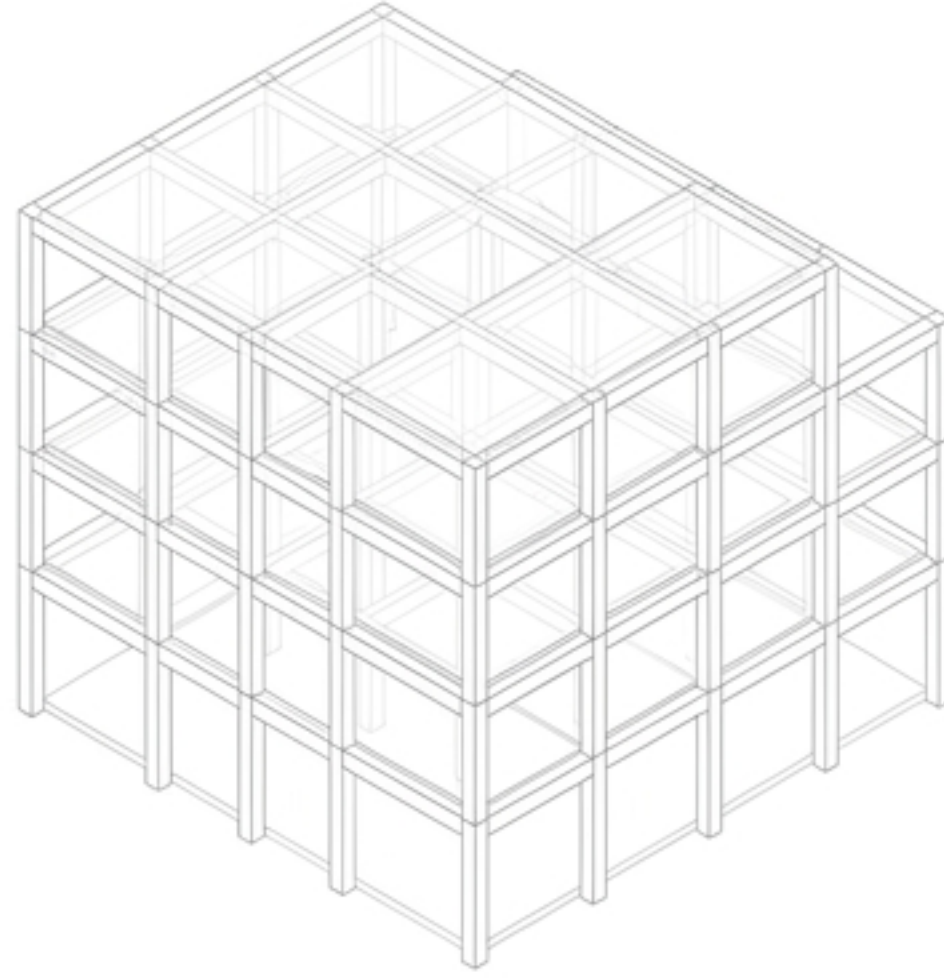




La Ilusión de la Circularidad

Por qué el material no define el destino: Un análisis paramétrico del hormigón, acero y madera.

Integración BIM para el cálculo del Índice de Circularidad (CI) en fases tempranas de diseño.

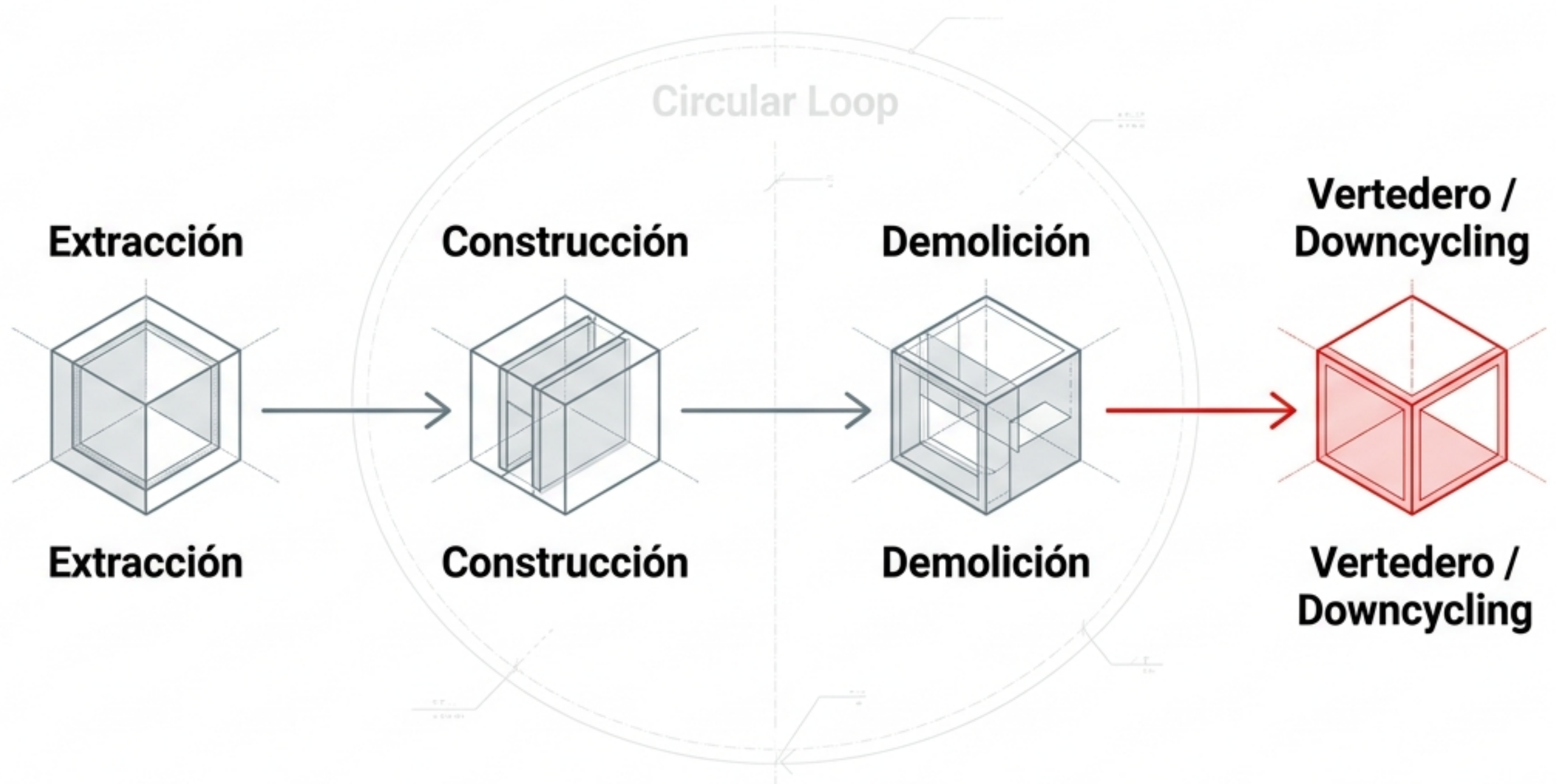
La Trampa Lineal: Un sector construido sobre el desperdicio

>90%

Proporción de los recursos en la economía global que no se recirculan al final de su vida útil.

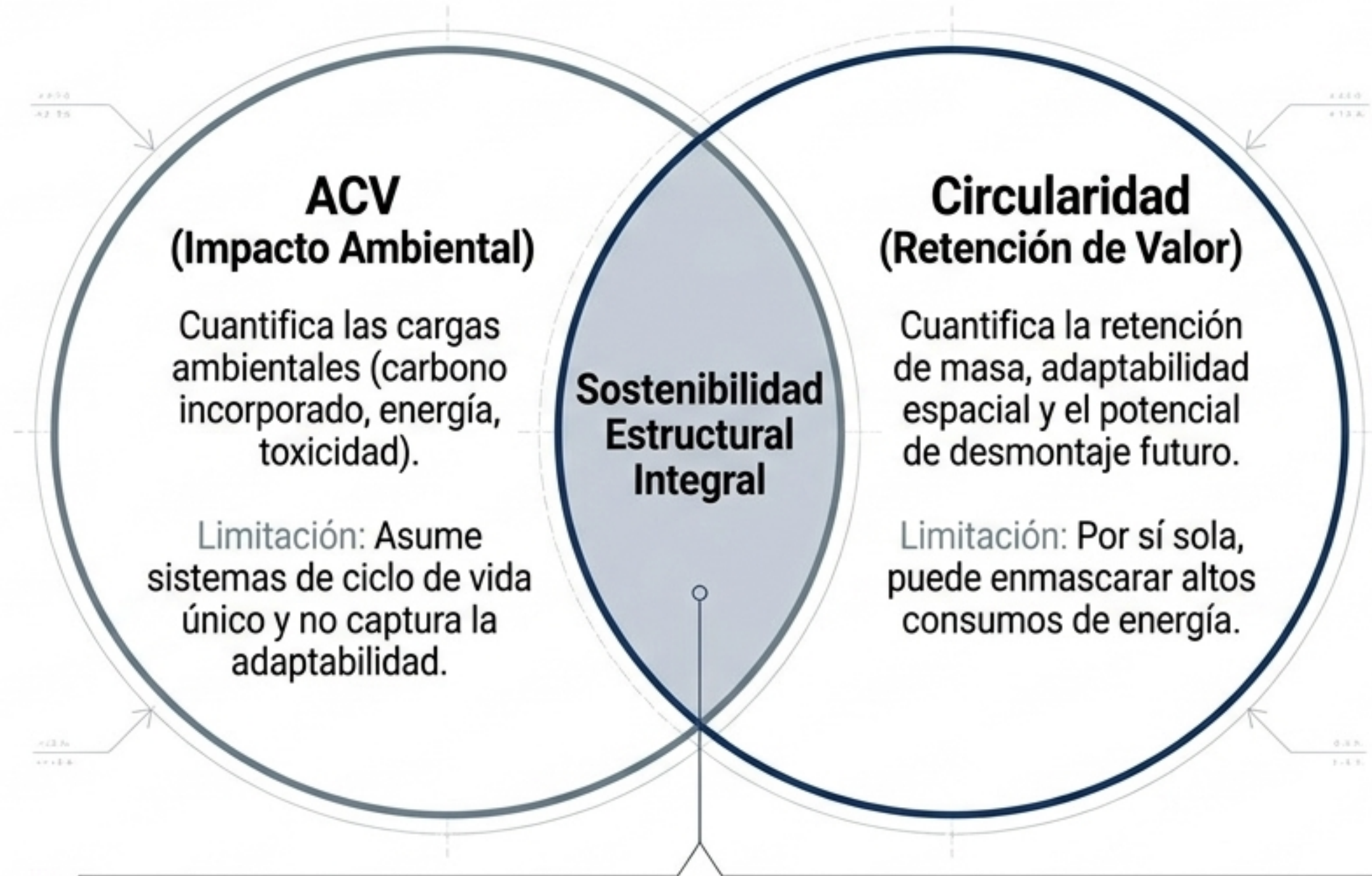
40%

Representación de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el total de residuos de la UE.



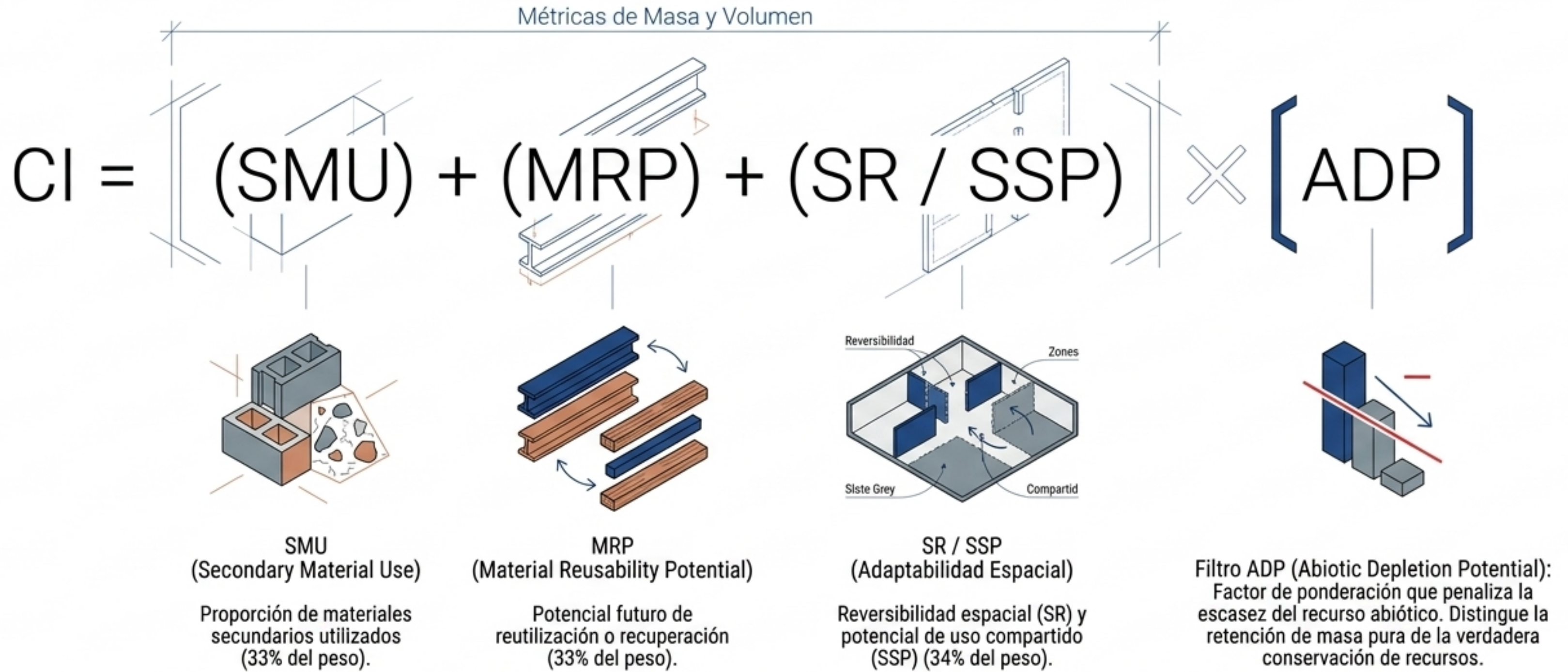
Depender del vertedero o del 'downcycling' (reciclaje de menor valor como relleno base) es incompatible con la arquitectura sostenible real.

La Brecha de Medición: ¿Por qué el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) no es suficiente?

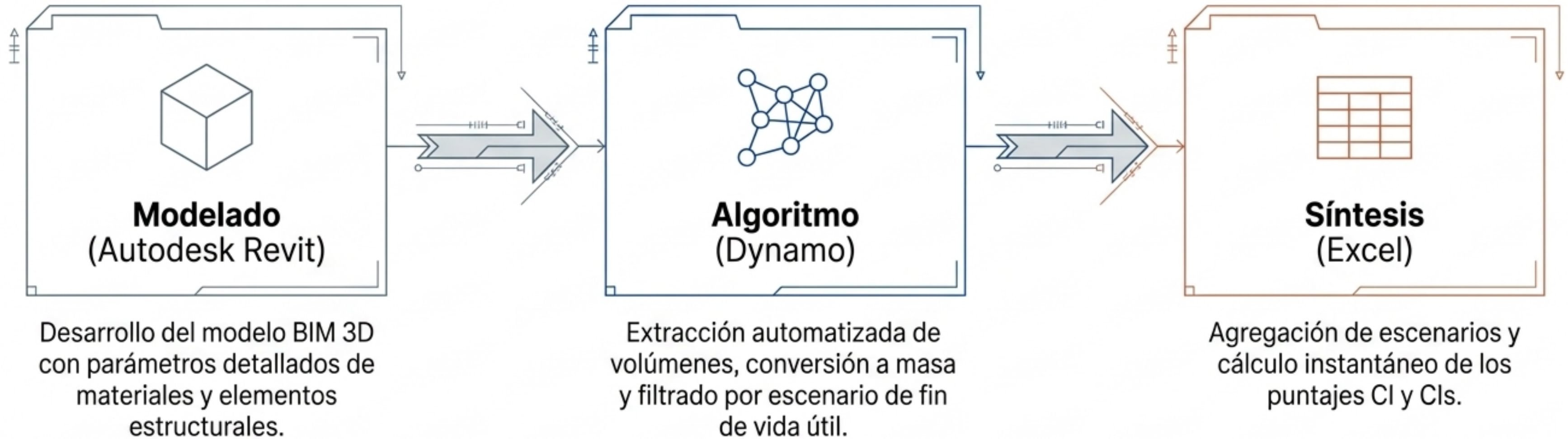


Requiere un marco de evaluación multicriterio que resuelva la tensión entre el impacto ambiental y la retención real de recursos técnicos.

Desglosando el Índice de Circularidad (CI)



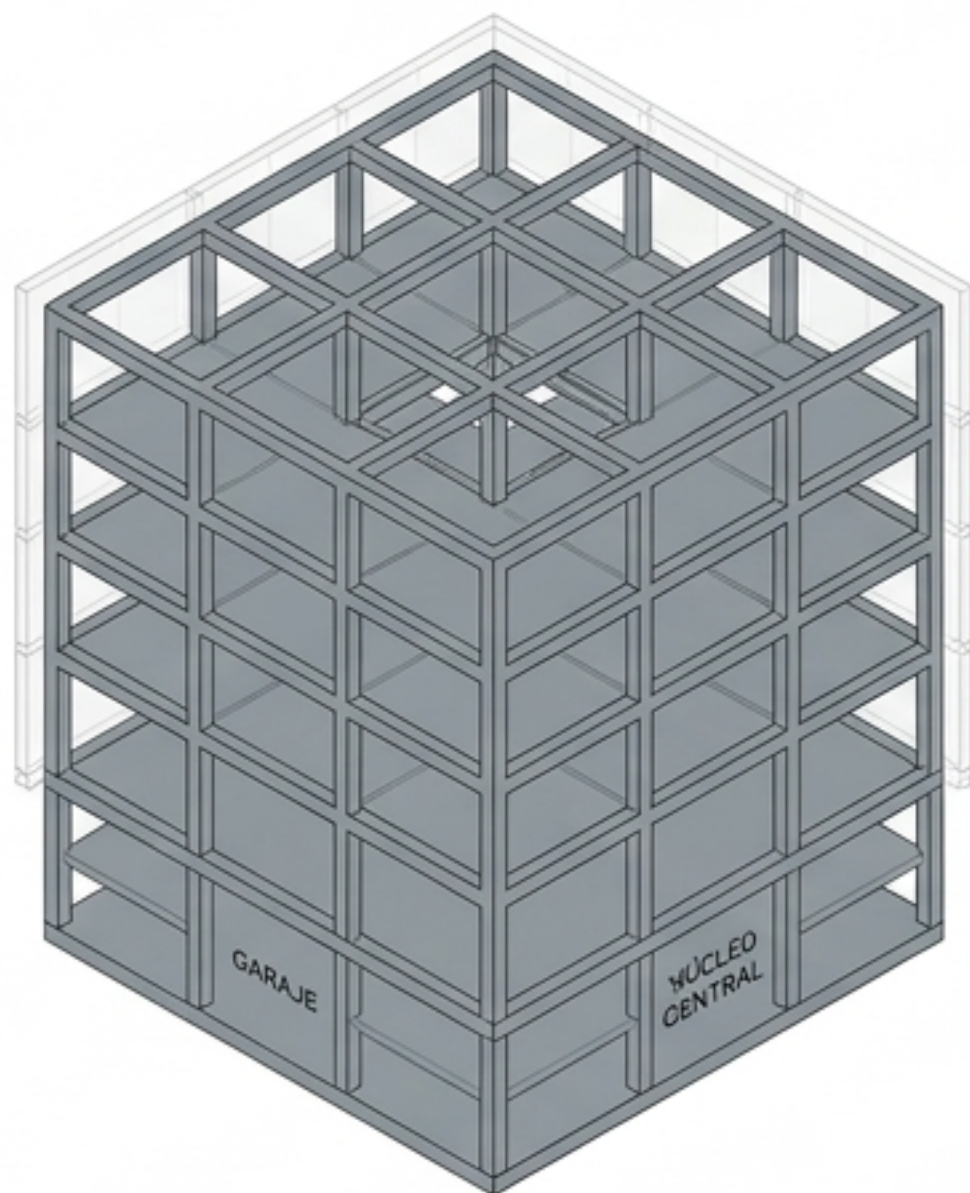
El Flujo de Trabajo Automatizado: De la Geometría al Dato



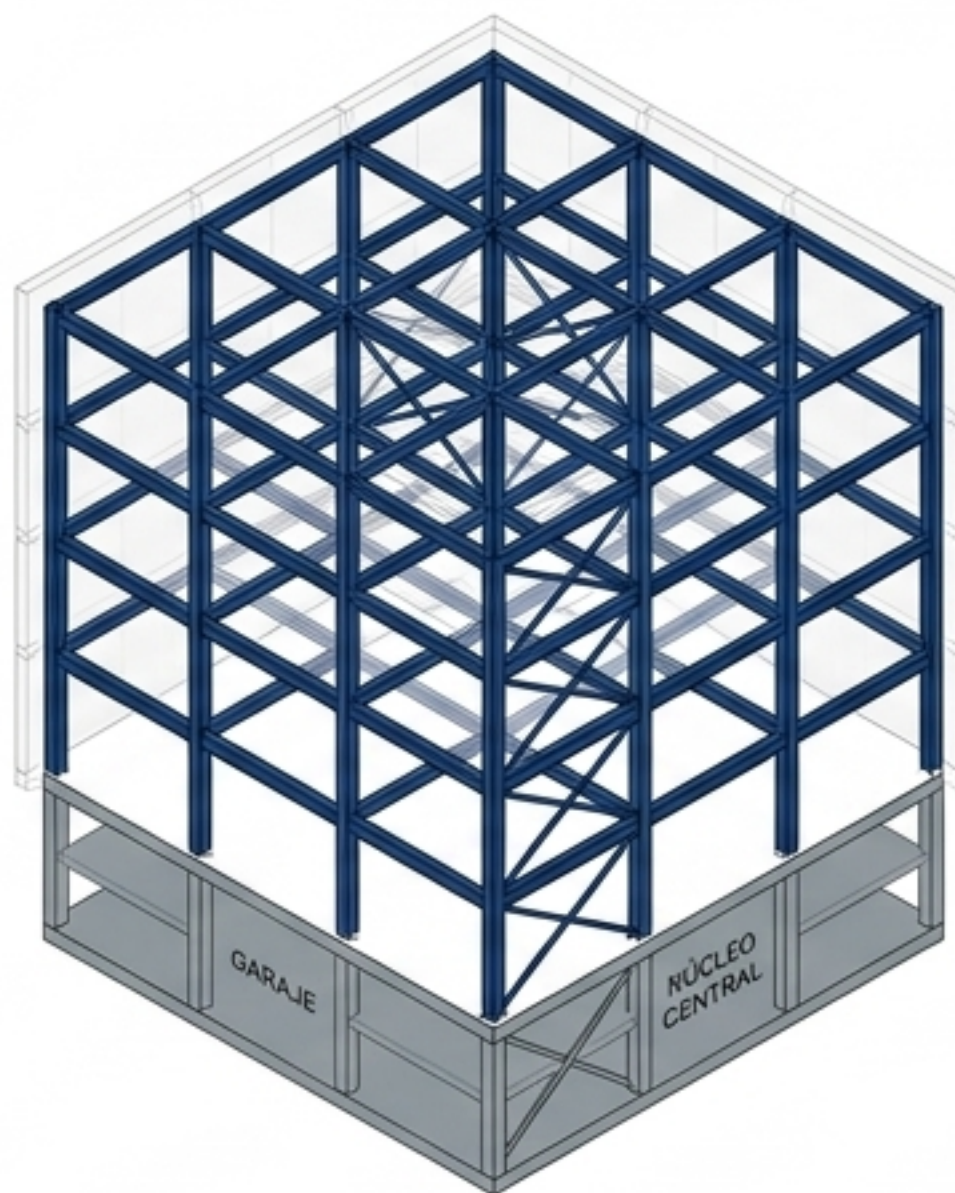
Insight Central: La circularidad ya no es un cálculo forense post-mortem, sino una variable paramétrica evaluable en la fase de diseño conceptual.

La Arena de Prueba: Un Edificio, Tres Variantes

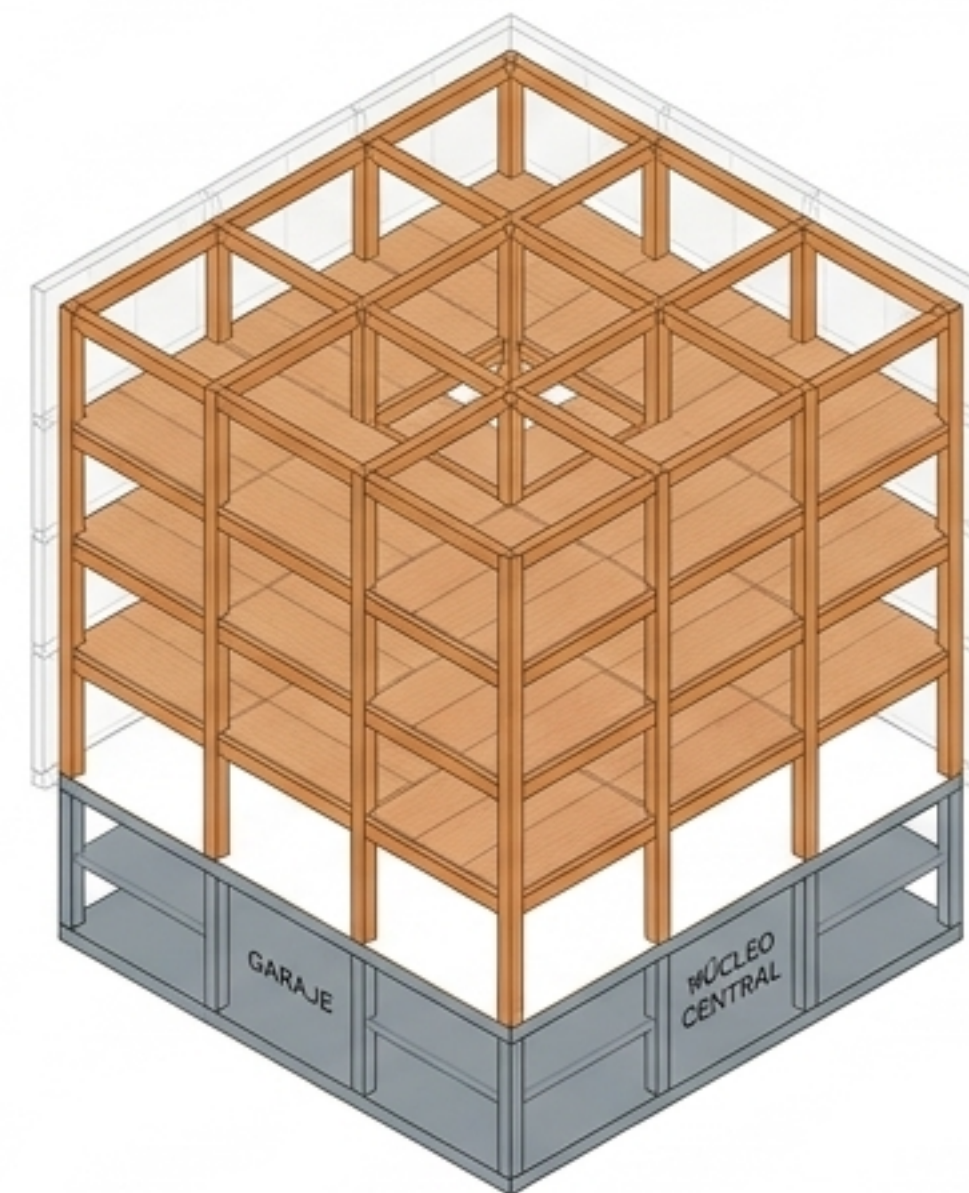
Edificio de oficinas genérico, 4 plantas sobre rasante
rasante (altura total 15.6m), planta de 25x25m.
Fachadas térmicas idénticas ("shell and core").



Hormigón Armado (C20/25)



Acero Estructural (S235JR)



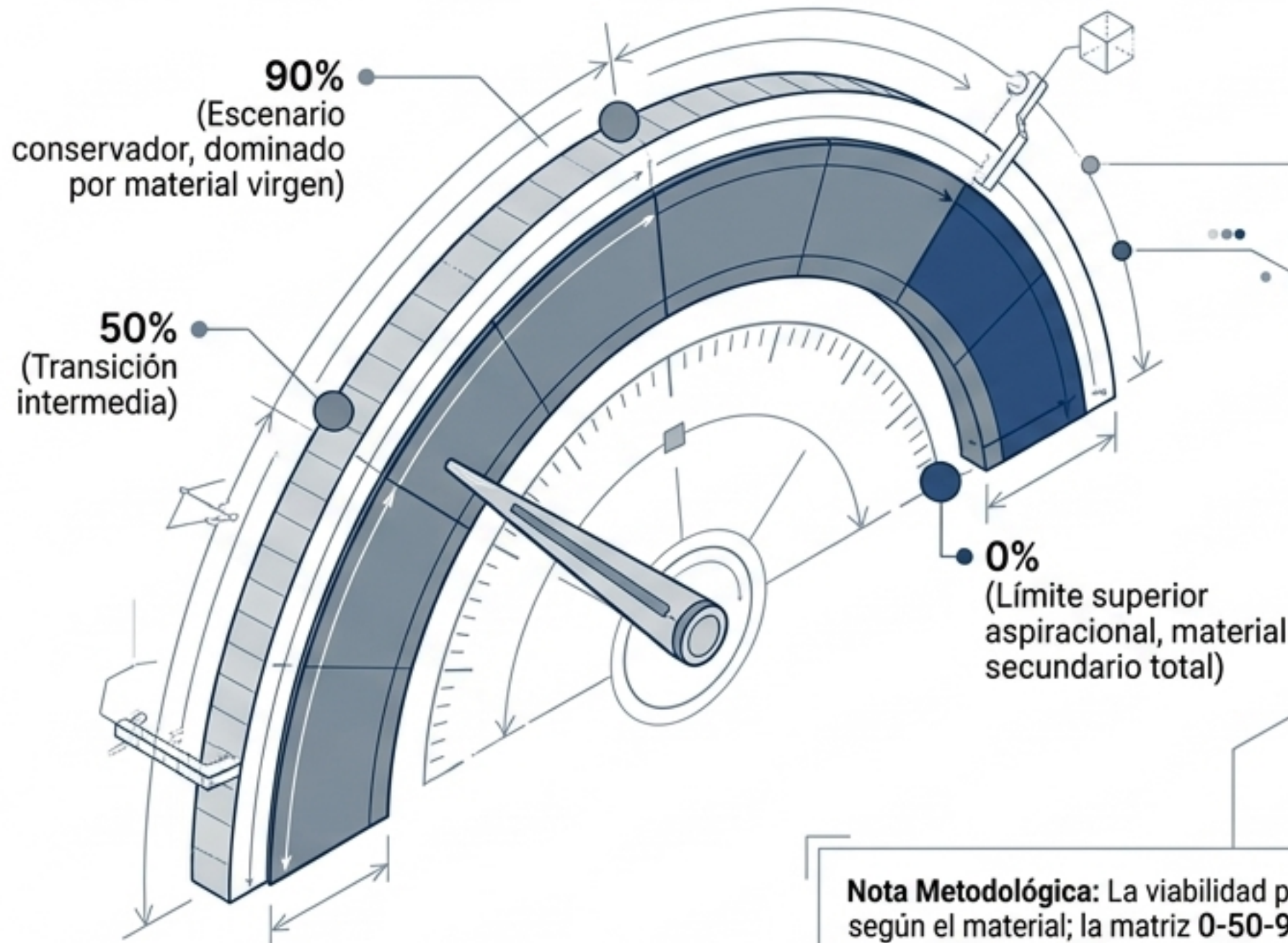
Madera Laminada (D30)

Control de Variables: En las tres variantes, el núcleo central y la planta subterránea (garaje) se mantienen en hormigón armado para garantizar una base de estabilidad funcional idéntica.

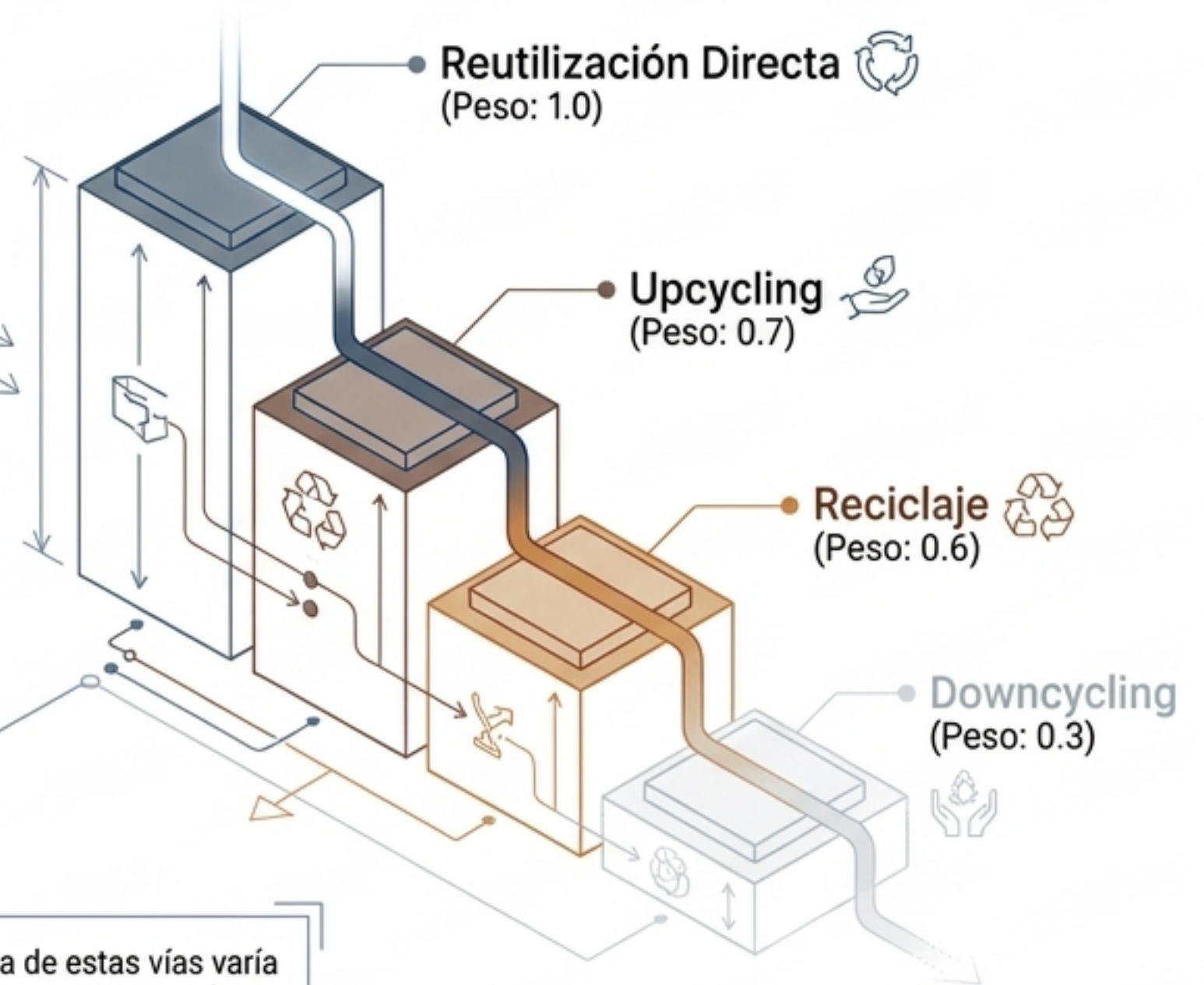
Sometiendo el Diseño a Estrés: Los 12 Escenarios

La circularidad no es estática; depende de las condiciones futuras del mercado y las rutas de recuperación.

Insumo de Material Primario (Entrada)

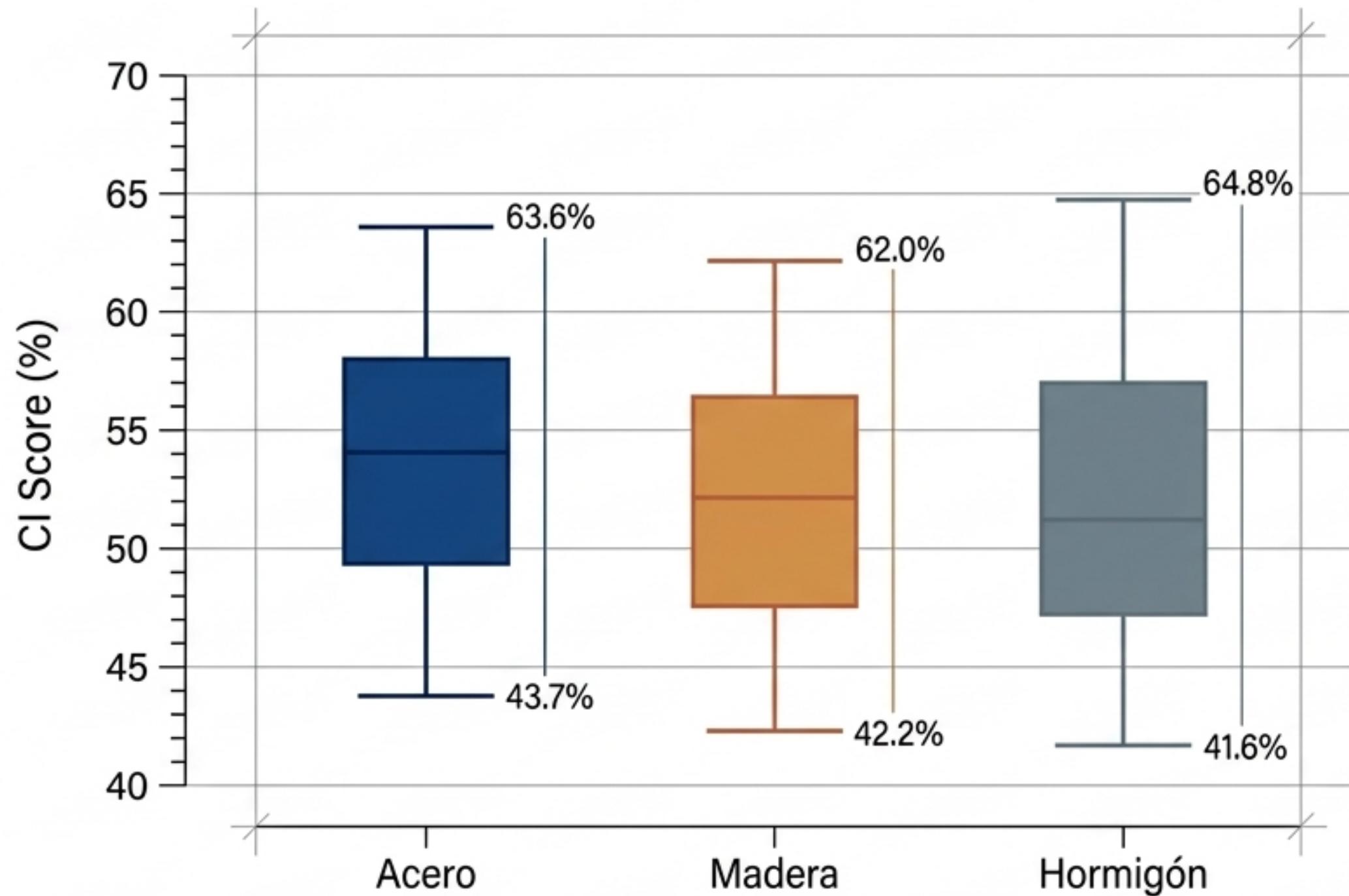


Asignación de Fin de Vida (Salida)



Nota Metodológica: La viabilidad práctica de estas vías varía según el material; la matriz 0-50-90% proporciona una base paramétrica justa para evaluar la sensibilidad.

El Marcador: Estabilidad frente a Volatilidad



Acero

Alta estabilidad.
Rango CI: 43.7% - 63.6%
(Desviación estándar: 7.80).
Comportamiento predecible.

Madera

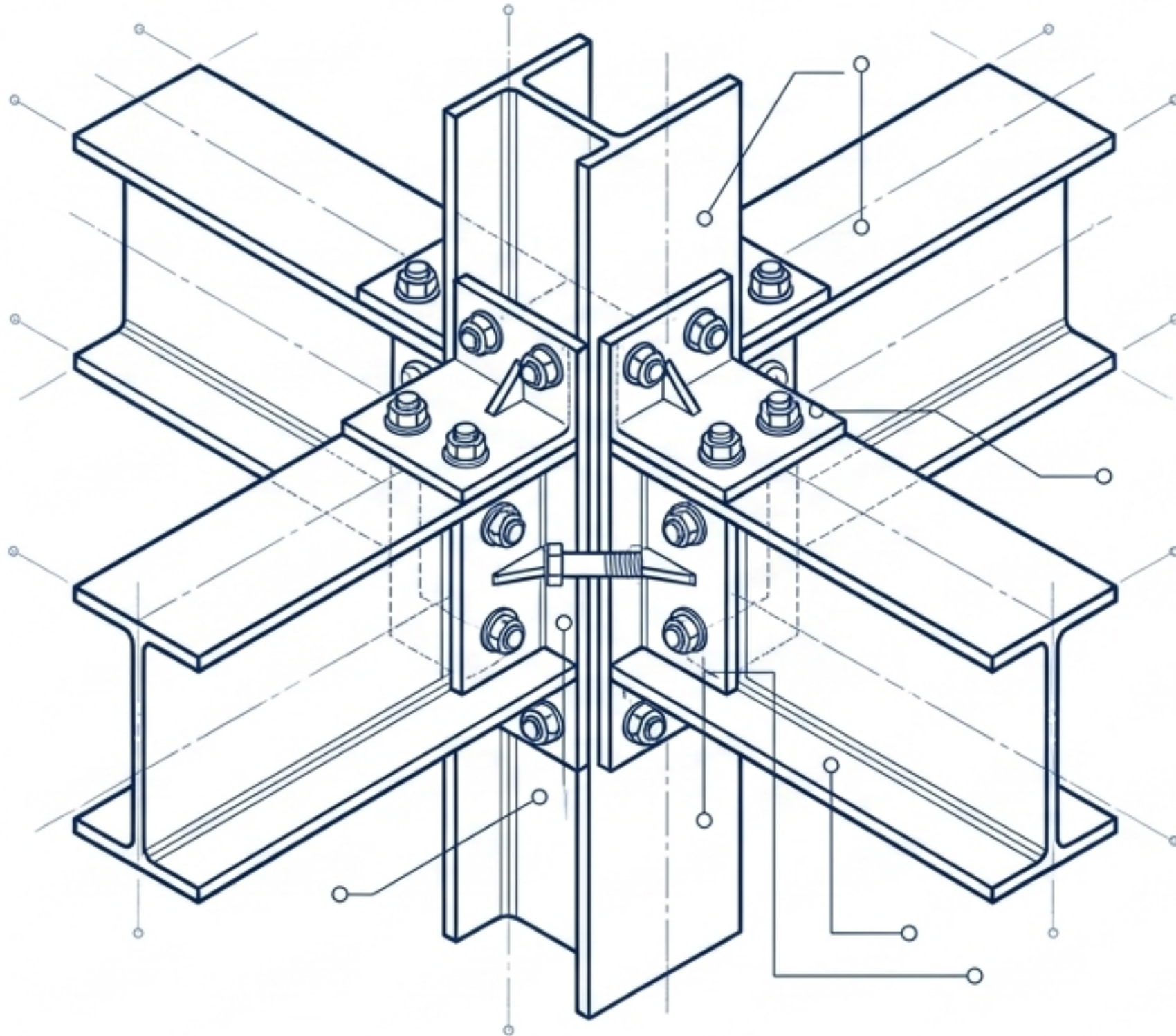
Rendimiento medio-alto con vulnerabilidades.
Rango CI: 42.2% - 62.0%
(Desviación estándar: 7.91).

Hormigón

Alta volatilidad.
Rango CI: 41.6% - 64.8%
(Desviación estándar: 8.09).
El resultado final depende drásticamente de la ruta de reciclaje.

Insight Central: El acero muestra los valores promedio más altos y estables. El hormigón presenta la mayor variabilidad, demostrando que su circularidad es altamente susceptible al escenario de recuperación implementado.

Acero: El Rendimiento Estable



La Ventaja (Alto MRP)

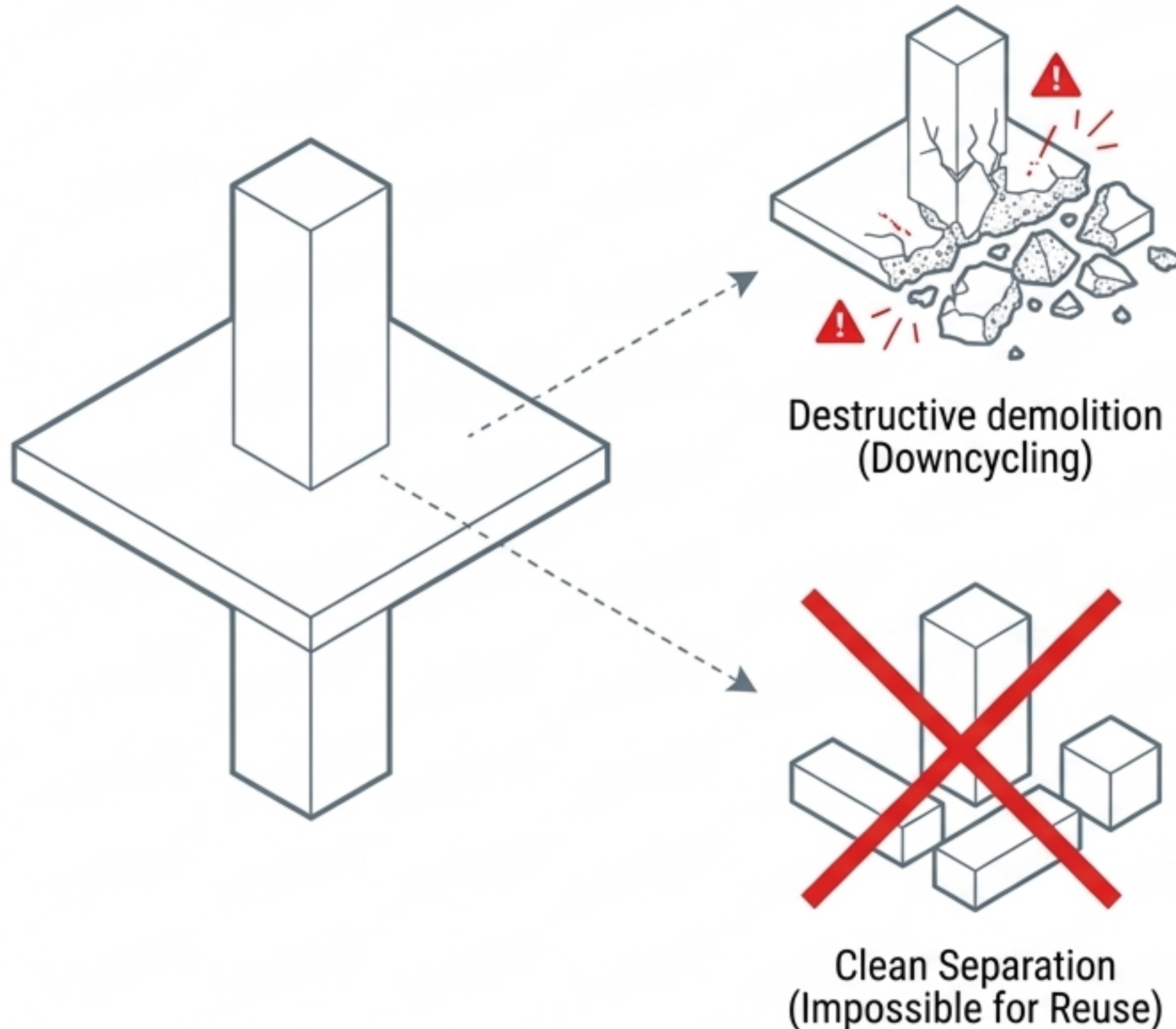
El modelo asume conexiones desmontables (atornilladas, no soldadas). Esto permite tasas de reciclabilidad comprobadas (>95%) y facilita el desmontaje para la reutilización estructural directa, manteniendo el valor del material.

La Vulnerabilidad (Sensibilidad al ADP)

Valor ADP: 6.89×10^{-7} (El más alto de los tres).

A pesar de su alta circularidad de masa, el acero depende de elementos constituyentes críticos y escasos. Los puntajes de circularidad del acero fluctúan bruscamente (hasta $\pm 20\%$) cuando se altera la ponderación del agotamiento de recursos.

Hormigón: El Rendimiento Volátil



La Barrera (Naturaleza Monolítica)

La imposibilidad de separar limpiamente los agregados y el cemento in situ limita gravemente la reutilización directa (Reciclaje directo <70%).

La Realidad del "Downcycling"

Las puntuaciones más altas del hormigón asumen un reciclaje utópico. En la realidad, a menudo se tritura para sub-bases (downcycling). El beneficio ambiental es mínimo debido a la energía de transporte y trituración.

El Efecto Máscara

Valor ADP: 1.30×10^{-7} (El más bajo).

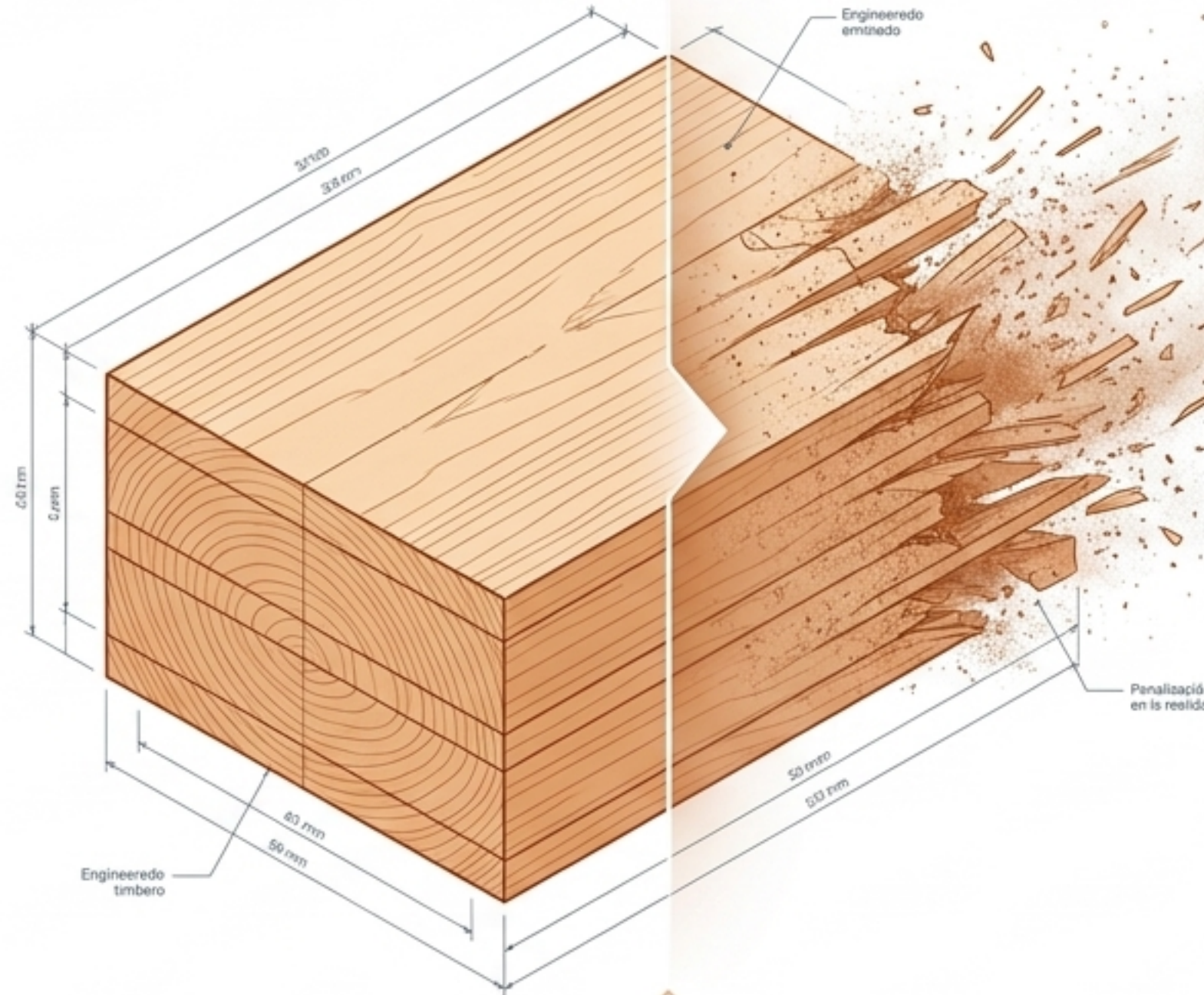
Este bajo factor de agotamiento abiótico "enmascara" su pobre potencial de reutilización real en la fórmula final.

Madera: El Rendimiento Complejo

CI_s = 55.2%

Paradoja de la Masa

Calculada puramente por masa, la madera domina. Su composición renovable la hace altamente atractiva.



CI = 52.1%

Penalización en la Realidad

Valor ADP: 2.52×10^{-7}

Los modelos asumen altas tasas de degradación orgánica al final de su vida útil (50-90% estimado como residuo).

El Punto Ciego de la Metodología: Los indicadores de circularidad actuales (CI) evalúan recursos técnicos, pero no capturan la renovación biológica ni el secuestro de carbono. Evaluar la madera requiere métricas híbridas (LCA + CI).

Matriz de Síntesis Estructural

	Promedio CI	Volatilidad (Rango)	Potencial de Reutilización (MRP)	Vulnerabilidad Principal
Hormigón	52.4%	Alta 	Bajo-Medio 	Monolitismo, alto riesgo de Downcycling.
Acero	53.6%	Baja 	Alto 	Alta sensibilidad al agotamiento abiótico (ADP).
Madera	52.1%	Media 	Medio 	Degradación biológica al final del ciclo.

CI vs. CIs: El Filtro de Escasez de Recursos

Circularidad de Masa (CIs)

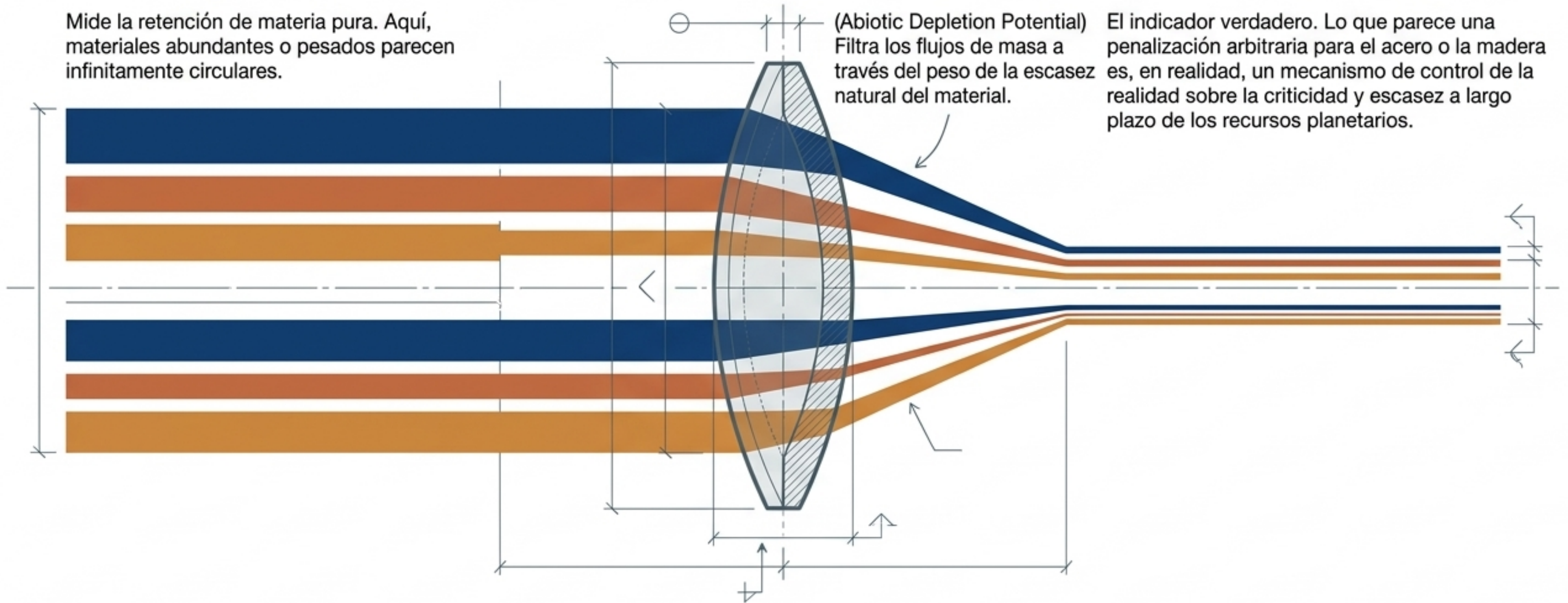
Mide la retención de materia pura. Aquí, materiales abundantes o pesados parecen infinitamente circulares.

Lente ADP

(Abiotic Depletion Potential)
Filtrar los flujos de masa a través del peso de la escasez natural del material.

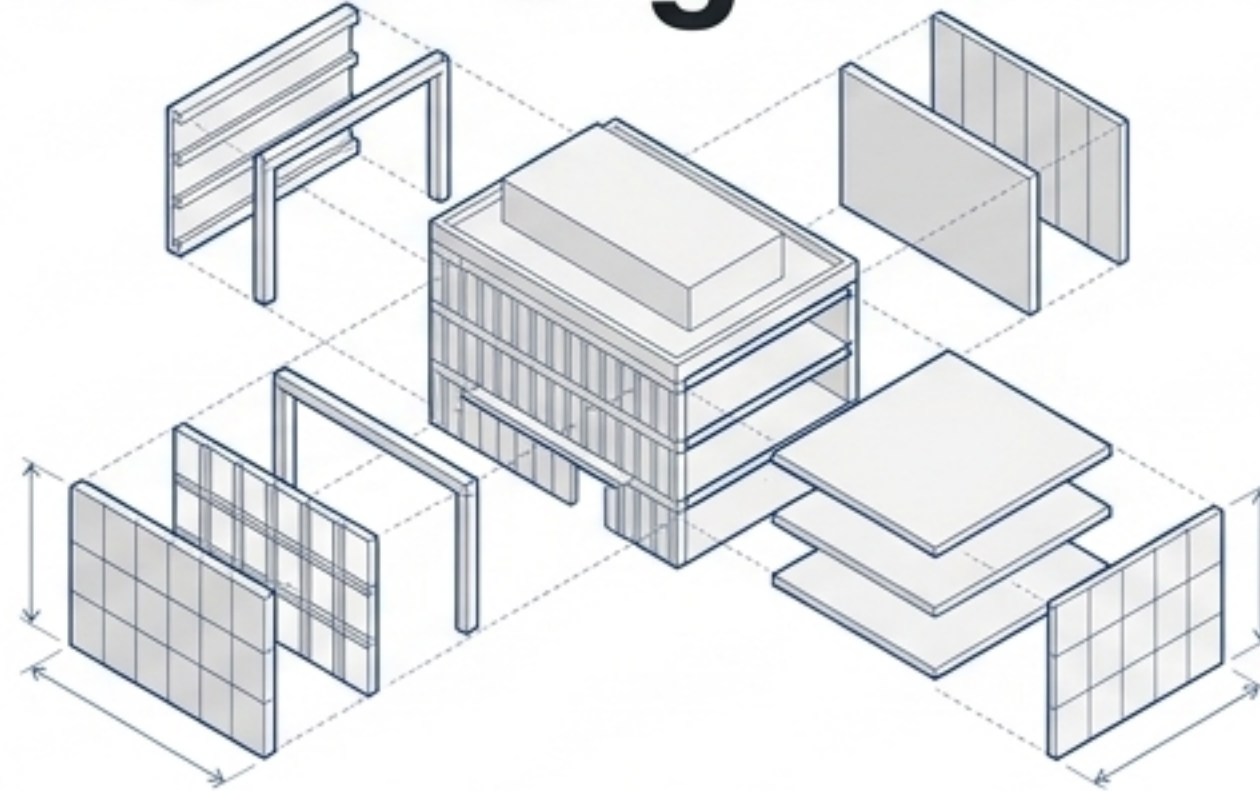
Circularidad de Recursos (CI)

El indicador verdadero. Lo que parece una penalización arbitraria para el acero o la madera es, en realidad, un mecanismo de control de la realidad sobre la criticidad y escasez a largo plazo de los recursos planetarios.



El Cambio de Paradigma

La circularidad no es una propiedad inherente de un material. Es el resultado de una estrategia de diseño.



Seleccionar un material 'verde' no garantiza la circularidad.

El Diseño para el Desmontaje (DfD), las conexiones reversibles y la adaptabilidad espacial (SR/SSP) superan matemáticamente a la selección de materiales primarios.

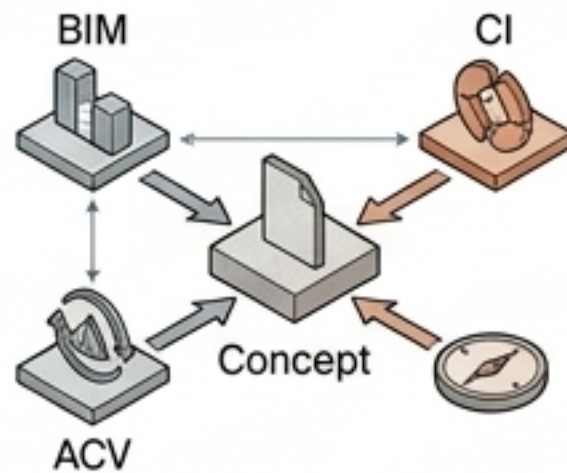
Priorizar la retención de la función, no solo la retención de la masa.

Perspectivas y Próximos Pasos

1

Adoptar Métricas Híbridas (BIM+CI+ACV)

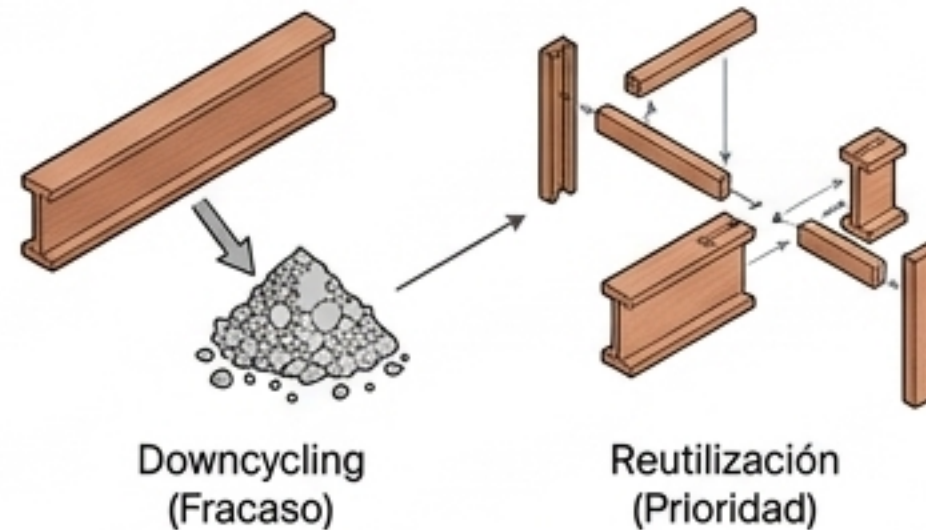
Un solo número es engañoso. Los flujos de trabajo BIM deben integrar de forma nativa análisis espaciales, ambientales y de escasez (ADP) en las etapas tempranas del concepto.



2

Cuestionar el Reciclaje de Masas

El reciclaje que tritura o destruye (Downcycling) es un fracaso del diseño. Los estándares deben priorizar e incentivar la reutilización de componentes estructurales intactos.



3

Estandarizar Pasaportes de Materiales

La incertidumbre degrada el valor. La circularidad requiere bases de datos regionales dinámicas e inventarios de componentes (EU CPR 2022) rastreables desde el inicio del proyecto.

