

El problema oculto de la escala: los mecanismos cambian su peso relativo con el tamaño

Juan Segurola

3Dresyns by Resyner Technologies S.L.

© 2026 Juan Segurola. Todos los derechos reservados.

Correspondencia: info@3Dresyns.com · www.3Dresyns.com

HEB-012 · Artículo técnico independiente · Versión v0.3

DOI: 10.5281/zenodo.22915324

Resumen

Un resultado obtenido a un tamaño se trata a menudo como si cambiar la escala solo modificara la cantidad de material implicada. En muchos sistemas físicos, cambiar el tamaño cambia la importancia relativa de los mecanismos. La relación superficie/volumen, la distancia de difusión, el camino óptico, la masa térmica, los gradientes de tensión, la población de defectos y el tiempo de transporte no escalan de forma idéntica. Por ello, una película fina puede estar limitada por reacción mientras una sección gruesa pasa a estar limitada por transporte o calor; una probeta pequeña puede enfriarse rápidamente mientras una mayor retiene exotermia; una característica reproducida a una dimensión puede desaparecer cuando las escalas ópticas y mecánicas se vuelven comparables con ella. Este artículo metodológico desarrolla el problema oculto de la escala. La proposición central es que la escala es una variable de estado siempre que cambiar la geometría cambie la competencia entre mecanismos.

Palabras clave: escala; escalado; geometría; espesor; relación superficie/volumen; difusión; camino óptico; transferencia de calor; transferencia; análisis dimensional

1. Propósito y límite de evidencia

HEB-012 aborda la transferencia entre tamaños como un problema metodológico. ER-010 conserva la metrología geométrica VPP entre escalas [2], y ER-185 conserva la cualificación de fotocurado en secciones gruesas [3]. El objetivo aquí es identificar por qué el escalado proporcional simple suele fallar. La premisa extiende la advertencia de HEB-001 de que variables ocultas fuera del ajuste nominal pueden dominar la inferencia [1].

2. La geometría cambia razones, no solo dimensiones

Para objetos geoméricamente similares, el volumen crece con el cubo de una longitud característica mientras que el área superficial crece con su cuadrado. La relación superficie/volumen disminuye, por tanto, al aumentar el tamaño. Los procesos controlados por interfaces, enfriamiento, evaporación, intercambio de oxígeno o extracción pueden cambiar de importancia relativa incluso cuando se conserva la forma.

3. El tiempo de difusión crece más rápido que la distancia

Un tiempo característico de difusión escala aproximadamente con el cuadrado de la longitud para una difusividad dada. Duplicar una distancia de difusión no duplica simplemente el tiempo de equilibrado. Lavado, entrada de disolvente, transporte de oxígeno y lixiviación pueden convertirse en problemas cualitativamente distintos en geometrías más gruesas o más encerradas.

4. El camino óptico crea dependencia con la profundidad

En medios absorbentes o dispersivos, aumentar el espesor modifica el campo de luz suministrado. La superficie y el núcleo pueden seguir, por tanto, historias de reacción diferentes bajo una misma exposición nominal. ER-185 conserva la cualificación específica de aplicación del fotocurado en secciones gruesas; HEB-012 utiliza el caso solo como ejemplo de dependencia de escala [3].

5. El escalado térmico cambia la historia de reacción

Los volúmenes mayores pueden retener calor de reacción porque la generación de calor escala con el volumen reactivo mientras que la pérdida de calor queda limitada por el área de contorno y el transporte térmico. La historia de temperatura resultante puede cambiar velocidad de reacción, conversión, tensiones y degradación. Igualar la exposición nominal no iguala la historia termoquímica.

6. La oportunidad de defecto cambia con el volumen o area sometidos a tensión

Una probeta mayor muestrea más material y potencialmente más defectos. Las estadísticas de resistencia pueden cambiar con el volumen calibrado o el area sometida a tensión aunque las propiedades locales del material sean las mismas. Una probeta de ensayo y un componente no comparten necesariamente la misma distribución de fallo. Las estadísticas clásicas de eslabón más débil ofrecen una base formal para esta dependencia del tamaño en resistencia [4].

7. La escala de la característica compete con la escala del proceso

Un pixel de impresora, profundidad de curado, anchura de haz, espesor de capa, contacto de soporte o amplitud de rugosidad se vuelve importante cuando deja de ser pequeño respecto a la característica pretendida. Resolución, fidelidad dimensional y anisotropía son, por tanto, observables dependientes de la escala, no números universales únicos [2].

8. La escala puede cambiar el mecanismo dominante

A pequeña escala puede dominar la química superficial; a mayor escala puede dominar el transporte de volumen o el calor. Una probeta pequeña transparente puede ser ópticamente uniforme mientras una pieza cargada mayor pasa a estar limitada por dispersión. La misma química no ha cambiado necesariamente, pero si lo ha hecho la jerarquía de mecanismos.

9. La similitud dimensional no es similitud física

La similitud geométrica conserva razones de forma, pero no conserva automáticamente los grupos adimensionales que gobiernan calor, masa, cantidad de movimiento o reacción. La transferencia requiere identificar las razones gobernantes del fenómeno de interés. Sin ese paso, «escalado» puede describir la apariencia mientras oculta un régimen físico diferente.

10. Desafío práctico de escala

Antes de transferir un resultado, identifique longitudes características: camino óptico, distancia de difusión, espesor de pared, longitud térmica, dimensión sometida a tensión, tamaño de característica y espesor de capa límite. Ensaye a más de una escala relevante y busque un cambio de tendencia, no solo un cambio de magnitud. Cuando el componente previsto se encuentre fuera del intervalo de escala validado, trate la transferencia como una extrapolación.

11. Las leyes de escalado hacen predecibles los cambios ocultos

Los argumentos de escala más sencillos ya advierten contra la transferencia lineal. Para una longitud característica L , el área escala como L^2 y el volumen como L^3 . Para un equilibrio controlado por difusión, un tiempo característico suele escalar como L^2/D para una difusividad fija D . Estas relaciones no resuelven un experimento real, pero identifican donde falló la intuición proporcional. Duplicar el espesor puede cuadruplicar una escala temporal de difusión, mientras duplicar una dimensión lateral cambia de forma diferente la geometría de pérdida de calor. El razonamiento dimensional debe preceder, por tanto, al escalado empírico: identifique que términos crecen con longitud, área, volumen o tiempo y que límites permanecen fijos.

12. El escalado óptico y térmico pueden reforzarse mutuamente

En una sección fotoreactiva gruesa, el camino adicional atenúa la luz mientras el volumen adicional puede retener más calor de reacción. El núcleo puede, por tanto, recibir menos iniciación óptica y experimentar una historia térmica diferente de la superficie. Aumentar la exposición para compensar la atenuación óptica puede modificar aún más la exotermia. ER-185 conserva la cualificación específica de aplicación del fotocurado en secciones gruesas [3]. El punto metodológico general es que la escala puede acoplar mecanismos que parecían separables en una probeta fina.

13. La escala mecánica expone poblaciones de defectos diferentes

Una probeta pequeña muestrea un volumen sometido a tensión limitado y puede evitar defectos raros que se vuelven probables en un componente mayor. A la inversa, una geometría grande puede redistribuir tensión y reducir concentración local en comparación con una probeta pequeña entallada. Escalar el comportamiento mecánico requiere, por tanto, estadística de materiales y geometría. Un único valor de resistencia no es automáticamente transferible entre tamaños de calibre, escalas de característica y arquitecturas de componente. El experimento debe declarar que población y campo de tensiones representaba la medición.

14. Las probetas representativas requieren dimensiones gobernantes representativas

Una probeta no necesita copiar todo el componente para ser representativa, pero debe conservar las dimensiones que controlan el mecanismo afirmado. Para un proceso limitado por difusión puede ser el espesor de pared o la longitud de camino; para curado óptico, la distancia de atenuación; para flexión, el espesor y la luz; para contaminación superficial, la relación área/volumen. Elegir una probeta conveniente cambiando la dimensión gobernante puede crear un ensayo preciso pero físicamente irrelevante. El problema oculto de la escala se controla identificando que dimensiones transportan el mecanismo antes de diseñar la probeta.

15. El aparato de medición también tiene una escala

Escalar la probeta puede desplazarla respecto a la escala característica del sistema de medición. Una sonda superficial que muestrea una región pequeña puede ser representativa en una película fina uniforme y no representativa en una pieza mayor heterogénea. Un tamaño de voxel que resuelve un defecto pequeño en una geometría puede fusionarlo en señal de volumen parcial en otra. Una fijación puede restringir fuertemente una probeta pequeña y tener influencia despreciable en una mayor. Por ello deben considerarse conjuntamente la escala de medición y la de la probeta. Un estudio de transferencia puede fallar incluso cuando la física del material escala aceptablemente porque la metrología ya no resuelve la misma población de características.

16. Reducir la escala también puede crear artefactos

El escalado hacia arriba recibe la mayor atención, pero la miniaturización no es automáticamente más segura. Las características muy pequeñas pueden quedar dominadas por rugosidad superficial, pixelación, fuerzas de menisco, intercambio de oxígeno, adhesión de contorno o tamaño finito de partícula. Una microprobeta de laboratorio puede, por tanto, entrar en un régimen que el componente completo nunca experimenta. Los estudios de reducción de escala deben preguntar si la simplificación conserva el mecanismo gobernante o lo sustituye por otro controlado por límites y resolución de fabricación. Un ensayo pequeño representativo es aquel que conserva las razones adimensionales o características relevantes, no simplemente aquel que utiliza menos material.

17. Conclusiones

La escala cambia el peso de los mecanismos. La relación superficie/volumen, el tiempo de difusión, la atenuación óptica, la retención térmica, la oportunidad de defecto y las razones proceso-característica no se transforman de forma idéntica. Un resultado puede ser válido a una escala y engañoso a otra sin que exista ningún error experimental en ninguna de ellas. La transferencia requiere un modelo de escala, no un factor multiplicativo.

Referencias

- [1] Seguro, J. The Hidden Error Budget: Measurement-System Failure, False Precision and Experimental Design in Laboratory Science. HEB-001. 3Dresyns Independent Technical Articles (2026). DOI: 10.5281/zenodo.22862642.
- [2] Seguro, J. Metrology of Vat Photopolymerisation: Resolution, Trueness, Precision and Geometric Fidelity Across Scales. ER-010. Zenodo (2026). Concept DOI: 10.5281/zenodo.22017483.
- [3] Seguro, J. Thick-Section Photocuring of Putties, Gels, Sealants and Potting Compounds: Attenuation, Frontal Cure, Exotherm and Through-Cure Qualification. ER-185. 3Dresyns Engineering Publications (2026).
- [4] Weibull, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. Journal of Applied Mechanics 18(3) (1951) 293-297. DOI: 10.1115/1.4010337.

Limite de conocimiento

HEB-012 trata el problema general de razonamiento en la transferencia de escala. ER-010 conserva la metrología dimensional VPP; ER-185 conserva la cualificación de fotocurado en secciones gruesas; el escalado específico de aplicación permanece en el ER correspondiente.

Limitaciones

Este artículo metodológico es una síntesis acotada de los corpus controlados HEB y Engineering Review. No informa de un nuevo conjunto de datos experimental, no establece umbrales numéricos universales y no convierte ejemplos de un dominio en especificaciones aplicables a todas las aplicaciones. Las afirmaciones que requieren cualificación específica de aplicación permanecen en la revisión técnica o estudio primario correspondiente.