

Metodología BIM y diseño paramétrico en los puentes mixtos de la autopista E6RV en Noruega

BIM Methodology and parametric design in the composite bridges of the E6RV motorway in Norway

Alberto Justo Cangas^a, Francisco Javier Carrascal Pérez^b,

Francisco Javier Martínez López^c y Manuel Biedma García^d

^a Ingeniero Técnico Industrial. Acciona Ingeniería. BIM Manager. ajusto@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyecto. franciscojavier.carrascal.perez@acciona.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyecto. franciscojavier.martinez.lopez@acciona.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe Dto. Estructuras Metálicas. manuel.biedma.garcia@acciona.com

RESUMEN

Acciona Ingeniería ha participado en el proyecto de la autopista E6 Ranheim–Værnes en Noruega usando metodología BIM y diseño paramétrico. El uso del diseño paramétrico ha mejorado la precisión, eficacia y eficiencia del proceso. Además, la metodología BIM ha optimizado la colaboración entre equipos multidisciplinares, facilitando la detección temprana de conflictos y la toma de decisiones. Esta metodología permite compartir modelos y datos en tiempo real, garantizando una correcta coordinación y comunicación entre todos los actores del proyecto.

ABSTRACT

Acciona Engineering has been involved in the E6 Ranheim–Værnes motorway project in Norway, employing BIM methodology and parametric design. The use of parametric design has significantly enhanced the accuracy, efficiency, and effectiveness of the process. Additionally, the BIM methodology has optimized collaboration among multidisciplinary teams, enabling early conflict detection and informed decision-making. This approach facilitates real-time sharing of models and data, ensuring seamless coordination and communication among all project stakeholders.

PALABRAS CLAVE: tecnología de estructuras, digitalización, metodología BIM, diseño paramétrico.

KEYWORDS: structural technology, digitalisation, BIM methodology, parametric design.

1. Autopista E6 Ranheim–Værnes (Noruega)

El tramo de Ranheim a Værnes de la autopista E6 tiene una longitud de 23 km y se amplía de dos a cuatro carriles para mejorar el flujo de tráfico, reducir la necesidad de desvíos y aumentar la seguridad de los usuarios. Esta

nueva infraestructura tiene como objetivo mejorar la conectividad en el norte del condado de Trøndelag, en el centro de Noruega.

Entre las múltiples estructuras que conforman el proyecto, destacamos:

- Dos puentes en la zona de Hommelvik: estas estructuras presentan tableros mixtos de 240 m de longitud total y tipología bijnácena, de anchura 14.8 m y canto total 4.0 m. Estos puentes se apoyan en cinco ejes: dos estribos y tres pilas de hormigón.
- Puente de Sandfærhus: esta estructura presenta idéntica tipología que los puentes de Hommelvik, con ajustes en cuanto a anchura de tablero, longitud total y distribución de los vanos.

El diseño está basado en el modelo, esto significa que el modelo contiene toda la información para poder construir, tanto geometría como los datos necesarios para su completa definición.



Figura 1. Render de viaductos en Hommelvik.

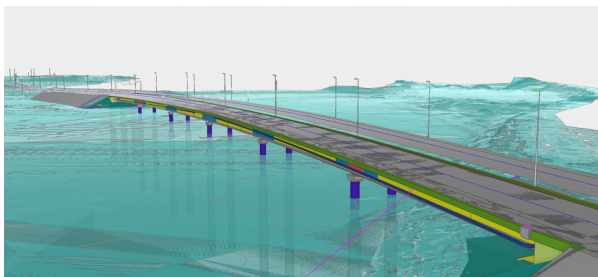


Figura 2. Render de viaducto en Sandfærhus.

2. Métodos y herramientas

Para el modelado de los viaductos se ha optado por *Tekla Structures* [1], un software especializado en modelado de estructuras, idóneo por su capacidad para manejar modelos de estructuras de gran envergadura. El nivel de detalle alcanzado es LOD500 (nivel de detalle fiel a lo ejecutado en realidad), y para completar el

modelo de uno de los viaductos se ha necesitado incluir:

- Más de 20 000 elementos de hormigón, metálicos y otros materiales.
- Más de 900 000 barras de refuerzo para hormigón armado.
- Más de 3 500 soldaduras y 2 000 tornillos en la estructura metálica.

Para mejorar la precisión con un análisis geométrico más detallado y debido a los continuos cambios y actualizaciones necesarios en la etapa de diseño, se optó por trabajar con diseño paramétrico usando *Grasshopper* [2], un software de programación visual.

Para la colaboración, coordinación y revisión de los modelos, Acciona Ingeniería empleó *Trimble Connect Web* [3], una plataforma digital destacada por su versatilidad y agilidad, con la capacidad de acceder a los modelos directamente desde la web. Esta solución facilitó la comparación de modelos desarrollados en distintos softwares, además de permitir la generación de comentarios para la revisión y la implementación de cambios en el diseño.

Por último, para la colaboración con el resto de las disciplinas del proyecto, se optó por *Quadri* [4], una plataforma que permitiese a todos los actores implicados acceder y trabajar de manera conjunta. Esta herramienta fue ideal para la colaboración avanzada en tiempo real en proyectos de infraestructura.

3. Modelado del viaducto

Para desarrollar un modelo de infraestructura, como un viaducto, es fundamental contar con información inicial clave, como la alineación, y procesarla de manera adecuada. A partir de estos datos, se elabora un algoritmo que, mediante un enfoque analítico, genera cada componente del viaducto. Posteriormente, estos elementos se integran en el software de modelado junto con toda la información detallada de cada uno.

3.1 Información inicial y su tratamiento

El proceso comienza con el diseño paramétrico, basado en información inicial clave, como:

- La alineación y la posición de los ejes del puente.

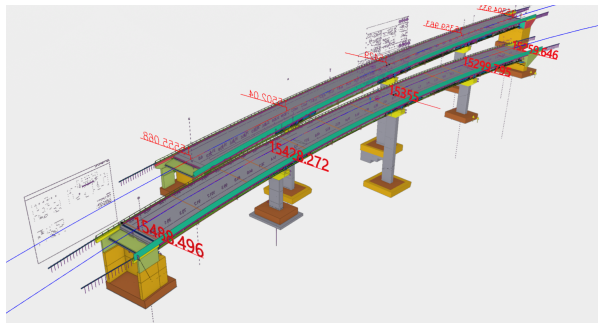


Figura 3. Modelos de los viaductos con las alineaciones.

- El perfil longitudinal detallado, acompañado de datos completos sobre las secciones tipo.

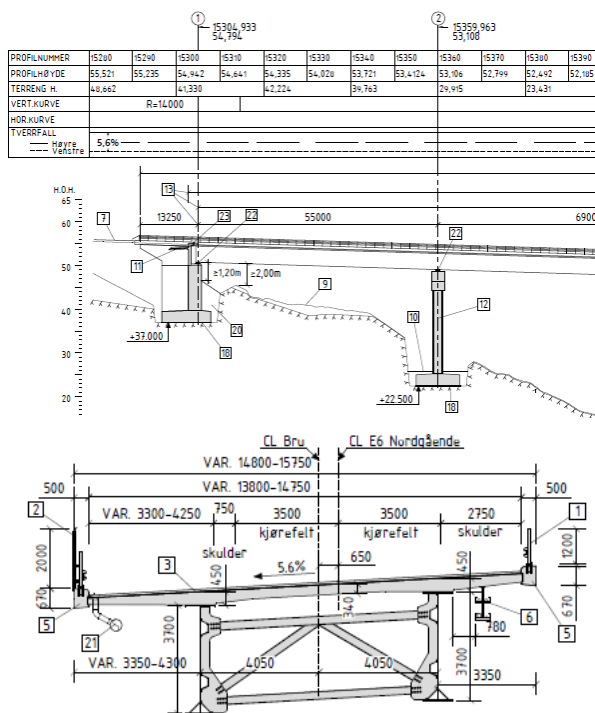


Figura 4. Perfil longitudinal y detalles tipo del viaducto.

- Además, se incorporan detalles adicionales en formato de tablas, como los espesores de la estructura metálica o el diámetro de las barras de refuerzo.

L	x1	xf	Bu	Bf	t	
2	7 624.9890	-	7624.9890	1000	1000	30 EJE 1
3	7 624.9890	7 624.9890	15249.9780	1000	1000	35
4	6 942.8217	15 249.9780	22192.7997	1000	1000	40
5	8 307.1562	22 192.7997	30499.9559	1000	1000	45
6	150.0000	30 499.9559	30649.9559	1000	1000	55
7	1 350.0002	30 649.9559	31999.9561	1000	1270	55
8	8 000.0439	31 999.9561	40000.0000	1270	1270	55 EJE 2
9	19 000.5876	40 000.0000	59000.5876	1270	1270	55 EJE 2
10	1 350.0002	59 000.5876	60350.5878	1270	1000	55
11	150.0000	60 350.5878	60500.5878	1000	1000	55
12	3 279.4701	60 500.5878	63780.0579	1000	1000	45
13	4 073.8349	63 780.0579	67853.8928	1000	1000	40
14	4 073.8349	67 853.8928	71927.7277	1000	1000	30
15	4 073.8349	71 927.7277	76001.5626	1000	1000	40
16	4 611.4953	76 001.5626	80613.0579	1000	1000	45
17	150.0000	80 613.0579	80763.0579	1000	1000	55
18	1 350.0002	80 763.0579	82113.0581	1000	1270	55
19	12 886.9419	82 113.0581	95000.0000	1270	1270	55 EJE 3
20	10 000.0857	95 000.0000	105000.0857	1270	1270	55 EJE 3
21	1 350.0002	105 000.0857	106350.0859	1270	1000	55
22	150.0000	106 350.0859	106500.0859	1000	1000	55
23	9 634.3252	106 500.0859	116134.4111	1000	1000	45
24	10 432.1497	116 134.4111	126566.5608	1000	1000	40
25	8 336.5006	126 566.5608	134903.0614	1000	1000	30

Figura 5. Ejemplo de definición de las chapas de las vigas armadas del tablero.

3.2 Procesamiento de la información inicial

Antes de desarrollar el algoritmo que genere la estructura, es necesario que nuestra programación pueda procesar la información recibida. A partir de la polilínea de la alineación, se extraen todos sus puntos, los cuales se interpolan para obtener una curva más precisa y suave, transformándola en una curva 3D. Además, esta curva no solo representa un trazado, sino una alineación en la que se deben incluir los PK, lo que permite posicionar correctamente los ejes del viaducto.

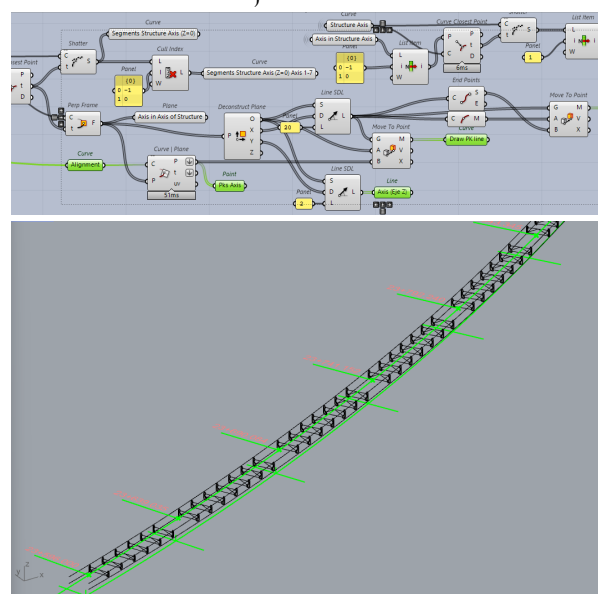


Figura 6. Rutina de programación para el tratamiento de la alineación.

Desde la programación, podemos obtener cualquier PK. En este caso, proyectamos la curva en el plano XY y calculamos la distancia a lo largo de la curva proyectada entre el PK solicitado y el PK de referencia.

Las tablas, en Excel o archivos CSV, deben verse como listados para trabajar con ellas en la programación. Por lo tanto, la programación lee cada una de las tablas y genera listas procesadas y ordenadas que se guardan en la memoria interna de la programación.

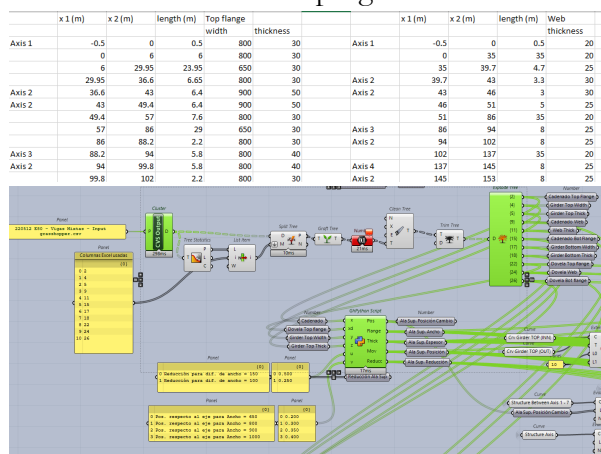


Figura 7. Ejemplo de una tabla Excel utilizada como información recibida y posteriormente procesada.

Ahora, con toda esta información procesada, estamos listos para trabajar en el algoritmo.

3.3 Desarrollo del algoritmo para generar el puente.

3.3.1. Generación del tablero metálico

Con la información necesaria para comenzar a desarrollar el algoritmo, iniciamos el trabajo con la alineación para desarrollar la superficie de la carretera. Además de la alineación, es fundamental contar con el replanteo de los ejes, sus coordenadas, el PK de la alineación o las distancias entre vanos, así como los valores del perfil longitudinal y cambios de peralte. Otra información clave, en el caso de un tablero de ancho variable, son los puntos donde el ancho varía.



Figura 8. Parte de la programación que genera la superficie de la carretera.

El resultado de estos procesos, que posteriormente se integrará en el modelo, es la geometría analítica, no los volúmenes de las piezas metálicas. Con esta información, definimos los ejes de las vigas curvas a lo largo del tablero, los puntos donde se producen cambios de espesor y la ubicación de los perfiles para los atados o diafragmas.

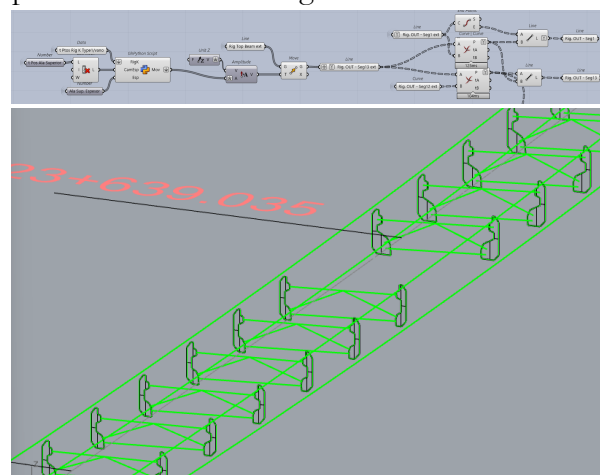


Figura 9. Rutina para generar los ejes de los perfiles.

Dado que el modelo geométrico del tablero, incluidos todos sus detalles (perfiles, rigidizadores, uniones atornilladas, soldaduras), es completamente paramétrico y todos sus elementos están relacionados de una manera lógica en la programación, los ejes y resultados

generados se adaptan de manera automática a la sección del viaducto, incluso si esta presenta variabilidad. Además, el sistema permite ajustar cualquier cambio en el diseño, como la modificación del ancho del tablero, la actualización de la alineación o los ejes del viaducto.

Con la programación, además de definir analíticamente toda la geometría, también podremos obtener rápidamente y con precisión toda la información necesaria.

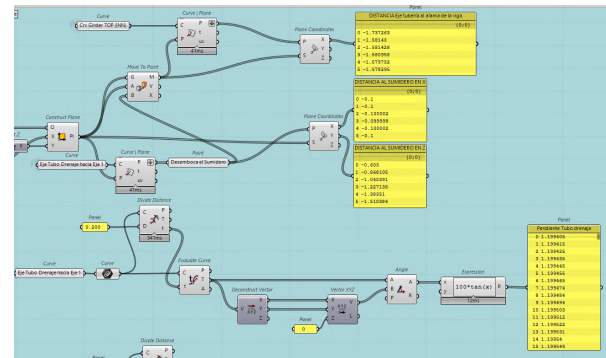


Figura 10. Información sacada directamente de la programación.

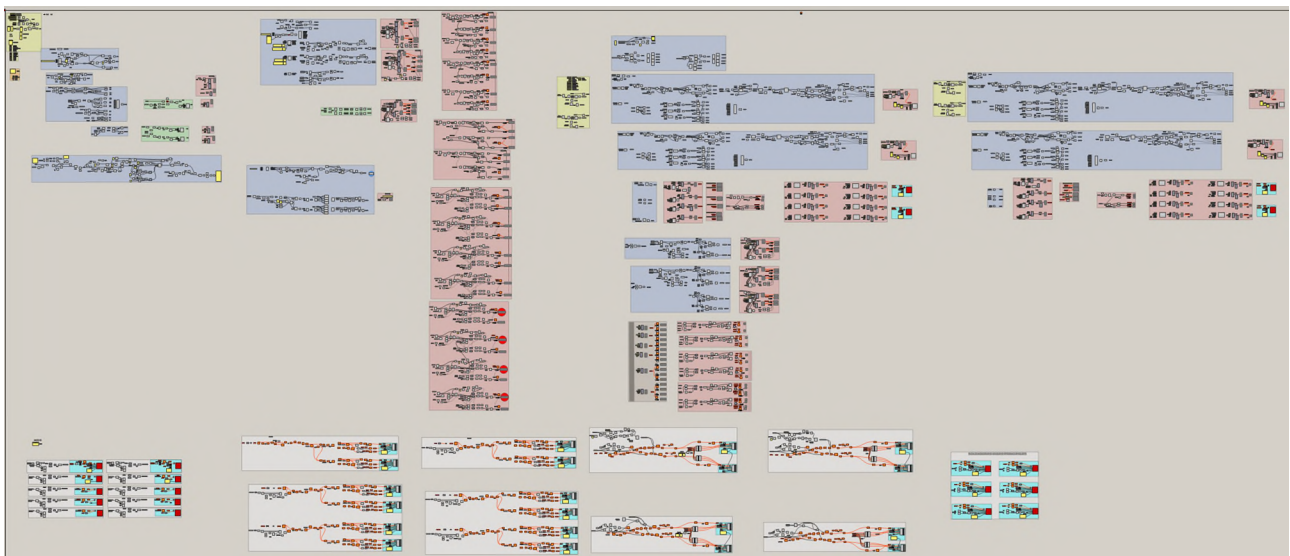


Figura 11. Vista general de la programación completa que genera la estructura metálica del tablero.

3.3.2. Generación del tablero de hormigón

Siguiendo el mismo criterio utilizado para el tablero metálico, desarrollamos el tablero de hormigón. No obstante, debido a que los elementos de hormigón tienen una forma geométrica singular, definida por un perfil de sección variable a lo largo de un eje, se modelan mediante programación. Los ejes y la posición de todas las barras de refuerzo se incluyen en la programación, adaptándose a las formas del hormigón y a la posibilidad de cambios de sección a lo largo de la longitud del puente. Siempre que se mantenga el concepto de diseño, las actualizaciones por correcciones o cambios se realizan de manera rápida.

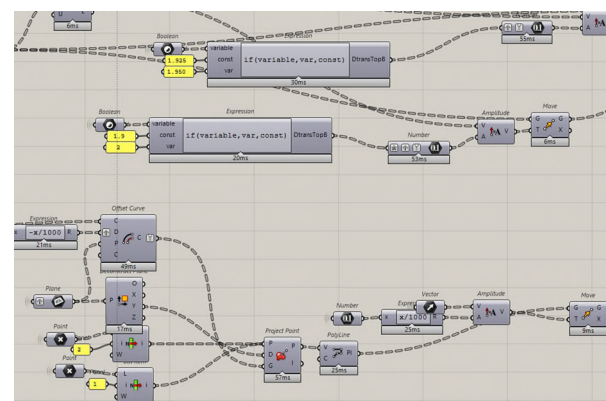


Figura 12. Parte de la rutina de programación para la generación del armado del tablero.

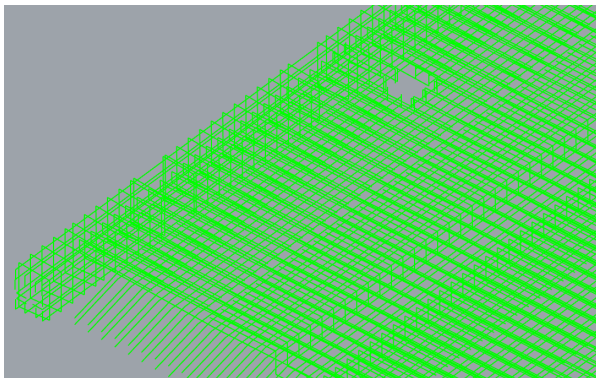


Figura 13. Ejes de las barras de armado del tablero.
Resultado de la rutina de programación.

3.4 Generación del modelo BIM desde el diseño paramétrico

Con todos los elementos definidos en la programación, procedemos a incluirlos en el software de modelado BIM. En esta etapa, debemos representar los elementos exactamente como deben ser, con las formas completamente definidas y todas sus características mecánicas.

Desde la programación se posicionan todos los ejes de los elementos en el espacio del modelo BIM incluyendo las características del perfil y del material.

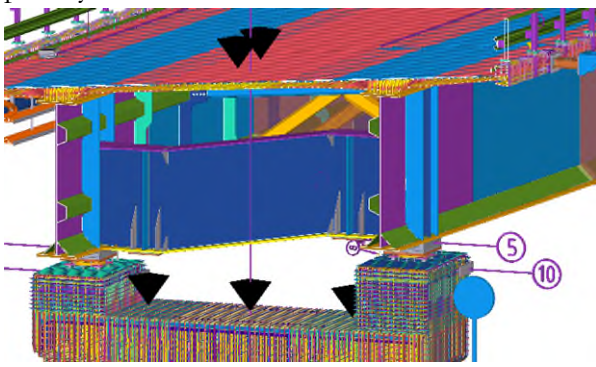


Figura 14. Sección en la que se pueden observar todos los detalles del puente resultante.

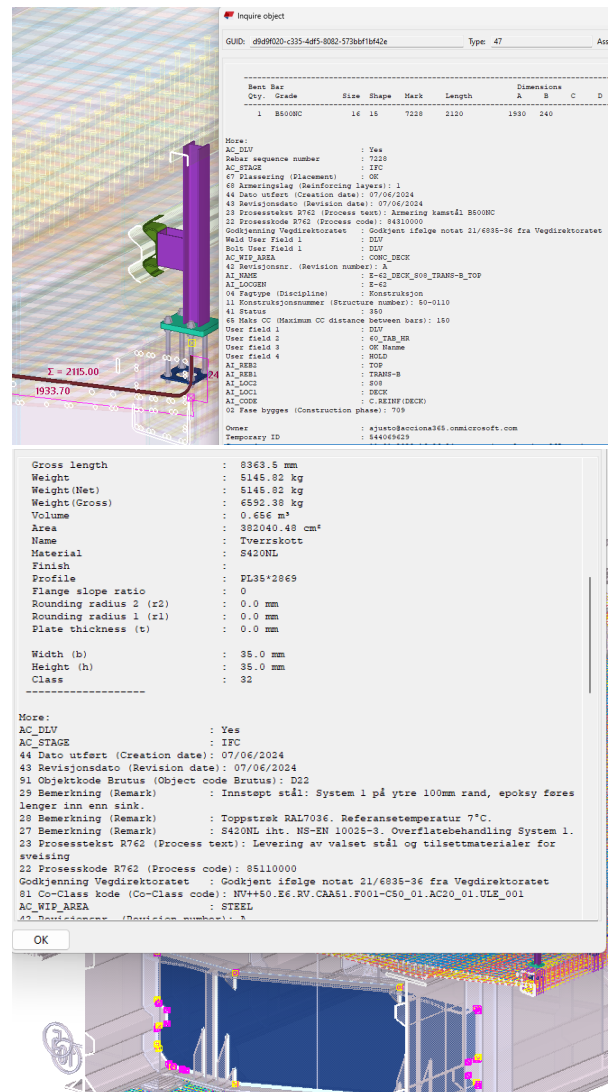
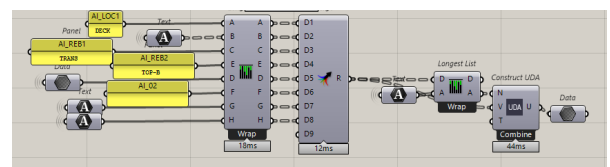


Figura 15. Características mecánicas e información de los elementos seleccionados.

Además, aprovechando la parametrización, al volcar los datos en el modelo BIM, incorporamos parámetros para codificar cada uno de los elementos. Esto nos permite identificarlos de manera eficiente y mantener un control total sobre todos los elementos.



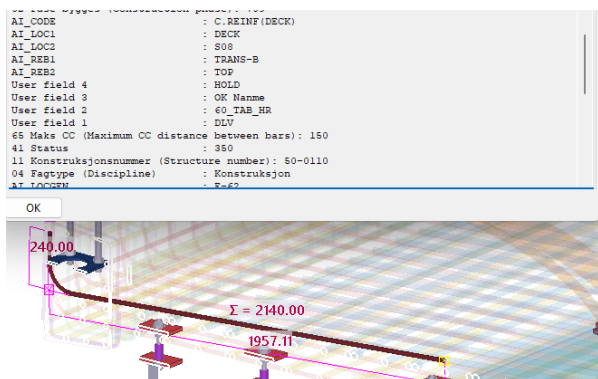


Figura 16. Ejemplo de rutina para incluir los parámetros en los elementos generados.

En este nivel de detalle del modelo (LOD500), no solo necesitamos que los elementos estén bien definidos, también debemos representar otros detalles como los tornillos y las soldaduras para que la información esté completa. Para ello, la programación pasa al siguiente nivel.

Para las uniones atornilladas se generaron componentes parametrizados en el software de modelado. Estos componentes también fueron posicionados por programación para que se adaptasen a los cambios en el modelo y por la cantidad de uniones necesarias en el viaducto.

Incluir todas las soldaduras en el modelo 3D de todo el viaducto hubiese sido imposible sin la programación de la API del software de modelado. Esta programación detecta los elementos a ser soldados y, con ayuda de los listados de soldaduras, se incluye en cada uno de ellos el tipo correspondiente de forma automática.

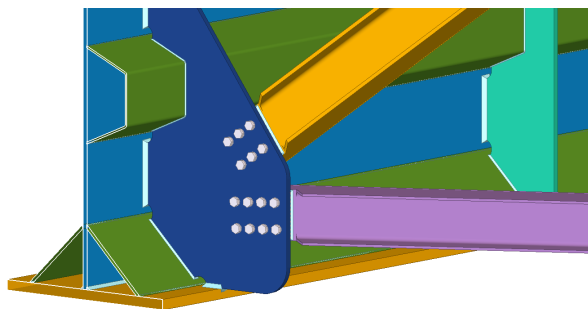


Figura 17. Detalle de unión en el tablero metálico del viaducto.

3.5 BIM: Geometría con información detallada.

Al igual que en el método tradicional, para completar un diseño 2D no solo son necesarios los dibujos, sino también la información adicional que permita definirlo por completo y hacerlo suficiente para la construcción. En el modelo 3D, esta información se integra en los metadatos del proyecto y de sus elementos.

En nuestro caso, tenemos un modelo con más de 50 000 elementos, lo cual sería muy costoso si quisiéramos introducir la información necesaria en cada uno de ellos. Esto se complica aún más si hay una actualización y tenemos que rehacerlo. Para solventar este problema, se ha desarrollado una aplicación que realiza esta tarea.

Desde la programación anterior, donde transferimos los elementos al modelo BIM, partimos con todos los elementos completamente identificados y con una codificación única para cada uno de ellos.

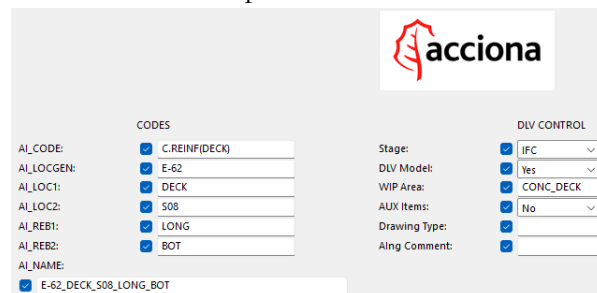
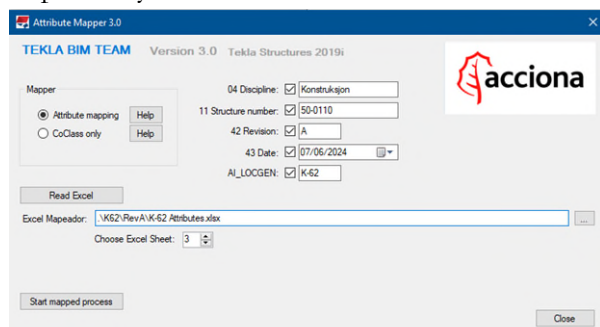


Figura 18. Ejemplo de codificación de un elemento en el modelo BIM.

Toda la información que debemos incluir en cada uno de los elementos se encuentra en una base de datos que los diseñadores van rellenando. Esta base de datos tiene un campo común que la enlaza con los elementos geométricos. El trabajo de esta aplicación es cruzar todos los datos de la hoja de cálculo y el modelo, insertando toda la información en los elementos correspondientes.

Además de acelerar el proceso (en muy poco tiempo se incluyen todos los datos en más de 50 000 elementos), la aplicación es capaz de realizar un primer chequeo, comprobando que todos los elementos son correctos, no se

duplican y tienen la información necesaria.



ATTRIBUTES ADDED WITH MISTAKES



Hay atributos de la tabla que no existen en el Modelo o hay elementos de Tekla que no están en la Tabla

• Se creará una hoja Excel

Aceptar

ATTRIBUTES ADDED



Se han añadido todos los atributos de la tabla. No hay ningún atributo en la tabla sin elemento en el Modelo

Aceptar

Figura 19. Aplicación desarrollada por Acciona Ingeniería para mapear metadatos en los modelos.

Si todo ha transcurrido correctamente y no se han detectado errores, la aplicación incorporará toda la información correspondiente en cada uno de los elementos.

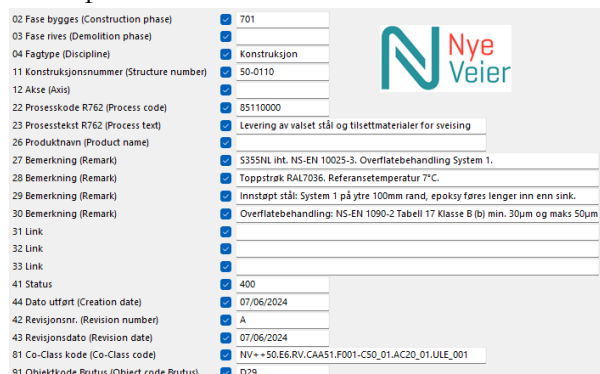


Figura 20. Ejemplo de los metadatos incluidos en uno de los elementos del modelo.

3.6 Documentación de salida

Los dos principales documentos BIM entregables del viaducto son un IFC (*Industry Foundation Classes*) y una hoja de cálculo con el listado de barras (BBS, *Bar Bending Schedule* en inglés). También se generó de forma automatizada una hoja de cálculo con el listado de mediciones (BoQ, *Bill of Quantities*).

3.6.1. IFC (*Industry Foundation Classes*)

El archivo IFC es un formato de datos diseñado para el intercambio de modelos con información sin pérdida o distorsión de datos. Es un formato de archivo abierto y neutral que permite la interoperabilidad entre varias aplicaciones que operan en el sector de la construcción.

Una de las propiedades del modelo IFC es que podemos abrirlo en cualquier visor IFC, independientemente del software con el que se haya producido, manteniendo inalterable toda la información incluida.

3.6.2. BBS (*Bar Bending Schedule*)

El BBS es un listado que incluye todas las barras de armado del proyecto, describiendo la posición, marca, tipo, tamaño, longitud, cantidad y detalles de doblado para la correcta fabricación de cada una de las barras.

En nuestro caso, sabiendo que el modelo contiene más de 30 000 grupos de barras generadas mediante programación, y aprovechando que están incluidas y codificadas en el modelo, se creó una plantilla en el software para generar de forma automática los listados necesarios que definan completamente todas las barras del viaducto.

DIM.A Min	DIM.A Max	DIM.B Min	DIM.B Max	DIM.C Min	DIM.C Max	DIM.r	Vekt - Kg Total	Bukkeform [mm]
DIM.A Min	DIM.A Max	DIM.B Min	DIM.B Max	DIM.C Min	DIM.C Max	DIM.r	Weight - Kg Total	Bend Shape [mm]
765	765	9450	9450	765	765	192	1556.52	9450 765
2735	2735	195	195	2735	2735	40	1043.94	2735 195
795	795	9770	9770	795	795	192	1611.7	9770 795

Figura 21. Ejemplo de una parte del BBS del armado del puente.

3.6.3. BoQ (*Bill of Quantities*)

El BoQ es un listado que incluye todas las partidas referentes a las mediciones. En este caso fue posible listar todas aquellas partidas asociadas a *elementos físicos tangibles* incluidos en el modelo, quedándose fuera las *partidas intangibles* tales como las de tipo “unidad de retirada de nieve en el entorno de trabajo” o “unidad de

estudio de curado de superficies de hormigón en tiempo frío”.

4. Colaboración y coordinación

Para aprovechar todo el potencial y ser lo más eficientes posible, hemos trabajado de forma colaborativa sobre el mismo modelo en tiempo real para producir, revisar y coordinar.

4.1 Modelo multiusuario

En el mismo modelo ha trabajado un equipo programando el tablero de hormigón, otro el tablero metálico y otro equipo con la subestructura.

Para trabajar en el mismo espacio, cada usuario que accede al modelo ya sea para producir o revisar, se ha sincronizado en una nube común para todos los implicados en el desarrollo del proyecto.

El modelo se sincroniza y actualiza en tiempo real, mejorando así la optimización del trabajo en equipo, aumentando la eficiencia y eficacia, garantizando la precisión y reduciendo sustancialmente los errores.

4.2 Revisión del modelo

De la misma forma, el modelo se sincroniza en otro espacio al que accede el equipo de diseño para revisarlo y comprobarlo. Aquí, además de ver el modelo, medir, comprobar colisiones y coordinarlo con los modelos adyacentes, se generan las tareas necesarias que se asignan a los usuarios implicados.

De esta manera, todas las tareas de corrección o actualización quedan registradas en el mismo lugar, asegurando su trazabilidad. Estas tareas pasan por diferentes estados a medida que se van corrigiendo, hasta que quedan cerradas.

ToDo					1783 of 1783
	Title	Assignee	Modified on	Priority	Status
☒	E6RA-1884 Actualizar textos de los empalme	Alberto Justo Cangas	25-09-2024	Critical	Done
☒	E6RA-1883 Ajustar "25 Material" B55 en las p	Alberto Justo Cangas	23-09-2024	Normal	Closed
☒	E6RA-1882 K62 BBS	Alberto Justo Cangas	15-09-2024	Critical	New
☒	E6RA-1879 E-62_Capa superior asfalto	Alberto Justo Cangas	27-06-2024	High	Closed
☒	E6RA-1878 E-62_Resina en juntas de constr	Alberto Justo Cangas	27-06-2024	High	Closed
☒	E6RA-1880 E-62_Partir barras muro estribo e	Alberto Justo Cangas	27-06-2024	High	Closed

Figura 22. Ejemplo de tareas creadas durante la revisión del modelo.

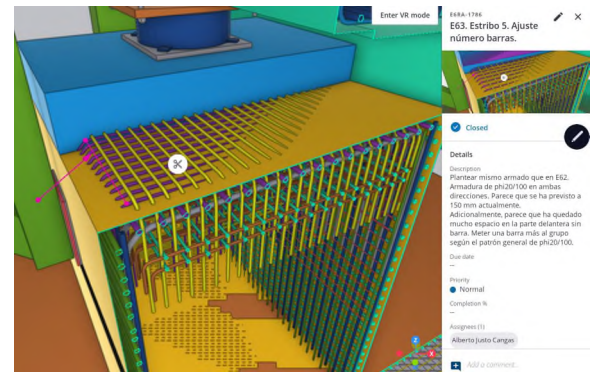


Figura 23. Ejemplo de una tarea corregida vista desde el modelo.

4.3 Coordinación con el resto de las disciplinas

Una vez que la revisión interna ha sido aprobada, el modelo se comparte en un nuevo espacio común donde todas las disciplinas están representadas. De esta manera, todos los actores involucrados en el proyecto pueden comprobar y revisar que el modelo del viaducto se ajusta al diseño y encaja perfectamente con el resto de las disciplinas.

4.4 Utilización del modelo final en la fabricación de la estructura metálica

Una vez completada la fase de modelado de la estructura metálica, tras pasar por todas sus revisiones, el modelo pudo ser utilizado por el fabricante.

Durante el trabajo en la parte metálica, nos aseguramos de identificar las necesidades básicas de los fabricantes de estructuras metálicas, de modo que tuvieran un modelo de partida muy

avanzado sobre el cual pudieran trabajar. Esta es una de las razones por la que se eligió *Tekla Structures* como programa de modelado BIM, ya que es un software muy popular entre los fabricantes de estructuras metálicas.

Como ya hemos comentado, el modelo incluye todos los elementos, tornillos y soldaduras necesarios junto con sus metadatos para la fabricación sin requerir documentos adicionales, así como los valores de las contraflechas de las vigas. En esta fase de modelado, se ponen los valores en lugar de las vigas con las contraflechas incluidas, ya que el objetivo es generar el modelo del puente en su posición teórica a día de apertura al tráfico rodado. Tampoco se incluyen los empalmes de fabricación en taller.

Aun así, el fabricante recibió una gran ayuda al poder apoyarse en nuestro modelo para generar el suyo con las contraflechas y los empalmes. Actualizó la nueva forma de las vigas principales según los datos de las contraflechas y añadió los empalmes necesarios en taller. Para el resto de objetos, como los diafragmas, atados y rigidizadores, simplemente tuvo que reposicionarlos.

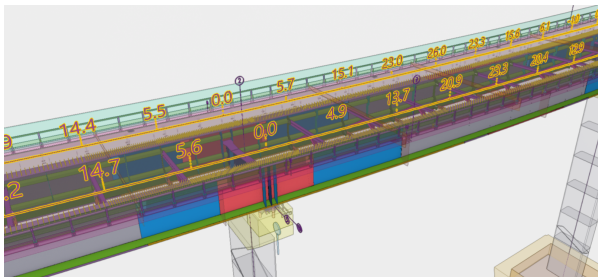


Figura 24. Contraflecha incluida en el modelo.

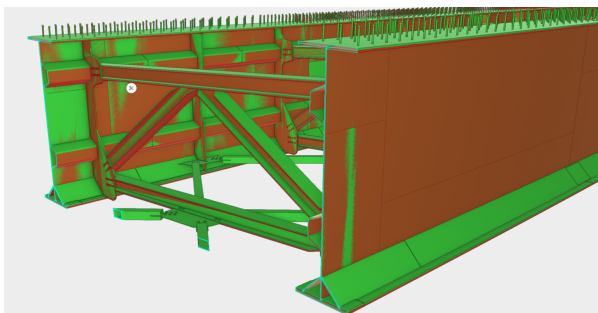


Figura 25. Superposición de modelos de ingeniería y fabricación.

5. Conclusión

A lo largo de este artículo, hemos detallado las distintas fases de generación de un modelo BIM de estructuras de obra lineal, como son los viaductos. A partir de lo expuesto, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El diseño paramétrico ofrece una gran capacidad para modelar geometrías complejas y proporciona agilidad en las actualizaciones debido a cambios de diseño o revisiones.
- Además, hay un aumento considerable en la calidad del proyecto.
- Con la programación y el diseño paramétrico, la curva de esfuerzo en relación con los resultados es mayor al principio. Sin embargo, a medida que el proyecto avanza, el esfuerzo disminuye sustancialmente, lo que resulta en una mayor productividad.
- Los modelos pueden ser consultados en tiempo real, lo que permite trabajar de forma transparente.
- Se mejora la optimización de los tiempos entre todas las disciplinas y actores involucrados en el proyecto.
- Importante disminución de los errores en obra, donde los costes asociados a un error son mucho mayores.

Agradecimientos

Los autores de este artículo queremos agradecer la colaboración en este proyecto de otros miembros de los equipos de *Estructuras* y *BIM* de Acciona Ingeniería: Borja Balbastre Camarena, José María Arroyo Barbat, Jesús Espinós Andrés, Alberto Gabarrón Durán y José María Hernández Aranda.

Referencias

- [1] *Tekla Structures*. Trimble Inc.
- [2] *Grasshopper*. Rhinoceros. Robert McNeel & Associates.
- [3] *Trimble Connect Web*. Trimble Inc.
- [4] *Quadri*. Trimble Inc.