

AUTOMATIZACIÓN Y DISEÑO PARAMÉTRICO DE ESTRUCTURAS DE ENCOFRADO ESPECIAL MEDIANTE FLUJOS BIM OPTIMIZADOS: EL CASO DEL CARRO DE ALAS EN EL GRUPO TECOZAM

David Castuera Pinto¹, José María Vallejo Herrador¹, Germán Alberto Cervetto Iacopini¹,
Antonio García de Blas Iglesias², José García-Aranda Ángel²

¹ Grupo TecoZam, Zamora, España, {david.castuera, jmaria.vallejo, german.cervetto}@tecozam.com

² AGB Ingeniería, Madrid, España, {agarciadeblas, jagarciaaranda}@agbingeneria.com

Resumen

La ejecución de viaductos singulares con tableros de gran formato exige el desarrollo de medios auxiliares altamente complejos que optimicen los ciclos de trabajo bajo estrictas tolerancias de seguridad y precisión geométrica. Este artículo presenta el caso de éxito del diseño del Carro de Alas del Grupo TecoZam realizado con colaboración de AGB Ingeniería. Frente a las limitaciones de la gestión del Proyecto mediante un enfoque predictivo en cascada, se implementó una metodología adaptativa sustentada en la automatización y el diseño paramétrico adaptativo. El encofrado especial fue modelado no como una geometría rígida estática, sino como un sistema gobernado por variables dinámicas de entrada, integrando la geometría del tablero y las cargas actuantes de hormigonado. Mediante un ecosistema digital interoperable constituido por herramientas como BricsCAD, Tekla, Rhinoceros (Grasshopper) y Consteel (Pangolin), se automatizó la transferencia fluida de datos de cálculo y despieces, acortando los ciclos de iteración estructural de semanas a horas. El carro incorpora soluciones de automatización mecánica mediante cilindros oleohidráulicos sincronizados y un sistema cinemático de abatimiento lateral que suprime las interferencias físicas con jabalcones y apoyos en las fases de avance. Los resultados validan una mitigación drástica de la incertidumbre técnica en fase de proyecto, optimizando la viabilidad constructiva y abriendo nuevas vías para el análisis automatizado de estructuras auxiliares complejas en el marco de la Construcción 5.0.

Palabras Clave: Diseño paramétrico, Modelado BIM, Encofrado especial, Carro de alas, Interoperabilidad técnica.

1 Introducción y estado del arte

En el ámbito de las obras públicas de gran envergadura y la ingeniería de puentes contemporánea, la optimización de los procedimientos constructivos constituye un factor crítico para asegurar la viabilidad económica, la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento estricto de los plazos contractuales. Dentro de estas infraestructuras, el hormigonado de las alas laterales de los tableros singulares representa una de las operaciones logísticas y estructurales más exigentes, requiriendo de forma sistemática sistemas de encofrado capaces de soportar cargas dinámicas considerables y adaptarse de forma milimétrica a secciones transversales variables. Tradicionalmente, la ingeniería de estos medios auxiliares se ha abordado mediante enfoques lineales o en cascada, en los cuales el diseño geométrico, el cálculo estructural y la planificación operacional en obra se ejecutaban de manera fragmentada y consecutiva. Esta desconexión metodológica suele derivar en la detección tardía de interferencias físicas sobre el terreno, costosos re-trabajos de picado o cosmética de superficies y un aumento inadmisibles en los márgenes de incertidumbre técnica durante la fase crítica de puesta en marcha [1].

El paradigma emergente de la Construcción 5.0 propone superar estas ineficiencias mediante el despliegue de Gemelos Digitales interactivos, la automatización analítica y el diseño paramétrico avanzado, situando la gestión integrada del conocimiento y la colaboración humana sin fricciones en el núcleo de la estrategia de producción. Bajo este enfoque cooperativo, las herramientas de software dejan de ser meros repositorios gráficos de información visual para convertirse en sistemas capaces de modelar el comportamiento dinámico y las restricciones físicas del medio auxiliar. El presente artículo detalla la metodología colaborativa y el



ecosistema interoperable implementado de forma conjunta por la oficina técnica de Tecozam y AGB Ingeniería para el diseño automatizado de un Carro de Alas de gran formato, demostrando que la verdadera innovación reside en la estructuración sistemática de las reglas de diseño combinadas con el talento experto de los ingenieros involucrados.

1.1 Contexto empresarial y trayectoria de innovación del holding

Grupo TecoZam se ha consolidado firmemente como un holding tecnológico de referencia internacional en el sector de la construcción de infraestructuras de alta complejidad, avalado por una sólida trayectoria de más de 23 años de experiencia en el mercado global. La corporación cuenta con un equipo humano superior a los 1500 profesionales altamente cualificados, opera activamente en 6 países y consolida una facturación anual de 125 M€. Su cartera de especialización abarca soluciones integrales en infraestructuras viarias y ferroviarias, grandes obras hidráulicas y de saneamiento, edificación singular e industrial, y de manera muy destacada, la ingeniería de estructuras complejas, puentes y viaductos especiales. TecoZam fundamenta su valor diferencial en la aplicación práctica de la innovación para resolver necesidades reales de obra, un compromiso refrendado por la obtención de la certificación oficial en su Sistema de Gestión de I+D+i bajo la norma internacional ISO 56001 y la propiedad de una cartera activa con más de 15 patentes registradas. Su sistema integral de gestión se halla además respaldado por las normas ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, EN 1090 y la norma UNE 19601 de compliance penal corporativo.

Entre los proyectos de escala nacional más significativos desarrollados por el grupo cabe citar el Viaducto sobre los ríos Gállego y Aurín en Sabiñánigo, el Viaducto del Tajo en Cañaveral y la ejecución de la Línea de Alta Velocidad (LAV) Madrid-Galicia empleando el Carro TecoZam T-320 en los complejos tramos de La Canda. En la arena internacional, la firma ha validado con éxito sus metodologías constructivas en obras de la envergadura de la Ampliación del Canal de Panamá, el viaducto Queensferry Crossing en Edimburgo (Reino Unido), el Aprovechamiento Hidroeléctrico del Alto Tâmega en Portugal, el Sotralink Suspension Bridge Project en Bergen (Noruega), así como los exigentes contratos de túneles urbanos de gran sección Northern Line Extension y Thames Tideway Tunnel en la ciudad de Londres. En todos estos escenarios, el empleo de soluciones 360° —que unifican medios auxiliares propios diseñados ad-hoc, equipos humanos especializados y el suministro controlado de acero estructural— ha permitido transformar la digitalización de un concepto teórico a un activo estratégico medible de alta predictibilidad.

2 El reto técnico: Especificaciones y complejidad del medio auxiliar

El proyecto encomendado a la oficina técnica requería el diseño y validación de un medio auxiliar de encofrado especial con un nivel de complejidad geométrica y de solicitaciones mecánicas sin precedentes en la práctica habitual de la firma. El objetivo principal consistía en ejecutar las alas laterales de un viaducto singular de gran formato, cuyo tablero presentaba una sección transversal de cajón central de hormigón armado con una anchura base de 14 metros, sobre el cual debían hormigonarse de forma segura y simétrica grandes voladizos laterales de 7 metros de longitud por cada flanco, configurando una superficie de rodadura final total de 28 metros de sección única. Las especificaciones de operación exigían además dar soporte a una longitud de puesta elevada de 15 metros continuos por ciclo de vertido, concentrando masas de hormigón fresco e inercias dinámicas severas sobre el medio auxiliar [4].

La severidad del desafío técnico se incrementaba de forma exponencial al considerar las variables geométricas intrínsecas del trazado vial. La infraestructura bajo estudio se localizaba en una zona de transición curva compleja, incorporando clotoides intermedias que provocaban una variación continua y asimétrica tanto en el peralte transversal de la calzada como en el intereje longitudinal existente entre los puntales de apoyo del carro. Asimismo, al tratarse de un tablero con sección de cajón central de canto variable, la cota altimétrica de los puntos de sustentación y anclaje de los puntales sobre el hormigón difería de forma dinámica en cada sección de puesta. Esta alta volatilidad paramétrica impedía el empleo de un carro estándar rígido o de configuraciones modulares comerciales tradicionales, obligando a integrar de forma holística disciplinas de cálculo estructural, encofrado, cinemática de mecanismos, iluminación de seguridad, motorización de traslación y sistemas de accionamiento oleohidráulico bajo un marco temporal sumamente restrictivo que cancelaba la viabilidad de un desarrollo tradicional en cascada.

3 Factor crítico de éxito: Estrategia de colaboración paralela y factor humano

Ante la imposibilidad material de abordar el proyecto mediante una secuenciación lineal debido al plazo perentorio de entrega, el factor crítico que desbloqueó el éxito de la ingeniería fue el establecimiento de una estrategia de colaboración paralela efectiva entre los ingenieros de Tecozam y el equipo especializado de AGB Ingeniería. El núcleo de esta estrategia no consistió en un mero reparto administrativo de horas de trabajo aisladas, sino en lo que conceptualmente se definió como 'repartir el problema' en función de la alta especialización de cada organización. De este modo, la oficina técnica de Tecozam asumió la optimización funcional de la máquina, la integración de la cinemática de movimiento y la viabilidad constructiva a pie de obra, mientras que AGB Ingeniería se focalizó de manera coordinada en el cálculo analítico avanzado de la estructura resistente y el diseño detallado de las uniones críticas [3].

Esta división inteligente permitió que ambos equipos avanzaran de forma simultánea, tomando decisiones técnicas paralelas con una visión global continua del sistema. La interoperabilidad real del flujo de trabajo no dependió únicamente de la compatibilidad de los formatos de archivo informáticos, sino de la articulación del factor humano mediante canales de comunicación directa y un liderazgo técnico robusto capitaneado por los responsables del proyecto. Las reuniones de sincronización e intercambio de datos permitieron validar iteraciones rápidas y consistentes, evitando los tradicionales reprocesos o paradas técnicas que surgen cuando el cálculo estructural se desvincula de las restricciones operativas de la maquinaria de obra. La máxima organizativa adoptada evidenció que la complejidad no se resuelve incrementando linealmente las horas de dedicación, sino sofisticando la estructura de la organización y la transferencia de conocimiento entre los especialistas.

4 Parametrización e interoperabilidad técnica del ecosistema digital

La traducción operativa de esta estrategia colaborativa requirió una transición metodológica disruptiva: pasar de modelar geometría fija a modelar comportamiento adaptativo. El diseño estructural y mecánico del carro se abordó conceptualmente como un sistema paramétrico vivo, donde la geometría base y las solicitudes mecánicas se convirtieron en variables dinámicas de entrada independientes. Gracias a este enfoque, ante cualquier cambio en el peralte del viaducto, el radio de la clotoide o el canto del cajón central, los ingenieros no necesitaban rehacer manualmente el modelado tridimensional ni reintroducir los nodos en los programas de elementos finitos; el sistema completo se recalculaba y adaptaba de forma automatizada, reduciendo los tiempos de iteración analítica de semanas a escasas horas y permitiendo explorar y validar múltiples configuraciones alternativas en tiempo real [2].

Este flujo de trabajo ágil y sin fricciones se sustentó sobre un ecosistema interoperable de herramientas de diseño y cálculo avanzado conectadas al servicio del proceso constructivo. La oficina técnica empleó BricsCAD, Tekla Structures y Rhinoceros como entornos centrales para la modelación tridimensional paramétrica y el despiece de fabricación para taller de las estructuras metálicas. Para el análisis estructural general del medio auxiliar se recurrió a los softwares de elementos finitos Graitec Advance Design y Consteel, mientras que el diseño, fatiga y resistencia del comportamiento no lineal de los nudos y conexiones críticas se confió de forma específica a la herramienta Idea Statica. El puente analítico e informacional entre el entorno de modelado gráfico y los motores de cálculo se materializó a través de la integración de módulos de parametrización avanzada como Grasshopper (para Rhinoceros) y Pangolin (para Consteel), encargados de automatizar la generación de mallas de cálculo, transferir matrices de cargas y exportar los datos de geometría optimizados de forma bidireccional. La herramienta operó así como un medio subordinado a una estrategia técnica definida, intercambiando reglas de diseño.

5 Resultados operacionales y proyecciones futuras de la solución única

La implementación de la metodología de diseño paramétrico unificada arrojó resultados concluyentes en la mitigación del riesgo técnico y en la eficiencia del ciclo de operaciones en obra. Al sincronizar de forma temprana el cálculo de esfuerzos mecánicos con las restricciones físicas de montaje, se eliminaron por completo las tradicionales incertidumbres que condicionan las soluciones constructivas auxiliares. Esta agilidad permitió optimizar los componentes mecánicos del Carro de Alas —incluyendo su avanzado sistema de traslación autopropulsada mediante motores y cilindros oleohidráulicos sincronizados y su mecanismo cinemático de abatimiento de los paneles laterales— evitando la adopción de sobredimensionamientos conservadores penalizados por la falta de tiempo para un análisis estructural riguroso. Para sintetizar de forma clara el impacto operacional alcanzado frente a la metodología lineal clásica, en la Tabla 1 se exponen los indicadores de rendimiento recopilados de forma empírica en el proyecto.

Parámetro Técnico / Operativo	Flujo de Diseño Secuencial Tradicional	Modelo Paramétrico Colaborativo
Tiempo de iteración ante cambios de trazado	5 a 7 días hábiles (Remodelado completo)	2 a 4 horas (Recálculo automático)
Detección de interferencias físicas	Tardía (En fase de montaje en obra)	Temprana automatizada en Gemelo Digital
Optimización del peso estructural	Baja (Soluciones conservadoras por plazo)	Alta (Ajuste analítico por elementos finitos)
Análisis de fatiga en equipos reutilizados	Parcial o documental diferido	Completo multi-escenario continuo

Tabla 1. Matriz comparativa de rendimientos de ingeniería entre metodologías de diseño auxiliares

Más allá de los beneficios directos sobre el cronograma del proyecto, el desarrollo de esta estructura paramétrica generó valiosos activos intangibles de conocimiento reutilizables para el holding. En el ámbito de las obras viales complejas, la adopción de tableros únicos de gran formato sustentados sobre pilas esbeltas constituye una tendencia de vanguardia internacional, debido a que reduce sustancialmente el número de cimentaciones profundas necesarias, conteniendo los costes económicos y minimizando de forma drástica el impacto ambiental sobre el entorno natural. El Carro de Alas diseñado paraméricamente queda consolidado como una solución de ingeniería ágil y escalable, facilitando su adaptación inmediata y reinstalación acelerada en futuras obras públicas singulares. Asimismo, dentro del grupo corporativo de cimbras máquina, la tecnología desarrollada simplifica el análisis estructural completo de medios auxiliares reutilizados de parque de materiales, permitiendo evaluar su fatiga estructural y comportamiento analítico tanto en la fase estática de hormigonado como en las etapas dinámicas de desencofrado, movimiento autónomo y transferencia de cargas transversales.

6 Conclusiones

El diseño del Carro de Alas de gran formato desarrollado por el Grupo TecoZam en alianza estratégica con AGB Ingeniería ratifica con solvencia que los desafíos operacionales y la alta complejidad técnica de la ingeniería civil moderna no se resuelven mediante la mera acumulación lineal de horas de trabajo, sino sofisticando la estructura organizativa y erradicando los silos informacionales. El éxito alcanzado demuestra de forma empírica que los entornos de digitalización avanzada y las metodologías BIM adquieren su verdadero valor cuando se configuran como canales metabólicos para organizar de forma lógica el conocimiento experto, y no como meros fines instrumentales aislados. La transición conceptual desde el modelado de geometrías rígidas e inertes hacia la modelación matemática de comportamientos dinámicos adaptativos dota a la oficina técnica de una agilidad analítica sin precedentes. En definitiva, las claves analíticas de la solución confirman que la excelencia no residió de forma exclusiva en el software seleccionado ni en la potencia algorítmica de la



parametrización, sino también en la capacidad humana para dividir correctamente el problema de ingeniería y articular una colaboración abierta, transparente y libre de fricciones en el marco de la Construcción 5.0.

7 Referencias bibliográficas

- [1] 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.
- [2] Koskela, L. (2000). An exploration towards a production theory and its application to construction. Espoo, Finlandia: VTT Technical Research Centre of Finland.
- [3] Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. New York, EUA: Oxford University Press.
- [4] Pellicer, E., Yepes, V., & Teixeira, J. C. (2014). Construction Innovation: A Sustainable Approach. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.