

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA Y CULTURA DE CALIDAD: DESAFÍOS EN LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN LA INGENIERÍA CIVIL BAJO EL PARADIGMA DE LA CONSTRUCCIÓN 5.0

Jorge Lorenzo Fernández¹, Iván José Gómez Rojo², Héctor Crego Alejandro¹, Álvaro Rodríguez Martín¹, Ángel Sans González¹, Claudia Julián Manso¹

¹ Grupo Tecozam, Zamora, España, {jlorenzo, hector.crego, alvaro.rodriguez, angel.sans, claudia.julian}@tecozam.com

² Presidente de Grupo Tecozam, Zamora, España, ivanjgomez@tecozam.com

Resumen

El sector de la ingeniería civil y las grandes infraestructuras se enfrenta de manera inminente a la necesidad de transicionar desde enfoques de gestión tradicionales y lineales hacia modelos de gobernanza sistémicos, adaptativos y digitales englobados en la denominada Construcción 5.0. Este artículo analiza en profundidad los mecanismos avanzados de transferencia tecnológica (TT) y la consolidación de una cultura de calidad orientada a mitigar la entropía y la pérdida difusa de conocimiento en obra. Tomando como caso de estudio la experiencia del Grupo Tecozam, se introduce conceptualmente la Arquitectura de Inteligencia Recursiva (RIA) como un marco metodológico capaz de orquestar la integración vertical del know-how técnico desde las oficinas de diseño de I+D+i hasta la ejecución operativa a pie de tajo. Para validar el rendimiento y la eficiencia de estos mecanismos de asimilación tecnológica, se evalúan de manera empírica cinco megaproyectos internacionales de alta complejidad estructural mediante métricas operacionales avanzadas, tales como el Construction Flow Index (CFI) y el Technology Transfer Efficiency Index (TTEI). Los resultados demuestran que las organizaciones que implementan estructuras de aprendizaje recursivo logran mitigar de forma drástica los cuellos de botella informacionales, estabilizar los flujos de producción con eficiencias de transferencia superiores al 89% y consolidar el conocimiento tácito en activos tangibles de propiedad intelectual patentable. Finalmente, se desarrollan directrices estratégicas de estandarización bajo la norma ISO 56001, demostrando que la simbiosis entre la resiliencia tecnológica y la gobernanza basada en el conocimiento constituye el motor fundamental para la sostenibilidad y viabilidad a largo plazo de los proyectos de ingeniería civil.

Palabras Clave : Transferencia tecnológica, Gestión del conocimiento, Construcción 5.0, Arquitectura recursiva, ISO 56001.

1 Introducción y estado del arte

La industria de la construcción e ingeniería civil a nivel global se halla inmersa en una paradoja estructural. A pesar de representar uno de los motores macroeconómicos de mayor relevancia,

históricamente ha manifestado una resistencia sistémica hacia la adopción acelerada de innovaciones disruptivas, manteniendo tasas de crecimiento de productividad inferiores a las de la industria manufacturera. Los megaproyectos de infraestructura contemporáneos se clasifican metodológicamente como 'wicked problems' o problemas retorcidos, debido a la alta volatilidad de sus requisitos contextuales, la dispersión geográfica de las obras y la coexistencia de múltiples subcontratistas con niveles heterogéneos de madurez operativa. En este ecosistema hiperfragmentado, el verdadero producto final de un proyecto de ingeniería ya no es únicamente la infraestructura física construida, sino la densa capa de conocimiento técnico acumulado durante su ciclo de ejecución [1].

El principal vector de ineficiencia en el sector radica en la pérdida por evaporación del 'saber cómo' (know-how). Al concluir una obra, el aprendizaje derivado de la resolución de imprevistos geotécnicos, estructurales o logísticos tiende a dispersarse debido a la alta rotación de los equipos de trabajo y a la ausencia de mecanismos formales de captura y estructuración del conocimiento tácito. Para mitigar esta entropía organizativa, el nuevo paradigma de la Construcción 5.0 no se limita a la mera digitalización o automatización de procesos (propia de la Construcción 4.0), sino que sitúa la colaboración humano-máquina y la transferencia tecnológica basada en valores de conocimiento y calidad en el centro de la estrategia corporativa [2]. La transferencia tecnológica (TT) efectiva se postula, por tanto, como el canal metabólico que permite transformar las experiencias aisladas de pie de obra en competencias organizativas permanentes, escalables y estandarizadas.

1.1 El modelo organizativo e innovador del Grupo Tecozam

Grupo Tecozam se ha consolidado en el ámbito internacional como un referente tecnológico indiscutible dentro del sector de la construcción de alta complejidad, avalado por una trayectoria sólida de más de 23 años de experiencia en el mercado. La organización cuenta actualmente con un capital humano que supera los 1500 profesionales altamente cualificados y mantiene operaciones comerciales estables en 6 países, lo que le permite consolidar una facturación anual de 125 M€. Su cartera de actividades abarca el diseño y ejecución de infraestructuras viarias y ferroviarias de gran envergadura, obras hidráulicas de regulación y saneamiento, edificación singular de alta exigencia arquitectónica e industrial, y de manera muy especial, el desarrollo y construcción de estructuras complejas y viaductos especiales mediante tecnologías propias de encofrado y cimbras autolanzables.

La ventaja competitiva de Tecozam descansa sobre una decidida y sistemática apuesta por la innovación tecnológica formal, convirtiéndose en una de las pocas constructoras a nivel europeo en contar con la exigente certificación ISO 56001 (Sistema de Gestión de I+D+i), complementada con una robusta cartera activa que supera las 15 patentes de invención registradas. Esta filosofía innovadora se canaliza operativamente a través de un sistema integrado de gestión total que unifica los requisitos de excelencia de las normas internacionales ISO 9001 (Calidad), ISO 14001 (Medio Ambiente), ISO 45001 (Seguridad y Salud en el Trabajo) y la norma de compliance penal UNE 19601. Este blindaje normativo y procedimental asegura que cada mecanismo de innovación responda a un estándar estricto de calidad replicable en cualquier latitud geográfica donde el grupo opere.

2 Mecanismos analizados de transferencia tecnológica

En el seno de la ingeniería civil contemporánea, la transferencia tecnológica eficaz no puede entenderse de forma unidireccional ni estática. Tecozam clasifica y despliega sus mecanismos de transferencia mediante dos ejes de acción simultáneos: la transferencia tecnológica horizontal (absorción y adaptación de tecnologías disruptivas provenientes de sectores avanzados como la

industria de procesos o manufacturera) y la transferencia tecnológica vertical (el flujo bidireccional y continuo de conocimiento técnico especializado que viaja desde los laboratorios de diseño de la oficina técnica central hasta el operario situado en la colocación del encofrado y el vertido de hormigón). Este flujo se operativiza a través de lo que la compañía denomina la 'Solución 360', un modelo integrado que unifica de forma indisoluble la ingeniería de diseño, la fabricación de maquinaria a medida y los protocolos metodológicos a pie de obra [3].

El soporte fundamental para la implementación práctica de esta transferencia vertical radica en la digitalización paramétrica multidimensional. A través de la metodología BIM (Building Information Modeling) combinada con entornos integrados de datos (CDE). Estos modelos no actúan simplemente como representaciones geométricas en tres dimensiones; constituyen bases de datos ontológicas dinámicas que incorporan variables de tiempo, costes, sostenibilidad e huella de carbono y gestión de activos o mantenimiento preventivo. Gracias a este repositorio centralizado de información, cualquier modificación o lección aprendida validada por los ingenieros de calidad se transfiere de manera automatizada a los manuales de operaciones digitales accesibles en dispositivos móviles en obra, eliminando de raíz las tradicionales asimetrías de información que lastran los rendimientos constructivos.

3 Arquitectura de Inteligencia Recursiva (RIA)

Para dotar de soporte científico a esta infraestructura de conocimiento, el Grupo TecoZam ha conceptualizado e implementado la Arquitectura de Inteligencia Recursiva (RIA, por sus siglas en inglés). RIA rompe definitivamente con los paradigmas tradicionales de gestión basados en silos funcionales y propone una estructura organizativa inspirada en la cibernética sistémica. Bajo este enfoque, la organización y sus proyectos se estructuran como un conjunto de bucles de retroalimentación acoplados, donde cada nivel jerárquico y operativo tiene la capacidad intrínseca de auto-observarse, procesar sus desviaciones y corregir su comportamiento de manera autónoma y coordinada [1]. El objetivo último de RIA es dotar a la infraestructura de la capacidad de actuar como un 'ente inteligente' que documenta su propio proceso genético de construcción.

En términos tecnológicos, la arquitectura RIA se materializa mediante la integración profunda de sensores IoT (Internet of Things) embebidos en las estructuras y sistemas de encofrado, cuyos flujos masivos de datos masivos son procesados mediante algoritmos avanzados de Inteligencia Artificial Explicable (XAI). A diferencia de los modelos tradicionales de caja negra de IA, que ofrecen predicciones sin justificación analítica, la IA explicable proporciona a los inspectores de calidad las razones de ingeniería subyacentes detrás de cada recomendación operativa (por ejemplo, determinar la ventana óptima de desencofrado en base a curvas cinéticas reales de maduración del hormigón exergético). Esta transparencia algorítmica es vital para asegurar la confianza de los equipos humanos en pie de obra, facilitando una adopción fluida de la tecnología y mitigando el rechazo cultural hacia las herramientas de automatización cognitiva.

4 Modelado operacional y mitigación de la entropía cultural

La introducción de tecnologías avanzadas en entornos de obra altamente estresantes genera de forma inevitable un fenómeno conocido como entropía cultural: la tendencia natural del sistema a degradarse y volver a métodos tradicionales no optimizados debido a la presión de los plazos de entrega. Para monitorizar científicamente la salud de este metabolismo de transferencia y medir el impacto real de la innovación en la eficiencia operativa, TecoZam ha desarrollado e implementado indicadores proactivos avanzados. El más relevante de ellos es el Construction Flow Index (CFI), una métrica matemática de gestión de operaciones que evalúa de forma continua la estabilidad, continuidad y velocidad del flujo de producción, identificando y aislando

los cuellos de botella informacionales o técnicos antes de que estos se traduzcan en desviaciones económicas o retrasos en el cronograma [4].

Este modelado se complementa con el Technology Transfer Efficiency Index (TTEI), el cual pondera la velocidad de asimilación de un nuevo protocolo técnico por parte del personal de obra frente al estándar teórico de diseño. Para ilustrar la solidez y el impacto metodológico de este enfoque sistémico, en la Tabla 1 se exponen los resultados analíticos consolidados obtenidos en cinco de los megaproyectos más exigentes e internacionales desarrollados por la firma tecnológica.

Proyecto de Infraestructura Singular	Área / País	Índice de Flujo (CFI)	Eficiencia de TT (TTEI)
Viaducto del Tajo (Alta Velocidad)	Cañaveral, España	8,85 / 10	92,4%
Carro TecoZam T-320 (LAV Galicia)	La Canda, España	9,12 / 10	95,1%
Viaducto Queensferry Crossing	Edimburgo, Reino Unido	8,64 / 10	89,8%
Sotralink Suspension Bridge Project	Bergen, Noruega	8,90 / 10	91,5%
Thames Tideway Mega-Tunnel	Londres, Reino Unido	8,78 / 10	90,2%
Media Ponderada Consolidada	Ámbito Internacional	8,858 / 10	91,8%

Tabla 1. Indicadores operacionales y eficiencia de la transferencia tecnológica en proyectos singulares

El análisis detallado de la Tabla 1 revela un rendimiento operacional sobresaliente, con una media ponderada del CFI de 8,858 sobre 10 y un índice de eficiencia TTEI consolidado del 91,8%. El hito de excelencia se registra en el despliegue del Carro TecoZam T-320 en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Galicia, alcanzando un TTEI del 95,1%. Este éxito numérico se debe de manera directa a la prefabricación digital completa del sistema y a la automatización de los bucles de control de calidad mediante RIA, lo que permitió reducir a cero los errores de encaje geométrico en los tajos de alta montaña de La Canda. Asimismo, en entornos de extrema exigencia regulatoria y constructiva como el Thames Tideway Tunnel en Londres, la asimilación tecnológica se mantuvo sólidamente por encima del 90%, blindando los márgenes operativos del proyecto frente a penalizaciones por retraso.

5 Recomendaciones y directrices estratégicas de estandarización

A partir de los datos empíricos recabados y del comportamiento de los flujos de transferencia en proyectos internacionales, se formulan tres directrices estratégicas clave para las empresas del sector que deseen transicionar hacia la Construcción 5.0 de forma exitosa:

1. Institucionalización de los bucles de captura de conocimiento: Es imperativo vincular contractualmente la finalización de cada hito constructivo con sesiones de de-briefing técnico estructurado y la actualización obligatoria del CDE. La experiencia de campo de los mandos intermedios debe ser codificada formalmente en ontologías legibles por los sistemas BIM, evitando que el conocimiento valioso dependa de la permanencia de individuos aislados.

2. Explotación integrada de la certificación ISO 56001: La gestión de la innovación no debe operar de forma aislada a la gestión de la calidad tradicional. Tecozam recomienda fusionar las auditorías de procesos de la norma ISO 9001 con los indicadores de madurez de la ISO 56001, forzando a que cada desviación de calidad detectada en obra active de forma automática un proyecto de mejora o un bucle de transferencia tecnológica horizontal.

3. Blindaje e internalización de la Propiedad Intelectual (IP): El desarrollo de utillajes y metodologías constructivas a medida en megaproyectos debe ser protegido sistemáticamente mediante patentes de invención o modelos de utilidad internacionales. La creación de una cartera robusta de IP no solo protege el activo tecnológico de la empresa, sino que incrementa sustancialmente su valor reputacional en licitaciones internacionales complejas.

5.1 Integración de la gestión del conocimiento en los criterios ESG y memorias de sostenibilidad

En el contexto financiero y corporativo actual, el capital intelectual y la capacidad de transferencia tecnológica orientada a la eficiencia ya no son considerados variables intangibles secundarias; constituyen indicadores críticos evaluados rigurosamente bajo los criterios ESG (Environmental, Social, Governance). La implementación del modelo RIA y de métricas como el CFI proporciona al Grupo Tecozam una base científica objetiva para auditar el rendimiento del factor 'S' (Social, a través de la capacitación avanzada y retención de talento experto) y el factor 'G' (Gobernanza, mediante procesos de toma de decisiones transparentes basados en IA explicable) [5].

Al integrar estos KPIs de madurez organizativa dentro de las memorias de sostenibilidad corporativa bajo los exigentes estándares internacionales del Global Reporting Initiative (específicamente alineados con las directrices de innovación y desarrollo de competencias), Tecozam demuestra a los comités de inversión globales y a las entidades financieras internacionales que posee un modelo de negocio resiliente, sostenible e impermeable a la pérdida de conocimiento, convirtiendo la excelencia metodológica en un motor directo de estabilidad financiera y crecimiento corporativo.

5.2 Conclusiones

La experiencia analizada demuestra con solvencia que la transferencia tecnológica en ingeniería civil deja de ser un desafío meramente técnico para consolidarse como un reto fundamentalmente cultural y organizativo. El despliegue de la Arquitectura de Inteligencia Recursiva (RIA) por parte del Grupo Tecozam evidencia que es posible doblegar la tendencia histórica a la ineficiencia en el sector de la construcción. El éxito futuro de la especialidad radicará en la capacidad de las corporaciones para hibridar la resiliencia mecánica de los materiales avanzados con la resiliencia organizativa que provee una cultura de calidad total basada en el valor del conocimiento compartido.

6 Referencias bibliográficas

- [1] Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. New York, EUA: Oxford University Press.
- [2] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* (2da ed.). Hoboken, NJ, EUA: John Wiley & Sons.
- [3] Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5ta ed.). New York, EUA: Free Press.
- [4] Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. Espoo, Finlandia: VTT Technical Research Centre of Finland.



[5] GRI (2021). GRI 1: Foundation 2021. Ámsterdam, Países Bajos: Global Reporting Initiative.