

SOSTENIBILIDAD EN EL PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS: NUEVOS PARÁMETROS DEL SIGLO XXI

SUSTAINABILITY IN STRUCTURAL DESIGN AND CONSTRUCTION: NEW PARAMETERS OF THE 21ST CENTURY

Salvador Domínguez Gil^a, Pablo Anaya Gil^b, Alberto Elvira Hurtado^c,
Miriam Oosterkamp Villaverde^d, Andrea San José Cabrero^e y Gema Ramírez Pacheco^f

^a Arquitecto. SOCOTEC. Universidad Politécnica de Madrid. Bids & Proposals Manager. Salvador.dominguez@socotec.com

^b Doctor Arquitecto. SOCOTEC. Universidad Politécnica de Madrid. Jefe de Equipo de Estructuras. Pablo.anaya@socotec.com

^c Arquitecto. SOCOTEC. Universidad Politécnica de Madrid. Técnico de Estructuras. Alberto.elvira@socotec.com

^d Arquitecto. SOCOTEC. Universidad Politécnica de Madrid. Técnico de Estructuras. Miriam.oosterkamp@socotec.com

^e Arquitecto. Hipoges. Universidad de Navarra. Advisor. andreasjosec@gmail.com

^f Doctor Arquitecto. Universidad Politécnica de Madrid. Profesora ETSAM (UPM). Gema.ramirez.pacheco@upm.es

RESUMEN

La industria de la construcción se está transformando en torno al concepto de sostenibilidad, dentro del cual la ingeniería estructural adopta una visión más holística. Este cambio prioriza el ciclo de vida de los edificios, integrando criterios ambientales, económicos, sociales y culturales. La sostenibilidad ambiental lidera el cambio en este ámbito, fomentando el uso de materiales y técnicas de bajo impacto mientras se busca optimizar costes a largo plazo. Además, existe un enfoque de valor creciente en el concepto de bienestar e identidad cultural. Este paradigma multidisciplinario redefine el papel del proyectista estructural, exigiendo competencia técnica, visión estratégica y capacidad integradora.

ABSTRACT

The construction industry is evolving steadily toward sustainability, with structural engineering embracing a more holistic perspective. This transformation focuses on the entire building life cycle, integrating environmental, economic, social, and cultural considerations. Environmental sustainability plays a central role, encouraging the use of low-impact materials and techniques while striving to optimize long-term costs. At the same time, it highlights the importance of strengthening well-being and cultural identity. This multidisciplinary approach is reshaping the role of structural designers, demanding not only technical proficiency but also strategic vision and the ability to integrate diverse perspectives into their designs.

PALABRAS CLAVE: Análisis del Ciclo de Vida, Toma de Decisiones Informada, Valores Intangibles

KEYWORDS: Life-Cycle Assessment, Informed Decision Making, Intangible Values

1. Introducción

El desarrollo sostenible, como concepto reconocible, es introducido por organizaciones internacionales hacia finales del siglo XX, destacando la definición recogida en el informe Brundtland, de 1987 [1]. Sin embargo, este y la búsqueda de su aplicación no ganan relevancia significativa hasta el fin de la segunda década del siglo XXI [2] y, de manera particular, hasta la reconocida crisis sanitaria y económica global del del Coronavirus en 2019 (COVID-19), cuyas consecuencias directas llevan a organizaciones públicas y privadas a modificar prioridades, operativas y objetivos. Así, se impulsan de manera significativa las propuestas enfocadas en solucionar o dar respuesta a los impactos sociales y económicos negativos [3] mientras se busca preservar los impactos positivos que el “nuevo orden mundial” de la crisis sanitaria ha generado a nivel medioambiental [4].

En un momento comprendido entre los dos hitos previos se haya la crisis financiera de 2008, descrita como el mayor desastre económico previo al COVID-19 y posterior a la Gran Depresión de 1929. Esta repercute importantes beneficios medioambientales a corto y medio plazo junto con la caída de actividad económica y la ralentización de su crecimiento, incluyendo la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, GEI (o GHG, del inglés Greenhouse Gas Emissions) de los sectores de la construcción y producción industrial [5][6]. A esta crisis la suceden en un marco teórico-conceptual los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS (o SDGs, del inglés Sustainable Development Goals) incluidos en la agenda 2030 [7], así como el Pacto Verde Europeo (EGD, del inglés European Green Deal) [8], hitos que remarcan el rol de las Administraciones Públicas en la consecución de un desarrollo sostenible. Junto a estas destacan las Directivas Europeas en Eficiencia Energética [9] y en Contratación Pública Sostenible [10], con un marcado esfuerzo no sólo en el campo

de la sostenibilidad medioambiental, sino también en el ámbito de la sostenibilidad social y económica [11].

España, al igual que otros países de la agrupación EU27+UK, se encamina dentro de este contexto general hacia la mejora de la sostenibilidad de todos los sectores económicos. Los sectores clave, tales como el sector de la construcción o el sector industrial, son priorizados junto con la transición energética hacia el *Zero-Carbon* o *Net-Carbon*. Estas apuestas se ven fomentadas con las propuestas en materia de Contratación Pública Sostenible, siguiendo las bases establecidas por la Comisión Europea y la planificación estratégica del país, que incluye la sostenibilidad de la construcción, su digitalización, la reducción de residuos y de emisiones de efecto invernadero.

2. Hacia un nuevo paradigma global: sostenibilidad, revolución y tendencia

El desarrollo de la sociedad y de los diferentes núcleos urbanos en que habita esta lleva aparejado el incremento del consumo de recursos y otros impactos ambientales ya reconocidos desde finales del siglo XX [12]. Sin embargo, los primeros esfuerzos por paliar dichos impactos, vinculados con la consecución de las diferentes implementaciones regulatorias en materia de eficiencia energética, solo ha sido posible gracias a la reducción de costes en operación y mantenimiento para los propietarios y usuarios de los edificios [13]. No es hasta una etapa posterior, a comienzos del siglo XXI, que se focalizan los esfuerzos en Europa hacia el coste operacional del ciclo de vida completo buscando el desarrollo de una metodología común europea que permita la toma de decisiones sostenibles en el ámbito de actuación de las Administraciones Públicas [14], sin resultados en la actualidad.

Con la implementación de las Directivas de Eficiencia Energética en Edificación (2010/31/EC) en España, los costes de ejecución se ven incrementados alrededor de un 20% mientras se mejoran las características de las envolventes y el rendimiento energético de los edificios, generando una reducción general del coste del ciclo de vida estimada alrededor del 40% para edificios construidos en 2020.

La Agenda 2030 incorpora otros conceptos en el imaginario colectivo tales como el diseño inclusivo, seguro, resiliente o sostenible, apoyándose en nuevos objetivos y parámetros cuantitativos tales como la reducción del consumo material, la reducción de los residuos generados, la reducción del consumo energético, la selección de soluciones de mayor durabilidad o la selección de soluciones con mayor capacidad de adaptación a cambios futuros. En línea con estas nuevas tendencias, las propuestas arquitectónicas articulan múltiples requisitos y prestaciones adicionales, añadiendo nuevos alcances, materiales y conocimientos en los proyectos.

Tratando de remarcar los nuevos atributos, las edificaciones de comienzos de siglo XXI no sólo buscan cumplir los objetivos conceptuales propuestos, sino también acreditarlos mediante las diversas certificaciones medioambientales o “sellos verdes” existentes en el mundo, destacando en España la aplicación de LEED, BREAM, WELL, VERDE y PASSIVHAUS. Los diversos indicadores de sostenibilidad recogidos en estas certificaciones facilitan un marco basado en información cuantitativa y cualitativa para evaluar el impacto de los proyectos. Sin embargo, dada su implicación en las actividades económicas del sector inmobiliario y su repercusión en la financiación reducida o “verde”, la falta de un marco común metodológico en la cuantificación de los indicadores y en su calificación final remarcan la necesidad de mecanismos específicos que permitan la homogeneización de los resultados. Surgen así nuevas regulaciones

como la Taxonomía Europea (2020), para definir las actividades económicas sostenibles y los medios para reportarlas; y el marco metodológico común europeo de indicadores de sostenibilidad en edificación, LEVEL(s) [15], como base común de evaluación e reporte del rendimiento en materia de sostenibilidad de los edificios desde su diseño hasta el fin de su vida útil. Este marco común y las certificaciones de sostenibilidad previamente recogidas tienen en común la apuesta por herramientas para la evaluación de la sostenibilidad basadas en el análisis cualitativo y cuantitativo del ciclo de vida de los edificios y de sus partes.

3. El análisis del Ciclo de Vida como nueva metodología para toma de decisiones

El Análisis del Ciclo de Vida, ACV (o LCA, del inglés Life-Cycle Assessment) y el Análisis del Coste del Ciclo de Vida, CCV (o LCC, del inglés Life-Cycle Cost Assessment) son las metodologías más conocidas para la evaluación de sostenibilidad en la actualidad. La aplicación del ACV se limita a la evaluación del desempeño o la sostenibilidad ambiental de una actividad o producción, mientras que el CCV se enfoca en el desempeño, la eficiencia o la sostenibilidad económica de dicho producto de acción humana. El desarrollo de estas dos herramientas complejas se ha realizado principalmente en un marco teórico, enfrentando significativas dificultades para su comparación debido a la diversidad de metodologías (Kosir, 2019) [16] y alcances en su aplicación (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020) [17]. Esto se debe a importantes limitaciones, como la dificultad para comprender los indicadores utilizados, que a menudo pueden contradecirse debido a su independencia, y la inexistencia de una unidad de medida común (Schneider-Marin & Lang, 2020) [18]. La simplificación excesiva a la unidad económica en el ACV (ISO 15686-5:2017) [19]

podría implicar que ser capaz de asumir los costos permita compensar la pérdida de calidad ambiental de los proyectos (Rennings & Wiggering, 1997) [20]. Sin embargo, nuevos estudios destacan la relevancia de la compensación económica una vez que la calidad ambiental ya se ha alcanzado, debido fundamentalmente a la capacidad de inversión posterior de dicha compensación en otras actuaciones urbanas o sociales.

Otras herramientas, como la Evaluación Coste-Beneficio (CBA, del inglés Cost-Benefit Assessment), intentan vincular los costes, beneficios tangibles (monetarios) y también los intangibles o cualitativos en la toma de decisiones. Así, se busca integrar los aspectos económicos junto a otros indicadores, algo también perseguido en metodologías como el Coste y Evaluación del Ciclo de Vida (LCC+A) del proyecto CILECCTA de la Comisión Europea.

Aunque en muchos casos la aplicación de estas metodologías sólo es posible en escenarios limitados, bajo carencias en las bases de datos y con asunciones o hipótesis fundamentadas en la experiencia, información y conocimiento de los técnicos competentes, el hecho de que pueda existir riesgo o error en la medición y en la toma de decisiones no implica que estas herramientas no deban utilizarse para evaluar la sostenibilidad y guiar acciones específicas. En este ámbito, el desarrollo continuo de estas y otras metodologías por diferentes organismos e instituciones va encaminado a facilitar su comprensión y aplicabilidad por diferentes agentes, tales como son el caso de la llamada *Life Cycle Initiative* (2002), apoyada por Naciones Unidas (UNEP); el *World Green Building Council* (WGBC), la *Royal Institution of Chartered Surveyors* (RICS) o, en el ámbito específico de la Ingeniería Estructural, la *Institution of Structural Engineers* (IStructE).

3.1 Localización y selección material: los límites del mercado laboral

En lo que respecta al análisis del ciclo de vida de los sistemas o elementos constructivos, la adaptación del mercado a la sostenibilidad está estrechamente vinculada con el desarrollo empresarial y la gestión del valor inmobiliario. La “acción verde” y la idea de la imagen corporativa, en una carrera por obtener ventaja competitiva, van de la mano con los cambios tecnológicos en las industrias. Varias empresas nacionales e internacionales están concentrando esfuerzos en la transición hacia energías renovables y en la modificación de sus sistemas de producción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono, a través del reciclaje de materias primas y la gestión de procesos, así como la selección material especializada y la implementación de sistemas de industrialización.

Estas acciones se alinean con el objetivo de mantener la competitividad en precios frente al incremento exponencial de los impuestos verdes y la inercia de la regulación pública hacia la reducción de la huella de carbono del sector de la construcción.

En este ámbito, el reconocimiento por parte del proyectista de estructuras de los diferentes sistemas existentes en el mercado, así como de los sistemas de producción bajo los que estos se generan, supone un paso fundamental para la selección de soluciones alternativas y sustitutivas en cada localización geográfica y aplicación específica.

4. Otros parámetros vinculados al diseño estructural: la facilidad de mantenimiento, la adaptabilidad y la flexibilidad programática

La evolución de las necesidades humanas y planeamientos urbanísticos a lo largo de las últimas décadas, el cambio continuo en las

formas de habitar y trabajar, así como la creciente demanda de “sostenibilidad” y eficiencia en el uso de los recursos, han colocado a la flexibilidad programática y la adaptabilidad de los edificios en el centro del diseño arquitectónico y estructural, con la rehabilitación de los edificios como punto focal en el ámbito de la actividad inmobiliaria. Estas cualidades permiten que un edificio pueda ser modificado, adaptado o reutilizado con mínimas intervenciones, aumentando su vida útil y reduciendo costes a largo plazo mientras se incrementan los beneficios asociados.

La figura del promotor se ha diversificado desde una visión centrada en el corto plazo y el beneficio inmediato hacia la búsqueda de la gestión de los activos a largo plazo bajo nuevos modelos de negocio y figuras legales. En consonancia con ello se diseminan los modelos de Construcción para alquiler (BTR, del inglés Build to Rent) y otros modelos concesionarios como los recogidos bajo el Real Decreto-ley 9/2024, de 23 de diciembre, en sus modificaciones de la Ley 9/2017 de Contratos del Sector Público.

En consonancia con estos nuevos modelos de actividad económica del sector inmobiliario, se pone en alza el valor de conceptos relacionados con la economía circular como la adaptabilidad, flexibilidad programática, la modularidad o la facilidad de mantenimiento, todos estos encaminados hacia la prolongación de la vida útil de los edificios, de los sistemas y elementos que los constituyen, manteniendo su valor económico a lo largo del tiempo mientras se reduce la generación de residuos.

4.1 Diseñando bajo el concepto de Flexibilidad programática y Adaptabilidad

La flexibilidad programática se refiere a la capacidad de un edificio para acomodar diferentes usos o configuraciones espaciales sin necesidad de intervenciones significativas. Esto incluye, entre otras:

- La flexibilidad funcional, definida como la capacidad de cambio de uso sin necesidad de modificar la estructura.
- La flexibilidad espacial, entendida como la capacidad de reorganizar el espacio interior a partir del uso de particiones modificables.

La adaptabilidad, por otro lado, implica la capacidad del edificio para ser modificado o transformado en respuesta a cambios externos. Estos cambios pueden conllevar la modificación parcial o total de la estructura y de su comportamiento global, siendo considerables como tales:

- Cambios de las necesidades de los usuarios
- Evolución tecnológica
- Cambios en la demanda ambiental o regulatoria

El estudio de la flexibilidad programática y la adaptabilidad, así como la toma de decisiones al respecto de las mismas es una cuestión aún con escaso desarrollo, encontrándose las principales propuestas de evaluación actuales en determinadas certificaciones ambientales y en el Indicador 2.3 de Level(s): Diseño con fines de adaptabilidad y reforma [15]. Entre los parámetros recogidos por el mismo para evaluar ambos conceptos se encuentran consideraciones habituales en el ejercicio profesional del proyectista de estructuras, incluyendo:

- Luz entre columnas o sistemas de transmisión de cargas vertical.
- Presencia o ausencia de sistemas continuos de fachadas o particiones basados en muros portantes.
- La incorporación de redundancias estructurales que permitan una capacidad portante superior,

vinculada con otros usos, en el caso de forjados; o ampliaciones de la edificabilidad, en el caso de estructura vertical y cimentaciones.

4.2 Diseñando bajo el concepto de modularidad, facilidad de mantenimiento o industrialización de sistemas

La industrialización, con varios significados o alcances reconocidos en el panorama internacional, ha supuesto un significativo punto de inflexión en cómo se diseñan y ejecutan los edificios y sus estructuras. De manera particular, la industrialización bajo parámetros de modularidad, ha facilitado la consecución de un mayor control en los costes de ejecución y del ciclo de vida de las estructuras, así como la mejora de la calidad de las mismas y la reducción de los residuos generados, entre otros beneficios. Desde el punto de vista de las externalidades sociales o culturales, la mano de obra especializada, así como la mejora de las condiciones de ejecución, seguridad y salud, han devenido mediante la industrialización en la mejora del bienestar de los trabajadores implicados.

La evaluación de la sostenibilidad de los sistemas industrializados presenta a día de hoy numerosas limitaciones o carencias vinculadas con los indicadores y criterios existentes [21], aún cuando existen diversos indicadores en las diferentes certificaciones ambientales que permiten tener en cuenta, al menos de manera parcial, los beneficios de los mismos.

5.Conclusiones

La evolución hacia la sostenibilidad en el amplio sentido del concepto y de sus perspectivas económica, ambiental, social o cultural ha sido impulsada por diferentes factores a lo largo del tiempo. En sectores como el de la construcción, las iniciativas públicas y

privadas encaminadas en primera instancia hacia la transición energética y la reducción de impactos ambientales y económicos en fase de operación de los inmuebles ha dado paso a nuevos objetivos específicos que incluyen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de residuos y la digitalización de la construcción, entre otros.

El desarrollo e incorporación a lo largo de las últimas décadas de herramientas para la toma de decisiones informadas tales como el Análisis del Ciclo de Vida o el Análisis del Coste del Ciclo de Vida sigue enfrentando desafíos metodológicos, así como limitaciones vinculadas con la inclusión y puesta en valor de otras necesidades, parámetros o indicadores tales como la flexibilidad programática, la adaptabilidad o la facilidad de mantenimiento de los edificios y de sus partes. Estas cuestiones cada vez más se integran en los objetivos de contratación pública sostenible y en los diseños arquitectónicos encaminados hacia la promoción de edificios más longevos y sostenibles.

Adicionalmente, desde varios puntos de vista se remarca la necesidad de definir y ampliar los marcos metodológicos comunes existentes, incluyendo nuevos indicadores que permitan recoger otros beneficios intangibles a medio y largo plazo.

Como conclusión, cada vez son más los parámetros a incluir en el ejercicio profesional del proyectista de estructuras, sin embargo, la evaluación o cuantificación de muchos de ellos se encuentran en etapas tempranas o incipientes, siendo necesaria una mayor implicación por parte de profesionales, investigadores y autoridades públicas con el objetivo de avanzar en la constitución de nuevas metodologías y nuevas líneas estratégicas de aplicación.

Referencias

- [1] World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press

- [2] United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2021). *The Sustainable Development Goals Report 2021*. <https://doi.org/10.18356/9789210056083>
- [3] United Nations. (2022). *United Nations Development Programme (2022-2025)*
- [4] Mousazadeh, M., Paital, B., Naghdali, Z. et al. (2021). Positive environmental effects of the coronavirus 2020 episode: a review. *Environment, Development and Sustainability* 23 12760. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01240-3>
- [5] Anbumozhi, V., Bauer, A. (2010). Impact of Global Recession on Sustainable Development and Poverty Linkages. *ADB Working Paper* 227 <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1653700>
- [6] Joint Research Centre [European Commission]. (2021). GHG Emissions of all world
- [7] United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.
- [8] European Commission. (2019). The European Green Deal
- [9] Directive (EU) 2019/2034 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on the prudential supervision of investment firms and amending Directives 2002/87/EC, 2009/65/EC, 2011/61/EU, 2013/36/EU, 2014/59/EU and 2014/65/EU
- [10] European Commission. (2019). The European Green Deal
- [11] Caldato F.C., Bortoluzzi S.C., de Lima E.P. (2020). The Role of Public Administration in Sustainable Development. In: Leal Filho W., Borges de Brito P., Frankenberger F. (eds) *International Business, Trade and Institutional Sustainability*. World Sustainability Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9_4
- [12] Meadows D. H., Meadows, D. L. Randers, K., Behrens, W. & Club of Rome (1972). *The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York : Universe Books
- [13] Ruegg, R., McConnaughey, J. S., Thomas-Sav, G., Hockenbery, K. A. (1978). *Life-Cycle Costing: A guide for selecting energy conservation projects for public buildings*. Building Science Series, 113. Washington, D.C: National Bureau of Standards.
- [14] Davis Langdon Management Consulting. (2007, mayo). Life cycle costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology. Final Report. http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/construction/competitiveness/life-cyclecosting/index_en.htm.
- [15] European Commission. (2021). Level(s), A common language for building assessment.
- [16] Košir, M. (2019). *Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change*. Ljubljana, Slovenia. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18456-8>
- [17] Bahramian, M., & Yetilmezsoy, K. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy and Buildings* , 219 , 109917. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917>
- [18] Schneider-Marin, P., & Lang, W. (2020). Environmental costs of buildings: monetary valuation of ecological indicators for the building industry. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 25 (9), 1637–1659. <https://doi.org/10.1007/s1136702001784-y>
- [19] ISO. (2017). ISO/DIS 15686-5:2017, Building and constructed assets — Service life planning— Part 5: Life Cycle Costing.

- [20] Rennings, K., & Wiggering, H. (1997). Steps towards indicators of sustainable development: Linking economic and ecological concepts. *Ecological Economics* , 20. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(96\)00108-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(96)00108-5)
- [21] Sotorrío G., Otero S., Cobo A., Tenorio J. (2024). Assessment of industrialised construction through sustainability tools. *Results in Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103663>