

Ingeniería Estructural 5.0

Diseño sísmico, BIM, inteligencia artificial,
gemelos digitales y monitoreo estructural

Isaac Neil Ubaldo Cornelio Muñoz



Ingeniería Estructural 5.0

Diseño sísmico, BIM, inteligencia
artificial, gemelos digitales y
monitoreo estructural

Editor



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO 1.....	13
1.1. Introducción al cambio de paradigma.....	13
1.2. Evolución tecnológica de la ingeniería estructural.....	18
1.2.1. La ingeniería estructural y la construcción progresiva del conocimiento técnico.....	18
1.2.2. La revolución computacional y el desarrollo del análisis estructural numérico.....	20
1.2.3. Del diseño asistido por computadora al modelamiento integrado de información.....	21
1.2.4. La transición hacia una ingeniería basada en datos.....	23
1.2.5. Inteligencia artificial y nuevas capacidades de análisis.....	24
1.2.6. Sistemas ciberfísicos, gemelos digitales y estructuras conectadas.....	25
1.2.7. De la automatización a la integración inteligente.....	26
1.3. El concepto de Ingeniería 5.0.....	27
1.3.1. Del paradigma tecnológico al paradigma sociotécnico.....	27
1.3.2. Los tres pilares del paradigma 5.0.....	29
1.3.3. La relación entre el ingeniero y las tecnologías inteligentes.....	33
1.3.4. Ingeniería 5.0 como integración de conocimiento, datos y decisión.....	34
1.3.5. Implicancias del paradigma 5.0 para las diferentes ramas de la ingeniería..	35
1.3.6. Una aproximación conceptual a la Ingeniería 5.0.....	36
1.4. Definición conceptual de Ingeniería Estructural 5.0.....	38
1.4.1. La necesidad de una redefinición del campo estructural.....	38
1.4.2. Una propuesta conceptual para la Ingeniería Estructural 5.0.....	39
1.4.3. Los cinco sistemas que integran la Ingeniería Estructural 5.0.....	41
1.4.4. La arquitectura de integración: del dato a la decisión estructural.....	46
1.4.5. Principios rectores de la Ingeniería Estructural 5.0.....	46
1.4.6. Alcances y límites del concepto.....	48
1.4.7. La Ingeniería Estructural 5.0 como marco de evolución profesional.....	49
1.5. Arquitectura y componentes tecnológicos de la Ingeniería Estructural 5.0. 49	
1.5.1. De la adopción tecnológica a la integración sistémica.....	49
1.5.2. El diseño sísmico como núcleo físico de la arquitectura.....	51
1.5.3. BIM como infraestructura de información.....	52
1.5.4. La inteligencia artificial como capa de análisis y aprendizaje.....	53
1.5.5. El gemelo digital como mecanismo de integración.....	55
1.5.6. El monitoreo estructural como conexión con la realidad.....	56
1.5.7. La capa de integración: interoperabilidad, comunicación y trazabilidad.....	58
1.5.8. Una arquitectura por niveles para la implementación de la Ingeniería Estructural 5.0.....	59
1.5.9. La arquitectura integrada y el ciclo de vida estructural.....	60
1.5.10. Riesgos de una integración tecnológica acrítica.....	61

1.5.11. Modelo conceptual integrado de la Ingeniería Estructural 5.0	62
CAPÍTULO 2.....	64
2.1. El problema sísmico y la naturaleza del comportamiento estructural	65
2.1.1. El terremoto como fuente de incertidumbre para el diseño estructural	65
2.1.2. La estructura como sistema dinámico	67
2.1.3. La respuesta inelástica y el problema del daño	68
2.2. Evolución de la filosofía del diseño sísmico	69
2.2.1. Del diseño centrado en fuerzas al diseño centrado en la respuesta	69
2.2.2. El diseño basado en desempeño: establecer objetivos explícitos	71
2.2.3. Ingeniería sísmica basada en desempeño: de la respuesta a las consecuencias	72
2.3. Del desempeño a la resiliencia estructural	73
2.3.1. Las limitaciones de una filosofía centrada exclusivamente en la seguridad	73
2.3.2. La resiliencia como propiedad temporal	74
2.3.3. Diseño orientado a la recuperación funcional	76
2.4. El diseño sísmico en la perspectiva de la Ingeniería Estructural 5.0	77
2.4.1. De un proceso estático a un proceso de conocimiento continuo	77
2.4.2. La retroalimentación entre diseño y comportamiento observado.....	77
2.4.3. El nuevo significado del desempeño en una estructura conectada.....	78
2.5. Demanda sísmica, niveles de amenaza y objetivos de desempeño	79
2.5.1. La relación entre amenaza, demanda y capacidad.....	79
2.5.2. Niveles de amenaza y escenarios de evaluación	80
2.5.3. Parámetros de intensidad y parámetros de demanda ingenieril.....	82
2.5.4. Estados límite, daño y consecuencias.....	83
2.5.5. Objetivos de desempeño como criterios de decisión.....	85
2.5.6. Implicancias para una ingeniería estructural basada en datos	86
2.6. Modelamiento estructural, incertidumbre y validación	86
2.6.1. El modelo como representación y no como réplica de la realidad	86
2.6.2. Tipologías y niveles de fidelidad del modelamiento estructural	87
2.6.3. Las fuentes de incertidumbre en el análisis estructural	88
2.6.4. Verificación, validación y cuantificación de incertidumbre	90
2.6.5. La actualización de modelos mediante información observada	91
2.6.6. Modelos híbridos: física, datos e inteligencia artificial	92
2.6.7. Implicancias para la práctica profesional	93
2.7. Resiliencia, sostenibilidad y ciclo de vida	93
2.7.1. La superación de una visión centrada exclusivamente en la construcción... ..	93
2.7.2. El ciclo de vida como unidad de análisis.....	95
2.7.3. El costo y el impacto ambiental del daño evitable	96
2.7.4. La resiliencia como componente de la sostenibilidad	97
2.7.5. Tecnologías digitales para la gestión sostenible del ciclo de vida.....	98
2.7.6. Diseño para adaptabilidad, reparación y recuperación	99
2.7.7. La contribución de la Ingeniería Estructural 5.0	100

2.7.8. Hacia una visión integrada de valor estructural.....	100
CAPÍTULO 3	102
3.1. De la representación geométrica a la gestión de información	103
3.2. BIM en el proceso de diseño y coordinación estructural	104
3.3. Interoperabilidad, datos y continuidad de la información	106
3.4. BIM como plataforma para el ciclo de vida y la Ingeniería Estructural 5.0	107
3.5. Límites y condiciones para una implementación efectiva de BIM.....	108
CAPÍTULO 4	110
4.1. Del monitoreo instrumental al conocimiento del comportamiento estructural	111
4.2. Datos estructurales, sensores y analítica: de la señal a la información	112
4.3. Inteligencia artificial para la evaluación y predicción estructural	113
4.4. Modelos híbridos, explicabilidad y supervisión humana	115
4.5. Límites, riesgos y condiciones para una inteligencia estructural confiable	116
CAPÍTULO 5	118
5.1. El gemelo digital: de la representación virtual al sistema ciberfísico	119
5.2. Arquitectura del gemelo digital estructural	120
5.3. BIM, monitoreo e inteligencia artificial: la integración de las tecnologías	123
5.4. Gemelos digitales y gestión del ciclo de vida: de la respuesta reactiva a la anticipación	124
CAPÍTULO 6	128
6.1. Hacia una definición de Ingeniería Estructural 5.0	129
6.2. El modelo integrador de Ingeniería Estructural 5.0	131
6.3. Centralidad humana: el ingeniero como intérprete, supervisor y responsable	134
6.4. Ruta de implementación: de la digitalización fragmentada a la integración inteligente	136
6.5. Escalabilidad del modelo y aplicaciones estratégicas.....	138
6.6. Agenda futura de investigación para la Ingeniería Estructural 5.0.....	139
CONCLUSIONES GENERALES	142
1. La transformación de la ingeniería estructural debe partir de sus fundamentos, no de la tecnología	143
2. El diseño sísmico basado en desempeño ofrece una lógica compatible con la transformación digital.....	143
4. La inteligencia artificial debe evolucionar hacia una colaboración con el conocimiento físico.....	145
5. El monitoreo estructural transforma la infraestructura en una fuente activa de conocimiento	145
6. El gemelo digital representa una oportunidad de integración, pero no debe reducirse a una réplica visual.....	146

7. La integración constituye el principal desafío y la principal oportunidad de la Ingeniería Estructural 5.0.....	147
8. La centralidad humana es un requisito para una transformación tecnológica responsable	148
9. La resiliencia y la sostenibilidad deben convertirse en criterios de integración tecnológica	148
10. La implementación debe ser gradual, contextualizada y proporcional.....	149
REFLEXIONES FINALES	150
REFERENCIAS	152

INTRODUCCIÓN

La ingeniería estructural atraviesa una etapa de transformación que trasciende la incorporación aislada de nuevas herramientas computacionales. La creciente complejidad de las infraestructuras, la expansión de las ciudades, la necesidad de responder a amenazas naturales y antrópicas, así como la disponibilidad cada vez mayor de información digital, están modificando la manera en que las estructuras son concebidas, diseñadas, construidas, supervisadas y gestionadas. En este escenario, la disciplina se enfrenta al desafío de conservar el rigor de sus fundamentos científicos mientras incorpora tecnologías capaces de ampliar la comprensión del comportamiento estructural y mejorar la calidad de las decisiones profesionales.

Históricamente, el objetivo esencial de la ingeniería estructural ha sido garantizar que las edificaciones y demás obras de infraestructura puedan resistir las acciones previstas durante su vida útil con niveles aceptables de seguridad y desempeño. Para ello, la disciplina ha desarrollado principios teóricos, modelos matemáticos, métodos experimentales y procedimientos normativos que permiten representar, con diferentes niveles de aproximación, la respuesta de los sistemas estructurales frente a las cargas y acciones a las que se encuentran sometidos. La mecánica de materiales, la teoría de estructuras, la dinámica estructural y la ingeniería sísmica constituyen, en este sentido, pilares que continúan siendo irrenunciables.

Sin embargo, las estructuras reales no permanecen estáticas desde el punto de vista de la información. Una vez construidas, están sometidas a procesos de envejecimiento, deterioro, modificaciones en sus condiciones de uso y eventos extraordinarios que pueden alterar su comportamiento. A pesar de ello, durante mucho tiempo la mayor parte de la información generada en las etapas de diseño y construcción permaneció fragmentada o perdió utilidad durante la fase de operación. Los planos, memorias de cálculo, registros de obra y documentos técnicos solían almacenarse como archivos independientes, con una limitada capacidad de actualización e integración. Como consecuencia, la gestión de una estructura durante su vida útil se desarrollaba, con frecuencia, a partir de información incompleta o de inspecciones realizadas cuando ya existían señales visibles de deterioro.

La transformación digital ofrece la posibilidad de modificar esta lógica. Actualmente es posible generar modelos digitales capaces de concentrar información geométrica, física y funcional; incorporar datos obtenidos mediante sensores; procesar grandes volúmenes de información mediante algoritmos inteligentes; y desarrollar representaciones virtuales que se actualicen de acuerdo con el comportamiento observado en el activo físico. Estas capacidades permiten avanzar desde una gestión predominantemente documental y reactiva hacia otra basada en la integración, el análisis y la anticipación.

No obstante, sería un error interpretar este proceso como una sustitución de la ingeniería por la tecnología. La disponibilidad de modelos tridimensionales, algoritmos de aprendizaje automático o sistemas automatizados de monitoreo no garantiza, por sí misma, mejores decisiones. Una representación digital puede contener información incorrecta; un algoritmo puede producir predicciones aparentemente precisas sin comprender los mecanismos físicos que gobiernan un fenómeno; y un sistema de sensores puede generar grandes cantidades de datos sin aportar conocimiento relevante para la gestión de una estructura. Por esta razón, el avance tecnológico debe ir acompañado de una mayor capacidad crítica y de una sólida formación en los fundamentos de la disciplina.

En este contexto, el concepto de **Ingeniería Estructural 5.0** constituye una propuesta para comprender la evolución contemporánea de la especialidad desde una perspectiva integradora. El término no se limita a identificar una nueva generación de software o a describir la automatización de determinadas actividades. Su alcance es más amplio: plantea la articulación entre el conocimiento científico y técnico de la ingeniería estructural con tecnologías digitales inteligentes, manteniendo al profesional como responsable de la interpretación, validación y toma de decisiones.

La Ingeniería Estructural 5.0 parte, por tanto, de una premisa fundamental: **la transformación digital debe estar orientada a mejorar la capacidad de la ingeniería para proteger a las personas, reducir la vulnerabilidad de las infraestructuras, incrementar su resiliencia y gestionar de manera más eficiente los recursos durante todo el ciclo de vida de las estructuras.** Desde esta perspectiva, la tecnología adquiere

valor cuando permite responder de manera más efectiva a problemas estructurales concretos y no únicamente cuando incrementa el grado de digitalización de un proceso.

Dentro de este paradigma, el diseño sísmico mantiene una posición central. En regiones expuestas a actividad sísmica, la seguridad estructural constituye una condición indispensable para la protección de la vida humana y la continuidad de los servicios esenciales. Sin embargo, la concepción contemporánea del desempeño sísmico ha ampliado la discusión más allá de la prevención del colapso. Una estructura puede permanecer en pie después de un evento severo y, aun así, experimentar daños que comprometan su funcionalidad, generen pérdidas económicas significativas o dificulten la recuperación de una comunidad. En consecuencia, la evaluación estructural requiere considerar no solo la resistencia, sino también la capacidad de desempeño, recuperación y adaptación frente a diferentes escenarios.

Esta evolución conceptual encuentra un importante complemento en el **Building Information Modeling (BIM)**. Más que una herramienta de representación tridimensional, BIM puede entenderse como un enfoque para organizar, relacionar y gestionar la información generada durante las distintas etapas de un proyecto. Para la ingeniería estructural, esta capacidad resulta especialmente relevante porque permite establecer conexiones entre los modelos de diseño, los elementos constructivos, las especificaciones técnicas y otros datos asociados con la infraestructura. Cuando la información se estructura adecuadamente, el modelo deja de ser únicamente una representación geométrica y puede convertirse en un soporte para la coordinación interdisciplinaria y la gestión del conocimiento técnico.

A su vez, la **inteligencia artificial** abre nuevas posibilidades para analizar patrones complejos, identificar relaciones en grandes conjuntos de datos y desarrollar modelos predictivos. Sus aplicaciones potenciales en la ingeniería estructural incluyen la identificación de daños, la predicción de propiedades o comportamientos, la optimización de alternativas de diseño y el apoyo a procesos de inspección y mantenimiento. Sin embargo, estas aplicaciones plantean interrogantes fundamentales sobre la calidad de los datos, la capacidad de generalización de los modelos y la interpretación de los resultados. Por ello, la utilización responsable de sistemas inteligentes exige que la precisión estadística sea complementada con conocimiento físico y criterio profesional.

La integración entre el activo físico y su representación digital constituye otro de los componentes esenciales de esta transformación. Los **gemelos digitales** representan una evolución respecto de los modelos digitales convencionales al incorporar la posibilidad de establecer conexiones dinámicas entre una infraestructura y los datos asociados con su estado o comportamiento. Su potencial reside en la creación de entornos de análisis en los que la información procedente del activo pueda ser utilizada para actualizar modelos, simular escenarios y apoyar decisiones relacionadas con la operación y el mantenimiento. De esta manera, la estructura puede ser comprendida no solamente a partir de las hipótesis formuladas durante su diseño, sino también mediante evidencia generada a lo largo de su vida útil.

Esta posibilidad se encuentra estrechamente vinculada con el **monitoreo de la salud estructural**. La instrumentación y los sistemas de adquisición de datos permiten observar determinadas variables relacionadas con la respuesta de una estructura, tales como aceleraciones, deformaciones, desplazamientos o frecuencias de vibración. Sin embargo, el verdadero propósito del monitoreo no consiste en acumular mediciones, sino en transformar los datos en información que permita reducir la incertidumbre sobre la condición del sistema. La integración entre sensores, modelos estructurales, herramientas de procesamiento e inteligencia artificial puede contribuir, en consecuencia, al desarrollo de estrategias de mantenimiento más predictivas y fundamentadas en evidencia.

La convergencia de estas tecnologías plantea una nueva manera de comprender el ciclo de vida estructural. En lugar de considerar el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento como etapas independientes, la Ingeniería Estructural 5.0 propone fortalecer los mecanismos de continuidad entre ellas. Las decisiones adoptadas durante el diseño pueden generar información útil para la operación futura; los datos obtenidos durante la vida útil pueden contribuir a evaluar los supuestos iniciales; y la experiencia acumulada en estructuras existentes puede retroalimentar los criterios empleados en nuevos proyectos. De este modo, la infraestructura deja de ser entendida como un producto terminado al finalizar la construcción y pasa a ser considerada como un sistema cuya condición y desempeño evolucionan en el tiempo.

Este enfoque también modifica el papel del ingeniero estructural. El profesional del futuro deberá conservar una sólida capacidad para analizar fuerzas, deformaciones,

mecanismos de falla y comportamiento dinámico, pero simultáneamente necesitará desarrollar competencias relacionadas con la gestión de información, la interpretación de datos y la interacción con tecnologías digitales. Esta ampliación del perfil profesional no implica que todos los ingenieros deban convertirse en especialistas informáticos. Significa, más bien, que la práctica estructural será progresivamente interdisciplinaria y que la capacidad para comunicarse con especialistas de otras áreas se convertirá en un componente esencial de la formación profesional.

La adopción de estas tecnologías tampoco ocurre en condiciones homogéneas. Las posibilidades de implementar BIM avanzado, sistemas de monitoreo permanente o gemelos digitales dependen de factores económicos, institucionales y tecnológicos. Por esta razón, la Ingeniería Estructural 5.0 no puede plantearse como un modelo único que deba ser aplicado de manera idéntica en todos los contextos. Su implementación debe considerar el tipo y la criticidad de la infraestructura, los recursos disponibles, la disponibilidad de datos, las competencias profesionales y los riesgos que se pretende gestionar. Una transformación digital efectiva no consiste necesariamente en utilizar la tecnología más sofisticada, sino en seleccionar las herramientas adecuadas para resolver un problema relevante.

Desde esta perspectiva, el presente libro propone un recorrido que parte de los fundamentos de la ingeniería estructural y avanza progresivamente hacia la integración de tecnologías emergentes. El diseño sísmico proporciona la base para comprender los mecanismos que determinan el desempeño de las estructuras frente a acciones extremas. BIM introduce una nueva lógica para la organización y continuidad de la información. La inteligencia artificial incorpora capacidades de análisis y predicción basadas en datos. Los gemelos digitales permiten explorar formas de conexión entre el activo físico y sus representaciones virtuales. Finalmente, el monitoreo estructural proporciona evidencia sobre el comportamiento real de la infraestructura durante su operación.

El propósito de la obra no es presentar estas áreas como disciplinas independientes. Por el contrario, se busca demostrar que su mayor potencial surge cuando son articuladas dentro de un sistema coherente. Un modelo BIM puede proporcionar la estructura de información necesaria para un gemelo digital; los sensores pueden suministrar datos para actualizar modelos analíticos; la inteligencia artificial puede

identificar patrones que resulten difíciles de detectar mediante procedimientos convencionales; y el conocimiento derivado de estos procesos puede apoyar decisiones relacionadas con la seguridad, el mantenimiento y la resiliencia.

La organización del libro responde a esta lógica de integración. La primera parte establece las bases conceptuales de la transformación de la ingeniería estructural y analiza la relación entre seguridad, desempeño y ciclo de vida. Posteriormente, se profundiza en los fundamentos del diseño sísmico y en el papel del modelamiento computacional. Las secciones siguientes abordan BIM, inteligencia artificial, gemelos digitales y monitoreo estructural, antes de desarrollar una propuesta integradora de Ingeniería Estructural 5.0 y examinar sus aplicaciones, limitaciones y perspectivas futuras.

En consecuencia, esta obra está dirigida a estudiantes avanzados de ingeniería, profesionales, investigadores y docentes interesados en comprender los cambios que están redefiniendo la disciplina. Su propósito no consiste únicamente en presentar herramientas tecnológicas, sino en promover una reflexión crítica sobre la manera en que dichas herramientas deben incorporarse al conocimiento y a la práctica profesional. La tecnología, por sí sola, no garantiza estructuras más seguras. Su contribución depende de la calidad de los modelos, de la confiabilidad de los datos y, sobre todo, de la capacidad humana para formular preguntas pertinentes e interpretar responsablemente las respuestas.

La Ingeniería Estructural 5.0 debe entenderse, finalmente, como una oportunidad para fortalecer el sentido fundamental de la disciplina. En un mundo caracterizado por una creciente exposición al riesgo, la innovación tecnológica adquiere su mayor relevancia cuando contribuye a proteger la vida, preservar la infraestructura y mejorar la capacidad de las sociedades para responder ante situaciones adversas. El desafío no consiste simplemente en construir estructuras digitales, inteligentes o conectadas. El desafío consiste en utilizar el conocimiento y la tecnología para construir un entorno más seguro, resiliente y sostenible.

Con esta perspectiva, el libro invita a comprender la transformación digital no como el destino final de la ingeniería estructural, sino como un nuevo conjunto de capacidades que debe ponerse al servicio de sus principios esenciales. El futuro de la

disciplina dependerá, en gran medida, de su capacidad para integrar innovación y fundamento científico, automatización y criterio profesional, información digital y comportamiento físico. En esa convergencia se encuentra el sentido y la proyección de la **Ingeniería Estructural 5.0**.

CAPÍTULO 1

DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL CONVENCIONAL A LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

1.1. INTRODUCCIÓN AL CAMBIO DE PARADIGMA

La ingeniería estructural se ha desarrollado históricamente como una disciplina orientada a comprender, predecir y controlar la respuesta de las construcciones frente a las acciones que actúan sobre ellas. Su evolución ha estado estrechamente vinculada con la necesidad de construir infraestructuras capaces de satisfacer condiciones de seguridad, funcionalidad y durabilidad bajo diferentes escenarios de carga y servicio. En consecuencia, el desarrollo de la disciplina se ha sustentado en la progresiva consolidación de teorías mecánicas, métodos analíticos, procedimientos experimentales y modelos numéricos que permiten representar el comportamiento de los sistemas estructurales con distintos niveles de complejidad.

Durante las últimas décadas, sin embargo, el contexto en el que se desarrolla la ingeniería estructural ha experimentado cambios significativos. El incremento de la capacidad computacional, la disponibilidad de grandes volúmenes de datos y el desarrollo de herramientas digitales han ampliado las posibilidades para analizar y gestionar el comportamiento de las estructuras. Particularmente, los avances en aprendizaje automático han permitido explorar nuevas formas de abordar problemas caracterizados por relaciones no lineales, múltiples variables e incertidumbre, con aplicaciones que abarcan el análisis y diseño estructural, la evaluación del desempeño, la identificación de daños y el monitoreo de la salud estructural (Sun et al., 2021; Xie et al., 2022).

Esta transformación no debe interpretarse únicamente como la incorporación de programas informáticos más sofisticados. Su alcance es más profundo, pues involucra una modificación progresiva en la forma en que se produce, organiza, intercambia y utiliza la información durante el ciclo de vida de una infraestructura. Mientras que los enfoques convencionales tendieron a concentrar gran parte de la generación del

conocimiento técnico en la etapa de diseño, los nuevos entornos digitales hacen posible incorporar información procedente de diferentes fuentes y etapas, incluyendo modelos computacionales, registros experimentales, imágenes, documentos técnicos y datos generados por sistemas de monitoreo (Sun et al., 2021).

En este escenario, el concepto de **cambio de paradigma** resulta útil para comprender la evolución de la disciplina. No se trata de afirmar que los fundamentos tradicionales de la ingeniería estructural han perdido vigencia, sino de reconocer que las tecnologías emergentes están modificando las herramientas disponibles para estudiar los mismos fenómenos físicos y, simultáneamente, están ampliando el conjunto de problemas que pueden ser abordados mediante procesos integrados de información y análisis. Las leyes que gobiernan la respuesta de una estructura no cambian por la incorporación de un algoritmo de inteligencia artificial; sin embargo, la capacidad para procesar información, reconocer patrones y explorar múltiples escenarios puede transformar significativamente la manera en que el ingeniero formula y resuelve determinados problemas.

Esta distinción resulta fundamental. La creciente incorporación de métodos de inteligencia artificial en ingeniería estructural ha generado expectativas respecto de su capacidad para complementar, acelerar o mejorar determinados procedimientos convencionales. La literatura especializada muestra aplicaciones prometedoras en la predicción de la respuesta estructural, la evaluación de propiedades y capacidades de elementos, la interpretación de información experimental y el reconocimiento de patrones en datos de monitoreo (Sun et al., 2021; Xie et al., 2022). No obstante, también se ha advertido que el desempeño de estos métodos depende de factores como la calidad y representatividad de los datos, la selección de variables, la validación del modelo y su capacidad de generalización a condiciones diferentes de aquellas utilizadas durante su desarrollo (Málaga-Chuquitaype, 2022).

Por ello, el avance hacia una ingeniería más digitalizada no implica necesariamente que los procedimientos de análisis tradicionales deban ser reemplazados. Una de las tendencias más relevantes consiste, precisamente, en la búsqueda de enfoques complementarios en los que el conocimiento físico y los modelos basados en datos puedan interactuar. La ingeniería estructural continúa requiriendo profesionales capaces de comprender los mecanismos de transferencia de cargas, las relaciones entre esfuerzos y

deformaciones, los efectos dinámicos y las posibles formas de falla. Las herramientas digitales pueden ampliar la capacidad de análisis, pero sus resultados requieren ser interpretados dentro de un marco físico y técnico coherente.

El cambio de paradigma puede entenderse, en este sentido, como una transformación en la **capacidad de integración de la ingeniería**. En los procesos convencionales, las etapas de diseño, construcción, operación y mantenimiento han sido frecuentemente gestionadas como actividades relativamente independientes. La información generada durante el diseño puede perder continuidad durante la construcción y resultar difícil de recuperar cuando la estructura entra en operación. Esta fragmentación limita la posibilidad de utilizar sistemáticamente la información acumulada para mejorar la gestión del activo y retroalimentar futuros proyectos.

Las tecnologías de información y las representaciones digitales ofrecen nuevas posibilidades para reducir esta discontinuidad. El desarrollo de enfoques basados en gemelos digitales, por ejemplo, busca establecer vínculos más dinámicos entre el activo físico, sus modelos virtuales y los datos obtenidos durante su funcionamiento. En el ámbito de la infraestructura civil, la investigación reciente identifica el potencial de estos sistemas para integrar tecnologías como el monitoreo de la salud estructural, el Internet de las cosas, el modelamiento de información y las técnicas de análisis inteligente, con aplicaciones orientadas a la evaluación de condiciones, la detección de daños y la gestión del ciclo de vida (Sun et al., 2025; Sun et al., 2026).

La importancia de esta integración radica en que una estructura no constituye un objeto invariable una vez terminada su construcción. Durante su vida útil puede experimentar procesos de deterioro, cambios en las condiciones ambientales, modificaciones en su uso y la acción de eventos extremos. Por ello, las decisiones tomadas durante la fase inicial de diseño no necesariamente contienen toda la información requerida para gestionar la infraestructura a lo largo del tiempo. El monitoreo estructural permite incorporar evidencia sobre determinados aspectos de su comportamiento real, mientras que las tecnologías de comunicación y procesamiento facilitan la transmisión y análisis de estos datos para apoyar la evaluación de su condición (Bhatta & Dang, 2024).

No obstante, la disponibilidad de información plantea un desafío que trasciende la capacidad tecnológica. La acumulación de grandes volúmenes de datos no equivale automáticamente a la generación de conocimiento. En aplicaciones de aprendizaje automático y monitoreo estructural, la utilidad de los resultados depende de que los datos sean pertinentes para el problema de ingeniería, suficientemente confiables y adecuadamente interpretados. Las revisiones recientes sobre aplicaciones de inteligencia artificial en estructuras han destacado que la disponibilidad y calidad de los conjuntos de datos, la selección de métricas de evaluación y la validación rigurosa continúan siendo factores determinantes para trasladar los resultados de investigación hacia aplicaciones profesionales confiables (Xie et al., 2022; Bae et al., 2025).

Esta situación conduce a una transformación importante en el papel del ingeniero. En un entorno caracterizado por una creciente automatización, el profesional no pierde relevancia; por el contrario, adquiere nuevas responsabilidades relacionadas con la formulación del problema, la evaluación de los supuestos, la selección de información relevante y la interpretación crítica de los resultados. Un algoritmo puede identificar correlaciones complejas dentro de un conjunto de datos, pero la responsabilidad de determinar si dichas relaciones son físicamente plausibles y técnicamente aplicables continúa requiriendo conocimiento especializado. La literatura sobre aprendizaje automático aplicado al diseño estructural ha enfatizado, precisamente, la necesidad de mantener una relación crítica entre las capacidades computacionales y los fundamentos conceptuales que sustentan la práctica de la ingeniería (Málaga-Chuquitaype, 2022).

En consecuencia, la transformación digital exige superar una visión instrumental de la tecnología. Disponer de un modelo tridimensional, una plataforma de datos o un sistema de inteligencia artificial no garantiza, por sí mismo, una mejora en la seguridad o eficiencia de una infraestructura. La tecnología adquiere valor cuando se integra en un proceso de ingeniería claramente definido y contribuye a resolver un problema concreto. Esta consideración resulta particularmente relevante en el campo estructural, donde las decisiones técnicas pueden tener consecuencias directas sobre la seguridad de las personas y la continuidad de servicios esenciales.

Desde esta perspectiva, es posible establecer una diferencia entre **digitalización** y **transformación digital**. La digitalización puede entenderse como

la incorporación de herramientas y formatos digitales a procesos existentes; la transformación digital, en cambio, implica una reorganización más profunda de los procesos de generación, integración y utilización de la información. Para la ingeniería estructural, esta diferencia significa pasar de emplear tecnologías únicamente para automatizar tareas aisladas a construir sistemas en los que la información pueda acompañar al activo durante diferentes etapas de su ciclo de vida y contribuir a procesos continuos de aprendizaje y toma de decisiones.

El concepto de **Ingeniería Estructural 5.0**, que constituye el eje articulador de este libro, se inscribe dentro de esta segunda perspectiva. Se propone como un marco integrador en el que los fundamentos de la ingeniería estructural convergen con tecnologías como el diseño computacional, BIM, la inteligencia artificial, los gemelos digitales y el monitoreo estructural. El propósito no consiste en establecer una jerarquía en la que la tecnología sustituya al conocimiento ingenieril, sino en explorar las posibilidades que surgen cuando ambas dimensiones se articulan.

Esta integración adquiere una importancia especial frente a los desafíos contemporáneos relacionados con la resiliencia de la infraestructura. La capacidad para diseñar estructuras seguras continúa siendo esencial, pero la disponibilidad de información sobre su comportamiento durante la operación puede complementar los criterios establecidos durante el diseño. En este sentido, los sistemas de monitoreo y las aproximaciones basadas en gemelos digitales pueden contribuir a una gestión más informada de la infraestructura, al facilitar la observación de determinadas variables, la identificación de cambios y la evaluación de posibles intervenciones a lo largo de su ciclo de vida (Sun et al., 2025; Sun et al., 2026).

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías también plantea interrogantes que deben ser abordados críticamente. La confiabilidad de los datos, la interoperabilidad entre sistemas, la transparencia de los modelos inteligentes, la seguridad de la información y las competencias necesarias para su implementación son algunos de los aspectos que condicionan su utilización efectiva. En consecuencia, la Ingeniería Estructural 5.0 no puede reducirse a una narrativa de innovación tecnológica inevitable. Su consolidación dependerá de la capacidad para desarrollar soluciones técnicamente confiables, económicamente viables y profesionalmente responsables.

El cambio de paradigma que se analiza en este capítulo debe entenderse, por tanto, como un proceso de evolución y ampliación. La ingeniería estructural mantiene sus principios científicos fundamentales, pero incorpora nuevas capacidades para representar, analizar y observar los sistemas que estudia. La estructura continúa siendo un sistema físico gobernado por las leyes de la mecánica; lo que está cambiando es la capacidad para conectar dicho sistema con representaciones digitales, fuentes de información y herramientas analíticas que pueden enriquecer el proceso de decisión.

En esta convergencia se encuentra el fundamento de la Ingeniería Estructural 5.0. Su propósito central no es construir una ingeniería dependiente de algoritmos, sino una ingeniería capaz de integrar conocimiento físico, información digital y criterio profesional para enfrentar problemas cada vez más complejos. El desafío consiste en aprovechar las posibilidades de la transformación tecnológica sin renunciar a los principios de rigor, seguridad y responsabilidad que constituyen la esencia de la profesión.

De este modo, el paso desde la ingeniería estructural convencional hacia una Ingeniería Estructural 5.0 debe comprenderse como una transición progresiva hacia modelos de trabajo más conectados, interdisciplinarios y orientados al ciclo de vida. Esta transición constituye el punto de partida para examinar, en los siguientes apartados, la evolución tecnológica de la disciplina y los principios que permitirán definir con mayor precisión el alcance y las características de este nuevo enfoque.

1.2. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

1.2.1. La ingeniería estructural y la construcción progresiva del conocimiento técnico

La evolución tecnológica de la ingeniería estructural no puede comprenderse como una sucesión de herramientas que reemplazan automáticamente a las anteriores. Se trata, más bien, de un proceso acumulativo en el que nuevas capacidades de observación, cálculo y representación se han incorporado progresivamente al conocimiento existente. Cada transformación tecnológica ha ampliado el alcance de los problemas que pueden ser analizados y ha permitido representar con mayor detalle determinados fenómenos; sin

embargo, los fundamentos físicos que sustentan el comportamiento estructural han conservado su carácter central.

En sus primeras etapas, la construcción de estructuras dependió principalmente de la experiencia acumulada y de procedimientos empíricos. La estabilidad y el desempeño de las construcciones eran evaluados, en gran medida, a partir de conocimientos derivados de la práctica y transmitidos entre generaciones de constructores. La progresiva formalización científica de la mecánica permitió posteriormente desarrollar una comprensión más sistemática de las relaciones entre cargas, esfuerzos, deformaciones y estabilidad. Esta transformación constituyó una condición fundamental para el surgimiento de la ingeniería estructural moderna.

La formalización matemática permitió pasar de la observación de estructuras previamente construidas a la posibilidad de anticipar, mediante modelos, determinadas respuestas antes de su ejecución. Esta capacidad predictiva continúa siendo uno de los rasgos distintivos de la ingeniería estructural. No obstante, los primeros procedimientos analíticos estaban condicionados por la capacidad humana para realizar cálculos y resolver sistemas matemáticos. En consecuencia, la complejidad de los modelos que podían utilizarse se encontraba limitada por el tiempo y los recursos requeridos para su resolución.

La evolución tecnológica modificó progresivamente esta condición. La incorporación de herramientas de cálculo mecánico y, posteriormente, de sistemas electrónicos permitió automatizar operaciones repetitivas y ampliar la capacidad para resolver problemas matemáticos. La ingeniería comenzó así una transición desde un entorno dominado por el cálculo manual hacia otro en el que la computación se convertiría en un componente esencial del análisis y diseño.

Esta primera gran transformación resulta relevante porque permite identificar un patrón que se mantiene hasta la actualidad: **la tecnología no elimina el problema de ingeniería, sino que transforma la escala y complejidad con la que dicho problema puede ser abordado**. La posibilidad de realizar cálculos más rápidos permitió estudiar sistemas más complejos, pero también incrementó la necesidad de establecer criterios adecuados para formular, validar e interpretar los modelos utilizados.

1.2.2. La revolución computacional y el desarrollo del análisis estructural numérico

La incorporación de la computación constituyó uno de los cambios más profundos en la historia reciente de la ingeniería estructural. El desarrollo de métodos numéricos permitió superar muchas de las restricciones asociadas con las soluciones analíticas cerradas, particularmente en problemas caracterizados por geometrías complejas, condiciones de frontera variables, comportamiento no lineal o distribuciones espaciales heterogéneas de las propiedades.

Entre las contribuciones más influyentes se encuentra el desarrollo y consolidación del **método de los elementos finitos**. Este método transformó la capacidad de representar sistemas físicos mediante la subdivisión de un dominio complejo en elementos más simples y la resolución numérica de sus relaciones de equilibrio y compatibilidad. Su evolución histórica demuestra cómo la interacción entre formulación matemática y capacidad computacional permitió convertir un conjunto de desarrollos teóricos en una herramienta central para el análisis de problemas de ingeniería (Liu et al., 2022).

La expansión del método de los elementos finitos modificó de manera sustancial la práctica del análisis estructural. Problemas que anteriormente requerían simplificaciones considerables pudieron ser representados mediante modelos de mayor detalle. Asimismo, se hizo posible analizar fenómenos relacionados con la dinámica, la no linealidad geométrica y material, la interacción entre componentes y la respuesta de estructuras sometidas a acciones complejas.

Sin embargo, la revolución computacional también introdujo un riesgo que continúa siendo relevante: la aparente precisión de un resultado numérico puede generar una falsa percepción de exactitud. Un software puede producir resultados con múltiples cifras decimales, pero la calidad de estos resultados depende necesariamente de la validez de las hipótesis, de las propiedades asignadas a los materiales, de las condiciones de frontera y de la representación adoptada para el sistema físico.

Por esta razón, el crecimiento de la capacidad computacional no redujo la importancia del criterio ingenieril. Por el contrario, hizo más necesaria la capacidad para

evaluar críticamente los resultados. La literatura sobre ingeniería estructural computacional destaca que, pese a los enormes avances alcanzados, los modelos numéricos continúan enfrentando desafíos relacionados con la representación de fenómenos complejos, la incertidumbre y la validación de las simulaciones frente al comportamiento físico observado (Hjelmstad et al., 2018; Liu et al., 2022).

La evolución hacia la Ingeniería Estructural 5.0 se apoya directamente en esta etapa. Las tecnologías actuales de inteligencia artificial, gemelos digitales y monitoreo estructural no reemplazan el conocimiento generado por la ingeniería computacional. Por el contrario, en gran medida se construyen sobre él. Un gemelo digital estructural, por ejemplo, requiere con frecuencia modelos capaces de representar el comportamiento físico de una infraestructura; los algoritmos de aprendizaje automático pueden complementarse con simulaciones numéricas; y los datos obtenidos mediante sensores necesitan ser interpretados en relación con modelos que expliquen el comportamiento esperado del sistema.

En consecuencia, la computación debe ser entendida como una de las bases sobre las cuales se desarrolla la transformación digital contemporánea de la ingeniería estructural.

1.2.3. Del diseño asistido por computadora al modelamiento integrado de información

Una segunda transformación significativa estuvo asociada con la digitalización de la representación técnica. La transición desde los planos elaborados manualmente hacia los sistemas de diseño asistido por computadora incrementó la eficiencia en la producción, modificación y reproducción de documentos técnicos. Sin embargo, la representación digital bidimensional, aunque constituyó un avance importante, mantuvo una característica fundamental de los procesos convencionales: gran parte de la información continuaba distribuida entre documentos independientes.

La evolución posterior hacia modelos digitales tridimensionales y, especialmente, hacia el **Building Information Modeling (BIM)** modificó progresivamente esta lógica. El elemento central de BIM no reside exclusivamente en la generación de una representación tridimensional, sino en la posibilidad de asociar información con los

componentes que integran el modelo y facilitar la coordinación entre diferentes especialidades y etapas del ciclo de vida.

En el campo estructural, esta transformación es especialmente relevante. Un sistema estructural no está compuesto únicamente por elementos geométricos; cada componente posee propiedades, relaciones y condiciones que influyen en su comportamiento y en su interacción con otros sistemas. La integración del proyecto estructural dentro de entornos BIM ha sido objeto de un creciente desarrollo científico, particularmente en temas relacionados con automatización, interoperabilidad y coordinación entre el modelamiento arquitectónico, constructivo y estructural (Fernández-Mora et al., 2022).

No obstante, la adopción de BIM también ha puesto de manifiesto que la integración tecnológica constituye un desafío más complejo que la simple utilización de un modelo común. La información debe conservar consistencia cuando es transferida entre plataformas, disciplinas y fases del proyecto. Los problemas de interoperabilidad pueden generar pérdidas de información o inconsistencias que afectan la confiabilidad de los procesos posteriores. Por ello, el valor de BIM depende tanto de las capacidades del software como de la existencia de estándares, procedimientos y mecanismos de coordinación.

La evolución desde el diseño asistido por computadora hacia el modelamiento de información representa, por tanto, un cambio conceptual importante. En el primer caso, la tecnología se utiliza principalmente para representar y documentar una solución; en el segundo, se busca que el modelo constituya un entorno de información capaz de acompañar y apoyar diferentes procesos de decisión.

Esta distinción resulta fundamental para la Ingeniería Estructural 5.0. Una infraestructura inteligente requiere que la información no permanezca aislada en archivos generados durante su diseño. La posibilidad de conectar modelos estructurales con procesos constructivos, datos de monitoreo y estrategias de mantenimiento depende de la capacidad para organizar y mantener la información durante el ciclo de vida del activo.

1.2.4. La transición hacia una ingeniería basada en datos

La siguiente etapa de la evolución tecnológica está asociada con el creciente protagonismo de los datos. Mientras que la ingeniería computacional tradicional se desarrolló principalmente a partir de modelos formulados con base en principios físicos y matemáticos, la disponibilidad de sensores, sistemas de adquisición y almacenamiento digital ha generado nuevas oportunidades para estudiar los sistemas estructurales a partir de información observada.

Esta transformación ha sido particularmente importante en el ámbito del **monitoreo de la salud estructural**. Las infraestructuras pueden ser instrumentadas para registrar variables asociadas con su respuesta, lo que permite observar determinados cambios en el comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo. La utilización de datos procedentes de sensores puede complementar las inspecciones tradicionales y contribuir a la evaluación de condiciones que no siempre son evidentes mediante observaciones visuales.

La integración de datos de monitoreo con modelos digitales ha sido identificada como una línea de investigación relevante para la gestión y mantenimiento de infraestructuras. Las revisiones sistemáticas sobre BIM aplicado al monitoreo y mantenimiento muestran que la combinación de modelos de información y sistemas de sensado puede facilitar la visualización, documentación y gestión de información relacionada con la condición estructural, aunque persisten desafíos importantes en materia de interoperabilidad, representación de datos y manejo de grandes volúmenes de información (Jiang et al., 2021).

La ingeniería basada en datos no debe interpretarse, sin embargo, como un abandono de los modelos físicos. Los datos representan observaciones de un fenómeno bajo condiciones determinadas y pueden contener ruido, errores o variaciones asociadas con factores ambientales y operativos. Por ello, la interpretación de la información requiere establecer relaciones entre los registros obtenidos y los mecanismos físicos que pueden explicar los cambios observados.

Esta consideración ha impulsado el desarrollo de enfoques híbridos en los que los modelos basados en física y los métodos basados en datos se complementan. En el

contexto de la Ingeniería Estructural 5.0, esta complementariedad resulta esencial. Los modelos físicos permiten incorporar conocimiento sobre mecanismos estructurales y condiciones de comportamiento; los datos, por su parte, pueden proporcionar evidencia sobre el funcionamiento real de la infraestructura. La integración de ambas fuentes permite reducir la distancia entre la respuesta esperada durante el diseño y el comportamiento observado durante la operación.

1.2.5. Inteligencia artificial y nuevas capacidades de análisis

La expansión de la inteligencia artificial constituye una de las transformaciones más visibles de la ingeniería contemporánea. En el campo estructural, los métodos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo han demostrado capacidad para identificar patrones complejos y desarrollar modelos predictivos en problemas para los cuales la formulación analítica directa puede resultar difícil o computacionalmente costosa.

Las aplicaciones potenciales abarcan diversas áreas, incluyendo la predicción de propiedades y respuestas, la clasificación de daños, la optimización del diseño y el procesamiento de información procedente de sistemas de monitoreo. Las revisiones recientes sobre inteligencia artificial aplicada al diseño y la ingeniería de estructuras muestran que estas herramientas están ampliando las posibilidades de abordar problemas caracterizados por múltiples objetivos, restricciones y variables, aunque su adopción requiere superar importantes desafíos relacionados con la generalización, la interpretabilidad y la confiabilidad de los resultados (Ao et al., 2025).

Desde una perspectiva histórica, la inteligencia artificial representa una nueva etapa en la evolución de la automatización. Las primeras herramientas computacionales se orientaron principalmente a ejecutar procedimientos definidos explícitamente por el ingeniero. Los métodos de aprendizaje automático, en cambio, permiten construir modelos a partir de patrones identificados en los datos. Esta diferencia amplía considerablemente las posibilidades de análisis, pero también modifica la naturaleza de los problemas relacionados con la validación.

En un procedimiento convencional, el ingeniero puede seguir de manera relativamente directa las operaciones realizadas por un algoritmo determinista. En un

modelo complejo de aprendizaje profundo, la relación entre las variables de entrada y la predicción final puede ser menos transparente. Esta característica plantea un desafío significativo en aplicaciones estructurales, especialmente cuando los resultados pueden influir en decisiones relacionadas con la seguridad.

Por ello, el desarrollo de la inteligencia artificial no debe evaluarse únicamente mediante indicadores de precisión. Un modelo con alto desempeño dentro de un conjunto específico de datos puede presentar limitaciones cuando se aplica a estructuras, materiales o condiciones diferentes. La literatura reciente ha enfatizado la necesidad de incorporar criterios de validación, interpretabilidad y coherencia física para garantizar una utilización responsable de estas herramientas en ingeniería (Ao et al., 2025).

La Ingeniería Estructural 5.0 requiere, en consecuencia, una relación equilibrada entre inteligencia humana y artificial. La automatización puede ampliar la capacidad del profesional para procesar información y explorar alternativas, pero la formulación de problemas, la evaluación de riesgos y la responsabilidad final sobre las decisiones no pueden transferirse de manera acrítica a un sistema algorítmico.

1.2.6. Sistemas ciberfísicos, gemelos digitales y estructuras conectadas

La evolución tecnológica alcanza una nueva dimensión cuando los modelos digitales, los datos y el activo físico comienzan a integrarse dentro de sistemas conectados. Esta transición se relaciona con el desarrollo de los **sistemas ciberfísicos**, en los que componentes físicos y digitales interactúan mediante procesos de adquisición, comunicación y procesamiento de información.

En el ámbito de la ingeniería estructural, esta lógica ha contribuido al desarrollo de los gemelos digitales. Un gemelo digital puede comprenderse como una representación digital dinámica vinculada, en diferentes niveles, con un activo físico y con información relacionada con su condición, comportamiento u operación. Su potencial se encuentra precisamente en la posibilidad de superar la condición estática de un modelo creado exclusivamente durante la etapa de diseño.

Las investigaciones recientes destacan que los gemelos digitales estructurales pueden integrar tecnologías como BIM, sensores, Internet de las cosas, inteligencia

artificial y modelos analíticos para apoyar el monitoreo, la evaluación y la gestión del ciclo de vida de las infraestructuras. Sin embargo, también advierten que la integración efectiva de estas tecnologías continúa siendo un desafío y que muchos desarrollos permanecen en etapas de aplicación parcial o experimental (Nhamage et al., 2025; Dong et al., 2026).

Esta observación es particularmente importante para evitar una visión excesivamente simplificada de la transformación digital. La existencia de un modelo BIM, un sistema de sensores y un algoritmo de inteligencia artificial no implica automáticamente la existencia de un gemelo digital funcional. El valor de un sistema integrado depende de la calidad de las conexiones entre sus componentes, de la confiabilidad de los flujos de información y de su capacidad para apoyar decisiones reales durante el ciclo de vida de la infraestructura.

Por ello, la evolución hacia estructuras conectadas debe analizarse no solo desde una perspectiva tecnológica, sino también desde una perspectiva de madurez organizacional. La adopción de estas herramientas requiere nuevas competencias, protocolos de gestión de datos, mecanismos de interoperabilidad y criterios para definir qué información es realmente necesaria.

1.2.7. De la automatización a la integración inteligente

La evolución descrita permite identificar una transición progresiva desde la automatización de tareas aisladas hacia la integración de sistemas y procesos. En una primera etapa, la tecnología permitió aumentar la velocidad y precisión del cálculo. Posteriormente, facilitó la generación y gestión de modelos digitales. Más recientemente, la disponibilidad de datos y los avances en inteligencia artificial han permitido desarrollar capacidades predictivas y mecanismos de interacción entre los modelos digitales y los activos físicos.

Esta evolución puede resumirse conceptualmente en cinco grandes transformaciones:

1. **Formalización científica:** desarrollo de teorías y métodos para comprender y predecir el comportamiento estructural.

2. **Computación numérica:** ampliación de la capacidad para resolver problemas complejos mediante métodos computacionales.
3. **Digitalización de la información:** transición hacia representaciones digitales y entornos integrados de modelamiento.
4. **Ingeniería basada en datos:** incorporación de información procedente de sensores, sistemas de monitoreo y bases de datos.
5. **Integración inteligente:** conexión entre activos físicos, modelos digitales, sistemas de análisis y procesos de toma de decisiones.

Estas etapas no deben interpretarse como períodos completamente separados. En la práctica, las diferentes tecnologías coexisten y se complementan. Un proyecto contemporáneo puede utilizar simultáneamente métodos analíticos convencionales, simulaciones numéricas, BIM y algoritmos de aprendizaje automático. Precisamente, la capacidad para integrar estas herramientas de acuerdo con las necesidades de cada problema constituye una de las características distintivas del paradigma que se propone en este libro.

La Ingeniería Estructural 5.0 representa, desde esta perspectiva, una evolución hacia la **integración inteligente y centrada en el ciclo de vida**. Su objetivo no consiste en maximizar indiscriminadamente la cantidad de tecnología utilizada, sino en construir una relación coherente entre conocimiento físico, información digital y toma de decisiones.

La transformación más significativa no será, por tanto, aquella que produzca el mayor número de datos o los modelos más sofisticados, sino aquella que permita reducir la incertidumbre y mejorar las decisiones relacionadas con la seguridad, la resiliencia y la gestión de las infraestructuras.

1.3. EL CONCEPTO DE INGENIERÍA 5.0

1.3.1. Del paradigma tecnológico al paradigma sociotécnico

El concepto de Ingeniería 5.0 surge en un contexto de transformación más amplio que el de la simple incorporación de nuevas tecnologías digitales. Para comprender su

significado es necesario reconocer que los procesos contemporáneos de innovación están modificando no solo las herramientas utilizadas por los ingenieros, sino también las relaciones entre tecnología, personas, organizaciones y sociedad. En consecuencia, el tránsito hacia un paradigma 5.0 no puede ser interpretado exclusivamente como una nueva fase de automatización.

Durante el desarrollo de la denominada Industria 4.0, la atención se concentró de manera importante en tecnologías como los sistemas ciberfísicos, el Internet de las cosas, la computación en la nube, la automatización avanzada y el análisis de datos. Estas tecnologías hicieron posible una mayor conexión entre sistemas físicos y digitales y generaron nuevas oportunidades para aumentar la eficiencia, flexibilidad y capacidad de procesamiento de las organizaciones. Sin embargo, la creciente digitalización también puso en evidencia que la eficiencia tecnológica, por sí sola, no constituye un criterio suficiente para evaluar el progreso de los sistemas productivos y tecnológicos.

La formulación de Industry 5.0 respondió, en parte, a esta necesidad de ampliar el marco de discusión. La perspectiva impulsada por la Comisión Europea plantea que este enfoque complementa, más que sustituye, el paradigma de Industry 4.0, al orientar la investigación y la innovación hacia sistemas **humanocéntricos, sostenibles y resilientes** (Breque et al., 2021). Esta precisión es importante porque evita interpretar el número “5.0” como una simple secuencia cronológica de revoluciones industriales o como la aparición de un conjunto completamente nuevo de tecnologías.

La diferencia fundamental reside en el propósito de la transformación. Mientras que una perspectiva estrictamente tecnológica puede concentrarse en las posibilidades de automatización y optimización, el enfoque 5.0 plantea la necesidad de preguntarse **para quién, para qué y bajo qué condiciones se desarrolla la tecnología**. De esta manera, la innovación deja de ser evaluada únicamente por su capacidad para incrementar la productividad y pasa a ser analizada también en función de su contribución al bienestar humano, la sostenibilidad ambiental y la capacidad de los sistemas para responder y adaptarse frente a perturbaciones.

Esta ampliación conceptual permite entender la Ingeniería 5.0 como un **paradigma sociotécnico**. La ingeniería deja de ser observada únicamente como una

actividad destinada a resolver problemas técnicos y pasa a ser comprendida como una práctica que produce consecuencias sociales, ambientales y económicas. Las decisiones adoptadas durante el diseño de una infraestructura, la selección de materiales, la automatización de un proceso o la utilización de algoritmos inteligentes no son neutrales, pues pueden afectar la seguridad de las personas, el consumo de recursos y la capacidad de una comunidad para enfrentar situaciones adversas.

Desde esta perspectiva, la Ingeniería 5.0 propone una relación más equilibrada entre la capacidad tecnológica y el propósito social de la ingeniería. El objetivo no consiste en rechazar la automatización o limitar el desarrollo tecnológico, sino en orientar estas capacidades hacia objetivos más amplios y responsables. La tecnología debe ser entendida como un medio para fortalecer las capacidades humanas y mejorar la calidad de las decisiones, en lugar de constituir un fin independiente de las necesidades sociales.

La literatura científica ha señalado que la centralidad humana constituye uno de los elementos diferenciadores más importantes del paradigma 5.0. Sin embargo, este concepto no debe reducirse a la idea de mantener al ser humano presente dentro de un proceso tecnológico. Una verdadera orientación humanocéntrica requiere considerar las competencias, la autonomía, la seguridad, el bienestar y la capacidad de participación de las personas que interactúan con los sistemas tecnológicos (Nahavandi, 2019; Ribeiro et al., 2023).

En consecuencia, trasladar esta perspectiva hacia la ingeniería implica reconocer que la transformación tecnológica debe fortalecer, y no debilitar, el criterio profesional. Los sistemas inteligentes pueden procesar información a una escala superior a la capacidad humana, pero carecen de la responsabilidad ética y del juicio contextual que caracterizan la toma de decisiones profesionales. La Ingeniería 5.0 plantea, por tanto, una relación de complementariedad entre capacidades humanas y tecnológicas.

1.3.2. Los tres pilares del paradigma 5.0

Aunque la literatura presenta diferentes interpretaciones y extensiones del concepto, existe una convergencia significativa alrededor de tres principios: **centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia**. Estos pilares constituyen un marco útil para

trasladar el enfoque 5.0 hacia las diferentes especialidades de la ingeniería (Breque et al., 2021).

a) Centralidad humana

La centralidad humana supone colocar a las personas en el centro del diseño y utilización de los sistemas tecnológicos. Esta idea representa una diferencia importante respecto de los enfoques en los que la persona es considerada principalmente como un componente que debe adaptarse a las exigencias de una tecnología o de un sistema automatizado.

En la Ingeniería 5.0, el proceso debería desarrollarse en sentido inverso: las tecnologías deben diseñarse y utilizarse considerando las capacidades, necesidades y limitaciones humanas. Esto implica reconocer que la automatización puede modificar profundamente el contenido del trabajo profesional y que dichas modificaciones requieren nuevas formas de capacitación, colaboración y gobernanza.

La centralidad humana no significa que todas las decisiones deban ejecutarse manualmente ni que la automatización sea incompatible con la ingeniería responsable. Su significado es más profundo: **las decisiones sobre el uso de la tecnología deben conservar una orientación humana y estar sujetas a responsabilidad profesional**. En sectores donde están involucradas la seguridad, la salud o la integridad física de las personas, esta condición adquiere una importancia particularmente elevada.

Para la ingeniería estructural, este principio implica que la incorporación de inteligencia artificial o sistemas automatizados no puede conducir a una transferencia acrítica de responsabilidad hacia algoritmos. El ingeniero continúa siendo responsable de evaluar los supuestos, interpretar los resultados y determinar la pertinencia de una decisión. La tecnología puede ampliar la capacidad de análisis, pero no elimina la necesidad de juicio profesional.

Asimismo, la centralidad humana plantea una exigencia para la formación de los futuros ingenieros. Las competencias técnicas deberán complementarse con capacidades de comunicación interdisciplinaria, gestión de información, pensamiento crítico y comprensión de las consecuencias sociales de las decisiones tecnológicas. La formación

para la era 5.0 requiere, por tanto, superar una visión exclusivamente instrumental de las competencias digitales y promover la capacidad de utilizar la tecnología de manera reflexiva y responsable (Gürdür Broo et al., 2022).

b) Sostenibilidad

El segundo pilar del paradigma 5.0 se relaciona con la necesidad de integrar la sostenibilidad dentro de los objetivos de la transformación tecnológica. Este principio reconoce que el incremento de la capacidad productiva o computacional no puede evaluarse de manera independiente de sus efectos sobre los recursos naturales y los sistemas ambientales.

Para la ingeniería, la sostenibilidad supone incorporar una perspectiva temporal más amplia. Una solución técnicamente eficiente en el corto plazo puede generar consecuencias negativas a largo plazo si requiere un consumo excesivo de recursos, produce elevados impactos ambientales o incrementa la vulnerabilidad de los sistemas frente a cambios futuros.

En este sentido, la Ingeniería 5.0 plantea la posibilidad de utilizar tecnologías digitales para mejorar el conocimiento sobre los recursos empleados y las consecuencias de las decisiones. Los modelos digitales, las simulaciones y los sistemas de información pueden facilitar la evaluación de alternativas y contribuir a una gestión más eficiente durante el ciclo de vida de los activos. Sin embargo, sería incorrecto asumir que toda digitalización es automáticamente sostenible. La tecnología requiere infraestructura, energía, equipos y recursos, por lo que su contribución a la sostenibilidad debe ser evaluada a partir de los resultados que permite alcanzar y no únicamente por su carácter innovador.

En el ámbito de la infraestructura, esta consideración es particularmente relevante. Las decisiones estructurales adoptadas durante la etapa de diseño pueden influir durante décadas en el consumo de materiales, las necesidades de mantenimiento, la posibilidad de rehabilitación y la vida útil de una construcción. Por ello, la incorporación de una perspectiva 5.0 invita a relacionar la innovación tecnológica con una gestión orientada al ciclo de vida.

c) Resiliencia

El tercer pilar es la resiliencia, entendida como la capacidad de un sistema para responder, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones. Su creciente relevancia se relaciona con la exposición de los sistemas contemporáneos a amenazas naturales, fallas tecnológicas, interrupciones de suministro y otros eventos capaces de afectar su funcionamiento.

La resiliencia amplía el concepto tradicional de eficiencia. Un sistema puede ser altamente eficiente bajo condiciones normales y, al mismo tiempo, resultar vulnerable frente a una perturbación inesperada. Por esta razón, el paradigma 5.0 plantea que la capacidad de adaptación debe ser considerada como una característica estratégica.

En ingeniería, la resiliencia requiere anticipar la incertidumbre. No todas las condiciones futuras pueden conocerse con precisión; por ello, el diseño y la gestión de sistemas deben considerar la posibilidad de eventos que excedan las condiciones habituales de funcionamiento. La disponibilidad de datos en tiempo real, la capacidad de simular escenarios y la integración entre modelos físicos y digitales pueden contribuir a mejorar esta capacidad de respuesta.

No obstante, la resiliencia no depende únicamente de la tecnología. Una infraestructura puede disponer de sistemas avanzados de monitoreo, pero continuar siendo vulnerable si no existen protocolos claros para interpretar la información y actuar frente a una señal de riesgo. La resiliencia requiere, por tanto, integrar capacidades tecnológicas con procedimientos organizacionales y profesionales.

La literatura reciente sobre Industry 5.0 ha destacado precisamente la necesidad de comprender estos tres pilares como dimensiones interdependientes y no como objetivos aislados. La centralidad humana, la sostenibilidad y la resiliencia pueden entrar en tensión si se persiguen mediante estrategias independientes. Por ejemplo, una solución tecnológicamente resiliente podría generar impactos ambientales elevados, mientras que una estrategia centrada exclusivamente en la reducción de costos podría disminuir las condiciones de seguridad o bienestar. La Ingeniería 5.0 requiere, por ello, un proceso de integración y equilibrio entre diferentes objetivos (Leng et al., 2022; Müller, 2023).

1.3.3. La relación entre el ingeniero y las tecnologías inteligentes

Uno de los aspectos centrales de la Ingeniería 5.0 es la redefinición de la relación entre el profesional y la tecnología. La evolución de los sistemas inteligentes ha generado dos visiones contrapuestas. La primera considera que el avance de la automatización conducirá progresivamente a la sustitución de numerosas actividades humanas. La segunda plantea que las tecnologías avanzadas pueden ampliar las capacidades profesionales cuando se diseñan como instrumentos de colaboración.

El paradigma 5.0 se aproxima principalmente a la segunda visión. La interacción entre inteligencia humana y sistemas artificiales puede generar nuevas capacidades cuando cada componente aporta aquello para lo cual presenta mayores ventajas. Los sistemas computacionales pueden procesar grandes cantidades de información, identificar patrones y ejecutar tareas repetitivas con alta velocidad. Los profesionales, por su parte, aportan comprensión contextual, experiencia, razonamiento causal y responsabilidad ética.

Esta complementariedad resulta especialmente relevante en ingeniería. Muchos problemas técnicos no consisten únicamente en encontrar una solución matemáticamente óptima. La decisión final puede involucrar restricciones económicas, sociales, ambientales, normativas y de seguridad que no siempre pueden representarse de manera completa dentro de un algoritmo.

Por ejemplo, un sistema de inteligencia artificial podría identificar una alternativa estructural con menor costo o menor cantidad de material bajo un conjunto determinado de variables. Sin embargo, el ingeniero debe evaluar si las hipótesis utilizadas son apropiadas, si el modelo considera adecuadamente las incertidumbres y si la solución es compatible con las condiciones reales del proyecto. La decisión profesional requiere integrar información cuantitativa con conocimiento contextual.

Esta situación conduce a una idea fundamental para la Ingeniería 5.0: **la automatización debe orientarse hacia el aumento de las capacidades humanas y no hacia la eliminación indiscriminada de la intervención humana**. El valor de una tecnología no depende únicamente de cuánto trabajo es capaz de automatizar, sino

también de su capacidad para mejorar la comprensión, reducir errores y apoyar decisiones más seguras.

La colaboración humano-tecnología también plantea nuevos desafíos. A medida que los sistemas se vuelven más complejos, aumenta el riesgo de que los usuarios dependan de resultados que no comprenden completamente. Este fenómeno puede generar una forma de automatización acrítica, en la que la confianza en el sistema sustituye al proceso de validación.

Por ello, la Ingeniería 5.0 exige una nueva cultura de alfabetización digital. Los profesionales no necesitan dominar todos los detalles técnicos de cada tecnología, pero sí deben comprender sus fundamentos, limitaciones y condiciones de aplicación. Un ingeniero que utiliza inteligencia artificial debe conocer las implicaciones de la calidad de los datos y la capacidad de generalización; quien trabaja con un gemelo digital debe comprender la diferencia entre una representación visual y un sistema capaz de apoyar decisiones; y quien utiliza modelos computacionales debe ser capaz de verificar la coherencia entre el resultado numérico y el comportamiento físico esperado.

1.3.4. Ingeniería 5.0 como integración de conocimiento, datos y decisión

A partir de los principios anteriores, es posible comprender la Ingeniería 5.0 como un enfoque que integra tres dimensiones fundamentales: **conocimiento especializado, información digital y toma de decisiones responsable**.

La primera dimensión está constituida por el conocimiento científico y técnico acumulado en cada disciplina. Los fundamentos físicos, matemáticos y experimentales continúan proporcionando el marco necesario para comprender los sistemas de ingeniería. La segunda dimensión corresponde a la creciente disponibilidad de información digital, generada mediante modelos, sensores, sistemas de gestión y otras fuentes. Finalmente, la tercera dimensión se relaciona con la capacidad de transformar este conocimiento y esta información en decisiones que respondan a objetivos técnicos y sociales.

La importancia de esta integración puede observarse en el siguiente razonamiento: los datos sin una pregunta claramente formulada pueden convertirse en información irrelevante; los modelos sin evidencia empírica pueden alejarse progresivamente de las

condiciones reales; y las decisiones sin fundamento técnico pueden conducir a soluciones inadecuadas. La Ingeniería 5.0 busca reducir estas desconexiones mediante sistemas en los que el conocimiento, los datos y la decisión se retroalimenten continuamente.

Esta perspectiva permite superar una concepción estrictamente tecnológica de la innovación. El objetivo no es construir sistemas cada vez más complejos únicamente por su capacidad técnica, sino desarrollar soluciones que permitan mejorar el desempeño de los sistemas de ingeniería. Una plataforma digital puede ser tecnológicamente sofisticada y, al mismo tiempo, carecer de utilidad si no contribuye a resolver un problema relevante.

En este sentido, la Ingeniería 5.0 se vincula con una visión orientada al propósito. Antes de seleccionar una tecnología es necesario definir qué problema se pretende resolver, qué información es necesaria y qué decisiones podrán mejorarse mediante su utilización. Esta secuencia resulta especialmente importante para evitar el denominado **tecnologismo**, entendido como la adopción de una herramienta por su novedad sin una justificación suficiente de su valor práctico.

La literatura crítica sobre Industry 5.0 ha advertido, precisamente, que el concepto todavía presenta ambigüedades y riesgos de superposición con paradigmas anteriores. Por ello, su utilidad no debe depender exclusivamente de la utilización de una nueva denominación, sino de la capacidad para aportar criterios realmente diferenciadores a la práctica profesional (Müller, 2023). Para la Ingeniería 5.0, estos criterios pueden encontrarse en la integración explícita de la centralidad humana, la sostenibilidad y la resiliencia dentro del proceso de innovación tecnológica.

1.3.5. Implicancias del paradigma 5.0 para las diferentes ramas de la ingeniería

Aunque los principios del paradigma 5.0 pueden ser aplicados a diferentes campos, su implementación adopta características particulares según la naturaleza del problema. No existe una única Ingeniería 5.0 homogénea, sino múltiples formas de trasladar sus principios hacia disciplinas con objetos de estudio, riesgos y responsabilidades diferentes.

En ingeniería industrial, el enfoque puede concentrarse en la interacción entre trabajadores y sistemas automatizados. En ingeniería ambiental, puede orientarse hacia el uso de tecnologías inteligentes para gestionar recursos y reducir impactos. En ingeniería energética, puede relacionarse con la integración de sistemas distribuidos, redes inteligentes y resiliencia frente a interrupciones.

En ingeniería civil y estructural, el paradigma adquiere una dimensión particularmente significativa debido a la naturaleza y duración de los activos gestionados. Una infraestructura puede permanecer en operación durante décadas y estar expuesta a cambios ambientales, procesos de deterioro y eventos extremos. En consecuencia, la información generada durante su ciclo de vida adquiere un valor estratégico.

La Ingeniería 5.0 aplicada al entorno construido puede contribuir a superar la fragmentación entre diseño, construcción, operación y mantenimiento. La literatura reciente sobre Construction 5.0 ha comenzado a explorar esta posibilidad, identificando la integración de tecnologías avanzadas con enfoques humanocéntricos, sostenibles y resilientes como una vía para desarrollar edificaciones e infraestructuras más adaptables y preparadas para las condiciones futuras (Gürdür Broo et al., 2022).

Sin embargo, la transferencia de principios entre disciplinas debe realizarse con cautela. No es suficiente incorporar tecnologías utilizadas en otros sectores y asumir que producirán los mismos resultados en infraestructura. Las estructuras poseen características particulares relacionadas con su comportamiento físico, su vida útil, las consecuencias de una falla y las exigencias normativas que regulan su diseño.

Por esta razón, la construcción conceptual de una **Ingeniería Estructural 5.0** requiere un proceso de adaptación disciplinar. Los principios generales del paradigma 5.0 deben traducirse en objetivos, métodos y tecnologías capaces de responder a problemas específicamente estructurales. Este proceso constituye el propósito del siguiente apartado.

1.3.6. Una aproximación conceptual a la Ingeniería 5.0

A partir de la discusión desarrollada, para los fines de esta obra se propone comprender la **Ingeniería 5.0** como:

Un enfoque de ingeniería que integra el conocimiento científico y profesional con tecnologías digitales avanzadas, sistemas inteligentes y datos provenientes del entorno físico, orientando la innovación hacia la ampliación de las capacidades humanas, la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas durante su ciclo de vida.

Esta definición debe ser entendida como una propuesta conceptual para el desarrollo del presente libro y no como una definición universalmente aceptada. Su propósito es establecer un marco de análisis que permita trasladar los principios generales del paradigma 5.0 hacia el ámbito específico de la ingeniería estructural.

La definición incorpora cinco elementos fundamentales. En primer lugar, reconoce la continuidad del conocimiento científico y profesional como base de la práctica ingenieril. En segundo lugar, considera la incorporación de tecnologías digitales como un mecanismo para ampliar las capacidades de análisis y gestión. En tercer lugar, establece una relación entre los sistemas digitales y el entorno físico, aspecto esencial para disciplinas que trabajan con infraestructuras reales. En cuarto lugar, sitúa las capacidades humanas como elemento central de la toma de decisiones. Finalmente, incorpora la sostenibilidad y la resiliencia como criterios para evaluar el propósito de la innovación.

Esta aproximación permite evitar dos interpretaciones extremas. La primera consistiría en considerar la Ingeniería 5.0 como una revolución que elimina los fundamentos anteriores. La segunda sería reducirla a una nueva etiqueta para tecnologías ya existentes. La propuesta desarrollada en este libro se sitúa entre ambas posiciones: reconoce la continuidad de los fundamentos de la ingeniería, pero sostiene que la integración de nuevas capacidades tecnológicas, acompañada por una redefinición de los objetivos de la innovación, puede transformar de manera significativa la práctica profesional.

1.4. DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

1.4.1. La necesidad de una redefinición del campo estructural

La ingeniería estructural contemporánea se encuentra en un proceso de expansión de sus capacidades técnicas y analíticas. Tradicionalmente, la disciplina se ha concentrado en garantizar que las estructuras puedan resistir las acciones previstas durante su vida útil, manteniendo niveles aceptables de seguridad, servicio y funcionalidad. Para alcanzar estos objetivos, se han desarrollado modelos teóricos, métodos experimentales, procedimientos numéricos y disposiciones normativas que constituyen la base científica y profesional del campo.

Sin embargo, la creciente incorporación de sistemas de información, sensores, modelos digitales y métodos de inteligencia artificial está modificando progresivamente el contexto en el que estas actividades se desarrollan. Actualmente, una estructura puede ser representada mediante modelos digitales durante su diseño, generar información durante su construcción y producir datos sobre determinados aspectos de su comportamiento durante la operación. Esta disponibilidad de información abre la posibilidad de establecer vínculos más estrechos entre las distintas etapas del ciclo de vida estructural.

Los desarrollos recientes en gemelos digitales para infraestructuras civiles muestran precisamente una transición desde modelos digitales estáticos hacia sistemas capaces de integrar múltiples fuentes de información y diferentes tipos de modelos a lo largo de la vida útil de un activo. No obstante, la literatura también advierte que esta integración continúa enfrentando desafíos importantes debido a la heterogeneidad de los datos, los modelos y las plataformas tecnológicas involucradas (Torzoni et al., 2024; Sun et al., 2025).

Esta situación plantea una cuestión fundamental: **¿cómo debe evolucionar la ingeniería estructural para aprovechar las nuevas capacidades tecnológicas sin perder el rigor físico y la responsabilidad profesional que caracterizan a la disciplina?**

La respuesta no puede consistir simplemente en añadir herramientas digitales al conjunto tradicional de procedimientos. Una estructura diseñada mediante un software avanzado, modelada en BIM o equipada con sensores no constituye automáticamente una estructura inteligente ni representa, por sí misma, una nueva forma de hacer ingeniería. La transformación adquiere profundidad cuando estas tecnologías se integran dentro de un proceso coherente de generación de conocimiento y toma de decisiones.

Por esta razón, el concepto de **Ingeniería Estructural 5.0** se propone en este libro como un marco integrador. Su finalidad es articular los principios fundamentales de la ingeniería estructural con las capacidades emergentes de la transformación digital, incorporando además los criterios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia discutidos en el paradigma 5.0.

1.4.2. Una propuesta conceptual para la Ingeniería Estructural 5.0

Para los fines de esta obra, se propone la siguiente definición:

La Ingeniería Estructural 5.0 es un enfoque integrador de la ingeniería estructural que articula el conocimiento físico y científico, los modelos digitales, los datos provenientes del comportamiento real de las estructuras y las tecnologías inteligentes para apoyar decisiones humanas orientadas a la seguridad, la sostenibilidad, la resiliencia y la gestión del ciclo de vida de los sistemas estructurales.

Esta definición constituye una **propuesta conceptual desarrollada para este libro**. Su propósito no es reemplazar las definiciones tradicionales de ingeniería estructural ni establecer artificialmente una nueva disciplina independiente, sino ofrecer un marco para comprender la evolución de la práctica estructural en un contexto de creciente integración tecnológica.

La definición contiene seis componentes fundamentales.

El primero es el **conocimiento físico y científico**. La Ingeniería Estructural 5.0 parte del reconocimiento de que los principios de la mecánica estructural continúan siendo el fundamento para comprender el comportamiento de una construcción. El equilibrio, la compatibilidad, la resistencia de los materiales, la dinámica estructural y los

mecanismos de falla no pierden validez por la incorporación de tecnologías digitales. Por el contrario, estos conocimientos proporcionan el marco necesario para interpretar críticamente la información producida por los sistemas computacionales.

El segundo componente corresponde a los **modelos digitales**. Estos permiten representar la geometría, las propiedades, las relaciones y, en determinados casos, los procesos asociados con una estructura. Su importancia trasciende la visualización, pues pueden convertirse en medios para organizar información y conectar diferentes fases del ciclo de vida. Sin embargo, el modelo digital solo adquiere valor ingenieril cuando su nivel de detalle y su información son pertinentes para el problema que se pretende resolver.

El tercer componente está constituido por los **datos procedentes del comportamiento real**. Los sistemas de monitoreo estructural, las inspecciones, las imágenes y otras fuentes de información permiten incorporar evidencia sobre la condición y respuesta de las infraestructuras. El desarrollo reciente del monitoreo basado en sensores, Internet de las cosas y técnicas de aprendizaje profundo ha ampliado significativamente las posibilidades de adquisición y procesamiento de esta información (Bhatta & Dang, 2024; Cha et al., 2024).

El cuarto componente son las **tecnologías inteligentes**, particularmente aquellas capaces de procesar grandes cantidades de información, identificar patrones y apoyar procesos predictivos. La inteligencia artificial puede contribuir a la evaluación estructural, pero sus resultados requieren validación y deben ser interpretados en función del conocimiento físico y de las condiciones específicas del sistema.

El quinto componente corresponde a la **decisión humana**. Este elemento constituye uno de los aspectos diferenciadores de la propuesta. La finalidad de integrar información y tecnología no es eliminar la participación del ingeniero, sino proporcionar mejores condiciones para el ejercicio del juicio profesional. La decisión sobre la seguridad de una estructura no debe ser entendida como la salida automática de un algoritmo, sino como el resultado de un proceso en el que la información disponible es evaluada dentro de un marco técnico, normativo y ético.

Finalmente, la definición incorpora una orientación hacia la **seguridad, sostenibilidad, resiliencia y gestión del ciclo de vida**. Estos elementos permiten establecer el propósito de la integración tecnológica. Una innovación estructural debe ser evaluada no únicamente por su sofisticación, sino por su capacidad para contribuir a infraestructuras más seguras, durables, adaptables y responsables con los recursos disponibles.

1.4.3. Los cinco sistemas que integran la Ingeniería Estructural 5.0

Para facilitar la comprensión y aplicación del concepto, este libro propone que la Ingeniería Estructural 5.0 puede analizarse mediante la interacción de **cinco sistemas complementarios**:

1. **Sistema físico estructural.**
2. **Sistema de representación digital.**
3. **Sistema de información y observación.**
4. **Sistema de inteligencia y análisis.**
5. **Sistema humano de decisión y gobernanza.**

Estos sistemas no representan necesariamente plataformas independientes. Constituyen dimensiones analíticas que permiten comprender cómo se genera, transforma y utiliza el conocimiento dentro de un entorno estructural integrado.

a) Sistema físico estructural: el objeto central de la ingeniería

El primer componente es la estructura física. Una edificación, puente, torre, presa u otra infraestructura constituye el objeto material sobre el cual se desarrolla la actividad ingenieril. Su comportamiento está condicionado por la geometría, los materiales, las condiciones de apoyo, las acciones externas, el ambiente y los procesos de deterioro que pueden ocurrir durante su vida útil.

La Ingeniería Estructural 5.0 no sustituye esta realidad física por una representación digital. Por el contrario, reconoce que todo modelo, dato o algoritmo debe mantener una relación verificable con el sistema que pretende representar.

Esta afirmación parece evidente, pero adquiere especial importancia en un contexto de creciente digitalización. La disponibilidad de grandes cantidades de información puede generar una separación progresiva entre el proceso computacional y el fenómeno físico. Por ello, uno de los principios fundamentales del enfoque propuesto es que **la realidad estructural constituye el referente último para la validación de los sistemas digitales**.

Los modelos pueden ser sofisticados y los algoritmos pueden alcanzar altos niveles de precisión estadística; sin embargo, su utilidad depende de su capacidad para representar aspectos relevantes del comportamiento físico. Esta necesidad de mantener un vínculo entre conocimiento físico y modelos basados en datos ha impulsado el interés por enfoques de aprendizaje automático informado por la física, particularmente en aplicaciones donde la extrapolación y la interpretabilidad son esenciales (Murphy et al., 2026).

b) Sistema de representación digital: del modelo estático al activo informacional

El segundo componente es la representación digital. Históricamente, los planos, memorias de cálculo y especificaciones técnicas han permitido representar y comunicar las características de una estructura. La transformación digital amplía esta función mediante modelos capaces de concentrar y relacionar diferentes tipos de información.

BIM constituye uno de los avances más relevantes en esta dimensión, pero la representación digital en la Ingeniería Estructural 5.0 no debe limitarse a un formato o software específico. Un modelo estructural puede incorporar información geométrica, propiedades de materiales, hipótesis de diseño, resultados de análisis, historial de intervenciones y otras variables relevantes para la gestión del activo.

El objetivo es transformar la información generada durante el proyecto en un **activo de conocimiento reutilizable**. Una estructura puede permanecer en

funcionamiento durante décadas, mientras que los profesionales, organizaciones y tecnologías involucradas en su gestión pueden cambiar. La preservación organizada de información relevante se convierte, por ello, en una condición importante para garantizar la continuidad del conocimiento.

La investigación sobre gemelos digitales de estructuras civiles destaca precisamente la necesidad de integrar diferentes modelos y fuentes de información durante el ciclo de vida, así como el desafío de garantizar que los sistemas digitales puedan evolucionar junto con infraestructuras cuya vida útil suele ser considerablemente mayor que la de las tecnologías informáticas utilizadas para gestionarlas (Torzoni et al., 2024).

c) Sistema de información y observación: conocer el comportamiento de la estructura

El tercer sistema corresponde a la capacidad para observar y registrar información sobre la estructura. Tradicionalmente, gran parte del conocimiento sobre el comportamiento estructural se obtenía mediante inspecciones periódicas, ensayos y evaluaciones realizadas en momentos específicos. La incorporación de sensores y sistemas de comunicación permite, en determinados casos, generar información de manera más frecuente y continua.

El monitoreo de la salud estructural representa una de las áreas con mayor potencial dentro de esta dimensión. Los sensores pueden registrar variables como aceleraciones, deformaciones, desplazamientos, temperatura u otras respuestas relevantes. Sin embargo, medir una variable no equivale automáticamente a comprender la condición estructural.

Uno de los desafíos centrales consiste en transformar datos en información útil para la toma de decisiones. Los cambios observados en una señal pueden estar asociados con daño estructural, pero también pueden deberse a variaciones ambientales, condiciones operacionales o problemas en los propios sistemas de medición. La interpretación exige, por tanto, procedimientos de validación y modelos capaces de distinguir entre diferentes fuentes de variación.

Las investigaciones recientes sobre monitoreo estructural basado en aprendizaje profundo reconocen el enorme potencial de estas técnicas, pero también subrayan que su aplicación práctica a gran escala continúa enfrentando desafíos relacionados con confiabilidad, costo, automatización y generalización (Cha et al., 2024).

Desde la perspectiva de la Ingeniería Estructural 5.0, el objetivo no es sensor todo aquello que técnicamente puede ser medido. El principio fundamental debe ser la **pertinencia de la información**. Los sistemas de observación deben diseñarse en función de las preguntas de ingeniería que se pretende responder.

d) Sistema de inteligencia y análisis: transformar información en conocimiento

El cuarto componente corresponde a las herramientas utilizadas para transformar información en conocimiento. En este nivel convergen los modelos analíticos y numéricos tradicionales con las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático.

La contribución más importante de este sistema no consiste necesariamente en automatizar decisiones, sino en ampliar la capacidad para analizar escenarios, identificar patrones y gestionar información compleja. Los modelos numéricos pueden utilizarse para simular comportamientos; los algoritmos de aprendizaje automático pueden identificar relaciones dentro de grandes conjuntos de datos; y los enfoques híbridos pueden combinar ambas capacidades.

Esta integración es particularmente prometedora para el desarrollo de gemelos digitales estructurales. Investigaciones recientes han propuesto marcos en los que modelos reducidos, redes neuronales y registros de sensores se integran para actualizar la representación de una estructura y apoyar estrategias de mantenimiento predictivo y gestión (Torzoni et al., 2024).

Sin embargo, la inteligencia debe entenderse como una capacidad analítica y no como una garantía automática de corrección. Un sistema puede identificar correlaciones estadísticamente sólidas que carezcan de significado causal o que no puedan generalizarse

a otras condiciones. Por ello, la Ingeniería Estructural 5.0 propone que la validación física, la incertidumbre y la interpretabilidad formen parte del proceso de análisis.

En este sentido, la convergencia entre inteligencia artificial y conocimiento estructural debe conducir hacia una **inteligencia aumentada por la física**, en la que los datos complementen, y no sustituyan de manera indiscriminada, los fundamentos científicos de la disciplina.

e) Sistema humano de decisión y gobernanza: el centro de la integración

El quinto sistema está constituido por las personas y organizaciones responsables de interpretar la información y tomar decisiones. Este componente es esencial porque una estructura no se gestiona únicamente mediante datos. Las decisiones sobre diseño, intervención, mantenimiento o evacuación involucran responsabilidades, recursos, riesgos y consecuencias que deben ser evaluados en un contexto determinado.

La Ingeniería Estructural 5.0 propone, por tanto, un modelo de **gobernanza humana de la tecnología**. Los sistemas digitales deben proporcionar información comprensible y trazable, mientras que los profesionales deben desarrollar competencias para evaluar sus resultados y reconocer sus limitaciones.

Este principio adquiere especial relevancia cuando se utilizan algoritmos complejos. Una decisión crítica no debería depender exclusivamente de una predicción cuyo funcionamiento y condiciones de validez sean desconocidos para quienes la utilizan. La transparencia y trazabilidad de los procesos analíticos constituyen condiciones importantes para una adopción responsable de tecnologías inteligentes.

La centralidad humana implica también reconocer que la innovación tecnológica transforma las competencias requeridas por los ingenieros. El profesional de la Ingeniería Estructural 5.0 deberá mantener una sólida formación en mecánica y diseño estructural, pero necesitará además competencias relacionadas con gestión de datos, modelamiento digital, evaluación de incertidumbre e interacción crítica con sistemas inteligentes.

1.4.4. La arquitectura de integración: del dato a la decisión estructural

La propuesta de Ingeniería Estructural 5.0 puede comprenderse como un ciclo continuo de integración:

Estructura física → adquisición de información → representación y procesamiento digital → análisis e interpretación → decisión profesional → intervención sobre la estructura física.

Este ciclo permite superar una visión lineal de la ingeniería. En los procesos convencionales, el diseño puede culminar formalmente con la entrega de la estructura. En un enfoque basado en el ciclo de vida, la experiencia obtenida durante la operación puede retroalimentar el conocimiento sobre el activo y contribuir a mejorar futuras decisiones.

La retroalimentación constituye, en este sentido, una de las características más importantes del paradigma. Una infraestructura monitoreada puede generar evidencia que permita contrastar determinadas hipótesis utilizadas durante su diseño. Esta información puede contribuir a actualizar modelos, identificar necesidades de inspección o mejorar estrategias de mantenimiento.

Sin embargo, la existencia de un ciclo de información no implica que todas las decisiones deban actualizarse automáticamente. El nivel de automatización debe ser proporcional al tipo de decisión y al riesgo asociado. Las decisiones rutinarias y reversibles pueden admitir mayores niveles de automatización, mientras que aquellas con consecuencias importantes sobre la seguridad deben mantener mecanismos robustos de supervisión y validación profesional.

Esta distinción permite evitar dos extremos: la dependencia exclusiva de procedimientos manuales y la automatización completa sin control humano. La Ingeniería Estructural 5.0 se sitúa en un espacio de **colaboración graduada**, en el que la tecnología y el profesional participan de acuerdo con la naturaleza y criticidad de cada problema.

1.4.5. Principios rectores de la Ingeniería Estructural 5.0

A partir de la propuesta conceptual desarrollada, este libro establece siete principios rectores que orientarán los capítulos posteriores:

1. Primacía del comportamiento físico

Toda representación digital o modelo inteligente debe mantener una relación justificable con el comportamiento del sistema físico. La tecnología no reemplaza las leyes de la mecánica ni la necesidad de validación experimental.

2. Integración durante el ciclo de vida

La información relevante debe poder acompañar a la estructura desde el diseño hasta la operación, mantenimiento, rehabilitación o eventual desmantelamiento. Los modelos y datos deben concebirse como recursos evolutivos y no como productos aislados de una única fase.

3. Interoperabilidad con propósito

La conexión entre sistemas tecnológicos debe responder a necesidades reales de ingeniería. Integrar plataformas que no contribuyen a mejorar una decisión concreta puede incrementar innecesariamente la complejidad.

4. Inteligencia complementaria

La inteligencia artificial debe utilizarse para ampliar las capacidades de análisis, exploración y procesamiento del ingeniero, no como un mecanismo para transferir de manera acrítica la responsabilidad profesional a un algoritmo.

5. Decisión humana responsable

Las decisiones críticas relacionadas con la seguridad estructural deben permanecer sujetas a juicio profesional, trazabilidad y responsabilidad claramente definidas.

6. Resiliencia y adaptación

Las estructuras y sus sistemas de gestión deben prepararse para condiciones cambiantes, incertidumbres y eventos que puedan afectar su funcionamiento. La información y las tecnologías inteligentes pueden contribuir a mejorar esta capacidad de adaptación.

7. Innovación sostenible

La incorporación de tecnología debe evaluarse por su contribución efectiva a la seguridad, durabilidad, eficiencia en el uso de recursos y reducción de impactos durante el ciclo de vida, y no únicamente por su grado de novedad.

Estos principios permiten que la expresión “5.0” tenga un contenido operativo dentro de la obra. No se trata únicamente de añadir BIM, inteligencia artificial o sensores a la ingeniería convencional. Se trata de **reorganizar la relación entre conocimiento, información y decisión** bajo una visión integrada y responsable.

1.4.6. Alcances y límites del concepto

Una definición académicamente rigurosa requiere reconocer también los límites del concepto propuesto. La Ingeniería Estructural 5.0 no debe ser presentada como una solución universal para todos los problemas de la disciplina.

En primer lugar, no todas las estructuras requieren el mismo nivel de digitalización. La incorporación de un gemelo digital complejo o de un sistema permanente de monitoreo puede ser técnicamente injustificada para determinados activos. La selección tecnológica debe considerar la criticidad, complejidad, vida útil, riesgos y recursos disponibles.

En segundo lugar, la calidad de un sistema digital depende de la calidad de sus datos y modelos. Una estructura conectada mediante sensores defectuosos, modelos desactualizados o algoritmos mal validados puede generar una falsa sensación de seguridad. La digitalización, por tanto, también puede introducir nuevas formas de riesgo.

En tercer lugar, existe una brecha entre los desarrollos de investigación y la adopción generalizada en la práctica profesional. Las revisiones sobre gemelos digitales en infraestructura civil identifican desafíos relacionados con interoperabilidad, sincronización de datos, costos, estándares y capacidades organizacionales. Por ello, la implementación debe entenderse como un proceso progresivo y no como una transformación instantánea (Sun et al., 2025; Huang et al., 2024).

Finalmente, la tecnología no puede sustituir la responsabilidad institucional. Una infraestructura más conectada requiere también protocolos claros, profesionales capacitados y organizaciones capaces de responder ante la información generada. Los datos solo producen valor cuando existe una capacidad efectiva para transformarlos en acción.

1.4.7. La Ingeniería Estructural 5.0 como marco de evolución profesional

El mayor aporte del concepto propuesto puede encontrarse en la manera en que redefine la función profesional del ingeniero estructural. En lugar de concebir al profesional como un usuario pasivo de herramientas digitales, la Ingeniería Estructural 5.0 lo sitúa como **integrador de conocimiento**.

El ingeniero deberá ser capaz de formular correctamente un problema estructural, seleccionar modelos apropiados, evaluar datos, comprender las limitaciones de los algoritmos y tomar decisiones considerando múltiples objetivos. Esta función integradora adquiere especial importancia en entornos donde ninguna tecnología individual posee toda la información necesaria para resolver un problema complejo.

Por ello, el futuro de la ingeniería estructural no depende exclusivamente de producir sistemas más autónomos. Depende también de formar profesionales capaces de interactuar críticamente con esos sistemas. La transformación tecnológica aumenta la necesidad de conocimiento especializado porque incrementa la cantidad y diversidad de información que debe ser interpretada.

La Ingeniería Estructural 5.0 propone, en consecuencia, una evolución de la profesión basada en una premisa fundamental: **a mayor capacidad tecnológica, mayor debe ser la responsabilidad en su utilización**.

1.5. ARQUITECTURA Y COMPONENTES TECNOLÓGICOS DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

1.5.1. De la adopción tecnológica a la integración sistémica

Una de las principales dificultades de la transformación digital en ingeniería consiste en confundir la **incorporación de tecnología** con la **transformación del proceso de ingeniería**. Una organización puede utilizar software de modelamiento BIM,

ejecutar análisis estructurales avanzados, instalar sensores en una infraestructura o aplicar algoritmos de aprendizaje automático y, aun así, mantener procesos fragmentados en los que cada herramienta funciona de manera independiente.

Esta fragmentación limita el valor potencial de la digitalización. Cuando los sistemas no intercambian información de manera coherente, se producen duplicidades, pérdidas de conocimiento y discontinuidades entre las etapas de diseño, construcción y operación. La información generada en una fase puede no estar disponible para quienes toman decisiones en una fase posterior. En consecuencia, el desafío central no consiste únicamente en producir una mayor cantidad de datos, sino en construir una **arquitectura capaz de transformar datos dispersos en conocimiento útil**.

Las revisiones recientes sobre gemelos digitales en infraestructura civil identifican precisamente la integración de datos, la interoperabilidad y la conexión entre el activo físico y su representación digital como algunos de los principales desafíos para la implementación efectiva de estos sistemas. Un gemelo digital funcional requiere algo más que un modelo tridimensional: necesita mecanismos para vincular información, modelos analíticos y, cuando corresponda, datos obtenidos del comportamiento real de la infraestructura (Jiang et al., 2021; Sun et al., 2025).

Desde la perspectiva de este libro, la **arquitectura tecnológica de la Ingeniería Estructural 5.0** puede entenderse como un sistema organizado en el que cada tecnología cumple una función específica, pero mantiene relaciones de intercambio con las demás. Esta arquitectura no presupone que todos los proyectos deban incorporar simultáneamente todas las tecnologías. Su propósito es proporcionar un marco para comprender **cuándo, por qué y cómo pueden integrarse**.

La lógica central puede representarse conceptualmente de la siguiente manera:

Conocimiento estructural → modelamiento y diseño → información digital → observación del comportamiento → análisis inteligente → decisión profesional → retroalimentación del sistema.

Esta secuencia no es estrictamente lineal. En la práctica, constituye un ciclo continuo. La información generada durante la operación puede modificar la comprensión

del sistema, actualizar modelos y mejorar decisiones futuras. Precisamente esta capacidad de retroalimentación es uno de los elementos que diferencia una infraestructura digitalmente documentada de un sistema verdaderamente integrado.

1.5.2. El diseño sísmico como núcleo físico de la arquitectura

El primer componente de la arquitectura es el **diseño sísmico**, entendido no solamente como un conjunto de verificaciones normativas, sino como el proceso mediante el cual se establece una hipótesis explícita sobre el comportamiento esperado de la estructura frente a diferentes niveles de demanda sísmica.

Esta consideración es fundamental porque la transformación digital no puede desvincularse del comportamiento físico. Una inteligencia artificial puede procesar miles de registros, un gemelo digital puede integrar información en tiempo real y un sistema de monitoreo puede generar grandes volúmenes de datos; sin embargo, la interpretación de dichos recursos requiere un marco estructural que permita establecer qué comportamientos son esperados y cuáles pueden representar una desviación significativa.

El diseño sísmico proporciona parte de ese marco. Las decisiones relacionadas con la configuración estructural, el sistema resistente, la ductilidad, la rigidez, la disipación de energía y las condiciones de desempeño establecen las bases para comprender la respuesta futura de una estructura.

Por ello, en la arquitectura de Ingeniería Estructural 5.0, el diseño sísmico no constituye una actividad que termina con la emisión de los planos. Sus hipótesis pueden convertirse en información relevante durante el ciclo de vida. Un modelo digital bien estructurado puede conservar parámetros del sistema resistente; un gemelo digital puede actualizar determinados estados del modelo; y los datos de monitoreo pueden proporcionar evidencia sobre el comportamiento dinámico real.

Esta perspectiva transforma parcialmente la lógica tradicional de diseño. En lugar de considerar exclusivamente una secuencia de:

Diseñar → construir → entregar,

se incorpora una lógica ampliada:

Diseñar → construir → observar → aprender → actualizar → gestionar.

La relevancia de esta transición radica en que las infraestructuras reales operan bajo condiciones que pueden diferir de las hipótesis idealizadas utilizadas inicialmente. Las propiedades de los materiales pueden variar, las condiciones ambientales pueden modificar la respuesta y los eventos extremos pueden generar cambios que requieren una nueva evaluación.

En este contexto, la disponibilidad de información procedente del monitoreo estructural puede contribuir a contrastar determinadas hipótesis y mejorar el conocimiento sobre el comportamiento del activo. La investigación sobre diagnóstico y monitoreo estructural reconoce que el análisis basado en datos tiene un potencial creciente para identificar cambios en la condición de las estructuras, aunque persisten desafíos importantes relacionados con la interpretación física, la generalización y la incertidumbre de los modelos (Bao et al., 2025; Cha et al., 2024).

Por tanto, la primera premisa tecnológica de la Ingeniería Estructural 5.0 es clara: **la digitalización debe construirse sobre fundamentos físicos sólidos**. Las tecnologías posteriores amplían las capacidades de observación, análisis y gestión, pero no sustituyen la comprensión de los mecanismos estructurales.

1.5.3. BIM como infraestructura de información

El segundo componente de la arquitectura es el **Building Information Modeling (BIM)**. Su importancia dentro de la Ingeniería Estructural 5.0 se relaciona con su capacidad para organizar y comunicar información durante diferentes etapas del ciclo de vida de una infraestructura.

No obstante, resulta necesario superar una interpretación reduccionista de BIM como una herramienta exclusivamente destinada a producir modelos tridimensionales. Desde una perspectiva integrada, su valor principal se encuentra en la posibilidad de estructurar relaciones entre información geométrica, propiedades de componentes, documentación técnica y otros datos asociados al activo.

Esta función convierte a BIM en una posible **infraestructura informacional**. El modelo puede actuar como un punto de referencia para conectar información procedente

de diferentes fuentes, siempre que se definan adecuadamente los estándares, niveles de información y mecanismos de actualización.

La literatura sobre gemelos digitales en ingeniería civil ha destacado que BIM puede desempeñar un papel importante como base para la representación digital de activos, aunque BIM y un gemelo digital no deben ser considerados conceptos equivalentes. Mientras BIM puede proporcionar una representación rica en información del activo, un gemelo digital requiere una conexión más dinámica entre la representación virtual y el sistema físico, así como capacidades de análisis y actualización (Jiang et al., 2021).

Esta distinción es particularmente importante para evitar el uso impreciso de conceptos. Un modelo BIM puede existir sin sensores ni conexión en tiempo real. Por el contrario, un sistema de monitoreo puede generar datos sin disponer de un modelo BIM completo. La integración entre ambos representa una oportunidad tecnológica, pero requiere objetivos claramente definidos.

En el contexto estructural, BIM puede facilitar la organización de información sobre elementos resistentes, materiales, secciones, conexiones y otras características relevantes. Sin embargo, la cantidad de información incorporada debe ser proporcional a las necesidades del proyecto. Un modelo excesivamente complejo puede generar dificultades de gestión sin aportar beneficios equivalentes.

Por ello, la Ingeniería Estructural 5.0 adopta el principio de **información con propósito**. No toda información disponible necesita ser incorporada al sistema; debe priorizarse aquella que contribuya efectivamente a mejorar el análisis, la coordinación, la operación o la toma de decisiones.

1.5.4. La inteligencia artificial como capa de análisis y aprendizaje

El tercer componente de la arquitectura es la **inteligencia artificial (IA)**. Su creciente aplicación en ingeniería estructural se explica por la capacidad de los métodos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para procesar grandes conjuntos de datos, reconocer patrones complejos y construir modelos predictivos.

En aplicaciones estructurales, estas capacidades pueden utilizarse para diferentes finalidades: clasificación de daños, procesamiento de imágenes, predicción de propiedades, identificación de patrones en respuestas dinámicas, optimización y apoyo a procesos de monitoreo. Las revisiones recientes muestran una expansión significativa de estas aplicaciones y, especialmente, una creciente integración entre métodos basados en datos, monitoreo estructural y modelos digitales (Cha et al., 2024; Bao et al., 2025).

Sin embargo, el valor de la IA no debe medirse exclusivamente por su capacidad de generar predicciones. En ingeniería estructural, una predicción debe ser evaluada considerando su relación con el fenómeno físico, las condiciones bajo las cuales fue entrenado el modelo y las consecuencias de un posible error.

Por esta razón, la Inteligencia Artificial ocupa en la arquitectura propuesta una **capa de análisis**, y no una posición autónoma de autoridad. Su función consiste en ampliar la capacidad del sistema para transformar datos en patrones, indicadores y estimaciones que posteriormente puedan ser evaluados por el ingeniero.

Esta diferenciación es esencial. Un algoritmo puede detectar una anomalía en una señal, pero la existencia de una anomalía estadística no equivale automáticamente a la existencia de daño estructural. La interpretación requiere información sobre las condiciones ambientales, operacionales y físicas del sistema.

La literatura reciente sobre diagnóstico estructural basado en aprendizaje automático también identifica la transferencia de modelos, la disponibilidad de datos representativos, la robustez y la interpretabilidad como desafíos centrales para la aplicación práctica de estas técnicas. Los modelos pueden mostrar un alto rendimiento en conjuntos de datos específicos y, sin embargo, presentar limitaciones cuando son aplicados en estructuras o condiciones diferentes (Bao et al., 2025).

En consecuencia, la IA dentro de la Ingeniería Estructural 5.0 debe responder a tres principios:

1. **Validación**, para comprobar la confiabilidad del modelo.

2. **Interpretabilidad**, para comprender razonablemente el significado de sus resultados.

3. **Supervisión profesional**, para asegurar que las decisiones críticas no dependan de resultados utilizados de manera acrítica.

La tecnología inteligente adquiere mayor valor cuando permite al profesional concentrarse en actividades que requieren razonamiento, interpretación y juicio contextual.

1.5.5. El gemelo digital como mecanismo de integración

El cuarto componente es el **gemelo digital**, probablemente uno de los conceptos con mayor potencial integrador dentro de la Ingeniería Estructural 5.0.

En términos generales, un gemelo digital puede comprenderse como una representación virtual vinculada a un sistema físico y actualizada mediante información procedente de diversas fuentes, incluyendo modelos, sensores y simulaciones. En ingeniería civil, la literatura ha señalado que la delimitación conceptual entre modelo digital, BIM, sistemas ciberfísicos y gemelos digitales todavía requiere precisión, precisamente porque los diferentes sistemas pueden compartir determinadas tecnologías sin poseer las mismas capacidades funcionales (Jiang et al., 2021).

Esta precisión resulta fundamental para el presente libro. **No todo modelo digital es un gemelo digital**. Para que una representación digital pueda cumplir una función de gemelo, debe existir algún mecanismo significativo de relación con el sistema físico y una capacidad para utilizar la información obtenida en procesos de análisis, actualización o decisión.

Los avances recientes muestran que los gemelos digitales aplicados a infraestructura civil tienen potencial para integrar monitoreo estructural, modelos computacionales y estrategias de mantenimiento. Sin embargo, la literatura también coincide en que su madurez práctica es heterogénea y que persisten desafíos relacionados con interoperabilidad, calidad de datos, costos y escalabilidad (Sun et al., 2025; Kaveh & Alhajj, 2025).

Desde la arquitectura propuesta, el gemelo digital cumple la función de **entorno integrador**. Puede conectar:

- La información del diseño.
- La representación geométrica y semántica del activo.
- Los modelos estructurales.
- Los datos procedentes de sensores.
- Los resultados de simulaciones.
- Los análisis realizados mediante IA.
- El historial de mantenimiento e intervención.

La función del gemelo digital no consiste necesariamente en automatizar todo el sistema. Su mayor potencial reside en proporcionar una **visión estructurada y evolutiva del activo**, permitiendo que la información generada en distintos momentos pueda contribuir a una comprensión más completa de su condición.

Esta integración modifica la manera en que se concibe el ciclo de vida. La estructura deja de ser únicamente un objeto físico que fue diseñado en el pasado y pasa a ser un sistema cuya representación informacional puede evolucionar junto con su comportamiento y condiciones de operación.

1.5.6. El monitoreo estructural como conexión con la realidad

El quinto componente es el **Structural Health Monitoring (SHM)** o monitoreo de la salud estructural. Dentro de la arquitectura de Ingeniería Estructural 5.0, este sistema desempeña una función esencial: establecer un puente entre la realidad física y el entorno digital.

El monitoreo permite adquirir información sobre variables relacionadas con la respuesta y condición de una estructura. Dependiendo de los objetivos, pueden utilizarse sensores de aceleración, deformación, desplazamiento, temperatura y otras tecnologías de observación. Asimismo, las técnicas de visión computacional, vehículos aéreos no

tripulados y métodos no destructivos están ampliando las posibilidades de inspección y diagnóstico.

No obstante, la instalación de sensores no constituye por sí misma un sistema inteligente. La utilidad del monitoreo depende de una cadena de procesos que comprende la selección de variables relevantes, la calidad de la adquisición, el procesamiento de señales, la interpretación y la vinculación con decisiones concretas.

Las revisiones recientes sobre monitoreo estructural basado en aprendizaje profundo muestran que el campo está evolucionando hacia enfoques que combinan sensores, visión computacional, datos de vibración, sistemas no destructivos, inteligencia artificial y gemelos digitales. Esta evolución está generando nuevas posibilidades de integración, pero también plantea desafíos relacionados con confiabilidad, ruido, variabilidad ambiental y transferencia de modelos a condiciones reales (Cha et al., 2024).

En consecuencia, el monitoreo debe diseñarse a partir de una pregunta de ingeniería. Antes de instalar un sistema es necesario definir:

- ¿Qué comportamiento se desea conocer?
- ¿Qué decisión podría mejorarse con la información obtenida?
- ¿Qué nivel de precisión es necesario?
- ¿Cuál es el costo de una falsa alarma o de una detección fallida?
- ¿Quién interpretará los resultados?

Estas preguntas permiten desplazar el enfoque desde la **adquisición indiscriminada de datos** hacia la **observación estratégica del comportamiento estructural**.

En una arquitectura 5.0, el SHM no es simplemente un sistema periférico. Constituye una fuente de retroalimentación capaz de actualizar la comprensión sobre el activo y, en determinados contextos, proporcionar información para modelos digitales y análisis predictivos.

1.5.7. La capa de integración: interoperabilidad, comunicación y trazabilidad

La existencia de cinco componentes tecnológicos no garantiza automáticamente la existencia de un sistema integrado. Para que el diseño sísmico, BIM, IA, gemelos digitales y monitoreo puedan funcionar como partes de una arquitectura común, se requiere una **capa de integración**.

Esta capa comprende tres capacidades fundamentales.

a) Interoperabilidad

La interoperabilidad se refiere a la capacidad de diferentes sistemas para intercambiar y utilizar información de manera significativa. El problema no consiste únicamente en transferir un archivo de una plataforma a otra, sino en conservar el significado de la información durante ese proceso.

En ingeniería estructural, la pérdida de información entre modelos puede generar errores y requerir procesos manuales de reconstrucción. Por ello, la interoperabilidad debe ser entendida como un requisito progresivo que requiere estándares, protocolos y estructuras de información adecuadas.

b) Comunicación

Los sistemas integrados requieren mecanismos para transmitir información entre sensores, plataformas y modelos. Dependiendo del caso, esta comunicación puede ser continua, periódica o activada por determinados eventos.

Sin embargo, una mayor frecuencia de comunicación no siempre produce un mayor valor. El diseño del flujo de información debe considerar la criticidad de la estructura, la naturaleza de las variables y las necesidades reales de decisión.

c) Trazabilidad

La trazabilidad permite conocer el origen de un dato, las transformaciones que ha experimentado y los procedimientos utilizados para generar un resultado. Esta condición

es especialmente importante cuando la información sirve de apoyo para decisiones relacionadas con seguridad.

Una predicción sin trazabilidad puede ser difícil de validar. Por ello, la Ingeniería Estructural 5.0 propone que los sistemas integrados mantengan, en la medida técnicamente posible, registros sobre la procedencia de los datos, las versiones de los modelos y los criterios utilizados en los procesos de análisis.

La importancia de estos aspectos es reconocida en la literatura sobre gemelos digitales e infraestructura, donde la integración de fuentes heterogéneas y la gestión confiable de datos constituyen algunos de los principales obstáculos para la transición desde prototipos experimentales hacia aplicaciones operativas a gran escala (Sun et al., 2025; Kaveh & Alhaji, 2025).

1.5.8. Una arquitectura por niveles para la implementación de la Ingeniería Estructural 5.0

No todas las organizaciones ni todas las infraestructuras poseen las mismas necesidades y recursos. Por esta razón, la implementación de la arquitectura tecnológica debe ser gradual.

Para fines de este libro, se propone una clasificación en **cuatro niveles de madurez tecnológica**:

Nivel 1. Digitalización documental

En este nivel, la información estructural se encuentra digitalizada, aunque todavía puede estar distribuida entre diferentes documentos y plataformas. El principal objetivo es mejorar la disponibilidad y organización del conocimiento existente.

Nivel 2. Integración informacional

En este nivel, los modelos y bases de información comienzan a relacionarse. BIM puede desempeñar una función importante como entorno de coordinación, mientras que los procesos de intercambio de información reducen la fragmentación entre disciplinas y etapas.

Nivel 3. Observación y análisis inteligente

El sistema incorpora información procedente de inspecciones, sensores u otras fuentes y utiliza herramientas analíticas avanzadas para apoyar la interpretación. La estructura comienza a generar retroalimentación sobre su comportamiento o condición.

Nivel 4. Gemelo digital integrado y gestión predictiva

En el nivel más avanzado, diferentes fuentes de información, modelos y sistemas analíticos se articulan para representar de manera dinámica aspectos relevantes del activo y apoyar decisiones relacionadas con operación, mantenimiento y resiliencia.

Esta clasificación no debe interpretarse como una escala obligatoria en la que toda infraestructura deba alcanzar el último nivel. Una pequeña edificación puede obtener mayores beneficios de una adecuada organización documental y de un buen modelo de gestión que de un sistema de monitoreo permanente costoso y complejo.

El principio rector debe ser la **proporcionalidad tecnológica**: el nivel de digitalización debe guardar relación con el riesgo, valor, complejidad y necesidades de la infraestructura.

1.5.9. La arquitectura integrada y el ciclo de vida estructural

Uno de los principales aportes de la arquitectura propuesta es permitir una visión integrada del ciclo de vida. Cada etapa puede generar información que contribuya a las demás.

Durante el **diseño**, se producen modelos, hipótesis y criterios de desempeño. Durante la **construcción**, se genera información sobre modificaciones, materiales y condiciones reales de ejecución. Durante la **operación**, las inspecciones y los sistemas de monitoreo pueden aportar evidencia sobre el comportamiento del activo. Finalmente, durante el **mantenimiento o la rehabilitación**, esta información puede apoyar la priorización de intervenciones.

La conexión entre estas etapas puede representarse de la siguiente manera:

**Diseño estructural → Modelo informacional → Construcción y actualización
→ Operación → Monitoreo → Análisis → Decisión → Mantenimiento o intervención
→ Actualización del conocimiento.**

Este ciclo representa una transformación importante respecto de la visión fragmentada del proyecto. La información deja de ser un producto que pierde utilidad al concluir una etapa y se convierte en un recurso que puede acumular valor durante la vida útil.

Las investigaciones sobre gemelos digitales para infraestructura civil destacan precisamente el potencial de estos sistemas para apoyar monitoreo, mantenimiento predictivo y gestión de activos, aunque su implementación efectiva depende de la calidad de la integración entre los modelos digitales y las fuentes de información física (Jiang et al., 2021; Sun et al., 2025).

1.5.10. Riesgos de una integración tecnológica acrítica

Una arquitectura tecnológica integrada también genera nuevos riesgos. La Ingeniería Estructural 5.0 no debe presentarse como una visión determinista en la que una mayor cantidad de tecnología conduce automáticamente a mejores resultados.

Entre los principales riesgos se encuentran:

La complejidad excesiva. Un sistema puede incorporar tantas plataformas y fuentes de información que se vuelva difícil de operar y mantener.

La dependencia tecnológica. La información crítica puede quedar vinculada a plataformas propietarias o tecnologías que evolucionan más rápidamente que la infraestructura.

La baja calidad de datos. Los modelos inteligentes pueden amplificar errores cuando reciben información incompleta, sesgada o incorrecta.

La automatización acrítica. Los profesionales pueden desarrollar una confianza excesiva en sistemas cuyos límites no comprenden.

La pérdida de trazabilidad. Cuando múltiples sistemas procesan la información, puede resultar difícil determinar cómo se obtuvo una recomendación determinada.

La brecha de capacidades. Una tecnología avanzada no genera beneficios si los profesionales y las organizaciones no poseen las competencias necesarias para utilizarla.

Estos riesgos demuestran que la implementación de la Ingeniería Estructural 5.0 es también un proceso de transformación organizacional y profesional. La tecnología debe ser acompañada por protocolos, formación, estándares y mecanismos de validación.

1.5.11. Modelo conceptual integrado de la Ingeniería Estructural 5.0

Como síntesis de los apartados anteriores, este libro propone el siguiente modelo conceptual:

Núcleo físico

Estructura + comportamiento mecánico + demanda sísmica y ambiental



Capa de representación

BIM + modelos estructurales + información del ciclo de vida



Capa de observación

Sensores + inspección + imágenes + datos operacionales



Capa de inteligencia

Simulación + análisis de datos + inteligencia artificial + modelos híbridos



Capa de integración**Gemelo digital + interoperabilidad + actualización de información****Capa de decisión****Ingeniero + organizaciones + criterios normativos + gestión del riesgo****Resultado esperado**

Estructuras más seguras, resilientes, sostenibles y gestionables durante su ciclo de vida.

Este modelo no debe interpretarse como una secuencia rígida. La información puede circular en múltiples direcciones. Una decisión de mantenimiento puede generar nuevos requerimientos de monitoreo; una observación inesperada puede requerir actualizar el modelo estructural; y un nuevo análisis puede modificar la estrategia de gestión.

La principal característica del modelo es, por tanto, la **retroalimentación**. La estructura física y el sistema digital se encuentran vinculados mediante un proceso continuo de generación, interpretación y actualización de conocimiento.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DEL DISEÑO SÍSMICO Y LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL ORIENTADA AL DESEMPEÑO

El diseño estructural frente a acciones sísmicas constituye una de las áreas más complejas de la ingeniería civil debido a la naturaleza incierta y dinámica del fenómeno que pretende enfrentar. A diferencia de otras acciones que pueden ser estimadas con relativa estabilidad, un terremoto representa un proceso físico cuya intensidad, contenido frecuencial, duración y características de interacción con el suelo y la estructura pueden variar significativamente.

Esta condición ha determinado que la ingeniería sísmica evolucione progresivamente. Los primeros enfoques modernos se concentraron principalmente en proporcionar suficiente resistencia para enfrentar fuerzas laterales equivalentes. Posteriormente, el desarrollo de la dinámica estructural, la comprensión del comportamiento inelástico y las observaciones realizadas después de grandes terremotos demostraron que la resistencia por sí sola no era suficiente para describir la respuesta real de una estructura.

Una construcción puede sobrevivir a un terremoto sin colapsar y, al mismo tiempo, experimentar daños que impidan su ocupación o funcionamiento durante meses. Esta diferencia entre **evitar el colapso y mantener o recuperar la funcionalidad** constituye uno de los principales motores de la evolución contemporánea del diseño sísmico.

El diseño basado en desempeño surgió precisamente para establecer objetivos explícitos sobre el comportamiento esperado de las estructuras frente a diferentes niveles de amenaza. Con el desarrollo posterior de la ingeniería sísmica basada en desempeño, estos objetivos comenzaron a relacionarse con consecuencias más directamente comprensibles para los propietarios y la sociedad, tales como pérdidas económicas, víctimas, tiempo de reparación y tiempo de inactividad.

En la actualidad, el concepto de resiliencia ha ampliado nuevamente el horizonte. Una infraestructura resiliente no se define únicamente por su capacidad de resistir una perturbación, sino también por su capacidad de mantener funciones esenciales y recuperarlas dentro de un período razonable. La resiliencia incorpora, por tanto, una dimensión temporal que resulta fundamental para comprender el valor de una estructura después de un evento sísmico.

Este capítulo analiza dicha evolución y propone una interpretación coherente con la arquitectura conceptual de la Ingeniería Estructural 5.0. El objetivo no es sustituir los fundamentos tradicionales del diseño sísmico, sino demostrar cómo estos fundamentos pueden conectarse con nuevos sistemas de información, observación y análisis para construir una ingeniería estructural orientada no solo a la seguridad, sino también al desempeño y a la capacidad de recuperación.

2.1. EL PROBLEMA SÍSMICO Y LA NATURALEZA DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

2.1.1. El terremoto como fuente de incertidumbre para el diseño estructural

El diseño sísmico enfrenta una dificultad fundamental: las estructuras deben prepararse para acciones futuras que no pueden ser conocidas con exactitud. Un terremoto específico no puede diseñarse como si se tratara de una carga permanente perfectamente determinada. La amenaza sísmica se caracteriza por incertidumbres relacionadas con la fuente, la propagación de las ondas, las condiciones locales del suelo y la propia interacción entre el movimiento del terreno y la estructura.

Esta condición obliga a la ingeniería sísmica a trabajar con representaciones probabilísticas y escenarios de demanda. El objetivo no es predecir exactamente el movimiento que experimentará una estructura en una fecha determinada, sino establecer niveles de amenaza y procedimientos que permitan alcanzar niveles aceptables de desempeño frente a diferentes condiciones.

La incertidumbre no desaparece cuando se desarrolla un modelo estructural sofisticado. Por el contrario, se distribuye a lo largo de todo el proceso de ingeniería.

Existen incertidumbres relacionadas con la amenaza sísmica, las propiedades de los materiales, las condiciones de construcción, la modelación numérica y el comportamiento inelástico de los componentes.

Por esta razón, el diseño estructural no debe interpretarse como una actividad destinada a garantizar una respuesta perfectamente conocida. Constituye un proceso de **gestión racional de la incertidumbre y del riesgo**. Los factores de seguridad, las combinaciones de carga, las disposiciones de detallado y los procedimientos de verificación forman parte de un sistema destinado a reducir la probabilidad y las consecuencias de comportamientos inaceptables.

La evolución hacia enfoques basados en desempeño ha permitido hacer esta incertidumbre más explícita. En lugar de limitar el proceso a comprobar que la resistencia de diseño supera una demanda determinada, el enfoque basado en desempeño busca establecer qué nivel de daño o respuesta resulta aceptable bajo diferentes niveles de amenaza. Esta transición constituye una de las transformaciones conceptuales más importantes de la ingeniería sísmica moderna.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Estructural 5.0, esta característica adquiere una importancia adicional. Las tecnologías digitales pueden reducir determinadas incertidumbres mediante una mejor caracterización, observación y análisis de los sistemas, pero no eliminan la incertidumbre inherente al comportamiento futuro. Un modelo de inteligencia artificial o un gemelo digital puede mejorar la capacidad para interpretar información, pero no transforma un fenómeno inherentemente incierto en un proceso completamente determinista.

Por ello, uno de los principios que guiará este libro es el siguiente:

La tecnología estructural avanzada debe utilizarse para gestionar y comprender mejor la incertidumbre, no para ocultarla bajo una apariencia de precisión digital.

Esta distinción resulta esencial en una época caracterizada por modelos computacionales capaces de producir resultados numéricos altamente precisos. La

precisión de una salida matemática no debe confundirse automáticamente con la exactitud de una predicción física.

2.1.2. La estructura como sistema dinámico

Una estructura sometida a un terremoto debe ser comprendida como un sistema dinámico. La respuesta no depende únicamente de la magnitud instantánea de una fuerza aplicada, sino de la interacción entre las características del movimiento del terreno y las propiedades dinámicas del sistema.

La masa, rigidez, amortiguamiento, configuración estructural y condiciones de apoyo influyen en la forma en que una construcción responde ante una excitación sísmica. Asimismo, cuando la respuesta alcanza niveles inelásticos, las propiedades iniciales del sistema pueden modificarse como consecuencia de la formación de daño, fluencia o degradación de rigidez.

Esta realidad explica por qué dos edificios sometidos al mismo terremoto pueden experimentar respuestas considerablemente diferentes. La demanda no depende únicamente del evento, sino también de las características dinámicas de la estructura y de las condiciones del sitio.

Desde una perspectiva conceptual, el comportamiento sísmico puede interpretarse como el resultado de una interacción continua entre tres dimensiones:

Amenaza sísmica + condiciones del sistema estructural + evolución de la respuesta durante el evento.

Esta interacción es fundamental para comprender los límites de los enfoques simplificados. Los métodos estáticos equivalentes y otros procedimientos convencionales han proporcionado herramientas de gran utilidad para el diseño profesional; sin embargo, representan simplificaciones de un fenómeno dinámico complejo. A medida que aumentan la irregularidad, importancia o complejidad de una estructura, puede ser necesario recurrir a procedimientos capaces de representar con mayor detalle la respuesta.

La evolución del diseño basado en desempeño está estrechamente vinculada a esta necesidad de comprender la respuesta más allá de una única fuerza de diseño. Las

variables como la deriva entre pisos, las rotaciones plásticas, las deformaciones y las aceleraciones pueden proporcionar información más directamente relacionada con los mecanismos de daño y con el comportamiento esperado de componentes estructurales y no estructurales.

La estructura, por tanto, no debe ser concebida como un objeto cuya condición queda completamente definida al finalizar el cálculo. Sus propiedades y condiciones pueden evolucionar durante su vida útil. El deterioro, las modificaciones, las intervenciones y los eventos extremos pueden alterar el sistema respecto de las condiciones consideradas inicialmente.

Esta idea constituye un punto de conexión fundamental con los capítulos posteriores del libro. La Ingeniería Estructural 5.0 se interesa precisamente por la posibilidad de observar y actualizar el conocimiento sobre una estructura durante su ciclo de vida. Sin embargo, esa capacidad tecnológica solo tiene sentido cuando existe una comprensión clara de **qué variables representan cambios significativos desde el punto de vista estructural**.

2.1.3. La respuesta inelástica y el problema del daño

Una de las contribuciones más importantes de la ingeniería sísmica moderna ha sido reconocer que, frente a terremotos severos, resulta generalmente inviable y económicamente poco razonable diseñar todas las estructuras para que permanezcan completamente dentro del rango elástico.

En consecuencia, muchas filosofías de diseño sísmico aceptan la posibilidad de que determinadas estructuras experimenten comportamiento inelástico bajo niveles intensos de demanda. La cuestión fundamental deja entonces de ser únicamente si la estructura permanecerá sin daño y pasa a ser **dónde, cómo y con qué consecuencias se desarrollará dicho daño**.

Esta diferencia es central. El comportamiento inelástico puede permitir la disipación de energía y evitar mecanismos de colapso, pero también puede producir daños cuya reparación sea costosa o prolongada. Por ello, una estructura que cumple un objetivo de seguridad de vida no necesariamente cumple un objetivo de continuidad operativa.

Las investigaciones sobre diseño basado en desempeño han enfatizado precisamente la necesidad de relacionar la respuesta estructural con estados de desempeño y consecuencias. Los niveles discretos tradicionalmente utilizados —como ocupación inmediata, seguridad de vida o prevención del colapso— constituyeron un avance importante respecto de una evaluación exclusivamente basada en fuerzas, al permitir establecer objetivos relacionados con el daño esperado.

La respuesta inelástica también introduce un desafío relevante para la digitalización de la ingeniería estructural. Los modelos lineales pueden representar adecuadamente determinadas condiciones, pero pueden resultar insuficientes cuando el objetivo es comprender la progresión del daño bajo demandas severas.

Esta situación plantea una cuestión que será recurrente en el libro: **la calidad de una representación digital depende del propósito para el cual será utilizada**. No existe un modelo universalmente “perfecto”. Un modelo apropiado para coordinar información geométrica puede no ser suficiente para evaluar la degradación cíclica de un componente, mientras que un modelo numérico extremadamente detallado puede resultar innecesario para una decisión de gestión rutinaria.

La Ingeniería Estructural 5.0 requiere, por tanto, seleccionar niveles de representación y análisis en función de las decisiones que se pretenden apoyar.

2.2. EVOLUCIÓN DE LA FILOSOFÍA DEL DISEÑO SÍSMICO

2.2.1. Del diseño centrado en fuerzas al diseño centrado en la respuesta

La evolución de la ingeniería sísmica puede comprenderse, en términos generales, como un tránsito desde procedimientos predominantemente centrados en fuerzas hacia enfoques que buscan comprender y controlar de manera más explícita la respuesta y las consecuencias del comportamiento estructural.

Los procedimientos basados en fuerzas desempeñaron un papel fundamental en el desarrollo de los códigos modernos. Su principal ventaja consiste en proporcionar métodos relativamente prácticos para dimensionar y verificar estructuras mediante acciones laterales de diseño y reglas de detallado. Sin embargo, la observación del

comportamiento de estructuras sometidas a terremotos demostró que la relación entre fuerza de diseño y daño real es compleja.

Una estructura puede presentar una resistencia global adecuada y, sin embargo, concentrar deformaciones inelásticas en zonas vulnerables. Del mismo modo, dos estructuras con capacidades resistentes similares pueden experimentar niveles de daño diferentes debido a diferencias en configuración, rigidez, ductilidad o características dinámicas.

El desarrollo del diseño basado en desempeño respondió a la necesidad de establecer objetivos más directamente vinculados con la respuesta esperada. Ghobarah (2001) destacó tempranamente que el futuro del diseño sísmico debía orientarse hacia objetivos explícitos y cuantificables asociados con múltiples niveles de amenaza y desempeño.

El cambio conceptual puede resumirse de la siguiente manera:

Enfoque predominantemente convencional	Enfoque orientado al desempeño
¿La estructura cumple la resistencia requerida?	¿Cómo se espera que se comporte?
Énfasis en fuerzas y capacidad	Énfasis en respuesta, daño y objetivos
Criterios generales de seguridad	Objetivos explícitos para diferentes escenarios
Verificación principalmente prescriptiva	Evaluación relacionada con desempeño esperado

Esta comparación no debe interpretarse como una oposición absoluta. Los procedimientos basados en fuerzas continúan siendo fundamentales en la práctica y los códigos contemporáneos incorporan múltiples elementos derivados del conocimiento sobre desempeño. La evolución representa, más bien, una ampliación progresiva de la capacidad para describir las consecuencias del comportamiento estructural.

2.2.2. El diseño basado en desempeño: establecer objetivos explícitos

El **diseño basado en desempeño** parte de una pregunta conceptualmente distinta: no se limita a determinar cuánto debe resistir una estructura, sino que busca definir **qué nivel de comportamiento resulta aceptable frente a diferentes niveles de demanda**.

Esta aproximación permite reconocer que los propietarios, usuarios y comunidades pueden tener expectativas diferentes respecto de una infraestructura. Un edificio convencional puede tener objetivos centrados principalmente en la protección de la vida, mientras que un hospital, un centro de comunicaciones o una instalación crítica puede requerir una capacidad significativamente mayor para mantener su funcionamiento después de un terremoto.

Los niveles de desempeño tradicionales suelen relacionarse con condiciones como:

- **Operacionalidad**, asociada con una alteración limitada de la capacidad de funcionamiento.
- **Ocupación inmediata**, donde el daño permite una utilización relativamente segura y limitada.
- **Seguridad de vida**, donde se busca evitar condiciones que representen un peligro inaceptable para los ocupantes.
- **Prevención del colapso**, orientada a reducir la probabilidad de colapso total ante demandas extremas.

Estos niveles no deben interpretarse como categorías absolutas aplicables de manera idéntica a todas las estructuras. Constituyen marcos conceptuales para relacionar niveles de amenaza con límites de daño y respuesta.

Una de las principales contribuciones del diseño basado en desempeño es hacer explícita la relación entre las decisiones de diseño y los resultados esperados. En lugar de asumir que el cumplimiento de un procedimiento implica automáticamente un determinado comportamiento, el ingeniero puede formular objetivos y verificar, mediante procedimientos apropiados, si el sistema diseñado se aproxima a dichos objetivos.

La revisión reciente sobre optimización del diseño basado en desempeño destaca que esta filosofía ha evolucionado desde métricas de respuesta estructural hacia medidas más directamente relacionadas con las consecuencias para los grupos de interés, incluyendo pérdidas económicas, tiempo de reparación y riesgo para la vida.

Esta evolución resulta especialmente relevante para la Ingeniería Estructural 5.0. Los sistemas digitales adquieren mayor utilidad cuando se encuentran vinculados con objetivos explícitos. Un sensor, un modelo de IA o un gemelo digital no debe generar información simplemente porque sea técnicamente posible. Su valor aumenta cuando la información puede relacionarse con una pregunta concreta sobre el desempeño de la estructura.

2.2.3. Ingeniería sísmica basada en desempeño: de la respuesta a las consecuencias

La evolución posterior hacia la **ingeniería sísmica basada en desempeño** amplió el alcance del enfoque inicial. El interés dejó de concentrarse exclusivamente en parámetros de respuesta estructural y comenzó a incorporar consecuencias que pueden resultar más comprensibles para propietarios, usuarios y responsables de la toma de decisiones.

Esta transformación es significativa porque una deriva determinada, aunque sea técnicamente relevante, no constituye por sí sola el resultado final que preocupa a un propietario o a una comunidad. Las preguntas relevantes pueden estar relacionadas con:

- ¿Cuál será el nivel de daño?
- ¿Qué componentes deberán ser reparados?
- ¿Cuál será el costo de la recuperación?
- ¿Cuánto tiempo permanecerá fuera de servicio la infraestructura?
- ¿Qué riesgo enfrentarán las personas?

Los marcos contemporáneos de ingeniería basada en desempeño han avanzado hacia esta traducción de la respuesta física en consecuencias. La revisión sobre diseño

basado en desempeño publicada en el *Journal of Structural Engineering* destaca que las generaciones más recientes de estos enfoques incorporan explícitamente incertidumbres y medidas de desempeño más significativas para los grupos de interés, como pérdidas y tiempo de reparación.

Esta transición puede representarse conceptualmente mediante una cadena de interpretación:

Amenaza sísmica → respuesta estructural → daño → consecuencias → decisiones.

Cada uno de estos niveles requiere modelos y conocimientos diferentes. La amenaza debe caracterizarse; la respuesta debe ser estimada; el daño debe relacionarse con variables de demanda; y las consecuencias deben considerar procesos de reparación, ocupación y funcionamiento.

Desde una perspectiva sistémica, esta cadena anticipa la lógica de la Ingeniería Estructural 5.0. El diseño estructural genera hipótesis sobre la respuesta; los modelos digitales organizan estas hipótesis; el monitoreo puede proporcionar evidencia sobre el comportamiento real; y las herramientas analíticas pueden contribuir a actualizar la interpretación.

Por esta razón, la transformación digital no debe ser entendida como una capa tecnológica independiente del diseño sísmico. Su mayor potencial aparece cuando puede contribuir a reducir las discontinuidades existentes entre **predicción, observación y decisión**.

2.3. DEL DESEMPEÑO A LA RESILIENCIA ESTRUCTURAL

2.3.1. Las limitaciones de una filosofía centrada exclusivamente en la seguridad

La protección de la vida constituye un objetivo irrenunciable de la ingeniería sísmica. Sin embargo, los terremotos han demostrado que evitar el colapso no equivale necesariamente a evitar consecuencias sociales y económicas graves.

Una estructura puede permanecer en pie después de un evento sísmico y, sin embargo, requerir reparaciones extensas. Los daños no estructurales pueden impedir la utilización del edificio, incluso cuando el sistema resistente principal conserva una condición satisfactoria. En el caso de infraestructuras críticas, la pérdida temporal de funcionalidad puede generar consecuencias que exceden ampliamente el costo directo de reparación.

Estas observaciones han impulsado el desarrollo del concepto de **resiliencia sísmica**. La resiliencia incorpora una dimensión que no está completamente representada por la resistencia o la seguridad inmediata: la capacidad del sistema para recuperarse después de una perturbación.

La literatura sobre diseño basado en resiliencia sostiene que este enfoque representa una extensión de la filosofía basada en desempeño porque incorpora explícitamente la recuperación posterior a eventos extremos. La evaluación deja de limitarse al instante en que ocurre el evento y considera también la trayectoria mediante la cual el sistema recupera su funcionalidad.

Por ello, la pregunta cambia nuevamente:

¿La estructura sobrevivirá al terremoto?

pasa a complementarse con:

¿Qué tan rápido y en qué condiciones podrá recuperar su función?

Esta segunda pregunta es especialmente importante en la Ingeniería Estructural 5.0 porque requiere información que puede generarse y actualizarse durante todo el ciclo de vida de la infraestructura.

2.3.2. La resiliencia como propiedad temporal

Una de las principales diferencias entre desempeño y resiliencia es la incorporación explícita del **tiempo**. Una estructura puede presentar un comportamiento satisfactorio durante un terremoto y, sin embargo, experimentar un proceso de recuperación prolongado debido a la complejidad de las reparaciones, la disponibilidad de recursos o el daño de componentes esenciales.

Desde esta perspectiva, la resiliencia puede comprenderse como la capacidad de:

1. **Resistir** o limitar los efectos de una perturbación.
2. **Absorber y adaptarse** a las consecuencias del evento.
3. **Recuperar** niveles adecuados de funcionalidad.

Las revisiones contemporáneas sobre diseño resiliente señalan que las métricas de resiliencia incorporan dimensiones como pérdida de funcionalidad, tiempo de inactividad, costos y trayectorias de recuperación, ampliando el enfoque tradicional centrado en la respuesta durante el evento.

Esta dimensión temporal puede representarse conceptualmente como una curva de funcionalidad. Antes del terremoto, la estructura opera en un determinado nivel. El evento puede producir una disminución de su funcionalidad y, posteriormente, comienza un proceso de recuperación. La forma y duración de esta trayectoria proporcionan información sobre la resiliencia del sistema.

Esta idea tiene profundas implicancias para el diseño. Ya no es suficiente preguntar únicamente cuánto daño puede tolerarse; también es necesario considerar **qué daños son compatibles con una recuperación aceptable**.

Por ejemplo, en un hospital, una reparación que requiera varios meses puede resultar socialmente inaceptable aunque la estructura no haya colapsado. En cambio, para otro tipo de edificio, un período de recuperación más prolongado podría ser tolerable. La definición de objetivos de resiliencia requiere, por tanto, incorporar las necesidades y prioridades de los usuarios.

Esta dimensión humanocéntrica establece un vínculo directo con el paradigma 5.0 desarrollado en el capítulo anterior. La ingeniería estructural no diseña únicamente elementos materiales; diseña condiciones para la continuidad de actividades humanas y sociales.

2.3.3. Diseño orientado a la recuperación funcional

El concepto de **recuperación funcional** representa una de las direcciones más relevantes de la evolución contemporánea del diseño sísmico. Su importancia radica en que reconoce la necesidad de que determinados edificios e infraestructuras puedan volver a cumplir funciones esenciales después de un evento severo.

Este enfoque exige considerar aspectos que tradicionalmente podían quedar fuera del cálculo estructural principal. La funcionalidad depende de la interacción entre:

- Sistema estructural.
- Componentes no estructurales.
- Instalaciones y equipos.
- Accesibilidad.
- Servicios externos.
- Capacidad organizacional para realizar reparaciones.

Por ello, una infraestructura funcionalmente resiliente no puede diseñarse únicamente mediante la optimización de un único sistema resistente. La resiliencia requiere una visión de conjunto.

Las revisiones recientes sobre resiliencia basada en diseño destacan que el enfoque contemporáneo está ampliando los objetivos de la ingeniería desde la prevención del colapso hacia la continuidad funcional y la recuperación dentro de plazos definidos. Este cambio exige incorporar variables como tiempo de recuperación, pérdidas económicas y funcionalidad en los procesos de evaluación y decisión.

Para la Ingeniería Estructural 5.0, esta evolución tiene una consecuencia directa: la información digital y el monitoreo deben estar conectados con objetivos de funcionalidad. No basta con saber que un sensor detectó una modificación en la respuesta dinámica. Es necesario interpretar si ese cambio puede afectar la seguridad, el desempeño o la capacidad funcional del activo.

De esta manera, la tecnología deja de estar orientada únicamente a la observación y pasa a integrarse dentro de una cadena de **diagnóstico, evaluación y recuperación**.

2.4. EL DISEÑO SÍSMICO EN LA PERSPECTIVA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

2.4.1. De un proceso estático a un proceso de conocimiento continuo

Tradicionalmente, el diseño estructural puede ser representado como un proceso que culmina con la definición y construcción de una solución. Sin embargo, desde una perspectiva de ciclo de vida, las hipótesis elaboradas durante el diseño pueden ser contrastadas, complementadas y eventualmente actualizadas mediante información obtenida durante la operación.

Esto no significa que una estructura deba ser rediseñada continuamente. Significa que el conocimiento sobre el sistema puede evolucionar.

La secuencia propuesta por la Ingeniería Estructural 5.0 puede expresarse así:

Diseñar → modelar → construir → observar → interpretar → aprender → gestionar.

El diseño sísmico proporciona las hipótesis iniciales sobre el comportamiento esperado. El modelo digital organiza una parte de esta información. El monitoreo puede generar evidencia sobre determinadas características del comportamiento real. La inteligencia artificial y otros métodos analíticos pueden ayudar a procesar información compleja. Finalmente, el ingeniero interpreta los resultados y determina si existe una necesidad de actualización, intervención o simplemente de continuidad operativa.

Esta arquitectura permite comprender que el diseño inicial no pierde importancia. Por el contrario, se convierte en el **punto de partida del conocimiento digital del activo**.

2.4.2. La retroalimentación entre diseño y comportamiento observado

Una de las mayores oportunidades de la transformación digital consiste en reducir la distancia existente entre el comportamiento previsto y el comportamiento observado.

Durante el diseño se realizan simplificaciones inevitables. Los modelos representan determinados mecanismos físicos y omiten otros que pueden ser poco relevantes para los objetivos del análisis. Después de la construcción, la estructura real puede presentar diferencias respecto de estas hipótesis.

Los sistemas de monitoreo y las técnicas de identificación estructural pueden contribuir a obtener información sobre determinados parámetros dinámicos y cambios en la respuesta. Esta información puede utilizarse para mejorar la comprensión del sistema, siempre que sea interpretada con procedimientos técnicamente rigurosos.

Sin embargo, la retroalimentación no debe entenderse como un proceso automático de reemplazo del modelo original por los datos. Los datos también poseen incertidumbre. Los sensores pueden presentar errores y las condiciones ambientales pueden modificar las señales.

La integración adecuada requiere un diálogo entre:

Modelo físico + evidencia observada + conocimiento profesional.

Esta relación representa una de las bases epistemológicas de la Ingeniería Estructural 5.0. Ninguna de estas fuentes de conocimiento es suficiente por sí misma en todos los contextos. El modelo proporciona capacidad explicativa; los datos aportan evidencia; y el profesional establece la interpretación y la decisión.

2.4.3. El nuevo significado del desempeño en una estructura conectada

En una infraestructura convencional, el desempeño puede ser evaluado principalmente mediante inspecciones o análisis realizados en momentos determinados. En una infraestructura conectada, determinadas variables pueden ser observadas con mayor continuidad.

Esta capacidad modifica potencialmente la gestión del desempeño. El estado de una estructura puede dejar de ser exclusivamente una condición inferida mediante evaluaciones periódicas y convertirse, en ciertos casos, en una condición respaldada por información actualizada.

No obstante, la disponibilidad de información no equivale a conocimiento automático. La Ingeniería Estructural 5.0 debe evitar convertir el monitoreo continuo en una acumulación indiscriminada de datos.

La pregunta relevante sigue siendo:

¿Qué información es necesaria para mejorar una decisión relacionada con el desempeño estructural?

Esta pregunta conecta directamente los fundamentos del diseño sísmico con los capítulos posteriores sobre monitoreo estructural, inteligencia artificial y gemelos digitales.

2.5. DEMANDA SÍSMICA, NIVELES DE AMENAZA Y OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

2.5.1. La relación entre amenaza, demanda y capacidad

El análisis del desempeño estructural requiere distinguir conceptualmente tres elementos que, aunque estrechamente relacionados, representan dimensiones diferentes del problema sísmico: la **amenaza**, la **demanda** y la **capacidad**.

La amenaza sísmica representa la posibilidad de que un sitio experimente determinados niveles de movimiento del terreno. La demanda expresa la respuesta que dicho movimiento induce en la estructura, mientras que la capacidad representa la aptitud del sistema y de sus componentes para resistir o deformarse sin superar determinados estados límite. La evaluación del desempeño surge, precisamente, de la relación entre estas dimensiones.

Esta distinción es fundamental porque un mismo nivel de amenaza puede producir demandas diferentes en estructuras distintas. Del mismo modo, dos estructuras sometidas a demandas similares pueden experimentar consecuencias diferentes debido a sus configuraciones, propiedades, mecanismos resistentes y niveles de redundancia.

En términos conceptuales, la cadena puede expresarse de la siguiente manera:

Amenaza sísmica → intensidad del movimiento → respuesta estructural → daño → consecuencias → desempeño.

La ingeniería sísmica contemporánea ha avanzado progresivamente hacia marcos capaces de hacer explícita esta secuencia. En particular, la metodología FEMA P-58 representa un desarrollo importante de la evaluación sísmica basada en desempeño al relacionar características específicas del sitio, de la estructura, de los componentes no estructurales y de la ocupación con consecuencias expresadas mediante métricas tales como costo y tiempo de reparación, víctimas, impacto ambiental y condiciones de inseguridad para la ocupación. Asimismo, reconoce explícitamente la naturaleza probabilística de la predicción del desempeño sísmico.

Esta evolución tiene una consecuencia conceptual relevante: **la seguridad estructural constituye una condición necesaria, pero no agota el significado del desempeño**. Una estructura puede evitar el colapso y, sin embargo, generar pérdidas económicas elevadas, períodos prolongados de inactividad o daños que comprometan su función social.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Estructural 5.0, esta cadena también permite identificar dónde pueden intervenir las tecnologías digitales. Los sistemas de información y monitoreo pueden mejorar la caracterización del activo; los modelos computacionales pueden estimar la respuesta; la inteligencia artificial puede apoyar la identificación de patrones; y los gemelos digitales pueden facilitar la integración de estas fuentes de conocimiento. Sin embargo, la utilidad de estas tecnologías depende de que exista una relación clara entre los datos obtenidos y los objetivos de desempeño que se pretenden evaluar.

2.5.2. Niveles de amenaza y escenarios de evaluación

Una de las principales contribuciones del diseño basado en desempeño consiste en reconocer que una estructura no debe evaluarse frente a un único escenario sísmico. Los objetivos pueden variar según la intensidad o frecuencia esperada de los movimientos considerados.

Un evento relativamente frecuente puede estar asociado con expectativas de daño limitado y continuidad operativa, mientras que un evento excepcionalmente severo puede admitir niveles mayores de daño siempre que se eviten consecuencias inaceptables, particularmente el colapso.

Por ello, el diseño orientado al desempeño establece una matriz conceptual en la que se relacionan **niveles de amenaza** con **objetivos de comportamiento**. Esta lógica permite sustituir parcialmente la pregunta genérica «¿es segura la estructura?» por una pregunta más precisa:

¿Cuál es el comportamiento esperado de la estructura frente a cada escenario de amenaza relevante?

La respuesta no puede ser idéntica para todas las infraestructuras. Un hospital, por ejemplo, posee requerimientos de continuidad funcional diferentes a los de un edificio cuya interrupción temporal no genera consecuencias críticas para la población. De manera semejante, un puente que forma parte de una red estratégica debe evaluarse considerando no solamente el daño físico directo, sino también las consecuencias de una interrupción de conectividad.

La definición de objetivos exige, por tanto, considerar simultáneamente la amenaza y la **importancia funcional** del activo. Este enfoque permite reconocer que el desempeño aceptable no es exclusivamente una cuestión mecánica; también expresa prioridades sociales, económicas y operacionales.

La investigación reciente sobre evaluación probabilística y resiliencia sísmica insiste en la necesidad de integrar los modelos de amenaza con la respuesta estructural y las consecuencias funcionales, particularmente cuando se evalúan sistemas complejos o infraestructuras sometidas a múltiples riesgos. Las metodologías avanzadas de evaluación de resiliencia combinan análisis de desempeño, probabilidades y trayectorias de recuperación para superar las limitaciones de una valoración restringida al daño físico inmediato.

En consecuencia, la selección de niveles de amenaza no debe entenderse como una decisión exclusivamente matemática. Constituye una decisión de ingeniería y gestión del riesgo que debe responder a la función, exposición y criticidad de la infraestructura.

2.5.3. Parámetros de intensidad y parámetros de demanda ingenieril

Para conectar la amenaza con el comportamiento de la estructura es necesario utilizar variables que permitan representar diferentes niveles de la cadena sísmica.

Los **parámetros de intensidad** (*Intensity Measures*, IM) caracterizan aspectos relevantes de la excitación sísmica. Los **parámetros de demanda ingenieril** (*Engineering Demand Parameters*, EDP), por su parte, describen la respuesta de la estructura o de sus componentes.

Entre los EDP utilizados con frecuencia se encuentran:

- Derivas entre pisos.
- Desplazamientos globales.
- Aceleraciones de piso.
- Rotaciones.
- Deformaciones.
- Fuerzas internas.
- Demandas acumulativas asociadas con determinados mecanismos de deterioro.

La importancia de estos parámetros reside en que permiten establecer un vínculo más directo entre la respuesta dinámica y la posibilidad de daño. La deriva entre pisos, por ejemplo, puede estar relacionada con el comportamiento de elementos estructurales y de determinados componentes no estructurales, mientras que las aceleraciones pueden tener una influencia importante sobre equipos y contenidos.

Sin embargo, ningún EDP es universalmente suficiente. La selección debe responder al **mecanismo de daño que se desea comprender**. Esta idea tiene implicancias importantes para el desarrollo de sistemas inteligentes. Un modelo de aprendizaje automático puede procesar numerosas variables, pero la incorporación indiscriminada de información no garantiza una mejor comprensión del fenómeno.

Una investigación reciente sobre análisis de sensibilidad de EDP en edificaciones de concreto reforzado muestra que la demanda estructural presenta una variabilidad significativa asociada con incertidumbres en parámetros estructurales y en la amenaza sísmica. El estudio resalta la importancia de identificar qué variables ejercen mayor influencia sobre los parámetros de respuesta antes de desarrollar modelos predictivos o evaluaciones probabilísticas.

Este hallazgo es especialmente relevante para la Ingeniería Estructural 5.0. La disponibilidad creciente de sensores y sistemas de adquisición puede conducir a recopilar grandes cantidades de datos. Sin embargo, la pregunta fundamental debe ser **qué variable proporciona información significativa sobre el desempeño que interesa evaluar**.

Por tanto, la selección de EDP debe seguir un principio de relevancia física y funcional:

Un dato es estructuralmente valioso no por su volumen o frecuencia de adquisición, sino por su capacidad para reducir la incertidumbre sobre una decisión relevante.

Este principio será retomado en los capítulos dedicados al monitoreo estructural y a la inteligencia artificial.

2.5.4. Estados límite, daño y consecuencias

La evaluación del desempeño requiere traducir la respuesta estructural en estados que puedan ser interpretados desde la perspectiva del daño y sus consecuencias.

Un **estado límite** puede entenderse como una condición a partir de la cual se considera que una respuesta o consecuencia alcanza un nivel relevante para el objetivo de

evaluación. Dependiendo del problema, puede relacionarse con daño, pérdida de funcionalidad, inestabilidad o colapso.

No obstante, el proceso no es determinista en sentido estricto. Un mismo nivel de demanda puede producir resultados diferentes debido a la variabilidad de materiales, construcción, configuración y otros factores. Por ello, los enfoques contemporáneos utilizan cada vez con mayor frecuencia relaciones probabilísticas entre demanda, daño y consecuencias.

La lógica general puede expresarse en cuatro niveles:

Nivel 1. Respuesta

La estructura experimenta desplazamientos, aceleraciones, fuerzas y deformaciones.

Nivel 2. Daño

Los componentes alcanzan determinados estados de deterioro o pérdida de capacidad.

Nivel 3. Consecuencias

El daño se traduce en costos, tiempos de reparación, interrupciones, víctimas potenciales u otras pérdidas.

Nivel 4. Decisión

Los responsables evalúan si dichas consecuencias son aceptables y determinan la necesidad de intervenir.

Esta secuencia constituye una de las bases de la ingeniería basada en desempeño. La metodología FEMA P-58 enfatiza precisamente la comunicación del desempeño mediante métricas directamente relevantes para los usuarios y propietarios, incorporando explícitamente tanto componentes estructurales como no estructurales.

La incorporación de las consecuencias representa un avance significativo para la toma de decisiones. Un propietario puede tener dificultades para interpretar una rotación

plástica determinada, pero puede comprender con mayor facilidad el significado de una estimación de tiempo de recuperación o de costo de reparación.

No obstante, esta traducción debe realizarse cuidadosamente. Las métricas simplificadas no deben ocultar las incertidumbres existentes en los modelos que conectan la respuesta física con las consecuencias. La claridad en la comunicación debe coexistir con el rigor técnico.

2.5.5. Objetivos de desempeño como criterios de decisión

Un objetivo de desempeño no debe entenderse simplemente como un resultado numérico. Constituye un **criterio de decisión previamente definido** sobre el comportamiento aceptable de una infraestructura.

La definición de objetivos permite orientar todo el proceso de ingeniería. Si el objetivo principal consiste en garantizar continuidad operativa, el sistema estructural, los componentes no estructurales y los servicios críticos deberán ser considerados de manera diferente que en un proyecto cuyo objetivo se limita a reducir la probabilidad de colapso.

En este sentido, los objetivos de desempeño funcionan como un vínculo entre la ingeniería y las necesidades de los grupos de interés. El proceso puede representarse como:

Necesidad funcional → objetivo de desempeño → métricas de evaluación → decisiones de diseño y gestión.

Esta relación resulta particularmente compatible con la visión humanocéntrica de la Ingeniería Estructural 5.0. Las tecnologías no deben determinar autónomamente cuáles son los objetivos. Los objetivos deben ser establecidos por personas, organizaciones y marcos regulatorios; posteriormente, las tecnologías pueden contribuir a evaluar su cumplimiento.

En los últimos años, los enfoques de evaluación de desempeño también han incorporado análisis basados en confiabilidad. Estudios recientes proponen relacionar explícitamente niveles de amenaza, parámetros de demanda admisibles y medidas de confiabilidad para evaluar con mayor rigor el cumplimiento de objetivos sísmicos.

Este desarrollo refuerza una idea central: un objetivo de desempeño técnicamente sólido debe reconocer no solamente el valor esperado de la respuesta, sino también la incertidumbre asociada con su cumplimiento.

2.5.6. Implicancias para una ingeniería estructural basada en datos

La formulación explícita de objetivos de desempeño proporciona el marco necesario para utilizar tecnologías basadas en datos de manera coherente.

Un sistema de monitoreo estructural, por ejemplo, debería diseñarse considerando las variables necesarias para responder preguntas relacionadas con el desempeño. Del mismo modo, un algoritmo de inteligencia artificial debería ser evaluado no únicamente por indicadores generales de precisión, sino por su capacidad para apoyar una decisión relevante.

Esta integración puede organizarse mediante la siguiente lógica:

Objetivo de desempeño → variable relevante → estrategia de medición → modelo de interpretación → decisión.

Esta secuencia evita uno de los principales riesgos de la transformación digital: comenzar con una tecnología y buscar posteriormente un problema que justifique su utilización.

La Ingeniería Estructural 5.0 propone el proceso inverso. Primero debe definirse la necesidad de ingeniería; después se determina la información necesaria y, finalmente, se selecciona la tecnología apropiada.

2.6. MODELAMIENTO ESTRUCTURAL, INCERTIDUMBRE Y VALIDACIÓN

2.6.1. El modelo como representación y no como réplica de la realidad

El modelamiento constituye uno de los instrumentos fundamentales de la ingeniería estructural. Sin embargo, es necesario reconocer una condición epistemológica básica: **un modelo estructural no es la estructura**. Es una representación construida para responder determinadas preguntas.

Un modelo puede simplificar la geometría, idealizar las condiciones de apoyo, representar de manera aproximada la rigidez de los elementos y utilizar modelos constitutivos que describen solo parcialmente el comportamiento real de los materiales.

Estas simplificaciones no constituyen necesariamente una debilidad. Son una condición inevitable de la modelación. El problema surge cuando se olvida que todo resultado depende de las hipótesis que permitieron construirlo.

La pregunta técnicamente relevante no es si un modelo representa todos los detalles de la realidad, sino:

¿Es el modelo suficientemente adecuado para el propósito de la decisión que se pretende tomar?

Este principio de *fitness for purpose* es también relevante en el desarrollo contemporáneo de gemelos digitales. La literatura reciente sobre sistemas digitales enfatiza que un gemelo no necesita ser una réplica perfecta del activo físico; debe poseer el nivel de fidelidad y las capacidades necesarias para el propósito específico que pretende cumplir. La verificación, la validación y la cuantificación de incertidumbre constituyen, en consecuencia, requisitos centrales para generar confianza en sus resultados.

Para la ingeniería estructural, este principio permite evitar dos extremos. Por un lado, el **modelo excesivamente simplificado**, incapaz de representar mecanismos relevantes; por otro, el **modelo innecesariamente complejo**, cuyo costo computacional y dificultad de validación no se justifican por el valor de la decisión.

2.6.2. Tipologías y niveles de fidelidad del modelamiento estructural

Los modelos estructurales pueden clasificarse de acuerdo con su propósito y nivel de representación. Sin pretender establecer una tipología exhaustiva, es posible distinguir cuatro niveles conceptuales.

a) Modelos de diseño

Su función principal es dimensionar y verificar componentes de acuerdo con procedimientos normativos. Priorizan eficiencia, trazabilidad y aplicabilidad profesional.

b) Modelos de evaluación avanzada

Incorporan una representación más detallada del comportamiento dinámico o inelástico y se utilizan cuando los mecanismos de respuesta requieren un análisis más profundo.

c) Modelos de simulación y predicción

Permiten estudiar diferentes escenarios, incertidumbres o estrategias de intervención. Pueden emplearse dentro de análisis probabilísticos y enfoques basados en desempeño.

d) Modelos operacionales o digitales

Se encuentran vinculados con información procedente del activo construido y pueden actualizarse a partir de inspecciones, sensores u otras fuentes de datos.

Esta clasificación muestra que la fidelidad no constituye una propiedad absoluta. Un modelo de diseño puede ser excelente para una decisión de dimensionamiento y, al mismo tiempo, insuficiente para identificar cambios menores en las propiedades dinámicas de una estructura durante su operación.

La evolución de la Ingeniería Estructural 5.0 exige reconocer esta pluralidad de modelos. Un gemelo digital estructural podría integrar diferentes representaciones en lugar de depender de un único modelo universal.

2.6.3. Las fuentes de incertidumbre en el análisis estructural

La incertidumbre forma parte de todos los procesos de evaluación estructural. Puede originarse en diferentes etapas de la cadena de conocimiento.

Entre las principales fuentes se encuentran:

Incertidumbre en la amenaza

Se relaciona con la variabilidad de los eventos sísmicos, la caracterización de las fuentes y la estimación del movimiento del terreno.

Incertidumbre en las propiedades estructurales

Incluye variaciones en materiales, geometría, condiciones de construcción y propiedades reales de los componentes.

Incertidumbre de modelamiento

Surge de las simplificaciones y aproximaciones utilizadas para representar el comportamiento físico.

Incertidumbre de medición

Está relacionada con errores de sensores, ruido, pérdida de datos y procedimientos de procesamiento.

Incertidumbre en las consecuencias

La relación entre daño físico y pérdidas económicas, tiempo de reparación o funcionalidad también posee una variabilidad significativa.

Estas fuentes no actúan necesariamente de manera independiente. Una evaluación rigurosa debe considerar cómo se propagan a lo largo de la cadena de desempeño.

La investigación reciente sobre cuantificación de incertidumbre en parámetros estructurales destaca precisamente que la vulnerabilidad sísmica basada en desempeño depende de la propagación de incertidumbres a través de respuestas no lineales, y que los métodos computacionales y modelos sustitutos basados en aprendizaje automático pueden contribuir a reducir el costo de ciertos análisis sin eliminar la necesidad de evaluar cuidadosamente la confiabilidad de sus resultados.

Esta observación es esencial para la Ingeniería Estructural 5.0: **un algoritmo rápido no reduce automáticamente la incertidumbre**. Puede acelerar el análisis, pero la confiabilidad de sus resultados continúa dependiendo de los datos, las hipótesis y los procedimientos de validación.

2.6.4. Verificación, validación y cuantificación de incertidumbre

En la práctica académica y profesional, los términos *verificación* y *validación* son utilizados con frecuencia como si fueran equivalentes. Sin embargo, conceptualmente responden a preguntas diferentes.

La **verificación** se relaciona con la correcta implementación del modelo. Pregunta, esencialmente: *¿el modelo ha sido resuelto de acuerdo con las ecuaciones, algoritmos y procedimientos previstos?*

La **validación**, en cambio, se relaciona con la capacidad del modelo para representar adecuadamente el fenómeno real para un propósito determinado. Pregunta: *¿el modelo representa de manera suficientemente confiable el sistema físico que pretende describir?*

La **cuantificación de incertidumbre** complementa ambas actividades al analizar el grado de confianza que puede atribuirse a los resultados.

La importancia de este enfoque ha aumentado con el desarrollo de modelos híbridos, inteligencia artificial y gemelos digitales. Las discusiones contemporáneas sobre digital twins identifican la validación y la cuantificación de incertidumbre como condiciones esenciales para que los resultados de un sistema digital puedan utilizarse en decisiones de importancia. Asimismo, se reconoce la necesidad de mantener una supervisión humana y una relación transparente entre los datos físicos y el modelo virtual.

En el contexto estructural, la validación puede utilizar diferentes fuentes de evidencia:

- Ensayos experimentales.
- Registros de comportamiento real.
- Resultados de monitoreo.
- Comparación con modelos alternativos.

- Datos obtenidos después de eventos sísmicos.
- Juicio experto y consistencia física.

La validación no debe concebirse como una actividad única realizada al inicio de un proyecto. En sistemas que reciben nueva información, puede constituir un proceso continuo de contraste entre predicción y evidencia observada.

2.6.5. La actualización de modelos mediante información observada

Una de las principales oportunidades de la Ingeniería Estructural 5.0 consiste en establecer mecanismos de retroalimentación entre los modelos desarrollados durante el diseño y la información obtenida durante la operación.

Un modelo inicial puede ser construido utilizando planos, propiedades nominales y supuestos de ingeniería. Posteriormente, las inspecciones, ensayos y datos de monitoreo pueden aportar información para revisar determinados parámetros.

Este proceso no significa que cada nueva medición deba modificar automáticamente el modelo. La actualización debe considerar la calidad y relevancia de la evidencia.

El principio general es:

Predicción inicial + información observada + evaluación de incertidumbre → modelo actualizado.

Los desarrollos recientes de gemelos digitales para sistemas sísmicos y geotécnicos muestran precisamente la creciente búsqueda de marcos que integren modelos físicos y datos de monitoreo para mejorar la evaluación de la integridad estructural. Sin embargo, la integración efectiva continúa enfrentando desafíos relacionados con datos heterogéneos, propiedades inciertas y la interpretación de las observaciones.

En estructuras reales, un cambio en una señal no debe interpretarse automáticamente como daño. Puede deberse a variaciones de temperatura, condiciones

operacionales o modificaciones en otros parámetros. Por ello, la actualización requiere un conocimiento simultáneo de la física del sistema y de las características de los datos.

Esta es una de las razones por las que la Ingeniería Estructural 5.0 propone una integración entre modelos físicos y métodos basados en datos, en lugar de sustituir completamente unos por otros.

2.6.6. Modelos híbridos: física, datos e inteligencia artificial

El crecimiento de la inteligencia artificial ha generado nuevas posibilidades para la ingeniería estructural, especialmente en problemas donde existen grandes cantidades de datos o relaciones complejas difíciles de representar mediante modelos analíticos convencionales.

Sin embargo, los métodos exclusivamente basados en datos pueden enfrentar problemas de generalización cuando se aplican fuera de las condiciones representadas durante su entrenamiento. En ingeniería sísmica, la escasez de datos de eventos extremos y la singularidad de cada estructura constituyen limitaciones particularmente importantes.

Una revisión reciente sobre aprendizaje automático en ingeniería sísmica identifica precisamente la respuesta no lineal, la escasez de datos, la generalización y la selección de características como algunos de los principales desafíos para la aplicación de estos métodos en la evaluación y diseño sísmico.

Los **modelos híbridos** ofrecen una alternativa prometedora. En lugar de reemplazar el conocimiento físico por algoritmos, combinan:

- Modelos basados en principios mecánicos.
- Datos experimentales u observados.
- Métodos estadísticos.
- Algoritmos de aprendizaje automático.

Esta combinación permite aprovechar las fortalezas de cada enfoque. Los modelos físicos proporcionan restricciones y coherencia mecánica; los datos pueden capturar

patrones no considerados; y la inteligencia artificial puede acelerar procesos de análisis o identificar relaciones complejas.

Para la Ingeniería Estructural 5.0, esta aproximación resulta especialmente coherente con el principio de **inteligencia aumentada**. El objetivo no es delegar la comprensión estructural a una caja negra, sino ampliar la capacidad profesional para interpretar sistemas complejos.

2.6.7. Implicancias para la práctica profesional

La integración de modelamiento, incertidumbre y validación modifica las competencias requeridas por el ingeniero estructural contemporáneo.

Ya no es suficiente conocer cómo ejecutar un software de análisis. Es necesario comprender:

- Qué hipótesis representa el modelo.
- Qué fenómenos físicos pueden quedar excluidos.
- Qué incertidumbres afectan los resultados.
- Qué evidencia permite validar las predicciones.
- Qué consecuencias tendría tomar una decisión incorrecta.

En consecuencia, la alfabetización digital en Ingeniería Estructural 5.0 debe ser inseparable de la **alfabetización en incertidumbre**. La capacidad para generar modelos más complejos debe acompañarse de una capacidad equivalente para reconocer sus límites.

2.7. RESILIENCIA, SOSTENIBILIDAD Y CICLO DE VIDA

2.7.1. La superación de una visión centrada exclusivamente en la construcción

Durante mucho tiempo, el éxito de una obra de ingeniería se evaluó principalmente en función de su capacidad para cumplir los requisitos establecidos durante el diseño y la construcción. Sin embargo, una infraestructura existe durante

décadas y sus impactos se distribuyen a lo largo de un ciclo de vida que incluye producción de materiales, construcción, operación, mantenimiento, reparación, rehabilitación y eventual fin de vida.

Esta perspectiva obliga a ampliar el horizonte de evaluación. Una solución estructural no debe valorarse únicamente por su costo inicial o por su desempeño ante un evento aislado. También es necesario considerar cómo sus decisiones de diseño afectan el consumo de recursos, las necesidades de mantenimiento, la vulnerabilidad futura y las consecuencias ambientales de las reparaciones.

En este contexto, **resiliencia** y **sostenibilidad** son conceptos complementarios, aunque no equivalentes.

La sostenibilidad se relaciona con la capacidad de satisfacer necesidades actuales considerando las consecuencias ambientales, económicas y sociales a largo plazo. La resiliencia se concentra en la capacidad de un sistema para resistir, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones.

Una estructura puede ser eficiente desde el punto de vista del uso inicial de materiales y, sin embargo, ser vulnerable a eventos que generen pérdidas ambientales importantes por reparaciones o reconstrucciones. De manera inversa, una solución diseñada para una elevada robustez puede utilizar una mayor cantidad inicial de recursos sin que ello garantice automáticamente un mejor resultado ambiental durante toda su vida útil.

Por ello, la relación entre ambos conceptos exige un análisis de compromisos y beneficios a largo plazo.

Una revisión reciente sobre sostenibilidad y resiliencia del entorno construido destaca precisamente la necesidad de integrar la evaluación del ciclo de vida con la evaluación del desempeño estructural para traducir el daño probable en consecuencias ambientales y analizar los posibles equilibrios entre resiliencia y sostenibilidad.

2.7.2. El ciclo de vida como unidad de análisis

El enfoque de ciclo de vida modifica la pregunta fundamental del diseño. En lugar de preguntar solamente:

¿Cuál es la solución más eficiente para construir hoy?

se plantea:

¿Cuál es la solución que proporciona el mejor desempeño técnico, funcional, económico y ambiental durante la vida útil prevista?

Esta perspectiva incorpora múltiples etapas:

- **Diseño y planificación.**
- **Extracción y producción de materiales.**
- **Construcción.**
- **Operación y mantenimiento.**
- **Reparación y rehabilitación.**
- **Fin de vida, reutilización o reciclaje.**

Cada decisión estructural puede producir efectos acumulativos. La selección de materiales influye en las emisiones incorporadas; el nivel de daño esperado puede modificar las necesidades futuras de reparación; y la facilidad de inspección y mantenimiento puede afectar la duración efectiva del activo.

Por esta razón, el ciclo de vida constituye un marco particularmente adecuado para la Ingeniería Estructural 5.0. Las tecnologías digitales pueden contribuir a conservar información a través de las diferentes etapas y reducir la fragmentación que históricamente ha separado el diseño de la operación.

Una revisión reciente sobre tecnologías digitales y sostenibilidad en la construcción identifica precisamente la integración y colaboración, la optimización y

simulación, el monitoreo y control y la capacitación como áreas centrales en las que BIM, inteligencia artificial, Internet de las cosas y otras tecnologías pueden contribuir a resultados sostenibles durante el ciclo de vida. Sin embargo, también destaca la necesidad de sistemas interoperables y de investigaciones sobre desempeño y resiliencia de largo plazo.

2.7.3. El costo y el impacto ambiental del daño evitable

Una de las conexiones más importantes entre resiliencia y sostenibilidad se encuentra en el daño evitable.

Cuando una infraestructura experimenta daños importantes, las consecuencias no se limitan al costo económico de reparación. La reconstrucción puede requerir nuevos materiales, energía, transporte y generación de residuos. Desde esta perspectiva, la reducción del daño puede generar beneficios ambientales adicionales.

No obstante, esta afirmación requiere una evaluación rigurosa. Incrementar indiscriminadamente la resistencia o utilizar mayores cantidades de materiales tampoco garantiza una solución sostenible. El objetivo debe ser encontrar soluciones que optimicen el desempeño durante el ciclo de vida.

Los estudios contemporáneos sobre evaluación integrada de resiliencia y sostenibilidad advierten precisamente que pueden existir compensaciones entre el impacto ambiental inicial de determinadas soluciones y los beneficios derivados de una mayor reducción de daños y necesidades de reparación. La evaluación del ciclo de vida y el desempeño probabilístico permiten analizar estos compromisos de manera más completa.

Esta reflexión tiene implicancias importantes para el diseño sísmico. El desempeño estructural puede ser interpretado también como una estrategia de prevención de impactos futuros. Una estructura que reduce de manera significativa la probabilidad de daños reparables puede disminuir, en determinadas condiciones, los recursos necesarios durante su vida útil.

Por tanto, el análisis estructural y la sostenibilidad no deberían desarrollarse como disciplinas completamente separadas.

2.7.4. La resiliencia como componente de la sostenibilidad

La relación entre resiliencia y sostenibilidad puede comprenderse a partir de la permanencia del valor de una infraestructura.

Una obra que requiere reconstrucciones frecuentes debido a su vulnerabilidad difícilmente puede considerarse sostenible en un sentido amplio, incluso si sus impactos iniciales fueron reducidos. De manera semejante, una infraestructura extremadamente robusta pero materialmente ineficiente puede generar costos ambientales innecesarios.

La Ingeniería Estructural 5.0 propone superar esta falsa dicotomía. La meta debe ser una **optimización multicriterio** en la que se consideren simultáneamente:

- **Seguridad.**
- **Desempeño.**
- **Funcionalidad.**
- **Capacidad de recuperación.**
- **Uso de recursos.**
- **Impactos ambientales.**
- **Viabilidad económica.**

Las metodologías recientes de evaluación de resiliencia sísmica han comenzado a incorporar esta visión sistémica, relacionando modelos de desempeño, monitoreo, análisis computacional y trayectorias de recuperación. Asimismo, la investigación reciente sobre sistemas de disipación y respuesta estructural resalta la necesidad de evaluar conjuntamente desempeño, recuperación y comportamiento durante el ciclo de vida.

Esta integración resulta especialmente pertinente en un contexto de aumento de la exposición urbana, cambio climático y creciente dependencia social de infraestructuras complejas.

2.7.5. Tecnologías digitales para la gestión sostenible del ciclo de vida

BIM, sensores, sistemas de monitoreo, inteligencia artificial y gemelos digitales pueden contribuir a una gestión más sostenible, pero sus beneficios no deben asumirse automáticamente.

La literatura contemporánea sobre tecnologías digitales identifica aplicaciones en:

- Optimización del uso de materiales.
- Simulación de alternativas.
- Seguimiento de recursos y procesos.
- Monitoreo del desempeño.
- Mantenimiento predictivo.
- Gestión de activos.
- Reducción de desperdicios.

Las revisiones de alto impacto sobre digitalización y sostenibilidad coinciden en que el principal potencial surge cuando las tecnologías permiten integrar información y mejorar decisiones a través del ciclo de vida, y no cuando se utilizan únicamente para digitalizar procedimientos existentes.

Sin embargo, los sistemas digitales también presentan limitaciones. Requieren infraestructura tecnológica, energía, almacenamiento de información y capacidades especializadas. La producción y operación de sistemas digitales poseen sus propios impactos y costos.

Por ello, una tecnología digital debe ser evaluada mediante la misma lógica que cualquier solución de ingeniería: **su implementación debe generar un valor verificable superior a sus costos y consecuencias.**

Esta observación es particularmente importante para los gemelos digitales. La investigación contemporánea reconoce su potencial para mejorar la gestión y

sostenibilidad de sistemas complejos, pero también advierte sobre problemas de calidad de datos, integración, confiabilidad y gobernanza.

2.7.6. Diseño para adaptabilidad, reparación y recuperación

Una visión de ciclo de vida también modifica los criterios de diseño. Además de la resistencia y ductilidad, resulta necesario considerar la **capacidad de adaptación y reparación**.

Una estructura resiliente puede diseñarse, cuando las condiciones del proyecto lo justifiquen, para facilitar:

- Inspecciones posteriores a eventos.
- Identificación de daños.
- Reparación de componentes.
- Reemplazo de elementos específicos.
- Recuperación de servicios críticos.

La pregunta deja de ser únicamente «¿cuánto daño puede soportar?» y se amplía hacia:

¿Qué tan reparable, adaptable y recuperable será la infraestructura después de una perturbación?

Esta perspectiva es especialmente relevante para sistemas esenciales. El costo de una interrupción funcional puede superar ampliamente el costo directo del daño físico.

La evaluación contemporánea de resiliencia incorpora cada vez con mayor frecuencia trayectorias de recuperación, variables funcionales y consecuencias socioeconómicas. Las revisiones recientes también señalan que los modelos exclusivamente estructurales pueden resultar insuficientes si no consideran la función que la infraestructura desempeña dentro de sistemas sociales más amplios.

Por ello, el diseño estructural orientado al ciclo de vida requiere colaboración con otras disciplinas y con los responsables de la gestión de activos.

2.7.7. La contribución de la Ingeniería Estructural 5.0

La Ingeniería Estructural 5.0 encuentra en la integración entre resiliencia, sostenibilidad y ciclo de vida uno de sus principales fundamentos.

Su aporte no consiste en afirmar que la tecnología resolverá automáticamente los problemas de sostenibilidad. Consiste en crear una arquitectura de conocimiento capaz de conectar decisiones tomadas en diferentes momentos de la vida de una infraestructura.

El modelo propuesto puede sintetizarse así:

Diseño informado → construcción trazable → operación observada → mantenimiento predictivo → recuperación eficiente → aprendizaje para futuros diseños.

Cada etapa produce información que puede mejorar la siguiente. Un evento sísmico, por ejemplo, no debería generar únicamente una reparación; también puede producir conocimiento sobre el comportamiento real que contribuya a mejorar futuras decisiones.

Los gemelos digitales y los sistemas de información integrados poseen un potencial particular para conservar y relacionar este conocimiento. No obstante, su implementación debe estar orientada por objetivos claros y mantenerse dentro de un marco de validación, proporcionalidad tecnológica y responsabilidad profesional.

2.7.8. Hacia una visión integrada de valor estructural

A partir de lo desarrollado, es posible afirmar que el valor de una infraestructura no depende únicamente de su capacidad inicial.

Una visión contemporánea debe considerar su capacidad para proporcionar beneficios a lo largo del tiempo. Esto implica reconocer que una estructura de alto valor es aquella que, en condiciones razonables de incertidumbre:

- Protege a las personas.

- Cumple sus funciones.
- Reduce pérdidas evitables.
- Puede recuperarse después de perturbaciones.
- Utiliza responsablemente los recursos.
- Conserva y genera conocimiento para mejorar su gestión.

Esta concepción integrada transforma el papel del ingeniero estructural. El profesional deja de ser exclusivamente el diseñador de un sistema resistente para convertirse también en un gestor del conocimiento técnico que acompaña el desempeño del activo durante su ciclo de vida.

CAPÍTULO 3

BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) Y LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL DEL PROCESO ESTRUCTURAL

La transformación digital de la ingeniería estructural no comienza con la inteligencia artificial ni con los gemelos digitales. Su fundamento más inmediato se encuentra en la capacidad de **organizar, estructurar y compartir información sobre una infraestructura a lo largo de su ciclo de vida**. En este proceso, *Building Information Modeling* (BIM) ha representado uno de los cambios más significativos en la forma de concebir, diseñar, construir y gestionar activos del entorno construido.

Sin embargo, reducir BIM a la elaboración de modelos tridimensionales constituye una interpretación limitada de su potencial. Su contribución principal reside en la transición desde documentos y representaciones fragmentadas hacia entornos de información estructurada, en los cuales los diferentes participantes pueden acceder, intercambiar y utilizar datos relacionados con un mismo activo.

Para la ingeniería estructural, esta transformación tiene consecuencias profundas. Tradicionalmente, el diseño ha dependido de una sucesión de modelos, planos, memorias de cálculo, especificaciones y documentos elaborados en diferentes plataformas. Aunque estos instrumentos continúan siendo necesarios, la fragmentación de la información puede generar inconsistencias, pérdidas de trazabilidad y dificultades para actualizar el conocimiento cuando cambian las condiciones del proyecto.

BIM plantea la posibilidad de reorganizar este proceso. El modelo deja de ser únicamente una representación geométrica y se convierte progresivamente en una **estructura de información** que puede relacionar geometría, propiedades, materiales, procesos, requisitos y datos generados durante la vida útil de la infraestructura.

Esta evolución resulta especialmente relevante en el contexto de la Ingeniería Estructural 5.0. Un sistema inteligente requiere información confiable sobre aquello que

pretende analizar. La inteligencia artificial necesita datos organizados; el monitoreo requiere una referencia del sistema físico; y un gemelo digital necesita mecanismos para vincular información virtual y evidencia procedente del activo real. En este sentido, BIM puede constituir una infraestructura informacional sobre la cual se desarrollan tecnologías posteriores.

El objetivo de este capítulo es analizar BIM desde esta perspectiva amplia, examinando su evolución, sus aportes específicos al proceso estructural, sus limitaciones y su papel como componente de una arquitectura digital integrada.

3.1. DE LA REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA A LA GESTIÓN DE INFORMACIÓN

El desarrollo de BIM debe comprenderse como parte de una transformación progresiva de las prácticas de representación y coordinación en la industria de la construcción. El paso desde el dibujo manual hacia el diseño asistido por computadora permitió aumentar la eficiencia en la producción de planos; sin embargo, la digitalización inicial no eliminó necesariamente la fragmentación de la información. En muchos casos, los documentos continuaron siendo archivos independientes que requerían coordinación manual.

BIM introduce un cambio conceptual al proponer que los elementos de una infraestructura pueden ser representados mediante objetos asociados con información y relaciones. Un elemento estructural no es únicamente una línea o una forma geométrica; puede estar vinculado con propiedades materiales, dimensiones, especificaciones y otros atributos relevantes.

Succar (2009) planteó que BIM debía entenderse como una transformación más amplia de los procesos y las interacciones de la industria, y no únicamente como una herramienta tecnológica. Desde esta perspectiva, la madurez BIM depende de la evolución simultánea de tecnologías, procesos y políticas organizacionales.

Esta concepción permite comprender por qué la adopción de BIM no puede reducirse a la compra de software. Una organización puede producir modelos tridimensionales y, sin embargo, continuar trabajando mediante procesos fragmentados.

La transformación digital ocurre cuando la información se convierte en un recurso compartido que modifica los procesos de coordinación y toma de decisiones.

En la ingeniería estructural, esta transición es particularmente significativa porque el modelo analítico y el modelo geométrico han sido tradicionalmente desarrollados mediante representaciones diferentes. La interoperabilidad entre ambos continúa siendo uno de los desafíos centrales del sector. La información debe conservar suficiente consistencia para que las modificaciones arquitectónicas, estructurales y constructivas puedan ser coordinadas sin introducir errores o pérdidas de información.

Eastman et al. (2011) señalaron que uno de los principales beneficios de BIM reside en la posibilidad de mejorar la coordinación interdisciplinaria y reducir inconsistencias entre documentos. Aunque la tecnología ha evolucionado desde entonces, este principio continúa siendo fundamental: el valor de BIM depende en gran medida de su capacidad para reducir la distancia entre las diferentes representaciones de un mismo activo.

Desde una perspectiva crítica, no obstante, BIM no elimina automáticamente los problemas de coordinación. La calidad de la información depende de las reglas de modelamiento, los protocolos de intercambio y la responsabilidad de los participantes. Un modelo digital puede reproducir las mismas deficiencias de un proceso tradicional si se construye sin criterios de gobernanza.

Por ello, para la Ingeniería Estructural 5.0, BIM debe entenderse como una **infraestructura de información**, no como una representación visual.

3.2. BIM EN EL PROCESO DE DISEÑO Y COORDINACIÓN ESTRUCTURAL

La aplicación de BIM en ingeniería estructural adquiere especial relevancia cuando se integra al proceso de diseño desde las etapas iniciales. La coordinación temprana permite identificar incompatibilidades geométricas, restricciones espaciales y decisiones que pueden afectar posteriormente la constructabilidad.

La principal contribución de BIM no consiste simplemente en detectar interferencias. Su potencial más importante radica en permitir una comprensión más

integrada del proyecto. Las decisiones estructurales pueden ser evaluadas considerando su relación con la arquitectura, las instalaciones, la secuencia constructiva y las condiciones de mantenimiento.

La investigación sobre implementación BIM ha mostrado que sus beneficios dependen de la intensidad y calidad de la colaboración. Azhar (2011), en una de las revisiones más influyentes sobre el tema, identificó beneficios relacionados con visualización, coordinación, reducción de errores y apoyo a la planificación, pero también señaló desafíos vinculados con interoperabilidad, responsabilidades y cambios organizacionales.

Para el ingeniero estructural, BIM permite avanzar hacia una coordinación basada en modelos. Sin embargo, esta coordinación debe complementarse con el análisis técnico. Un modelo coordinado geoméricamente no garantiza que una solución sea estructuralmente adecuada. La integración digital no sustituye el juicio de ingeniería.

Este punto es particularmente relevante en el contexto sísmico. Las irregularidades arquitectónicas, los cambios de rigidez o la ubicación de elementos pueden requerir una interpretación que trascienda la detección automática de interferencias. BIM puede proporcionar una visión integrada del sistema, pero la evaluación del comportamiento debe continuar fundamentándose en principios de mecánica estructural y dinámica.

La literatura sobre colaboración BIM destaca que los mayores beneficios aparecen cuando la tecnología se integra con procesos de coordinación definidos y una participación temprana de los actores relevantes. Por ello, la implementación debe considerar tanto el modelo como la estructura organizacional que permite utilizarlo.

En consecuencia, BIM puede entenderse como un **espacio común de coordinación**, siempre que exista una gobernanza clara sobre la creación, actualización y uso de la información.

3.3. INTEROPERABILIDAD, DATOS Y CONTINUIDAD DE LA INFORMACIÓN

Uno de los desafíos fundamentales de la transformación digital consiste en mantener la continuidad de la información entre diferentes etapas y sistemas.

Un proyecto estructural puede involucrar plataformas de modelamiento, programas de análisis, herramientas de coordinación, sistemas de gestión documental y, posteriormente, plataformas de operación y mantenimiento. Si cada sistema funciona como un compartimento aislado, la información debe ser transferida manualmente y aumenta el riesgo de pérdida, inconsistencia o duplicación.

La interoperabilidad se refiere a la capacidad de diferentes sistemas y actores para intercambiar y utilizar información de manera significativa. En BIM, esta cuestión ha impulsado el desarrollo de estándares y esquemas de datos que buscan facilitar el intercambio más allá de formatos propietarios.

La literatura científica ha señalado que la interoperabilidad continúa siendo una de las principales limitaciones para alcanzar una integración completa del ciclo de vida. La transferencia entre modelos geométricos y analíticos, por ejemplo, puede requerir simplificaciones o interpretaciones que introducen diferencias entre representaciones.

Volk et al. (2014), al analizar BIM en edificios existentes, identificaron importantes desafíos relacionados con la disponibilidad, actualización e integración de información durante la vida útil de los activos. Esta observación resulta especialmente relevante para la Ingeniería Estructural 5.0: un sistema digital no puede mantenerse confiable si su información de referencia permanece estática mientras el activo físico cambia.

Por ello, la continuidad de la información debe considerar dos dimensiones:

- **Continuidad técnica:** capacidad para transferir datos entre plataformas.
- **Continuidad temporal:** capacidad para conservar y actualizar información a lo largo de la vida útil.

La segunda dimensión es fundamental para conectar BIM con monitoreo y gemelos digitales. Un modelo desarrollado durante el diseño debe poder evolucionar cuando aparecen modificaciones, inspecciones, reparaciones o nuevas mediciones.

Desde una perspectiva crítica, la interoperabilidad no constituye solamente un problema informático. También es un problema de definición: los participantes deben compartir criterios sobre qué información es necesaria, quién es responsable de ella y cuándo debe actualizarse.

3.4. BIM COMO PLATAFORMA PARA EL CICLO DE VIDA Y LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

El potencial más significativo de BIM para la Ingeniería Estructural 5.0 aparece cuando el modelo se proyecta más allá de la etapa de diseño.

Durante la operación de una infraestructura se generan nuevos datos: inspecciones, modificaciones, registros de mantenimiento, resultados de monitoreo y eventos extraordinarios. Si estos datos permanecen desconectados del conocimiento generado durante el diseño, la infraestructura pierde una oportunidad de aprendizaje acumulativo.

La integración de BIM con sistemas de gestión de activos y tecnologías de captura de datos permite avanzar hacia una visión más dinámica. El modelo puede convertirse en una referencia organizada para localizar información, contextualizar observaciones y facilitar decisiones.

Sin embargo, es importante evitar una simplificación conceptual: **un modelo BIM no es, por sí mismo, un gemelo digital**. Un gemelo digital requiere una relación más activa entre el sistema físico y su representación digital, incluyendo mecanismos de actualización e interpretación de información. BIM puede constituir una de las bases informacionales del gemelo, pero ambos conceptos cumplen funciones diferentes.

Boje et al. (2020) analizaron precisamente la relación entre BIM y gemelos digitales, destacando que la transición hacia sistemas más inteligentes requiere superar modelos predominantemente estáticos y desarrollar mecanismos para conectar datos, semántica e información procedente de los activos.

Esta distinción es importante para la arquitectura del presente libro. BIM representa la consolidación de la **información estructurada**; el monitoreo aporta la **evidencia del comportamiento real**; la inteligencia artificial contribuye con la **capacidad de análisis y aprendizaje**; y el gemelo digital busca integrar estas dimensiones en un sistema dinámico de apoyo a la decisión.

Por tanto, BIM ocupa una posición estratégica dentro de la Ingeniería Estructural 5.0, pero no debe ser considerado una solución autónoma para todos los problemas de digitalización.

3.5. LÍMITES Y CONDICIONES PARA UNA IMPLEMENTACIÓN EFECTIVA DE BIM

Una visión académicamente rigurosa de BIM debe reconocer sus limitaciones. La digitalización puede aumentar la complejidad organizacional si se implementa sin objetivos claros. Un modelo excesivamente detallado puede requerir recursos que no se justifican por los beneficios obtenidos.

Entre los principales desafíos se encuentran:

- Interoperabilidad entre plataformas.
- Calidad y consistencia de la información.
- Capacitación de los profesionales.
- Definición de responsabilidades.
- Resistencia al cambio organizacional.
- Costos de implementación y mantenimiento.
- Protección y gobernanza de la información.

Estos desafíos permiten establecer un principio fundamental para la Ingeniería Estructural 5.0: **la transformación digital debe ser proporcional al problema que pretende resolver.**

No todas las infraestructuras requieren el mismo nivel de modelamiento o integración digital. Una implementación adecuada debe comenzar por identificar decisiones críticas y necesidades de información. Posteriormente, se seleccionan las herramientas necesarias.

La literatura sobre adopción BIM ha mostrado que los beneficios no dependen únicamente de la tecnología, sino también de las capacidades organizacionales y de la transformación de los procesos de trabajo (Succar, 2009; Bryde et al., 2013).

Por ello, la madurez digital no puede medirse solamente por la sofisticación del software utilizado. Una organización puede emplear herramientas avanzadas y, al mismo tiempo, mantener procesos deficientes de intercambio de información.

La verdadera madurez aparece cuando existe coherencia entre **personas, procesos, datos y tecnología**.

CAPÍTULO 4

INTELIGENCIA ARTIFICIAL, ANALÍTICA DE DATOS Y MONITOREO ESTRUCTURAL

El capítulo anterior estableció que la transformación digital de la ingeniería estructural depende, en primer lugar, de la capacidad para organizar y mantener información coherente sobre un activo. Sin embargo, disponer de información estructurada no equivale necesariamente a comprender el comportamiento real de una estructura. Para avanzar desde la representación digital hacia una gestión inteligente es necesario incorporar datos procedentes de la operación, interpretarlos y transformarlos en conocimiento útil para la toma de decisiones.

En este contexto, el **monitoreo de salud estructural** o *Structural Health Monitoring* (SHM), la analítica de datos y la inteligencia artificial constituyen componentes complementarios de una misma arquitectura tecnológica. El monitoreo proporciona evidencia sobre el comportamiento del activo; la analítica permite identificar patrones y extraer información relevante; y la inteligencia artificial puede ampliar la capacidad para clasificar, predecir y detectar anomalías en conjuntos de datos complejos.

No obstante, la incorporación de estas tecnologías plantea una advertencia fundamental: **la disponibilidad de datos no garantiza por sí misma una mejor decisión**. Los sistemas de monitoreo pueden generar grandes volúmenes de información sin que ello conduzca necesariamente a una comprensión más precisa del estado estructural. La utilidad de los datos depende de su calidad, de la selección de variables, del conocimiento físico del sistema y de la capacidad para distinguir entre cambios normales y alteraciones potencialmente asociadas con daño.

Este capítulo analiza la integración entre monitoreo estructural, analítica de datos e inteligencia artificial desde una perspectiva crítica. Su propósito no es presentar la inteligencia artificial como un sustituto de la ingeniería estructural, sino examinar cómo puede contribuir a ampliar la capacidad de observación e interpretación del ingeniero. De esta manera, se consolida una idea central del libro: **la Ingeniería Estructural 5.0**

requiere sistemas capaces de aprender de la infraestructura real sin perder la fundamentación física, la incertidumbre y la responsabilidad profesional.

4.1. DEL MONITOREO INSTRUMENTAL AL CONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El monitoreo estructural puede definirse como un proceso sistemático de observación destinado a obtener información sobre el estado y la respuesta de una infraestructura. Dependiendo del objetivo, puede incorporar mediciones de aceleración, deformación, desplazamiento, temperatura, inclinación u otras variables relevantes.

Sin embargo, medir no equivale automáticamente a diagnosticar. Un sensor registra una señal; la interpretación estructural requiere determinar qué significado puede atribuirse a esa señal dentro del comportamiento global del sistema.

Esta diferencia es esencial. Una variación en la frecuencia natural de una estructura, por ejemplo, podría estar asociada con una modificación de rigidez, pero también puede responder a cambios ambientales u operacionales. Por tanto, la identificación de daño exige procedimientos capaces de separar los efectos atribuibles a posibles deterioros de la variabilidad inherente al funcionamiento normal.

La literatura reciente sobre evaluación sísmica mediante SHM muestra una evolución desde sistemas centrados exclusivamente en la adquisición de señales hacia enfoques que integran sensores, modelos estructurales y métodos de inteligencia computacional para la evaluación del estado de las infraestructuras. Esta evolución ha sido particularmente significativa en puentes, donde el monitoreo puede contribuir tanto al seguimiento de la condición como a la evaluación posterior a eventos extremos (Karakostas et al., 2024).

En consecuencia, el monitoreo debe entenderse como una **cadena de conocimiento**:

Medición → procesamiento → identificación de características → interpretación → decisión.

Cada etapa puede introducir incertidumbres. Una deficiencia en la calidad de los datos, una selección inadecuada de variables o una interpretación basada exclusivamente en correlaciones pueden afectar la decisión final.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Estructural 5.0, el objetivo no debe ser instrumentar una infraestructura para generar la mayor cantidad posible de datos, sino obtener información que contribuya a responder preguntas concretas: ¿ha cambiado el comportamiento?, ¿existe evidencia de deterioro?, ¿qué componentes requieren inspección?, ¿cómo ha respondido la estructura ante un evento?

Esta orientación convierte al monitoreo en un instrumento de apoyo a la ingeniería y no simplemente en una infraestructura tecnológica.

4.2. DATOS ESTRUCTURALES, SENSORES Y ANALÍTICA: DE LA SEÑAL A LA INFORMACIÓN

La expansión de las tecnologías de medición ha modificado sustancialmente la naturaleza de los datos disponibles para la ingeniería civil. Actualmente es posible combinar sensores convencionales, dispositivos conectados mediante Internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT), sistemas de visión artificial, inspecciones automatizadas y otras fuentes de información.

Sin embargo, esta diversidad genera un desafío de integración. Los datos estructurales pueden diferir en frecuencia de adquisición, precisión, formato y significado físico. Una imagen de una fisura, una señal de aceleración y un registro de temperatura no pueden interpretarse de manera idéntica, aunque puedan contribuir conjuntamente a una evaluación del estado de la infraestructura.

La analítica de datos cumple, por ello, una función intermedia entre la adquisición y la decisión. Su objetivo es transformar datos brutos en información interpretable mediante actividades como:

- Control de calidad y limpieza de datos.
- Filtrado y reducción de ruido.

- Identificación de características relevantes.
- Reconocimiento de patrones.
- Detección de anomalías.
- Integración de fuentes heterogéneas.

Las revisiones recientes sobre aprendizaje profundo aplicado al SHM subrayan que la calidad y disponibilidad de los datos continúan siendo determinantes para el desempeño de los sistemas inteligentes. La investigación ya no se concentra únicamente en seleccionar algoritmos, sino también en problemas como recuperación de datos, fallos de sensores, variabilidad ambiental y combinación de información procedente de diferentes modalidades de observación (Cha et al., 2024).

Esta observación permite establecer una premisa importante para la Ingeniería Estructural 5.0: **la inteligencia de un sistema depende tanto de la arquitectura de sus datos como del algoritmo utilizado para analizarlos.**

En términos profesionales, esto implica que la etapa de preparación y comprensión de los datos no debe considerarse una actividad secundaria. Antes de aplicar un modelo predictivo es necesario conocer cómo se generaron los datos, qué fenómenos representan y qué limitaciones poseen.

4.3. INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN Y PREDICCIÓN ESTRUCTURAL

La inteligencia artificial comprende un conjunto amplio de métodos capaces de identificar patrones, clasificar información o generar predicciones a partir de datos. En ingeniería estructural, sus aplicaciones se han expandido hacia problemas como detección de daño, reconocimiento de patrones dinámicos, evaluación de condición, estimación de respuestas y desarrollo de modelos sustitutos.

El aprendizaje automático (*machine learning*) resulta especialmente útil cuando las relaciones entre variables son complejas o cuando la resolución repetida de modelos

físicos requiere elevados recursos computacionales. En estos casos, un modelo entrenado adecuadamente puede aproximar determinadas relaciones y acelerar procesos de análisis.

Sin embargo, la precisión obtenida en un conjunto de datos conocido no garantiza que un modelo pueda generalizar adecuadamente a nuevas estructuras o condiciones operacionales. Esta limitación es particularmente importante en ingeniería estructural porque las estructuras reales presentan una gran diversidad y los datos de daño severo o colapso son, afortunadamente, escasos.

Las revisiones sobre aprendizaje automático aplicado a dinámica estructural destacan precisamente que los principales campos de aplicación incluyen el monitoreo de salud estructural, el control y el diseño, pero también advierten que la incorporación de conocimiento físico y el desarrollo de modelos híbridos son necesarios para superar limitaciones asociadas con la generalización y la interpretación de los resultados (Cunha et al., 2023).

Por ello, en el ámbito de la Ingeniería Estructural 5.0 es conveniente diferenciar tres funciones principales de la inteligencia artificial:

a) Clasificación

Permite asignar observaciones a categorías, como condiciones normales, anomalías o diferentes tipos de daño.

b) Predicción

Busca estimar una respuesta futura o desconocida a partir de información disponible.

c) Apoyo a la interpretación

Ayuda a identificar relaciones y patrones que pueden orientar al especialista hacia una evaluación más detallada.

La tercera función es particularmente relevante. La inteligencia artificial puede actuar como un sistema de **inteligencia aumentada**, capaz de ampliar la capacidad de

análisis del ingeniero sin reemplazar su responsabilidad sobre la interpretación y la decisión.

4.4. MODELOS HÍBRIDOS, EXPLICABILIDAD Y SUPERVISIÓN HUMANA

Uno de los debates más importantes sobre inteligencia artificial en ingeniería se relaciona con la confianza que puede otorgarse a modelos complejos. Un algoritmo puede alcanzar una elevada precisión estadística y, sin embargo, ofrecer una explicación limitada sobre las razones de sus predicciones.

Esta característica puede ser problemática cuando los resultados se utilizan para decisiones relacionadas con seguridad estructural. Por ello, la evolución más prometedora no parece orientarse hacia la sustitución completa de los modelos físicos, sino hacia su integración con métodos basados en datos.

Los **modelos híbridos** combinan conocimiento procedente de la mecánica estructural con técnicas de aprendizaje automático. Los principios físicos pueden actuar como restricciones o fuentes de información, mientras que los datos permiten capturar comportamientos difíciles de representar mediante modelos convencionales.

La revisión de Cha et al. (2024) identifica los enfoques informados por la física como una de las direcciones relevantes del desarrollo del aprendizaje profundo para SHM, junto con la integración de visión artificial, gemelos digitales y métodos de monitoreo basados en vibraciones.

Esta tendencia es coherente con la filosofía de este libro. La Ingeniería Estructural 5.0 no debe construir una oposición entre «ingeniería tradicional» e «inteligencia artificial». La verdadera innovación puede surgir de la interacción entre ambas formas de conocimiento.

En este marco, la supervisión humana cumple tres funciones esenciales:

1. **Definir el problema:** determinar qué pregunta de ingeniería debe resolverse.

2. **Evaluar la coherencia:** analizar si los resultados son compatibles con el comportamiento físico esperado.

3. **Asumir la decisión:** valorar las consecuencias y responsabilidades asociadas con una intervención.

Un sistema inteligente puede recomendar una inspección adicional, identificar una anomalía o estimar una probabilidad; la decisión de declarar segura una infraestructura o intervenirla continúa requiriendo un marco profesional y técnico más amplio.

4.5. LÍMITES, RIESGOS Y CONDICIONES PARA UNA INTELIGENCIA ESTRUCTURAL CONFIABLE

La incorporación de inteligencia artificial y sistemas de monitoreo no está exenta de riesgos. Un sistema puede producir resultados aparentemente precisos y, al mismo tiempo, basarse en datos no representativos. Asimismo, un modelo entrenado en condiciones experimentales puede presentar dificultades al ser aplicado a una infraestructura real.

Entre los principales desafíos pueden identificarse:

- Escasez de datos asociados con daños reales.
- Variabilidad ambiental y operacional.
- Fallos y pérdida de información de sensores.
- Transferencia limitada de modelos entre estructuras.
- Falta de explicabilidad.
- Riesgo de automatización excesiva.
- Incertidumbre sobre la confiabilidad de las predicciones.

La literatura sobre SHM basado en aprendizaje no supervisado resulta especialmente ilustrativa respecto a este problema. Dado que las bases de datos de estructuras dañadas son frecuentemente limitadas, los métodos capaces de aprender el

comportamiento asociado con condiciones normales pueden ofrecer ventajas para la detección temprana de anomalías. Sin embargo, una anomalía estadística no debe interpretarse automáticamente como daño; requiere evaluación contextual y física (Sakaris et al., 2023).

Esta distinción es fundamental para la práctica profesional. El sistema inteligente debe ser diseñado para **reducir incertidumbre**, no para producir una falsa sensación de certeza.

En consecuencia, una implementación responsable debería cumplir al menos cuatro condiciones:

Datos confiables + modelo validado + interpretación física + supervisión profesional.

La ausencia de cualquiera de estas condiciones puede reducir significativamente el valor de la automatización.

CAPÍTULO 5

GEMELOS DIGITALES Y GESTIÓN INTELIGENTE DEL CICLO DE VIDA ESTRUCTURAL

Los capítulos anteriores han desarrollado tres componentes fundamentales de la transformación digital de la ingeniería estructural. En primer lugar, el diseño sísmico y basado en desempeño proporcionan los fundamentos físicos para comprender la seguridad, la incertidumbre y la respuesta de las estructuras. En segundo lugar, BIM permite organizar y gestionar información relacionada con el activo. Finalmente, el monitoreo estructural y la inteligencia artificial incorporan la capacidad de observar el comportamiento real y extraer conocimiento de los datos.

El desafío siguiente consiste en integrar estas capacidades. Una infraestructura no puede considerarse verdaderamente inteligente únicamente porque disponga de un modelo tridimensional, sensores instalados o algoritmos de aprendizaje automático. La inteligencia emerge cuando estas tecnologías pueden interactuar dentro de un sistema que represente al activo, incorpore información actualizada, permita interpretar su comportamiento y apoye decisiones durante su ciclo de vida.

En este contexto surge el concepto de **gemelo digital** (*Digital Twin*, DT). Aunque su definición continúa evolucionando y existen diferentes niveles de implementación, existe un elemento común en la literatura: un gemelo digital trasciende la representación digital estática al establecer una relación funcional entre un activo físico y su contraparte digital. Esta relación puede incorporar datos, modelos, simulaciones y mecanismos de actualización para comprender y gestionar el comportamiento del sistema.

En ingeniería civil, los gemelos digitales han despertado un interés creciente por su potencial para integrar monitoreo estructural, BIM, simulación y gestión de activos. Sin embargo, el entusiasmo tecnológico debe ser acompañado de una evaluación crítica. No toda infraestructura requiere un gemelo digital de alta complejidad y no todo modelo

conectado a sensores alcanza necesariamente la madurez de un verdadero sistema de apoyo a la decisión.

Por ello, este capítulo analiza los gemelos digitales desde una perspectiva estructural y orientada al ciclo de vida. Se sostiene que su mayor aporte no consiste en crear una réplica virtual visualmente sofisticada, sino en construir una **continuidad informacional y analítica entre el comportamiento físico de la estructura y las decisiones que se toman sobre ella**. Las revisiones recientes confirman que la integración entre modelos, sensores, datos operacionales y simulación constituye uno de los núcleos conceptuales del desarrollo de gemelos digitales para infraestructura civil.

5.1. EL GEMELO DIGITAL: DE LA REPRESENTACIÓN VIRTUAL AL SISTEMA CIBERFÍSICO

El concepto de gemelo digital ha sido utilizado con cierta amplitud en diferentes sectores tecnológicos. Esta diversidad ha producido, en ocasiones, confusión entre términos como modelo digital, BIM, sistema ciberfísico y gemelo digital. Para la ingeniería estructural, distinguir estos conceptos resulta esencial.

Un **modelo digital** puede representar geométrica o analíticamente una estructura, pero no necesariamente mantiene una conexión continua con el activo físico. Un modelo BIM, por su parte, organiza información geométrica y semántica sobre el activo y puede servir como una importante base para su gestión. Sin embargo, la existencia de un modelo BIM no implica, por sí sola, que exista una actualización dinámica basada en el comportamiento real.

El gemelo digital incorpora una lógica diferente: la representación virtual adquiere valor en la medida en que puede relacionarse sistemáticamente con el sistema físico. Esta relación puede involucrar información procedente de sensores, inspecciones, modelos numéricos, registros operacionales y otros mecanismos de actualización. Jiang et al. (2021), al examinar el concepto en ingeniería civil, destacan precisamente la necesidad de diferenciar el gemelo digital de BIM y de otros sistemas digitales, enfatizando sus componentes y relaciones funcionales dentro del entorno construido.

Desde esta perspectiva, un gemelo digital estructural puede comprenderse como un sistema compuesto por cuatro dimensiones fundamentales:

1. **Activo físico:** la estructura real y su entorno operativo.
2. **Representación digital:** modelos geométricos, analíticos y semánticos.
3. **Flujo de información:** datos procedentes de sensores, inspecciones y otras fuentes.
4. **Capacidad analítica:** procedimientos para interpretar, simular o predecir el comportamiento.

La interacción entre estas dimensiones transforma el modelo digital en una plataforma potencialmente dinámica. Un cambio detectado en la estructura puede incorporarse a la representación digital; a partir de ello, pueden realizarse simulaciones o análisis; y los resultados pueden contribuir a orientar nuevas inspecciones o intervenciones.

La literatura sobre infraestructura civil enfatiza que la actualización frecuente mediante información procedente del activo físico constituye una de las características que diferencia a los gemelos digitales de los modelos digitales convencionales. Esta capacidad permite que la representación virtual no permanezca limitada a las condiciones iniciales del diseño, sino que pueda evolucionar durante la vida útil de la infraestructura.

No obstante, la conexión entre lo físico y lo digital no debe interpretarse como un proceso perfecto o automático. Los datos siempre contienen incertidumbre, los sensores tienen limitaciones y los modelos constituyen simplificaciones de la realidad. Por ello, un gemelo digital no es una «copia exacta» de una estructura. Es, más rigurosamente, una **representación dinámica y continuamente informada**, cuyo propósito es reducir la incertidumbre y mejorar la calidad de las decisiones.

5.2. ARQUITECTURA DEL GEMELO DIGITAL ESTRUCTURAL

La implementación de un gemelo digital requiere una arquitectura que permita conectar diferentes fuentes y tipos de información. Esta arquitectura no debe concebirse

como una solución tecnológica única, sino como una estructura funcional adaptable a las características y necesidades del activo.

Para una infraestructura estructural, puede proponerse una arquitectura integrada de cinco capas:

a) Capa física

Comprende la estructura real, sus componentes y las condiciones ambientales y operacionales a las que se encuentra sometida. Constituye la fuente primaria de información y el objeto sobre el cual se desarrollan las decisiones de ingeniería.

b) Capa de adquisición

Incluye sensores, sistemas de inspección, dispositivos IoT y otros mecanismos utilizados para capturar información. La selección de estas tecnologías debe responder a objetivos específicos de monitoreo y no únicamente a la disponibilidad de dispositivos.

c) Capa de información y modelos

Integra modelos BIM, modelos analíticos, bases de datos y registros históricos. Esta capa permite organizar la información y establecer relaciones entre componentes físicos, propiedades y eventos registrados.

d) Capa analítica

Comprende simulaciones estructurales, métodos estadísticos, inteligencia artificial y modelos predictivos. Su función consiste en transformar los datos en información técnicamente interpretable.

e) Capa de decisión

Representa el nivel en el cual los resultados se traducen en acciones: inspeccionar, mantener, reparar, restringir el uso o continuar la operación bajo determinadas condiciones.

Esta arquitectura permite comprender que un gemelo digital no es un producto aislado, sino un **ecosistema de información y análisis**. Las revisiones sobre gemelos

digitales en infraestructura civil han identificado precisamente la integración de sensores, adquisición de datos, modelamiento, plataformas digitales y análisis como componentes fundamentales para el desarrollo de aplicaciones orientadas al monitoreo y mantenimiento.

Un aspecto crítico de esta arquitectura es la retroalimentación. La información no debe fluir exclusivamente desde la estructura hacia el modelo. Las conclusiones obtenidas mediante análisis pueden orientar nuevas estrategias de monitoreo, modificar la frecuencia de inspección o actualizar las hipótesis utilizadas en los modelos.

De este modo, el sistema puede describirse como un ciclo:

Observar → integrar → interpretar → simular → decidir → actualizar.

Este ciclo representa una de las diferencias fundamentales entre una digitalización centrada en el almacenamiento de información y una gestión inteligente orientada al aprendizaje.

Ejemplo conceptual: edificio sometido a actividad sísmica

Supóngase un edificio instrumentado con acelerómetros y sensores de deformación. Después de un evento sísmico, los datos registrados pueden compararse con patrones históricos y utilizarse para identificar cambios en determinadas características dinámicas. Esta información puede actualizar el modelo analítico y permitir evaluar escenarios de comportamiento bajo nuevas hipótesis.

El resultado no debería ser una declaración automática de seguridad o inseguridad. Su función más rigurosa sería proporcionar evidencia para priorizar una inspección, identificar zonas potencialmente críticas y apoyar al especialista en la evaluación posterior al evento.

Esta aplicación ilustra el principio fundamental del gemelo digital estructural: **integrar evidencia y modelos para mejorar el proceso de decisión, no automatizar irresponsablemente el juicio profesional.**

5.3. BIM, MONITOREO E INTELIGENCIA ARTIFICIAL: LA INTEGRACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

El desarrollo conceptual de los capítulos anteriores permite identificar una relación complementaria entre las principales tecnologías de la Ingeniería Estructural 5.0.

BIM proporciona una estructura para organizar información. **El monitoreo estructural** incorpora evidencia sobre el comportamiento del activo. **La inteligencia artificial** amplía la capacidad para analizar grandes conjuntos de datos e identificar patrones. **El gemelo digital** busca integrar estas capacidades dentro de una arquitectura orientada al ciclo de vida.

Esta relación evita considerar a las tecnologías como soluciones independientes. La principal oportunidad se encuentra precisamente en su integración.

Por ejemplo, un sensor puede registrar una anomalía, pero esta información adquiere mayor significado cuando puede localizarse dentro de un modelo estructural, compararse con información histórica y analizarse mediante modelos físicos o basados en datos. A su vez, los resultados de esta evaluación pueden documentarse y convertirse en parte del historial del activo.

La integración BIM–gemelo digital ha sido identificada como una línea central para avanzar desde modelos predominantemente estáticos hacia representaciones capaces de incorporar información operacional. No obstante, la literatura advierte que esta transición enfrenta problemas de interoperabilidad, semántica de los datos y actualización de modelos.

Por tanto, la integración tecnológica debe basarse en un principio de **continuidad de la información**. Los datos generados en una etapa del ciclo de vida deben conservar, en la medida de lo posible, su significado y utilidad en etapas posteriores.

Esta continuidad puede representarse de la siguiente manera:

Diseño → Construcción → Operación → Monitoreo → Evaluación → Mantenimiento → Aprendizaje.

La incorporación del concepto de aprendizaje resulta especialmente importante. Cada intervención, inspección o evento proporciona información que puede mejorar el conocimiento sobre la estructura. En un sistema maduro, la experiencia acumulada no debería perderse en informes aislados, sino incorporarse progresivamente al historial digital del activo.

Sin embargo, la integración no significa necesariamente centralizar todos los datos en una única plataforma. En proyectos complejos, puede ser más realista establecer mecanismos de interoperabilidad entre sistemas especializados. La cuestión fundamental no es dónde se almacena cada dato, sino si puede ser localizado, interpretado y utilizado cuando resulta necesario.

5.4. GEMELOS DIGITALES Y GESTIÓN DEL CICLO DE VIDA: DE LA RESPUESTA REACTIVA A LA ANTICIPACIÓN

Una de las principales aplicaciones potenciales de los gemelos digitales se encuentra en la transformación de la gestión de activos. Tradicionalmente, muchas decisiones de mantenimiento se han basado en inspecciones periódicas, respuestas ante fallas o calendarios predeterminados. Aunque estos procedimientos continúan siendo necesarios, la disponibilidad de información continua abre la posibilidad de avanzar hacia estrategias más adaptativas.

Un gemelo digital puede contribuir a integrar información sobre la condición actual del activo, su comportamiento histórico y posibles escenarios futuros. Esta capacidad puede apoyar una transición progresiva desde una lógica exclusivamente reactiva hacia estrategias de mantenimiento basadas en condición y, en determinados contextos, mantenimiento predictivo.

La secuencia puede representarse como una evolución:

Enfoque	Pregunta principal
Reactivo	¿Qué hacemos después de la falla?
Preventivo	¿Cuándo corresponde intervenir según un programa?

Basado en condición	¿Cuál es el estado actual del activo?
Predictivo	¿Qué comportamiento o deterioro podría producirse?
Inteligente	¿Qué decisión resulta más adecuada considerando condición, riesgo y ciclo de vida?

El último nivel constituye el horizonte más relevante para la Ingeniería Estructural 5.0. La decisión no debe depender únicamente de una predicción técnica. Una intervención estructural implica costos, seguridad, funcionalidad, sostenibilidad y consecuencias sociales. Por tanto, la inteligencia del sistema debe contribuir a integrar múltiples criterios y no limitarse a anticipar fallas.

Las investigaciones recientes sobre aplicaciones de gemelos digitales en la etapa de operación y mantenimiento destacan precisamente el papel de tecnologías habilitadoras como IoT, simulación, analítica y plataformas de información para mejorar la toma de decisiones durante la vida útil del activo. Al mismo tiempo, se reconoce que muchas aplicaciones continúan en etapas de desarrollo y que la implementación a escala real presenta desafíos significativos.

Desde una perspectiva estructural, esta capacidad resulta particularmente relevante en contextos de amenaza sísmica. Después de un evento, un sistema integrado podría ayudar a organizar la información disponible, comparar respuestas registradas y priorizar inspecciones. A largo plazo, los datos acumulados podrían contribuir a mejorar modelos y estrategias de gestión.

No obstante, es necesario mantener una distinción fundamental entre **predicción** y **decisión**. Un sistema puede estimar probabilidades o identificar tendencias, pero la decisión final debe considerar incertidumbres, consecuencias y criterios profesionales.

5.5. Límites, escalabilidad y gobernanza de los gemelos digitales

El desarrollo de gemelos digitales plantea importantes expectativas, pero también exige reconocer sus límites. Una de las principales dificultades consiste en la tendencia a

proponer sistemas tecnológicamente complejos sin una definición suficientemente clara del problema que pretenden resolver.

Un gemelo digital puede incorporar sensores, modelos de alta resolución, inteligencia artificial y plataformas de visualización. Sin embargo, si la información generada no modifica o mejora una decisión concreta, la complejidad tecnológica puede convertirse en un costo sin un beneficio proporcional.

Por ello, la implementación debe basarse en el principio de **proporcionalidad tecnológica**: el nivel de complejidad debe ser coherente con la criticidad del activo, los riesgos existentes y el valor de la información obtenida.

Una estrategia escalable podría organizarse en tres niveles:

Nivel 1. Representación digital informada

Incluye modelos BIM o digitales, información documental organizada y actualizaciones periódicas basadas en inspecciones.

Nivel 2. Gemelo digital conectado

Incorpora adquisición automatizada de datos y mecanismos de actualización relacionados con variables relevantes de comportamiento.

Nivel 3. Gemelo digital inteligente

Integra datos, modelos, simulación y analítica avanzada para apoyar decisiones predictivas y adaptativas.

Esta clasificación permite evitar una visión binaria según la cual una infraestructura «tiene» o «no tiene» un gemelo digital. En realidad, la madurez puede desarrollarse progresivamente.

Asimismo, la gobernanza de los datos constituye una condición indispensable. Los sistemas conectados plantean interrogantes sobre propiedad, acceso, calidad, seguridad y responsabilidad. En el caso de infraestructuras críticas, estos aspectos

adquieren una importancia adicional debido a los riesgos asociados con la manipulación o pérdida de información.

Las revisiones recientes sobre gemelos digitales para infraestructura identifican la interoperabilidad, el costo de implementación, la ciberseguridad y la preparación de la fuerza laboral como algunas de las principales barreras para su adopción generalizada.

Por ello, la transformación digital requiere una visión institucional y profesional. La tecnología debe estar acompañada por protocolos, competencias y responsabilidades claramente definidas.

CAPÍTULO 6

INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0: MARCO INTEGRADOR, IMPLEMENTACIÓN Y PROYECCIÓN PROFESIONAL

Los capítulos precedentes han mostrado que la transformación de la ingeniería estructural no depende de una única innovación tecnológica. El diseño sísmico y basado en desempeño proporciona el fundamento para comprender la seguridad y el comportamiento de las estructuras; BIM contribuye a organizar la información durante las diferentes etapas del proyecto; el monitoreo estructural permite observar el comportamiento del activo; la inteligencia artificial amplía la capacidad para analizar datos complejos; y los gemelos digitales ofrecen una posibilidad de integración entre los sistemas físicos y digitales.

Sin embargo, la coexistencia de estas herramientas no garantiza, por sí sola, una transformación efectiva. La literatura sobre gemelos digitales en construcción ha mostrado que el sector continúa enfrentando problemas de fragmentación, interoperabilidad y limitada integración de la información a lo largo del ciclo de vida (Boje et al., 2020; Opoku et al., 2021; AlBalkhy et al., 2024). En consecuencia, el desafío contemporáneo consiste en superar la adopción aislada de tecnologías para construir sistemas capaces de conectar conocimiento físico, información digital, observación del comportamiento y toma de decisiones.

Este capítulo propone, en ese contexto, el concepto de **Ingeniería Estructural 5.0** como un marco integrador. La propuesta no pretende establecer una nueva disciplina independiente ni sustituir los fundamentos tradicionales de la ingeniería estructural. Su propósito es articular las capacidades digitales emergentes con principios que deben permanecer centrales: **seguridad, responsabilidad profesional, centralidad humana, resiliencia y sostenibilidad**.

La idea se encuentra conceptualmente alineada con la evolución hacia paradigmas tecnológicos centrados en las personas y en la integración responsable de sistemas

inteligentes. En el ámbito de la construcción, investigaciones recientes también han comenzado a trasladar estos principios hacia enfoques de *Construction 5.0*, destacando la necesidad de complementar la automatización con interacción humano-sistema, sostenibilidad y capacidad adaptativa (Soman et al., 2025; Ohueri, 2026).

Por tanto, la tesis central de este capítulo es que **la Ingeniería Estructural 5.0 no se define por la cantidad de tecnologías empleadas, sino por la calidad de su integración y por su capacidad para mejorar las decisiones que afectan la seguridad y el desempeño de las infraestructuras.**

6.1. HACIA UNA DEFINICIÓN DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

La evolución digital de la ingeniería ha estado acompañada por una progresiva incorporación de modelos computacionales, automatización, sensores y sistemas de información. No obstante, la transformación digital del entorno construido continúa siendo desigual. Las investigaciones sobre gemelos digitales muestran que muchas aplicaciones permanecen concentradas en fases específicas del ciclo de vida y que la conexión efectiva entre diseño, construcción, operación y mantenimiento constituye todavía un desafío relevante (Opoku et al., 2021; Su et al., 2023).

A partir de esta realidad, la **Ingeniería Estructural 5.0**, como propuesta conceptual de este libro, puede definirse como:

Un enfoque integrado de la ingeniería estructural que combina conocimiento físico, tecnologías digitales, datos del ciclo de vida e inteligencia computacional para fortalecer la seguridad, la resiliencia, la sostenibilidad y la calidad de las decisiones, manteniendo al profesional y a las personas como elementos centrales del sistema.

Esta definición introduce una diferencia fundamental respecto de una interpretación exclusivamente tecnológica. El concepto «5.0» no debe reducirse a la incorporación de software más avanzado o a la automatización creciente de los procesos. Su significado reside en la **reorientación de la tecnología hacia finalidades estructurales y sociales explícitas.**

En este sentido, la tecnología debe responder a una pregunta previa a su implementación: **¿qué problema de ingeniería permite comprender, gestionar o resolver mejor?**. Esta lógica es especialmente importante en estructuras, donde una decisión puede tener consecuencias directas sobre la seguridad de las personas y la continuidad de servicios esenciales.

La definición propuesta se sustenta en cinco principios interdependientes.

1. Seguridad y desempeño estructural

La seguridad continúa siendo el núcleo de la disciplina. Los sistemas digitales deben ampliar la capacidad para comprender y gestionar el comportamiento estructural, pero no reemplazar los principios físicos ni el análisis ingenieril.

2. Centralidad humana

La automatización debe fortalecer las capacidades del ingeniero y de los demás actores involucrados en el ciclo de vida. La investigación reciente sobre sistemas digitales centrados en las personas en construcción enfatiza que la interacción efectiva entre usuarios, datos y sistemas inteligentes es determinante para convertir la información digital en apoyo real para la decisión (Soman et al., 2025).

3. Continuidad de la información

La información generada durante el diseño no debería perder su utilidad al iniciar la construcción u operación. La literatura sobre gemelos digitales y BIM ha identificado precisamente la continuidad semántica y la interoperabilidad como condiciones necesarias para avanzar hacia una gestión integrada del activo (Boje et al., 2020; Tuhaise et al., 2023).

4. Resiliencia y adaptación

Las estructuras se encuentran expuestas a incertidumbre, deterioro y eventos extremos. Por ello, la transformación digital debe contribuir no solamente a incrementar la eficiencia, sino también a mejorar la capacidad de detectar cambios, aprender de los eventos y apoyar respuestas adaptativas.

5. Sostenibilidad durante el ciclo de vida

Una infraestructura estructural debe evaluarse más allá de su fase de diseño. La información digital y los sistemas de monitoreo pueden contribuir a optimizar intervenciones, reducir acciones innecesarias y mejorar el conocimiento sobre el comportamiento real del activo. Sin embargo, estos beneficios dependen de que la tecnología se integre a objetivos explícitos de gestión y no se implemente como un fin en sí misma.

6.2. EL MODELO INTEGRADOR DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

La principal contribución conceptual de este capítulo es la formulación de un modelo integrador para la Ingeniería Estructural 5.0. Este modelo se construye a partir de la convergencia de las líneas tecnológicas examinadas en los capítulos anteriores y de los marcos desarrollados en la literatura sobre BIM, gemelos digitales y sistemas ciberfísicos.

Diversas investigaciones coinciden en que un gemelo digital funcional requiere más que una representación virtual. Chiachío et al. (2022), por ejemplo, proponen para la ingeniería estructural un marco que incorpora simulación, aprendizaje y gestión, articulando las interacciones entre las contrapartes física y digital. Del mismo modo, las revisiones de Boje et al. (2020) y Su et al. (2023) destacan la necesidad de integrar modelos de información, datos, simulación y mecanismos de decisión durante el ciclo de vida.

Sobre esta base, se propone un modelo organizado en **seis capas funcionales**.

Capa 1. Fundamento físico y normativo

Esta capa constituye el núcleo de la ingeniería. Comprende la mecánica estructural, la dinámica, el diseño sísmico, el análisis de incertidumbre, los criterios de desempeño y los marcos normativos.

La digitalización no elimina la necesidad de modelos físicos. Por el contrario, el incremento en la disponibilidad de datos hace aún más importante contar con fundamentos capaces de distinguir entre patrones físicamente plausibles y resultados que

pueden responder a errores de medición o correlaciones espurias. Por ello, la información computacional debe interpretarse dentro del dominio de conocimiento de la ingeniería estructural.

Capa 2. Modelo de información

La segunda capa organiza la identidad digital del activo. Incluye modelos BIM, propiedades geométricas y materiales, documentación técnica e información asociada con los componentes.

Esta función resulta esencial porque los datos obtenidos durante la operación adquieren mayor utilidad cuando pueden relacionarse con elementos estructurales específicos. La investigación sobre gemelos digitales en construcción reconoce a BIM como uno de los principales mecanismos de representación y organización de información, aunque también advierte que la transición hacia un gemelo digital requiere superar la condición estática de muchos modelos convencionales (Opoku et al., 2021; Tuhaise et al., 2023).

Capa 3. Observación y adquisición de datos

Esta capa conecta el modelo digital con la realidad física. Incluye sensores, sistemas de monitoreo, inspecciones, levantamientos y otros mecanismos para registrar información sobre la condición y respuesta de la estructura.

Su pregunta central es:

¿Qué está ocurriendo realmente en el activo?

La importancia de esta capa radica en que permite contrastar el comportamiento esperado con la evidencia observada. Sin embargo, la adquisición de datos debe responder a objetivos de ingeniería previamente definidos. La instrumentación indiscriminada puede incrementar el volumen de información sin mejorar necesariamente la comprensión del sistema.

Capa 4. Análisis e inteligencia

Los datos requieren ser transformados en información interpretable. En esta capa se integran modelos numéricos, procedimientos estadísticos, algoritmos de inteligencia artificial y métodos de aprendizaje.

La literatura sobre gemelos digitales estructurales reconoce la simulación y el aprendizaje como atributos centrales de sistemas capaces de evolucionar en relación con el comportamiento de su contraparte física (Chiachío et al., 2022). Sin embargo, la inteligencia computacional debe considerarse un mecanismo de apoyo y no una fuente autónoma e incuestionable de verdad. La validación y la coherencia física siguen siendo requisitos indispensables.

Capa 5. Decisión y acción

Esta capa constituye el punto de convergencia del sistema. Los resultados deben transformarse en decisiones relacionadas con inspección, mantenimiento, reparación, restricción de uso o actualización de modelos.

La existencia de una predicción no equivale a una decisión. Un sistema puede identificar una posible anomalía, pero corresponde al proceso de ingeniería evaluar la confiabilidad de la evidencia, las consecuencias del error y las alternativas disponibles.

Capa 6. Aprendizaje y retroalimentación

Finalmente, las decisiones y sus resultados generan nueva información. Las inspecciones confirman o descartan hipótesis; las reparaciones proporcionan evidencia sobre mecanismos de deterioro; y los eventos extremos permiten contrastar las predicciones con el comportamiento real.

Esta lógica de retroalimentación es consistente con el potencial atribuido a los gemelos digitales para conectar el activo físico, la información y la actualización progresiva del conocimiento durante el ciclo de vida (Su et al., 2023; AlBalkhy et al., 2024).

En conjunto, el modelo propuesto puede sintetizarse mediante el siguiente ciclo:

Comprender → Modelar → Observar → Analizar → Decidir → Aprender → Actualizar.

Síntesis parcial

El modelo de Ingeniería Estructural 5.0 no plantea una secuencia tecnológica lineal, sino un sistema de retroalimentación. Su valor depende de las conexiones entre sus capas: los fundamentos físicos orientan el análisis; el modelo de información contextualiza los datos; la observación proporciona evidencia; y el aprendizaje permite actualizar progresivamente el conocimiento sobre la estructura.

6.3. CENTRALIDAD HUMANA: EL INGENIERO COMO INTÉRPRETE, SUPERVISOR Y RESPONSABLE

Uno de los riesgos de la transformación digital consiste en asumir que una mayor automatización implica necesariamente una menor necesidad de participación humana. Esta premisa resulta particularmente problemática en ingeniería estructural, donde las decisiones se desarrollan bajo incertidumbre y pueden tener consecuencias significativas sobre la seguridad pública.

Los sistemas inteligentes pueden procesar grandes volúmenes de información y reconocer patrones que resultarían difíciles de identificar manualmente. Sin embargo, su capacidad de cálculo no equivale automáticamente a comprensión del contexto. La literatura reciente sobre sistemas humano-céntricos en construcción ha comenzado a enfatizar la necesidad de diseñar interfaces y mecanismos de interacción que permitan convertir las capacidades digitales en un apoyo efectivo para las personas responsables de las decisiones (Soman et al., 2025; Ohueri, 2026).

En consecuencia, la centralidad humana en la Ingeniería Estructural 5.0 debe entenderse como un principio operativo y no únicamente ético. El ingeniero necesita mantener la capacidad de:

- comprender los datos que alimentan un modelo;
- conocer los supuestos que condicionan sus resultados;

- identificar situaciones fuera del dominio de aplicación;
- evaluar la incertidumbre;
- y asumir la responsabilidad de las decisiones críticas.

Esta idea es particularmente relevante para la inteligencia artificial. Un algoritmo puede clasificar señales o detectar anomalías, pero el resultado debe ser interpretado dentro del comportamiento esperado de la estructura. La supervisión profesional se vuelve, por tanto, más importante a medida que aumenta la complejidad del sistema.

El diseño de la interacción humano-sistema también influye en la utilidad de las plataformas digitales. Soman et al. (2025) señalan que las interfaces constituyen un elemento estratégico para permitir la interacción entre usuarios y sistemas de gemelos digitales, particularmente cuando los datos y las decisiones deben circular en ambos sentidos.

Por ello, el principio de centralidad humana puede expresarse mediante una idea fundamental:

La automatización debe reducir la carga cognitiva innecesaria, no eliminar la comprensión necesaria para ejercer responsabilidad profesional.

Implicancias para la formación profesional

La formación del ingeniero estructural debe evolucionar de manera interdisciplinaria. El profesional no necesita convertirse simultáneamente en especialista en programación, ciencia de datos y todas las plataformas digitales; sin embargo, sí debe desarrollar una alfabetización suficiente para comprender las posibilidades y limitaciones de estas herramientas.

Esto implica fortalecer la capacidad de formular preguntas de ingeniería, evaluar resultados y comunicarse con especialistas de diferentes áreas. La competencia central no será únicamente operar una tecnología, sino **integrar conocimiento estructural con información digital y juicio profesional**.

6.4. RUTA DE IMPLEMENTACIÓN: DE LA DIGITALIZACIÓN FRAGMENTADA A LA INTEGRACIÓN INTELIGENTE

La transición hacia una Ingeniería Estructural 5.0 no debe plantearse como una adopción inmediata de todas las tecnologías disponibles. Las organizaciones presentan diferentes capacidades, tipos de proyectos y niveles de madurez digital. Además, la evidencia disponible muestra que la implementación de gemelos digitales en el entorno construido continúa enfrentando barreras relacionadas con interoperabilidad, integración de datos y condiciones organizacionales (AlBalkhy et al., 2024; Tuhaise et al., 2023).

Por ello, se propone una ruta gradual de cuatro etapas.

Etapa 1. Digitalización básica y ordenamiento de la información

La primera condición para una transformación sostenible es disponer de información confiable y organizada. En esta etapa se priorizan:

- estandarización de documentación;
- modelos digitales consistentes;
- protocolos de nomenclatura;
- gestión de versiones;
- capacitación en procesos colaborativos.

El objetivo es reducir la fragmentación. La incorporación prematura de sistemas avanzados sobre una base informacional desordenada puede amplificar los problemas existentes.

Etapa 2. Integración de datos y continuidad del ciclo de vida

Una vez consolidada la información básica, el siguiente paso consiste en establecer relaciones entre diferentes fuentes de datos. Las revisiones sobre gemelos digitales destacan que la integración entre modelos digitales, almacenamiento de datos y mecanismos de comunicación constituye un requisito fundamental para superar aplicaciones aisladas (Boje et al., 2020; Su et al., 2023).

En esta fase pueden implementarse repositorios comunes, registros digitales de inspección y mecanismos de interoperabilidad entre plataformas.

Etapas 3. Monitoreo y análisis avanzado

La tercera etapa incorpora información sobre el comportamiento real del activo. La selección de sensores y métodos analíticos debe responder a preguntas concretas: ¿qué variable necesita observarse?, ¿qué decisión podría modificarse con esta información?, ¿cuál es el costo de no conocerla?

Este principio evita la acumulación indiscriminada de datos. El valor de un sistema de monitoreo depende de su capacidad para reducir incertidumbres relevantes.

Etapas 4. Integración mediante gemelos digitales

La etapa de mayor madurez busca conectar modelos, datos y procesos de decisión dentro de un ciclo de retroalimentación. Los marcos desarrollados para gemelos digitales estructurales muestran el potencial de combinar comunicación entre las contrapartes física y digital, simulación y mecanismos de aprendizaje para apoyar la gestión de la integridad estructural (Chiachío et al., 2022).

No obstante, alcanzar esta etapa no significa necesariamente construir un sistema completamente autónomo. En el ámbito estructural, la automatización debe estar condicionada por la criticidad de las decisiones. En muchos casos, un sistema semiautomatizado con supervisión profesional puede ser más apropiado que un proceso completamente automatizado.

Principio de implementación

Cada incremento en complejidad tecnológica debe justificar su contribución. Por ello:

Digitalizar no es necesariamente transformar; transformar significa mejorar una capacidad de ingeniería o una decisión relevante.

6.5. ESCALABILIDAD DEL MODELO Y APLICACIONES ESTRATÉGICAS

Una condición fundamental para que la Ingeniería Estructural 5.0 tenga aplicabilidad real es reconocer que no todas las estructuras requieren el mismo nivel de digitalización. La literatura sobre gemelos digitales en el entorno construido advierte que su implementación todavía se encuentra en una fase relativamente temprana y que los desafíos técnicos y organizacionales pueden limitar la adopción indiscriminada de sistemas complejos (AlBalkhy et al., 2024).

Por tanto, se propone el principio de **proporcionalidad tecnológica**: la complejidad del sistema debe corresponder con la criticidad del activo, el riesgo asociado con su falla y el valor de la información que se espera obtener.

Nivel básico: infraestructura digital organizada

Adecuado para activos convencionales. Puede incorporar modelos BIM, documentación estructurada y registros digitales de inspección y mantenimiento.

El objetivo principal consiste en preservar la continuidad de la información y facilitar la trazabilidad.

Nivel intermedio: integración y monitoreo selectivo

Está orientado a estructuras donde la información sobre su comportamiento puede modificar decisiones relevantes. Puede incluir monitoreo de componentes críticos, análisis de datos y actualización periódica del modelo.

Nivel avanzado: sistema estructural conectado e inteligente

Se encuentra orientado especialmente hacia infraestructuras críticas, estratégicas o sometidas a condiciones de riesgo elevadas. En este nivel pueden integrarse monitoreo continuo, simulación, inteligencia artificial y gemelos digitales.

La necesidad de una implementación contextualizada también se desprende de la investigación reciente sobre tecnologías digitales en construcción. Wang et al. (2026) identifican que BIM, inteligencia artificial y sensores forman un núcleo de tecnologías

interrelacionadas, pero advierten que el impacto práctico depende de la capacidad para conectar los avances tecnológicos con las necesidades reales de los procesos constructivos.

Aplicaciones estratégicas

El modelo propuesto puede resultar especialmente relevante en:

- hospitales y edificaciones esenciales;
- puentes y sistemas de transporte;
- infraestructura expuesta a elevada amenaza sísmica;
- instalaciones industriales estratégicas;
- edificios de gran complejidad estructural;
- infraestructura existente que requiere una gestión intensiva de su condición.

En estos contextos, la disponibilidad de información integrada puede contribuir a priorizar inspecciones y orientar recursos hacia los componentes o condiciones que presentan mayor incertidumbre o riesgo.

Sin embargo, es importante enfatizar que **una mayor cantidad de tecnología no equivale necesariamente a una mayor seguridad**. La seguridad depende de la calidad del diseño, de la construcción, del mantenimiento y de las decisiones tomadas durante el ciclo de vida. La tecnología puede mejorar la información disponible, pero no sustituye la calidad de la ingeniería.

6.6. AGENDA FUTURA DE INVESTIGACIÓN PARA LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

La convergencia entre ingeniería estructural y tecnologías digitales abre una agenda científica amplia. Las revisiones recientes sobre gemelos digitales muestran que, pese al crecimiento acelerado de la investigación, persisten problemas relacionados con

interoperabilidad, definición conceptual, validación, integración del ciclo de vida y gobernanza de los sistemas (AlBalkhy et al., 2024; Su et al., 2023).

Sobre esta base, se identifican seis líneas prioritarias.

1. Inteligencia artificial informada por la física

Una prioridad consiste en avanzar desde modelos exclusivamente correlacionales hacia sistemas que integren principios físicos y conocimiento estructural. El objetivo no es rechazar los métodos basados en datos, sino mejorar su capacidad de generalización e interpretación.

2. Cuantificación y comunicación de la incertidumbre

Los sistemas inteligentes destinados a apoyar decisiones estructurales deben comunicar no solamente una predicción, sino también las condiciones y limitaciones asociadas con ella. Esta necesidad es particularmente importante cuando los resultados pueden desencadenar intervenciones costosas o decisiones relacionadas con la seguridad.

3. Validación de gemelos digitales estructurales

La fidelidad de un modelo debe evaluarse de acuerdo con la decisión que pretende apoyar. Un gemelo digital utilizado para visualización no requiere el mismo nivel de validación que uno destinado a apoyar decisiones sobre integridad estructural. Los trabajos sobre gemelos digitales estructurales han comenzado a desarrollar marcos funcionales que vinculan simulación, aprendizaje y gestión, pero la validación continúa siendo un campo prioritario para la consolidación de estas aplicaciones (Chiachío et al., 2022).

4. Interoperabilidad y continuidad semántica

La pérdida de significado de la información entre plataformas y fases del ciclo de vida continúa siendo una limitación. Boje et al. (2020) identifican la dimensión semántica como un elemento central para avanzar hacia gemelos digitales capaces de integrar datos heterogéneos.

5. Gobernanza, transparencia y responsabilidad

La creciente utilización de sistemas conectados plantea interrogantes sobre propiedad de los datos, ciberseguridad, transparencia de los algoritmos y responsabilidad ante decisiones apoyadas por sistemas automatizados. La investigación reciente también identifica la opacidad de ciertos modelos de inteligencia artificial y la soberanía de los datos como barreras relevantes para la evolución de ecosistemas digitales más avanzados (Moghimi et al., 2026).

6. Educación para la Ingeniería Estructural 5.0

La formación universitaria deberá fortalecer la capacidad para trabajar en entornos interdisciplinarios. Esto supone integrar, de manera progresiva, competencias relacionadas con:

- análisis y diseño estructural;
- modelamiento y gestión digital de información;
- monitoreo y adquisición de datos;
- fundamentos de ciencia de datos e inteligencia artificial;
- evaluación del ciclo de vida;
- ética y responsabilidad profesional.

La finalidad no es formar especialistas superficiales en múltiples herramientas, sino profesionales capaces de comprender las relaciones entre dominios y liderar procesos de integración tecnológica.

La agenda futura de investigación debe concentrarse en hacer que los sistemas digitales sean más confiables, explicables e interoperables. El progreso científico de la Ingeniería Estructural 5.0 dependerá menos de incorporar tecnologías adicionales que de resolver las brechas existentes entre datos, modelos físicos, decisiones y responsabilidad profesional.

CONCLUSIONES GENERALES

HACIA UNA INGENIERÍA ESTRUCTURAL INTELIGENTE, RESILIENTE Y CENTRADA EN LAS PERSONAS

El recorrido desarrollado a lo largo de este libro permite sostener que la ingeniería estructural atraviesa una transformación que va más allá de la incorporación progresiva de nuevas herramientas digitales. La convergencia entre diseño sísmico, modelamiento avanzado, Building Information Modeling (BIM), inteligencia artificial, gemelos digitales y monitoreo estructural está modificando la manera en que se genera, organiza, interpreta y utiliza la información durante el ciclo de vida de una infraestructura.

Sin embargo, la principal conclusión de esta obra es que la transformación tecnológica no constituye un fin en sí misma. Una estructura no es necesariamente más segura, resiliente o sostenible por incorporar sensores, algoritmos o modelos digitales. El verdadero valor de estas tecnologías depende de su capacidad para fortalecer el conocimiento sobre el comportamiento estructural y, sobre todo, para mejorar las decisiones tomadas por los profesionales responsables de su diseño, construcción, operación y mantenimiento.

Desde esta perspectiva, el concepto de Ingeniería Estructural 5.0 propuesto en este libro constituye un marco integrador orientado a superar la visión fragmentada de la transformación digital. Su finalidad es conectar el conocimiento físico tradicional de la ingeniería con las capacidades emergentes de los sistemas digitales, manteniendo como principios rectores la seguridad, la resiliencia, la sostenibilidad y la responsabilidad humana.

Las conclusiones que siguen no pretenden cerrar definitivamente el debate sobre el futuro de la disciplina. Por el contrario, sintetizan los principales aprendizajes

derivados de la articulación de los seis capítulos y establecen una base para la evolución futura de la investigación, la formación y la práctica profesional.

1. LA TRANSFORMACIÓN DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL DEBE PARTIR DE SUS FUNDAMENTOS, NO DE LA TECNOLOGÍA

La primera conclusión fundamental es que la evolución hacia una ingeniería estructural digitalmente avanzada no implica abandonar los principios que históricamente han sustentado la disciplina. La mecánica estructural, la dinámica, la ingeniería sísmica y el análisis de incertidumbre continúan siendo indispensables para comprender el comportamiento de las estructuras.

Las tecnologías emergentes amplían la capacidad para procesar información, explorar escenarios y observar el comportamiento real de los activos. Sin embargo, los datos por sí mismos no explican necesariamente los fenómenos físicos. Un sistema inteligente puede identificar patrones; un modelo digital puede representar una estructura; y un sensor puede registrar una respuesta. No obstante, corresponde al conocimiento ingenieril establecer la relación entre estos elementos, evaluar su plausibilidad y determinar su relevancia para la seguridad.

Por ello, la transformación digital debe construirse sobre una premisa fundamental: la tecnología debe ampliar la ingeniería, no sustituirla. La capacidad de comprender los mecanismos físicos seguirá siendo necesaria incluso en escenarios caracterizados por una creciente automatización.

2. EL DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESEMPEÑO OFRECE UNA LÓGICA COMPATIBLE CON LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL

La evolución del diseño sísmico desde enfoques predominantemente prescriptivos hacia una consideración explícita del desempeño representa uno de los fundamentos conceptuales más importantes para la ingeniería estructural contemporánea. Este cambio desplaza parcialmente la atención desde el simple cumplimiento de requisitos hacia la

pregunta fundamental sobre cómo se espera que una estructura responda frente a diferentes niveles de demanda.

Esta lógica es particularmente compatible con las tecnologías digitales. BIM puede organizar información sobre los componentes que participan en la respuesta; el monitoreo estructural puede proporcionar evidencia sobre el comportamiento real; la inteligencia artificial puede ampliar las capacidades de análisis; y los gemelos digitales pueden contribuir a integrar modelos y datos durante el ciclo de vida.

En consecuencia, el desempeño constituye un puente conceptual entre la ingeniería estructural tradicional y la digitalización. Mientras el diseño establece expectativas sobre el comportamiento, las tecnologías emergentes abren la posibilidad de contrastar, actualizar y gestionar dichas expectativas a partir de nueva información.

3. BIM debe entenderse como una infraestructura de información y no únicamente como una herramienta de modelamiento

Una de las conclusiones centrales del análisis desarrollado es que BIM alcanza su mayor potencial cuando deja de ser interpretado exclusivamente como una tecnología de representación geométrica. Su contribución estratégica reside en la capacidad para estructurar, relacionar y preservar información relevante sobre una infraestructura.

Esta función adquiere especial importancia dentro de la Ingeniería Estructural 5.0. La información generada durante el diseño puede adquirir un nuevo valor durante la construcción, la operación, el mantenimiento y la evaluación posterior a eventos extremos. La continuidad informacional permite reducir la pérdida de conocimiento que tradicionalmente ocurre cuando una infraestructura cambia de fase o de responsable.

No obstante, BIM no resuelve automáticamente los problemas de integración. La calidad del modelo, la interoperabilidad, los estándares de información y la gobernanza de los datos son condiciones necesarias para convertir un conjunto de modelos digitales en una verdadera infraestructura de conocimiento.

Por tanto, la adopción de BIM debe orientarse hacia la construcción de ecosistemas de información confiables y utilizables durante todo el ciclo de vida, y no únicamente hacia la producción de modelos visualmente sofisticados.

4. LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL DEBE EVOLUCIONAR HACIA UNA COLABORACIÓN CON EL CONOCIMIENTO FÍSICO

La inteligencia artificial representa una de las herramientas con mayor potencial para transformar la ingeniería estructural. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos puede resultar especialmente útil en problemas de monitoreo, detección de anomalías, reconocimiento de patrones, predicción y apoyo a la gestión.

Sin embargo, la incorporación de inteligencia artificial también plantea una advertencia fundamental: la capacidad predictiva no equivale necesariamente a comprensión física. Un algoritmo puede producir resultados aparentemente precisos dentro de un conjunto de datos determinado y, aun así, presentar limitaciones cuando las condiciones cambian o cuando se enfrenta a situaciones no representadas durante su entrenamiento.

En consecuencia, el futuro de la inteligencia artificial aplicada a estructuras no debería orientarse exclusivamente hacia modelos cada vez más complejos, sino hacia sistemas capaces de integrar datos con principios físicos, incertidumbre y mecanismos de interpretación.

La Ingeniería Estructural 5.0 propone, por ello, una relación de complementariedad: la inteligencia artificial amplía la capacidad del ingeniero para analizar información, mientras que el conocimiento estructural proporciona el contexto necesario para evaluar y utilizar sus resultados de manera responsable.

5. EL MONITOREO ESTRUCTURAL TRANSFORMA LA INFRAESTRUCTURA EN UNA FUENTE ACTIVA DE CONOCIMIENTO

Tradicionalmente, una parte importante de la información utilizada para tomar decisiones sobre una estructura se genera antes de su construcción. El monitoreo

estructural introduce una transformación significativa al permitir que la infraestructura continúe generando información durante su vida útil.

Esta capacidad puede reducir la distancia entre el comportamiento supuesto durante el diseño y la respuesta observada en condiciones reales. A partir de ello, es posible desarrollar procesos más informados para la inspección, el mantenimiento y la gestión de la integridad estructural.

Sin embargo, la disponibilidad de datos no garantiza automáticamente conocimiento. El desafío consiste en seleccionar variables relevantes, garantizar la calidad de las mediciones y desarrollar procedimientos que permitan distinguir entre variaciones normales, cambios ambientales, ruido y posibles indicadores de deterioro.

La principal aportación del monitoreo no reside, por tanto, en la cantidad de sensores instalados, sino en su capacidad para responder preguntas concretas de ingeniería. Una estrategia de monitoreo debe diseñarse a partir de decisiones que se pretende mejorar y no simplemente a partir de la disponibilidad tecnológica.

6. EL GEMELO DIGITAL REPRESENTA UNA OPORTUNIDAD DE INTEGRACIÓN, PERO NO DEBE REDUCIRSE A UNA RÉPLICA VISUAL

El análisis desarrollado en este libro permite concluir que el concepto de gemelo digital representa una de las mayores oportunidades para integrar las capacidades tecnológicas actualmente disponibles. Su potencial reside en establecer una relación dinámica entre la infraestructura física, sus representaciones digitales, los datos observados y los procesos de análisis.

No obstante, el término debe utilizarse con rigor. Una representación tridimensional, incluso cuando contiene información detallada, no constituye necesariamente un gemelo digital. Para que exista una verdadera capacidad de integración, deben establecerse conexiones significativas entre el activo físico, los datos y los modelos utilizados para apoyar la comprensión y la toma de decisiones.

El gemelo digital debe entenderse, entonces, como un sistema evolutivo de conocimiento, cuya complejidad depende de la función que debe cumplir. No todas las estructuras requieren el mismo nivel de integración ni el mismo grado de actualización en tiempo real.

Esta conclusión conduce a un principio esencial: la fidelidad y complejidad de un gemelo digital deben ser proporcionales a la criticidad de las decisiones que se pretende apoyar.

7. LA INTEGRACIÓN CONSTITUYE EL PRINCIPAL DESAFÍO Y LA PRINCIPAL OPORTUNIDAD DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL 5.0

A lo largo de la obra se ha evidenciado que BIM, inteligencia artificial, monitoreo estructural y gemelos digitales poseen un considerable potencial individual. Sin embargo, la mayor transformación surge cuando estas tecnologías dejan de funcionar como sistemas aislados.

La Ingeniería Estructural 5.0 se plantea precisamente como una respuesta a este problema de fragmentación. El modelo integrador propuesto articula seis dimensiones: fundamento físico y normativo, modelo de información, observación y adquisición de datos, análisis e inteligencia, decisión y acción, y aprendizaje y retroalimentación.

Esta arquitectura permite comprender que el valor no se encuentra exclusivamente en cada componente, sino en las relaciones entre ellos. Los fundamentos físicos orientan la interpretación; el modelo digital proporciona contexto; el monitoreo aporta evidencia; la inteligencia amplía la capacidad analítica; y el proceso de decisión transforma la información en acciones concretas.

La secuencia propuesta —comprender, modelar, observar, analizar, decidir, aprender y actualizar— sintetiza una nueva lógica para la gestión estructural. La infraestructura deja de ser concebida únicamente como un objeto diseñado y construido para convertirse también en un sistema del cual es posible aprender de manera progresiva.

8. LA CENTRALIDAD HUMANA ES UN REQUISITO PARA UNA TRANSFORMACIÓN TECNOLÓGICA RESPONSABLE

Una de las conclusiones más importantes de esta obra es que el avance hacia sistemas estructurales inteligentes no disminuye la importancia del profesional. Por el contrario, la creciente complejidad de los sistemas digitales puede incrementar la necesidad de juicio, interpretación y responsabilidad.

La Ingeniería Estructural 5.0 sitúa al ser humano en el centro de la transformación. Esto implica reconocer que las decisiones relacionadas con seguridad, intervención y gestión del riesgo no deben transferirse acríticamente a sistemas automatizados.

El ingeniero del futuro deberá asumir nuevas funciones: interpretar resultados producidos por algoritmos, evaluar incertidumbres, supervisar sistemas automatizados y establecer límites para su utilización. La competencia profesional se desplazará progresivamente desde el dominio aislado de herramientas hacia la capacidad para integrar conocimientos y tomar decisiones en entornos interdisciplinarios.

Por tanto, la automatización debe entenderse como un mecanismo para fortalecer la capacidad humana, reducir tareas repetitivas y ampliar el acceso a información relevante, sin eliminar la responsabilidad asociada con las decisiones críticas.

9. LA RESILIENCIA Y LA SOSTENIBILIDAD DEBEN CONVERTIRSE EN CRITERIOS DE INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA

La transformación digital ofrece oportunidades para mejorar la eficiencia, pero su contribución debe evaluarse desde objetivos más amplios. Las estructuras enfrentan amenazas naturales, deterioro, incertidumbres operativas y los efectos de condiciones ambientales cambiantes.

En este contexto, la resiliencia exige la capacidad para anticipar, resistir, responder y aprender. Las tecnologías digitales pueden contribuir a estas capacidades mediante una mejor comprensión de la condición de las estructuras, la detección temprana de cambios y el fortalecimiento de los procesos de toma de decisiones.

Asimismo, la sostenibilidad requiere una visión de ciclo de vida. Una infraestructura sostenible no depende exclusivamente de reducir los impactos asociados con su construcción, sino también de prolongar su vida útil de manera segura, evitar intervenciones innecesarias y gestionar eficientemente los recursos durante su operación.

La tecnología adquiere así una función estratégica cuando permite vincular decisiones estructurales con objetivos de resiliencia y sostenibilidad. El criterio de éxito no debe ser la cantidad de información generada, sino la capacidad para utilizarla en favor de una infraestructura más segura, durable y responsable.

10. LA IMPLEMENTACIÓN DEBE SER GRADUAL, CONTEXTUALIZADA Y PROPORCIONAL

No todas las organizaciones ni todas las infraestructuras cuentan con las mismas necesidades y capacidades. Por ello, uno de los principales riesgos consiste en presentar la transformación digital como un modelo único que debe ser adoptado de manera uniforme.

La Ingeniería Estructural 5.0 requiere una implementación progresiva. El punto de partida debe ser la identificación de problemas concretos de ingeniería y gestión. Posteriormente, deben construirse capacidades de información, interoperabilidad y análisis antes de avanzar hacia sistemas más complejos.

Esta lógica permite reconocer distintos niveles de madurez. Una organización puede obtener beneficios importantes mediante la estructuración de información y la digitalización de sus procesos, sin necesidad de implementar inmediatamente un gemelo digital completamente conectado o sistemas avanzados de inteligencia artificial.

El principio rector debe ser la proporcionalidad tecnológica: la complejidad de la solución debe justificarse por el valor que aporta a la seguridad, la gestión o el desempeño del activo.

REFLEXIONES FINALES

El principal aporte conceptual de este libro consiste en proponer la Ingeniería Estructural 5.0 como una visión integradora para orientar la convergencia entre ingeniería estructural y transformación digital.

Esta propuesta parte de una premisa sencilla, pero fundamental: el futuro de la ingeniería estructural no será determinado únicamente por las tecnologías que incorpore, sino por la manera en que estas tecnologías se integren con el conocimiento físico, la responsabilidad profesional y las necesidades de la sociedad.

BIM puede organizar la información; los sensores pueden observar el comportamiento; la inteligencia artificial puede analizar patrones; y los gemelos digitales pueden articular estas capacidades en sistemas dinámicos. Sin embargo, ninguna de estas tecnologías constituye una solución independiente. Su verdadero potencial surge cuando contribuyen conjuntamente a mejorar la comprensión y la gestión de las estructuras.

La Ingeniería Estructural 5.0 propone, en consecuencia, superar una visión tecnológica fragmentada y avanzar hacia un paradigma basado en la integración. Se trata de construir un puente entre el conocimiento acumulado de la ingeniería y las capacidades emergentes de la era digital.

En este paradigma, la estructura deja de ser únicamente el resultado final de un proceso de diseño. Se convierte en parte de un ciclo continuo de conocimiento: se modela, se observa, se analiza y se aprende de ella durante toda su vida útil. No obstante, este proceso debe conservar una premisa irrenunciable: la tecnología debe permanecer al servicio de la seguridad y del bienestar humano.

El desafío para las próximas décadas no será simplemente diseñar estructuras más inteligentes. Será desarrollar una ingeniería capaz de utilizar la inteligencia —humana y artificial— para construir infraestructuras más seguras, resilientes, sostenibles y responsables.

La Ingeniería Estructural 5.0 no representa el reemplazo de la ingeniería por la tecnología. Representa la evolución de la ingeniería mediante una integración consciente, crítica y responsable de la tecnología.

Esta perspectiva constituye, finalmente, la invitación central de esta obra: comprender la transformación digital no como una ruptura con los fundamentos de la ingeniería estructural, sino como una oportunidad para fortalecerlos y proyectarlos hacia una nueva generación de infraestructuras y profesionales.

REFERENCIAS

- AlBalkhy, W., Karmaoui, D., Ducoulombier, L., Lafhaj, Z., & Linner, T. (2024).** Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges. *Automation in Construction*, 162, 105368.
- Ao, Y., Li, S., & Duan, H. (2025).** Artificial intelligence-aided design (AIAD) for structures and engineering: A state-of-the-art review and future perspectives. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32, 4197–4224. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10264-1>
- Azhar, S. (2011).** Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Bae, J., et al. (2025).** State-of-the-art artificial intelligence techniques in structural engineering: A review of applications and prospects. *Results in Engineering*, 28, 107882. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107882>
- Bao, Y., Sun, H., Xu, Y., Guan, X., Pan, Q., et al. (2025).** Recent advances in structural health diagnosis: A machine learning perspective. *Advances in Bridge Engineering*, 6, Article 7. <https://doi.org/10.1186/s43251-024-00155-z>
- Bhatta, S., & Dang, J. (2024).** Use of IoT for structural health monitoring of civil engineering structures: A state-of-the-art review. *Urban Lifeline*. <https://doi.org/10.1007/s44285-024-00031-2>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020).** Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021).** *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/308407>

- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013).** The project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- Cha, Y.-J., Ali, R., Lewis, J., & Büyüköztürk, O. (2024).** Deep learning-based structural health monitoring. *Automation in Construction*, 161, 105328. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105328>
- Chiachío, M., Megía, M., Chiachío, J., Fernandez, J., & Jalón, M. L. (2022).** Structural digital twin framework: Formulation and technology integration. *Automation in Construction*, 140, 104333. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104333>
- Cunha, B. Z., Droz, C., Zine, A.-M., Foulard, S., & Ichchou, M. (2023).** A review of machine learning methods applied to structural dynamics and vibroacoustic. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 200, 110535. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110535>
- Dong, B., Shahbaz, A., & Karavasilis, T. L. (2026).** Integration of cyber-physical systems and digital twins in structural engineering: Applications, challenges and future advancements. *Journal of Building Engineering*.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011).** *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors* (2nd ed.). Wiley.
- Fernández-Mora, V., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022).** Integration of the structural project into the BIM paradigm: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 53, 104318. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104318>
- Gomez-Cabrera, A., & Escamilla-Ambrosio, P. J. (2022).** Review of machine-learning techniques applied to structural health monitoring systems for building and bridge structures. *Applied Sciences*, 12(21), 10754. <https://doi.org/10.3390/app122110754>

- Gürdür Broo, D., Kaynak, O., & Sait, S. M. (2022).** Rethinking engineering education at the age of Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 25, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100311>
- Huang, J., Wu, P., Li, W., Zhang, J., & Xu, Y. (2024).** Exploring the applications of digital twin technology in enhancing sustainability in civil engineering: A review. *Structural Durability & Health Monitoring*, 18(5), 577–598. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.050338>
- Hjelmstad, K. D., et al. (2018).** Computational structural engineering: Past achievements and future challenges. *Frontiers in Built Environment*, 4, Article 21. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00021>
- Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., & Chen, K. (2021).** Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*, 130, Article 103838. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838>
- Karakostas, C., Quaranta, G., Chatzi, E., et al. (2024).** Seismic assessment of bridges through structural health monitoring: A state-of-the-art review. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 1309–1357.
- Kaveh, H., & Alhajj, R. (2025).** Advancing civil infrastructure with digital twins: A review of applications and challenges. *Journal of Civil Engineering and Management*. <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.24921>
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022).** Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 279–295. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>
- Li, H., Deng, H., & Deng, Y. (2025).** Towards worker-centric construction scene understanding: Status quo and future directions. *Automation in Construction*, 171, 106005. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106005>
- Liu, W. K., Li, S., & Park, H. S. (2022).** Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, 4431–4453. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>

- Long, W., Bao, Z., Chen, K., Ng, S. T., & Wuni, I. Y. (2023).** Developing an integrative framework for digital twin applications in the building construction industry: A systematic literature review. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102346>
- Lu, W., Lou, J., Ababio, B. K., Zhong, R. Y., Bao, Z., Li, X., et al. (2024).** Digital technologies for construction sustainability: Status quo, challenges, and future prospects. *Materials Sustainability*, 2, Article 10.
- Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., & Schooling, J. M. (2020).** Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. *Automation in Construction*, 118, 103277. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103277>
- Málaga-Chuquitaype, C. (2022).** Machine learning in structural design: An opinionated review. *Frontiers in Built Environment*, 8, 815717. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.815717>
- Murphy, J. D., Pak, H., Weng, Y., & German Paal, S. (2026).** Physics-informed machine learning in structural engineering: A scoping review and categorization of physics injection methods. *Journal of Structural Engineering*, 152(6). <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-15596>
- Müller, J. M. (2023).** Is Industry 5.0 a human-centred approach? A systematic review. *Processes*, 11(1), 193. <https://doi.org/10.3390/pr11010193>
- Nahavandi, S. (2019).** Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Nhamage, I. A., Horas, C. S., Dang, N.-S., Campos e Matos, J. A., & Martins, J. P. (2025).** Strategies for maximising the value of digital twins for bridge management and structural monitoring: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32, 4555–4586. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10280-1>

- Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021).** Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726.
- Ohueri, C. C. (2026).** Human digital twin for optimizing labor productivity in Construction 5.0. *Automation in Construction*, 183, 106800. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106800>
- Pregnotato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., De Risi, N., Carhart, N., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J., & Taylor, C. (2022).** Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
- Sakaris, C. S., et al. (2023).** Unsupervised learning methods for data-driven vibration-based structural health monitoring: A review. *Sensors*, 23(6), 3290.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018).** *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). Wiley.
- Soman, R. K., Farghaly, K., Mills, G., & Whyte, J. (2025).** Digital twin construction with a focus on human twin interfaces. *Automation in Construction*, 170, 105924. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105924>
- Succar, B. (2009).** Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- Su, S., Zhong, R. Y., Jiang, Y., Song, J., Fu, Y., & Cao, H. (2023).** Digital twin and its potential applications in construction industry: State-of-art review and a conceptual framework. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102030. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102030>

- Sun, H., Burton, H. V., & Huang, H. (2021).** Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 33, 101816. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101816>
- Sun, Z., Jayasinghe, S., Sidiq, A., Shahrivar, F., Mahmoodian, M., & Setunge, S. (2025).** Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A comprehensive review. *Sensors*, 25(1), 59. <https://doi.org/10.3390/s25010059>
- Sun, Z., et al. (2026).** Digital twin technology for structural lifecycle management and health monitoring. *Applied Sciences*, 16(13), 6524. <https://doi.org/10.3390/app16136524>
- Tanguay, X., & Amor, B. (2024).** Assessing the sustainability of a resilient built environment: Research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 458, 142437. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142437>
- Torzoni, M., Tezzele, M., Mariani, S., Manzoni, A., & Willcox, K. E. (2024).** A digital twin framework for civil engineering structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 418, 116584. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584>
- Tuhaise, V. V., Tah, J. H. M., & Abanda, F. H. (2023).** Technologies for digital twin applications in construction. *Automation in Construction*, 152, 104931.
- Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C. E., Rajabifard, A., & Acuto, M. (2022).** Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 5, 822–829
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014).** Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Wang, Z., Barak, R., Sacks, R., Yevu, S. K., Bentur, A., & Hadjidemetriou, G. M. (2026).** Construction productivity and digital technologies. *Automation in Construction*, 183, 106768.

- Xie, Y., Ebad Sichani, M., & Xiao, J. (2022).** Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review. *Structures*, 38, 448–491. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.003>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021).** Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., & Celar, S. (2023).** From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology. *Energies*, 16(2), 522. <https://doi.org/10.3390/en16020522>