con la variabilidad natural del proceso, cualquier cambio estadísticamente significativo se manifestará como una alteración en los parámetros

representados en el gráfico. Esta etapa de diseño de gráficos de control se denomina Fase I. Posteriormente, la Fase II, de monitoreo u operativa, utiliza los límites de control establecidos durante la Fase I para detectar y actuar sobre causas especiales de variación [1].

Cuando se abordan problemas caracterizados por múltiples parámetros, es recomendable emplear gráficos de control multivariados, pues los gráficos univariados —que consideran una sola variable a la vez— tienden a incrementar la probabilidad de generar falsas alarmas debido a causas especiales de variación [2,3]. Entre los gráficos multivariados más utilizados en la literatura se encuentra el gráfico de Hotelling, diseñado para detectar cambios en la media de variables interrelacionadas. Este gráfico representa una extensión multivariada del gráfico de control de Shewhart y permite la supervisión simultánea de múltiples variables que describen un proceso o la calidad de un producto [3].

Las espumas metálicas son materiales celulares de celdas cerradas, constituidas por una red de espacios vacíos (poros grandes) delimitados mediante paredes solidas interconectadas y caracterizadas por bajos valores de densidad [4,5]. Lo anterior, combinado con las propiedades mecánicas, térmicas, etc. del metal base [6,7], permite su aplicación funcional en absorción de energía, aislamiento térmico y acústico, amortiguamiento de vibraciones, así como para usos estructurales en sectores como el automotriz, naval y biomédico [8]. No obstante, su adopción comercial ha sido limitada debido a factores relacionados con variaciones en su estructura, métodos de fabricación y costos de producción [9,10].

La manufactura de una espuma debe asegurar que el material mantenga una porosidad controlada en cantidad, tamaño y distribución, garantizando una estructura homogénea de la matriz del material [7,9]. Estos objetivos son difíciles de alcanzar, especialmente en el caso de una espuma de aluminio cuando su producción es por vía metalúrgica en moldes y usando agentes espumantes. La coexistencia de fases metálicas sólida, líquida y de burbujas gaseosas genera fenómenos complejos que dificultan el control del proceso [8,11]. Como resultado, se obtienen materiales no homogéneos, con gradientes de densidad, variaciones en el tamaño de celdas y presencia de defectos [11,12]. Estos factores, en conjunto con el desarrollo constante de nuevos materiales, hace que este campo sea relevante y desafiante [11, 13]. En particular, la densidad se relaciona con las propiedades mecánicas del material, como son la resistencia a tracción, compresión o torsión [10, 14–16]. En efecto el perfil de densidad, medido a lo largo un espesor o de una longitud de una muestra de material celular, puede proporcionar información sobre su uniformidad estructural [17-19]. También en el caso de materiales compuestos, como los paneles de viruta de madera, los parámetros de proceso afectan significativamente la forma del perfil de densidad [20,21,22]. En [23] se ha estudiado la relación entre el perfil de densidad vertical en tableros de viruta de madera y su desempeño funcional, demostrando que la forma del perfil influye directamente en el rendimiento del producto final.

El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento de monitoreo estadístico en la Fase I para el control de una espuma de aluminio. La propuesta contempla la utilización de técnicas de medición no destructivas (NDT, por su sigla en inglés), para analizar la densidad de la espuma mediante perfiles experimentales de esta magnitud a lo largo del material. A partir de los perfiles se calculan los indicadores de la forma del perfil y posteriormente se determinan los estadísticos. Debido a la naturaleza de las espumas metálicas producidas por vía metalúrgica, es común observar heterogeneidad en su densidad, ocasionando que algunos valores del estadístico excedan los límites de control del gráfico de manera aislada. Si embargo, la presencia de estos valores aislados no implica necesariamente que el proceso esté fuera de control. Por lo tanto, se propone una interpretación de los valores consecutivos de los estadísticos que exceden los límites de control, para evaluar la uniformidad de la densidad de las espumas, en la zona involucrada.

La metodología empleada en este trabajo se describe en las secciones siguientes. Se brinda el método de medición y la estrategia para obtener los conjuntos de perfiles de densidad, así como el modo para determinar los indicadores del perfil. Sucesivamente, se introduce la técnica para la reducción de indicadores, para cada conjunto de perfiles, seleccionando aquellos que serán empleados en el diseño del gráfico de control. Posteriormente, se presenta el enfoque para evaluar el desempeño del gráfico, así como una propuesta de interpretación de los valores estadísticos consecutivos que exceden el límite superior de control. Finalmente, se presentan las conclusiones y las recomendaciones finales.

Metodología

Los perfiles de densidad se obtuvieron a partir de mediciones de la intensidad de radiación absorbida por el material, utilizando un sistema de escaneo por rayos gamma [24]. Las mediciones se desarrollaron en una muestra de espuma de aluminio con dimensiones de $16.5 \times 16.5 \times 4.0 \text{ cm}^3$, fabricada mediante el proceso de espumado a partir de precursores comerciales Alulight® GmbH. Los precursores consistían en una aleación AlSi10 mezclada con hidruro de titanio (TiH_2), al 0.80 % en peso, como agente espumante. Durante la fabricación, las varillas precursoras se colocaron sobre el plano X–Y perpendicular a la dirección de la gravedad, como en Figura 1. En la misma figura se brindan los ejes de referencia X, Y, Z, la muestra de la espuma y las siguientes configuraciones para la medición de la densidad: Canto X, rayos paralelos al eje Y, donde, para una determinada coordenada X, las mediciones son en correspondencia de distintos valores Z; Canto Y, rayos paralelos al eje X, donde, para una determinada coordenada Y, las mediciones son en correspondencia de distintos valores Z; Frente X, rayos paralelos al eje Z donde, para una determinada coordenada X, las mediciones son en correspondencia de distintos valores Y; Frente Y, rayos paralelos al eje Z donde, para una determinada coordenada Y, las mediciones son en correspondencia de distintos valores X. Para cada posición del escaneo, se registraron tres mediciones con un tiempo de muestreo de 30 segundos por medición. Cada perfil de Canto se formó a partir de 18 mediciones, espaciadas cada 2 mm entre 0 mm y 34 mm y cada perfil de Frente se construyó con 82 mediciones, separadas cada 2 mm, desde 0 mm hasta 162 mm. En total, se registraron 39 perfiles para cada uno de los Cantos y de los Frentes.

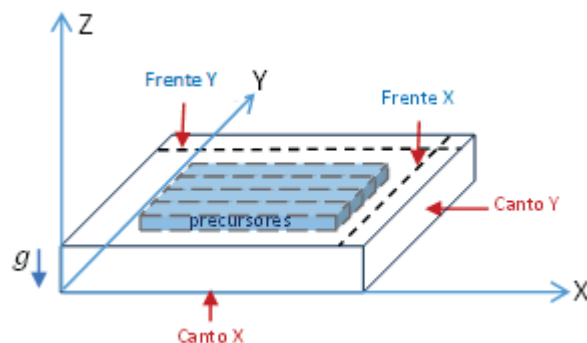


Figura 1. Sistema de referencia y posicionamiento de los precursores en la muestra de la espuma metálica.

Sucesivamente se implementó el método para caracterizar la densidad de la espuma, procesando directamente los valores medidos, pues la intensidad de radiación gamma absorbida es proporcional a esta propiedad. En el trabajo se usó el método de Wong et al. [20], desarrollado para evaluar la calidad de tableros de partículas de madera. Los autores asumieron como variable de respuesta el perfil de densidad a lo largo del espesor del tablero,

caracterizando su forma mediante varios parámetros. El mismo método se implementó para la densidad de la espuma metálica, usando los 14 indicadores señalados en la Figura 2. En la figura, la densidad máxima (PD) se definió como el promedio entre la densidad máxima medida en la mitad izquierda del perfil, correspondiente a la base (PDb), y la densidad máxima en la mitad derecha, correspondiente a la superficie (PDs). La posición central del perfil, próxima a $X = 80$ mm, dividió el intervalo de medición en dos mitades. Por su parte, la densidad del núcleo (CD) se calculó como la media de la densidad en la sección central que abarca el 20 % de las posiciones alrededor del punto medio del perfil. La densidad media (MD) correspondió al promedio de todas las mediciones de densidad a lo largo del perfil. El factor de gradiente (GF) se definió como la distancia horizontal entre la línea central (CL) y el contorno del perfil, medida a una altura equivalente a la mitad de la diferencia entre la densidad máxima (PD) y la densidad del núcleo (CD). Este factor se calculó para ambos lados del perfil: hacia la base (GFb) y hacia la superficie (GFs). El área de pico (PA) correspondió al área bajo la curva del perfil que superaba la línea de la densidad media (MD), calculada también de forma separada para la base (PAb) y la superficie (PAs). Las distancias de pico (Pbb y Pbs) indicaron la distancia desde los extremos del perfil (base o superficie) hasta el punto donde el perfil intersecaba la línea de MD. Finalmente, se propuso el rango (R) como un indicador adicional, definido como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de densidad en todo el perfil.

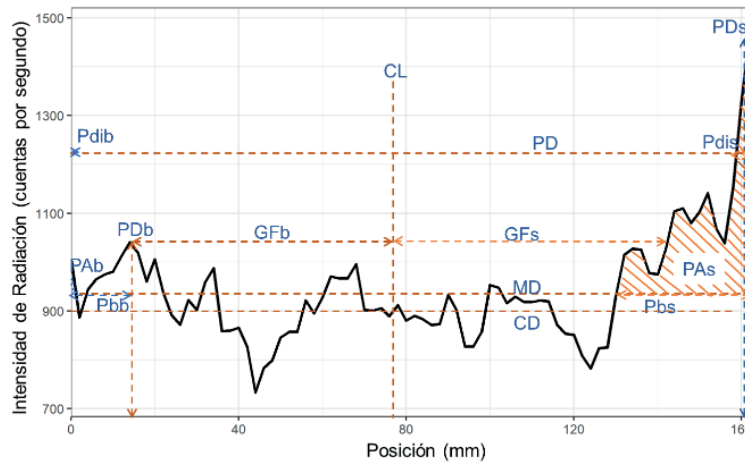


Figura 2. Indicadores que caracterizan a un perfil de densidad de espuma metálica.

Para desarrollar el método, se programó una rutina en lenguaje R para extraer los 14 indicadores, a partir de cada perfil de densidad. Esto generó un conjunto de 14 variables para cada uno de los 39 perfiles, tanto de Frentes como de Cantos. Se aplicó la técnica de Análisis Factorial a cada conjunto de datos, con el objetivo de reducir la dimensionalidad e identificar un subconjunto de indicadores que explicara la mayor parte de la varianza total. Con los indicadores seleccionados, se diseñó un gráfico de control multivariado utilizando el estadístico T^2 de Hotelling [3], el cual se calculó mediante la ecuación (1).

$$T^2 = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (1)$$

donde $\bar{\mathbf{x}} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_p]'$ representa el vector de medias muestrales de los indicadores que caracterizan los perfiles, \mathbf{x} es el vector de variables que caracterizan a cada perfil y \mathbf{S} la matriz de varianza-covarianza muestral de las $p \times p$ variables. Así, el valor de un estadístico T^2 de Hotelling cuantifica la distancia multivariada entre un vector de observaciones y la media multivariada del proceso, ponderada por la variabilidad y correlación entre variables. Cuanto

mayor es su valor, mayor es la discrepancia con respecto al comportamiento esperado, mientras que valores pequeños indican similitud con los valores de referencia. Los límites de control superior (UCL) e inferior (LSC) para controlar los estadísticos, para Fase I, son:

$$UCL = \frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2} \quad (2)$$

$$LSC = 0$$

donde $\beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2}$ es la cola superior de la distribución beta con parámetros $p/2, (m-p-1)/2$.

Se utilizó la función *mqcc* de R, para determinar los límites de control a partir de los perfiles originales, estableciendo un error tipo I, α , como valor individual. Dado que se realizaron pruebas simultáneas, para la interpretación se debió tomar en cuenta el error de la familia, calculado como: $\alpha_{familia} = (1 - \alpha)^p$ donde p es el número de variables. Con el fin de evaluar el desempeño del gráfico de control en términos del ARL_0 de diseño correspondiente a $1/\alpha$, se implementó una función “*bootstrapping*” para generar nuevos perfiles a partir de los originales. En este caso se tomaron 2 perfiles al azar y se promediaron sus valores para cada posición, generando así N nuevos perfiles en cada iteración. El procedimiento se aplicó por separado a los conjuntos de perfiles correspondientes a Canto X, Canto Y, Frente X y Frente Y. Para cada nuevo perfil, se calcularon los indicadores seleccionados y su correspondiente estadístico T^2 mediante la Ecuación 1. Se identificó si dicho estadístico superaba el límite superior de control y se registró el “*run length*” o número de muestras necesarias para que el gráfico detecte un fuera de control. Este se promedió para determinar el ARL de las 1000 iteraciones ejecutadas. Sucesivamente, se realizaron corridas para diferentes valores de α , así comparando el desempeño del gráfico. Cualquier cambio en el proceso —reflejado en la media o la correlación entre indicadores— se manifestaría como un cambio en el valor del estadístico T^2 , permitiendo su detección cuando se compare con el límite previamente establecido. Como la estructura interna de las espumas no es homogénea, es esperable que mediante el estadístico T^2 se muestre saltuariamente un fuera de control, como punto aislado. En cambio, la aparición de varios estadísticos T^2 consecutivos fuera del límite de control indicaría que los perfiles de una zona específica de la espuma metálica puedan evidenciar un cambio consistente en su forma, señalando posibles defectos internos o irregularidades en la uniformidad de la densidad del material.

Resultados y discusión

En la Figura 3 se brindan los perfiles experimentales de Canto X y Canto Y, observando una densidad mayor en las posiciones extremas respecto de las posiciones más centrales. Este comportamiento se relaciona con el enfriamiento y solidificación prematura de la espuma cercana de las paredes del molde, que provoca en esa región una expansión reducida de las burbujas. La Figura 4 muestra los perfiles de Frente, donde se aprecia que los de Frente X presentan una mayor irregularidad en las mediciones, en comparación con los de Frente Y. Esto podría indicar que los precursores, dispuestos perpendicularmente al eje Y, entrando en contacto entre sí durante la expansión, generan un patrón no homogéneo de burbujas, reflejado en variaciones locales de la densidad.

Para estos perfiles se evalúa la reducción de dimensionalidad mediante Análisis Factorial en los cuatro conjuntos (Canto X, Canto Y, Frente X y Frente Y), identificándose que el 80 % de la variabilidad total se explica principalmente por los 4 indicadores Rango, PD, CD y MD.

Utilizando la Ecuación 2 con $p = 4$ indicadores, se establece el límite de control superior, cuyos valores son 15.19949, 13.7690546 y 11.70098 para los α alternativos de 0.0010, 0.0027 y 0.0100, respectivamente.

Aunque el tamaño de muestra no altera la estructura de la matriz de varianza-covarianza, sí influye en la estabilidad de sus estimaciones. Con pocas observaciones, la matriz puede ser inestable o sesgada, mientras que un mayor número de muestras permite una mejor aproximación a la covarianza poblacional. Por ello, se emplea $N=200$, una cantidad mayor de muestras en comparación con la cantidad original de 39 perfiles.

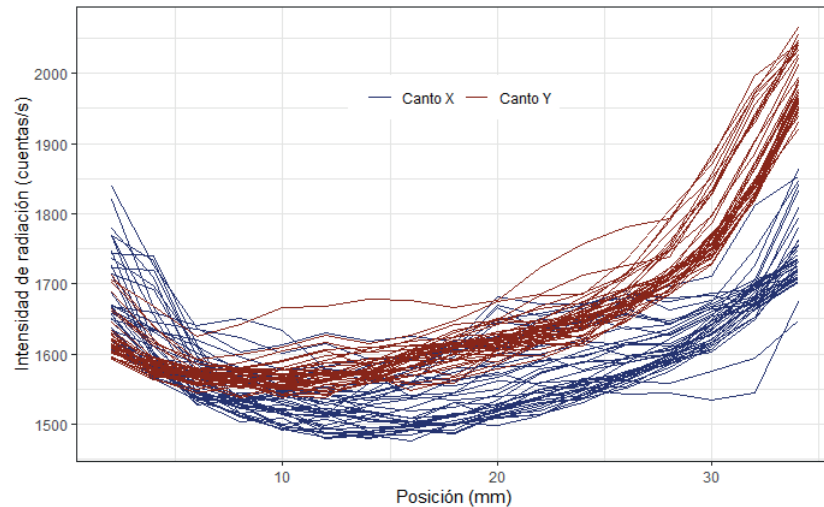


Figura 3. Perfiles de la radiación absorbida de Canto X y Canto Y de la espuma metálica.

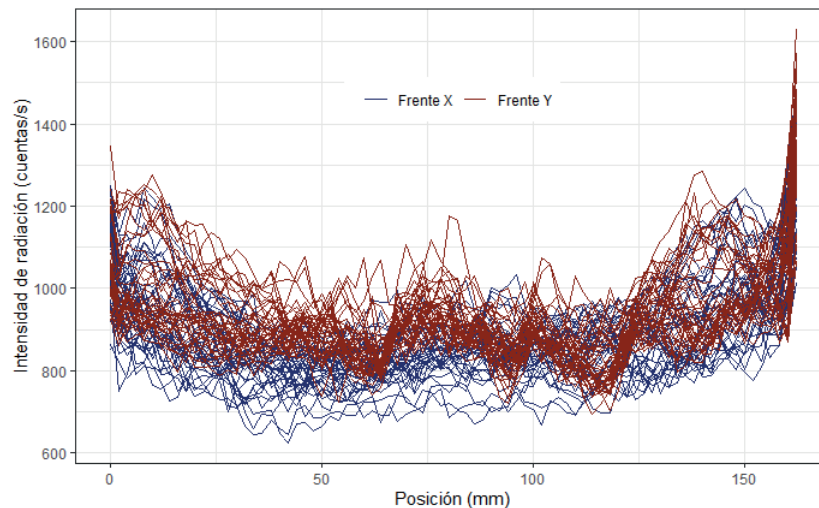


Figura 4. Perfiles de la radiación absorbida de Frente X y Frente Y de la espuma metálica.

En el Cuadro 1 se brinda el resultado del ARL para cada conjunto de mediciones, en correspondencia de tres valores de α . Para todos los casos, el ARL mayor se obtiene para las mediciones de Canto X, mientras el menor para el Frente Y, con valores que van desde 120 hasta 192. Se observa que, aunque la diferencia entre los errores α sea considerable, los resultados de los ARL estimados no lo son, siendo respectivamente de 36, 33 y 27, para

el Canto X. Si se comparan estos resultados con el valor teórico del ARL, se aprecia que en promedio el ARL del gráfico es más bajo, pero esta diferencia se reduce considerablemente si se confronta con el ARL de la tasa de error de familia (FWER) de $1 - (1 - \alpha)^p$.

El estadístico T^2 de Hotelling mide la distancia multivariada entre vectores de medias de los indicadores de los perfiles, ponderada por la variabilidad y correlación entre variables. Por tanto, la presencia de varios valores T^2 consecutivos fuera de control indica un cambio en la densidad del material en esa zona. Valores altos del estadístico reflejan una mayor diferencia respecto a la media esperada, mientras que valores bajos sugieren que no hay diferencias significativas.

Cuadro 1. Resultados del ARL para los tres valores de α individual.

α	0.00100	Mínimo y máximo	0.00270	Mínimo y máximo	0.01000	Mínimo y máximo
UCL	15.19949		13.7690546		11.70098	
ARL Canto X	36	Min=1 Max=191	33	Min=1 Max=185	27	Min=1 Max=185
ARL Canto Y	26	Min=1 Max=182	22	Min=1 Max=185	19	Min=1 Max=153
ARL Frente X	29	Min=1 Max=175	24	Min=1 Max=192	18	Min=1 Max=120
ARL Frente Y	26	Min=1 Max=182	23	Min=1 Max=185	18	Min=1 Max=153
ARL FWER	250		93		25	

En el Cuadro 2 se aprecia que, para las mediciones del Canto X, de las 1000 iteraciones se encuentran 118 con secuencias de al menos dos estadísticos T^2 de Hotelling consecutivos; de estas, 111 iteraciones tienen solo una secuencia, 6 iteraciones dos secuencias y 1 iteración presenta tres secuencias. La secuencia más larga encontrada contiene solo 3 valores del estadístico, uno más del valor establecido de 2.

De acuerdo con los resultados de los Cuadros 2, 3 y 4, las iteraciones que encuentran una secuencia son más del 80%, mientras que un porcentaje menor se debe a 2 secuencias y aun menos a 3 secuencias.

Cuadro 2. Cantidad de secuencias formadas por dos estadísticos T^2 consecutivos encontradas en cada iteración.

$\alpha = 0.001$	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Canto X	118	1	111	94%	3
		2	6	5%	
		3	1	1%	
		4	0	0%	
Canto Y	251	1	218	87%	3
		2	28	11%	
		3	4	2%	
		4	1	0%	

$\alpha= 0.001$	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Frente X	217	1	191	88%	3
		2	26	12%	
		3	0	0%	
		4	0	0%	
Frente Y	234	1	207	88%	3
		2	26	11%	
		3	1	0%	
		4	0	0%	

Cuadro 3. Cantidad de secuencias formadas por mínimo dos estadísticos T^2 consecutivos encontradas en cada iteración.

$\alpha=0.0027$	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Canto X	130	1	121	93%	3
		2	8	6%	
		3	1	1%	
		4	0	0%	
Canto Y	313	1	265	85%	3
		2	243	78%	
		3	4	1%	
		4	1	0%	
Frente X	303	1	256	84%	3
		2	46	15%	
		3	1	0%	
		4	0	0%	
Frente Y	304	1	254	84%	3
		2	47	15%	
		3	3	1%	
		4	0	0%	

Cuadro 4. Cantidad de secuencias formadas por mínimo dos estadísticos T^2 consecutivos encontradas en cada iteración.

$\alpha= 0.01$	Iteraciones con secuencias	Cantidad de secuencias	Cantidad de iteraciones		Longitud más larga
Canto X	196	1	179	91%	3
		2	16	8%	
		3	1	1%	
Canto Y	379	1	302	80%	3
		2	63	17%	
		3	13	3%	
		4	1	0,3%	
Frente X	443	1	327	74%	3
		2	103	23%	
		3	11	2%	
		4	1	0,2%	
		5	1	0,2%	
Frente Y	417	1	323	77%	3
		2	77	18%	
		3	16	4%	
		4	1	0%	

La mayor cantidad de secuencias se observan en las mediciones de Frente Y. Por ejemplo, para un $\alpha= 0.001$, se evidencian secuencias en 234 iteraciones de las 1000; de estas, 207 tienen una secuencia, es decir, la probabilidad en media de observar una secuencia en un perfil es de un 20% aproximadamente. De la misma manera, las probabilidades de observar dos y tres secuencias en un mismo perfil son de 2.6% y 1%, respectivamente.

Para las variaciones locales de densidad al interno de una espuma metálica, los resultados obtenidos pueden sugerir algunas guías para decidir sobre qué parámetros utilizar para su monitoreo. Entre estos se incluyen, el número de perfiles por zona, la distancia entre mediciones dentro de cada perfil, el espaciamiento entre perfiles, el valor del nivel de significancia α , así como la longitud mínima de secuencias de estadísticos T^2 .

Las Figuras 5 y 6 brindan ejemplos del comportamiento de los gráficos de Control multivariados T^2 de Hotelling. La Figura 5(a) evidencia una secuencia de 3 valores consecutivos del estadístico, señalando solo una secuencia de tamaño 3, mientras el grafico de Figura 5(b) no señala secuencia, pues ninguna es de tamaño 2 o más grande. La Figura 6(a) muestra una secuencia de dos estadísticos consecutivos y en la Figura 6(b) no se detectan secuencias.

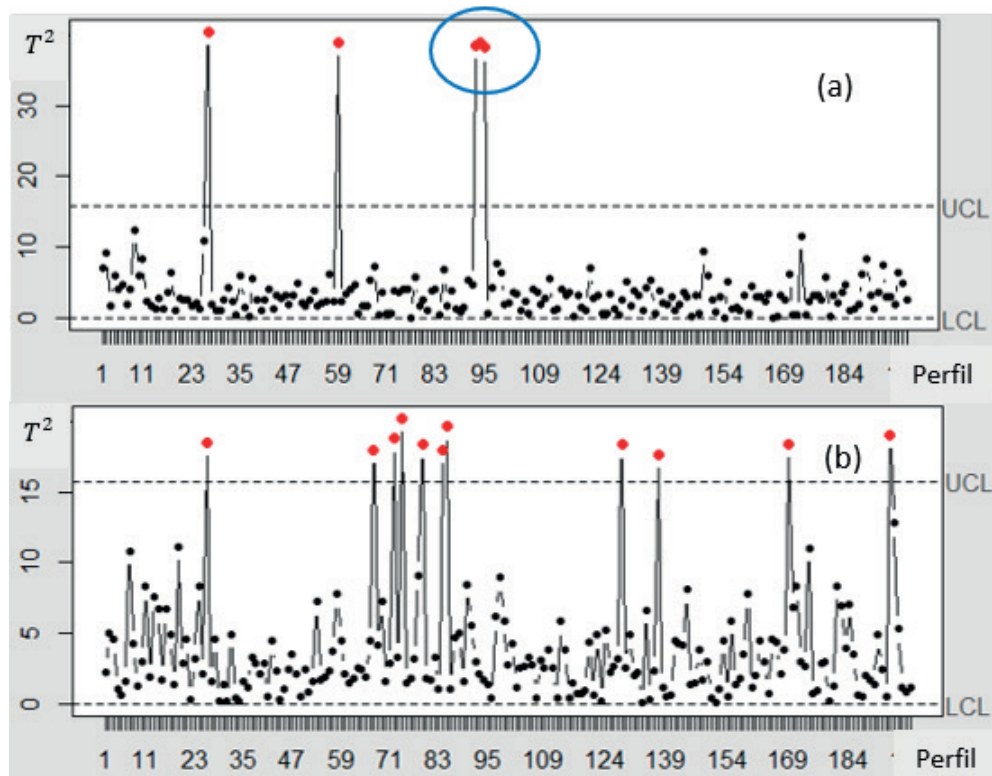


Figura 5. Gráficos T^2 de Hotelling para $1 - \alpha = 0.999$, mediciones de Canto Y: (a) señala secuencia de 3 estadísticos por arriba del UCL; (b) no señala secuencias.

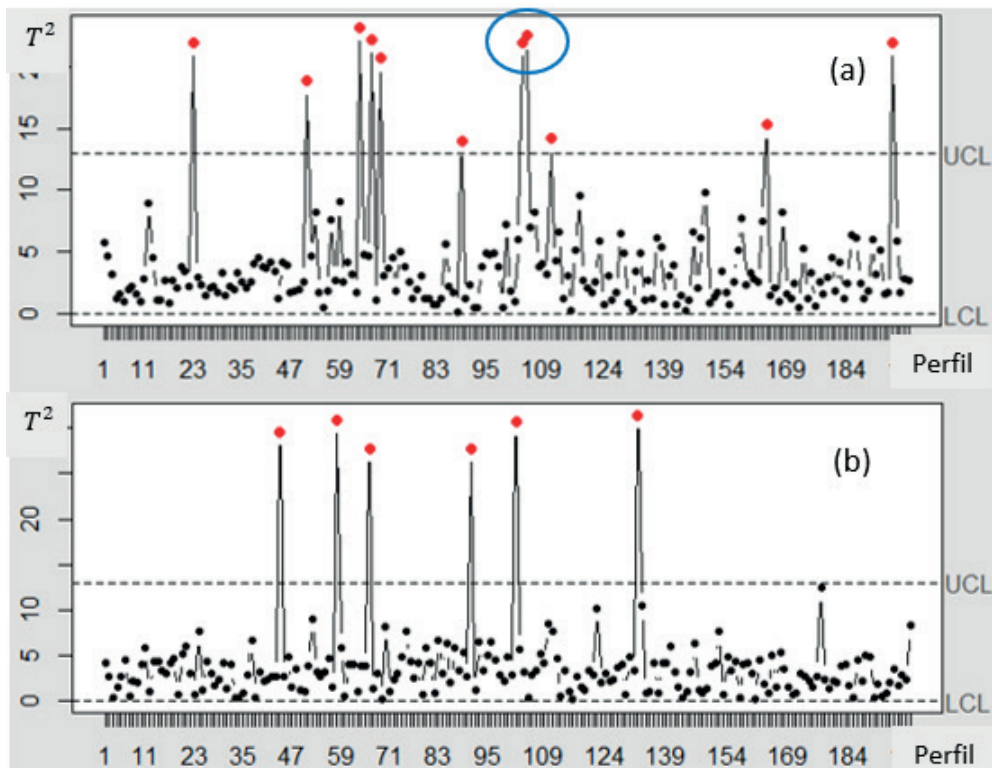


Figura 6. Gráficos T^2 de Hotelling para $1 - \alpha = 0.99$: (a) mediciones de Frente X, que muestran una sola secuencia por encima del UCL; (b) mediciones de Frente Y, que no muestran secuencias.

Conclusiones y recomendaciones

A partir de mediciones de la radiación gamma absorbida por una espuma de aluminio, se ha desarrollado un método de caracterización de su densidad mediante indicadores de forma del perfil, diseñando un gráfico T^2 de Hotelling para Fase I e identificando cambios espaciales en la media de dichos indicadores.

Se ha estimado el ARL del gráfico de control multivariado e identificado secuencias de estadísticos consecutivos que señalan condiciones de fuera de control. La probabilidad de observar secuencias de más de dos estadísticos consecutivos fuera de control ha resultado ser muy baja, indicando que la espuma se ha producido bajo condiciones estables y por tanto en control.

La propuesta de evaluar secuencias de estadísticos consecutivos constituye un enfoque sencillo, pero innovador, que permite detectar posibles fallas internas o irregularidades en la uniformidad de la densidad del material, sin recurrir a métodos destructivos. Para futuras implementaciones, será necesario estimar el número óptimo de estadísticos consecutivos fuera de control que justifique una alerta. Para ello, se recomienda realizar pruebas controladas que incluyan defectos inducidos en el material, lo cual permitirá calibrar adecuadamente los parámetros del sistema de monitoreo. Entre estos parámetros se sugieren, el número de perfiles por zona, la distancia entre mediciones dentro de cada perfil, el espaciamiento entre perfiles, el valor del nivel de significancia α , así como la ya señalada longitud mínima de secuencias de estadísticos T^2 consideradas como señal de posible desviación.

Referencias

- [1] W.H. Woodall, D. J. Spitzner, D. Montgomery y S. Gupta, "Using Control Charts to Monitor Process and Product Quality Profiles", *Journal of Quality Technology*, vol.36(3), pp.309-320, 2004.
- [2] E. Santos-Fernández, "Multivariate Statistical Quality Control Using R", Springer Science Business Media New York, 2012.
- [3] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*. 8va ed. Wiley&Sons, USA, 2019.
- [4] L.J. Gibson y M.F. Ashby, *Cellular solids-structure and properties*, 2nd ed., Cambridge University Press, UK, 1997.
- [5] A.P. Murali, S. Duraisamy, S. Samuthiram, y R. Vijay "Current and emerging methods for manufacturing of closed pore metal foams and its characteristics: a review", *Journal of Materials Science*, vol.60, pp. 1187-1227, 2025.
- [6] M. Madgule, C.G. Sreenivasa y A.V. Borgaonkar, "Aluminium metal foam production methods, properties and applications - a review", *Materials Today: Proceedings*, vol.77, pp. 673-679, 2023.
- [7] M. Ashby, T. Evans, N. Fleck, L. Gibson, J.W. Hutchinson, H. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*. 1era ed., Elsevier, USA, 2000.
- [8] J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*. Vol.46, pp.559-632, 2001.
- [9] C. Ji, H. Huang, T. Wang y Q. Huang, "Recent advances and future trends in processing methods and characterization technologies of aluminum foam composite structures: A review", *Journal of Manufacturing Processes*, vol.93, pp. 116-152, 2023.
- [10] S.U. Nisa, S. Pandey, P.M. Pandey, "A review of the compressive properties of closed-cell aluminum metal foams", *Journal of Process Mechanical Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*, vol.237(2), pp.531-545, 2023.
- [11] E. Solorzano, M.A. Rodríguez-Pérez, J.A. Reglero y J.A. De Saja, "Density gradients in aluminum foams: characterization by computed tomography and measurements of the effective thermal conductivity", *Journal of Materials Science* vol.42, pp. 2557-2564, 2007.
- [12] P.E. Sarzosa Viera, E.P. Abarca Pérez & E.V. Sailema Sailema, "Análisis de la estructura de la porosidad de espumas metálicas de aluminio de celda abierta y su influencia sobre las propiedades mecánicas". *Tesla Revista Científica*, vol.2(2), 2022.

- [13] C. Körner, R.F. Singer, "Processing of metal foams—challenges and opportunities". *Advanced Engineering Materials* vol.4, pp.159-165, 2000.
- [14] Y. Sugimura, H. Meyer, H.Y. He, H. Bart-Smith, J. Grensted, A.G. Evans. "On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams", *Acta Materialia*; vol.45, pp.5245–5259, 1997.
- [15] Y. Sugimura, A. Rabiei, A.G. Evans, A.M. Harte, N.A. Fleck, "Compression fatigue of a cellular Al alloy", *Materials Science and Engineering*, vol.269, pp.38–48, 1999.
- [16] C. Körner, F. Berger, M. Arnold, C. Stadelmann, R.F. Singer, "Influence of processing conditions on morphology of metal foams produced from metal powder", *Materials Science and Technology*, vol.16, pp.781-784, 2000.
- [17] A. Sanabria-Castro, M. Meneses-Guzmán, B. Chiné-Polito, "Uso de regresión de soporte vectorial para el control de espuma metálica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol.42, 2023.
- [18] M. Meneses-Guzmán, B. Chiné, M. Conejo-Solís & V. Mussi, "Caracterización y Monitoreo del perfil de densidad de una espuma metálica", 13° Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, 13° Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Lisboa, Portugal, 23-26 de Outubro, 2017.
- [19] A. Robelo-Latorraca, M. Meneses-Guzmán and B. Chiné-Polito, "Monitoreo de perfiles de la intensidad de radiación absorbida por una espuma metálica", XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2023.
- [20] E. D. Wong, M. Zhang, Q. Wang & S. Kawai, "Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard", *Journal of Wood Science*, vol.44, pp.287-295, 1998.
- [21] T. Young, P. Winistorfer, S. Wang, "Multivariate Control Charts of MDF and OSB vertical density profile attributes", *Forest Products Journal*, vol.49(5), pp.79-86, 1999.
- [22] B.M. Colosimo, S. Doriguzzi, M. Meneses & Q. Semeraro. "Functional Data Modeling and Monitoring applied to Particleboard Manufacturing", *International Conference on Applied Stochastic Models and Data Analysis*, Rome, Italy, 2011.
- [23] B.M. Colosimo, M. Meneses, & Q. Semeraro, "On the effectiveness of profile monitoring to enhance functional performance of particleboards". *Quality and Reliability Engineering International*, vol.31(8), pp.1665-1674, 2015.
- [24] F. Rodríguez-Mendez, M. Meneses-Guzman, B. Chiné-Polito, R. Pereira-Arroyo, "Desarrollo de un sistema automatizado de escaneo por radiación gamma". *Revista Tecnología en Marcha*, vol.32(3), pp.87-98, 2019.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.