

BIM 5D frente al cómputo tradicional en el reforzamiento estructural: un aplicativo en Dynamo-Revit para la cuantificación, el presupuesto y la verificación según la NEC de un encamisado metálico de pilares

5D BIM versus traditional quantity take-off in structural retrofitting: a Dynamo-Revit application for quantities, cost estimation and NEC compliance checking of a steel jacketing for columns

RESUMEN

La cuantificación de los reforzamientos estructurales se realiza todavía con planos CAD 2D y hojas de cálculo manuales que estiman los materiales de unión y protección con factores fijos, lo que impide rastrear el origen de cada cantidad. Este estudio compara ese cómputo tradicional con un flujo BIM 5D apoyado en un aplicativo paramétrico desarrollado en Dynamo-Revit y codificado en Python, aplicado al encamisado metálico de 15 pilares de $0,65 \times 0,90$ m de un paso vehicular elevado de Guayaquil. El aplicativo genera el encamisado a partir de 28 parámetros de entrada y asigna a cada pieza su cantidad y su rubro presupuestario. Además, calcula la soldadura, el adhesivo epóxico y la pintura anticorrosiva con los rendimientos de sus fichas técnicas, y verifica 18 requisitos de detallado de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). La geometría ejecutada se reconstruyó con fotografías de obra, y las cantidades y los presupuestos se contrastaron con el contrato y con la planilla de liquidación. El modelo cuantificó 17.582,10 kg de acero ASTM A588 y 1.626 pernos epóxicos, con una diferencia de 0,30 kg respecto de la liquidación. Los factores fijos de los análisis de precios unitarios sobrestimaron unas cuatro veces la soldadura y el adhesivo, y unas cinco veces el anticorrosivo, por lo que el presupuesto BIM 5D resultó USD 6.389,32 menor (8,61 % de los rubros del encamisado). La verificación detectó un incumplimiento de distancia al borde en la conexión con la viga cabezal, y el tiempo estimado de actualización del diseño se redujo en una mediana de 74,3 %. Se concluye que, frente al cómputo tradicional, el flujo BIM 5D aporta trazabilidad presupuestaria, precisión en los materiales de unión y protección y un control temprano del detallado.

PALABRAS CLAVE: BIM 5D, reforzamiento estructural, encamisado metálico, modelado paramétrico, cuantificación automatizada, Dynamo-Revit, verificación normativa, Norma Ecuatoriana de la Construcción.

ABSTRACT

The quantity take-off of structural retrofitting is still carried out with 2D CAD drawings and manual spreadsheets that estimate joining and protection materials through fixed factors, which prevents tracing the origin of each quantity. This study compares that traditional take-off with a 5D BIM workflow supported by a parametric application developed in Dynamo-Revit and coded in Python, applied to the steel jacketing of 15 columns of 0.65×0.90 m in an elevated vehicular overpass in Guayaquil. The application generates the jacketing from 28 input parameters and assigns each element its quantity and budget item. It also calculates welding electrode, epoxy adhesive and anticorrosive paint from the yields stated in their data sheets, and checks 18 detailing requirements of the Ecuadorian Construction Code (NEC). The as-built geometry was reconstructed from site photographs, and quantities and budgets were compared with the contract and the final payment record. The model quantified 17,582.10 kg of ASTM A588 steel and 1,626 epoxy anchors, within 0.30 kg of the payment record. The fixed factors of the unit price analyses overestimated welding and adhesive about fourfold and anticorrosive paint about fivefold, so the 5D BIM budget was USD 6,389.32 lower (8.61 % of the jacketing items). The compliance check detected an edge distance nonconformity in the cap beam connection, and the estimated design update time decreased by a median of 74.3 %. It is concluded that, compared with traditional take-off, the 5D BIM workflow provides budget traceability, accurate estimates of joining and protection materials and early control of detailing.

KEYWORDS: 5D BIM, structural retrofitting, steel jacketing, parametric modeling, automated quantity take-off, Dynamo-Revit, code compliance checking, Ecuadorian Construction Code.

TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y CONOCIMIENTO

Recepción: 15/10/2026

Aceptación: 20/10/2026

Publicación: 31/12/2026

AUTOR/ES

 **Tenempaguay Palate, Andrés Nicolás**

 **Abata Toscano, Wilson Javier**

 **Arroyo Orozco, Jorge José**

 **Maliza Cruz, Wellington Isaac**

 antenempaguayp@ube.edu.ec

 wjabatat@ube.edu.ec

 jarroyoo@ube.edu.ec/

 jorge.arroyoo@ug.edu.ec

 wimalizac@ube.edu.ec

 Universidad Bolivariana del Ecuador

 Universidad Bolivariana del Ecuador

 Universidad Bolivariana del Ecuador / Universidad de Guayaquil

 Universidad Bolivariana del Ecuador

 Guayaquil – Ecuador

 Guayaquil – Ecuador

 Guayaquil – Ecuador

 Guayaquil – Ecuador

CITACIÓN:

Tenempaguay, A., Abata, W., Arroyo, J. & Maliza, W. (2026). BIM 5D frente al cómputo tradicional en el reforzamiento estructural: un aplicativo en Dynamo-Revit para la cuantificación, el presupuesto y la verificación según la NEC de un encamisado metálico de pilares. Revista InnovaSciT. 4 (2.). p. 1636 – 1672.

INTRODUCCIÓN

La República del Ecuador se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las zonas de mayor amenaza sísmica del planeta. El sismo de subducción de magnitud 7,8 Mw de 2016 evidenció la vulnerabilidad de las estructuras construidas en el país, y los estudios posteriores atribuyeron gran parte de los colapsos a deficiencias constructivas y a mecanismos de falla asociados a columnas débiles (Cunalata Vásquez y Caiza Sánchez, 2022). Esta problemática no se limita a las edificaciones, sino que alcanza también a la infraestructura vial elevada construida en décadas anteriores, donde es frecuente encontrar exposición y corrosión del acero de refuerzo, pérdida de sección del hormigón y estribos con espaciamientos que no cumplen los parámetros de confinamiento vigentes.

Un caso representativo es el paso vehicular elevado de la intersección de la Av. del Bombero y la Av. Rodríguez Bonín, en Guayaquil. Según el informe de prefactibilidad de la M.I. Municipalidad de Guayaquil (2021a), la estructura presentaba desprendimiento de hormigón, corrosión severa del refuerzo y estribos rotos con espaciamientos de 30 a 45 cm, mientras que el área de influencia del paso elevado registraba un tránsito promedio diario de 131.124 vehículos. El mismo organismo estimó que un colapso generaría USD 57,5 millones en costos de tiempo de viaje y USD 1,4 millones en costos de reconstrucción (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2021a).

La metodología BIM (*Building Information Modeling*) organiza la información del proyecto alrededor de un modelo con objetos paramétricos, y su dimensión 5D vincula ese modelo con las cantidades y los costos. Con ello, el modelo pasa a ser la fuente principal de información para la cuantificación y la estimación de costos (Stanley y Thurnell, 2014), y atiende a uno de los factores que más afectan el desempeño económico de los proyectos, la imprecisión de las cantidades y de los presupuestos (Vigneault et al., 2020). En esa línea, Wahab y Wang (2022) reportan que la extracción de cantidades desde el modelo reduce la desviación presupuestaria frente al cómputo 2D, aunque su precisión depende del nivel de detalle modelado y de las reglas de medición. Khosakitchalert et al. (2020) lo comprobaron en muros y pisos compuestos, cuyas cantidades extraídas del modelo original se desviaron hasta en 47 % de las de referencia y solo coincidieron con ellas después de separar cada capa en un elemento independiente mediante un procedimiento automatizado en Dynamo.

Por su parte, D'Angelo et al. (2022) muestran que los flujos BIM ya se aplican a la rehabilitación de edificaciones, y la programación visual con Dynamo permite automatizar la extracción de cantidades y su enlace con el presupuesto (Saenpaeng et al., 2025). Sin embargo, la revisión de Lim et al. (2021) sobre el uso del BIM en edificaciones existentes advierte que estos recursos apenas se han aplicado en ese ámbito, puesto que solo cinco trabajos publicados entre 2018 y 2020 los emplearon, y sitúa el nivel de automatización entre los vacíos pendientes. Fuera de la rehabilitación, Dynamo se ha utilizado para generar alternativas estructurales a

partir de reglas y parámetros (Hamidavi et al., 2020), para incorporar reglas de diseño durante la creación del modelo (Singh et al., 2019) y para automatizar la generación de modelos de infraestructura en distintos niveles de detalle (Ninić et al., 2017).

Aun así, Autodesk Revit no dispone de familias nativas para modelar el encamisado metálico de pilares rectangulares, con sus ángulos, placas, pernos adhesivos, cordones de soldadura y conexiones a la cimentación y a la viga cabezal, carencia que se relaciona con la falta de protocolos para codificar los objetos del modelo que Stanley y Thurnell (2014) identifican como una de las barreras del BIM 5D. Tampoco se encontraron trabajos que comparen un flujo de este tipo con el cómputo tradicional de una obra pública ecuatoriana, ni estudios que verifiquen de forma automática los requisitos de detallado de las normas que la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) adopta para el acero estructural y los anclajes (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI], 2014a, 2014b).

Por consiguiente, el objetivo de este artículo es comparar el flujo BIM 5D con el cómputo tradicional en la cuantificación y el presupuesto del reforzamiento estructural de pilares con encamisado metálico. Para ello se desarrolló un aplicativo paramétrico en Dynamo-Revit, codificado en Python (CPython 3), que además de cuantificar verifica los requisitos de detallado de la NEC y calcula los materiales de unión y protección a partir de los rendimientos de sus fichas técnicas. Su desempeño se evaluó en el caso del paso vehicular elevado de la Av. del Bombero y la Av. Rodríguez Bonín.

MÉTODOS MATERIALES

La investigación adoptó un enfoque cuasiexperimental, puesto que se compararon dos métodos de cuantificación sobre un mismo caso real y se controló una de las variables de respuesta, el tiempo de actualización del diseño (TAD), que se define en el apartado 2.8. El estudio se desarrolló en 2026 y tuvo como objeto el proceso de cuantificación del encamisado metálico de los pilares del proyecto de mantenimiento del paso elevado, obra ejecutada entre 2022 y 2023.

Las fuentes primarias fueron los planos estructurales del proyecto, las especificaciones técnicas municipales de la M.I. Municipalidad de Guayaquil (2021b), los análisis de precios unitarios (APUs) de la contratista MARDIRED S.A. (2022) y la planilla única de liquidación de la obra (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2023). Para los materiales de unión y protección se consultaron, además, las fichas técnicas del electrodo, del adhesivo epóxico y del anticorrosivo. El trabajo se organizó en cuatro etapas: (a) caracterización del caso real, (b) modelado paramétrico BIM, (c) cuantificación 5D con verificación normativa automatizada y (d) comparación de cantidades, presupuestos y tiempos entre ambos métodos.

Caso de estudio

El contrato de mantenimiento se adjudicó a la contratista MARDIRED S.A. en junio de 2022 por USD 294.164,72, y la obra se ejecutó entre julio de 2022 y octubre de 2023. La

subestructura comprende 15 pilares de hormigón armado de $0,65 \times 0,90$ m, dispuestos en tres ejes de cinco pilares y con una altura libre de 4,10 m.

El informe de prefactibilidad (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2021a) registró estribos rotos con espaciamientos de 300 a 450 mm, valores que duplican o triplican la separación máxima de 150 mm que la NEC-SE-HM (sección 4.3.4) establece para el refuerzo transversal de confinamiento en elementos a flexocompresión (MIDUVI, 2014b). La evaluación de la capacidad sísmica del encamisado quedó fuera del alcance de este estudio, que se centró en su cuantificación, su presupuesto y la verificación de sus requisitos de detallado.

La solución consistió en un encamisado metálico exterior compuesto por cuatro ángulos L $150 \times 150 \times 15$ mm en las esquinas, de 4,60 m de altura incluidos 0,50 m de excavación. Los ángulos se unen mediante placas horizontales de 100×15 mm, soldadas entre sus alas con cordones de filete de 8 mm y electrodo E7018, y las placas, a su vez, se anclan a la columna con pernos de anclaje adhesivo $\varnothing 1/2'' \times 5''$ alojados en perforaciones de $\varnothing 16$ mm. En la base, un marco de perfiles L fija el encamisado a la cimentación mediante pernos verticales, mientras que en la parte superior otro marco de perfiles L, complementado con platinas laterales, se fija a la viga cabezal mediante pernos de anclaje.

Los ángulos, las placas y las platinas son de acero ASTM A588 ($F_y = 345$ MPa), material que la AISC 360-10 acepta para perfiles laminados y planchas (American Institute of Steel Construction [AISC], 2010) y que la NEC-SE-HM reconoce en su sección 10.3.4. Los pernos son barras roscadas ASTM A193 Grado B7 con tuercas ASTM A194, y el electrodo cumple la especificación AWS A5.1, materiales admitidos en las secciones A3.3 a A3.5 de la misma norma (AISC, 2010). La Tabla 1 presenta las cantidades contratadas y las liquidadas de los cuatro rubros del encamisado.

Tabla 1 Rubros del encamisado metálico: cantidades contratadas y ejecutadas

Rubro	Descripción	Cantidad contratada	Cantidad ejecutada	P.U. (USD)	Valor ejecutado (USD)
505(2)E	Estructura metálica, acero ASTM A588	18.449,00 kg	17.581,80 kg	3,39/kg	59.602,30
2.27D	Perforación $\varnothing 16$ mm, L = 5"	1.740 u	1.626 u	2,38/u	3.869,88
2.25C	Adhesivo epóxico para perno $\varnothing 1/2'' \times 5''$	1.740 u	1.626 u	3,90/u	6.341,40
PER-3	Perno de anclaje $\varnothing 1/2'' \times 5''$	1.740 u	1.626 u	2,72/u	4.422,72
Total					74.236,30

Nota. Elaborado por los autores (2026). Las cantidades contratadas y ejecutadas se tomaron de la planilla única de liquidación de la obra (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2023), y los precios unitarios, de los APUs presentados por la contratista MARDIRED S.A. (2022).

Durante la ejecución, la contratista modificó la disposición de algunos elementos respecto del detalle de los planos, lo que explica que la cantidad liquidada sea menor que la

contratada. Como no se dispuso de los anexos de cálculo, la geometría ejecutada se reconstruyó a partir del registro fotográfico de la obra (Figura 1) y se ajustó a las cantidades liquidadas mediante hojas de cálculo.

Las fotografías permitieron identificar tres particularidades. En primer lugar, las platinas laterales tienen 150 mm de alto y seis pernos horizontales cada una; en segundo lugar, la viga cabezal recibe cuatro pernos verticales por cara menor; y, por último, en los seis pilares de extremo de eje no hay pernos en la cara exterior, y el perfil superior de esa cara se cortó dejando una ceja de 25 mm. Con estos datos, el ajuste final fijó 13 niveles de placas por pilar y tres pernos por lado en la placa base.

Cómputo tradicional del proyecto

En el cómputo tradicional, las cantidades se midieron sobre los planos CAD 2D y se calcularon en hojas de cálculo organizadas por rubro. Al concluir la obra, la ejecución se liquidó en una única planilla de liquidación, en la que el acero se pagó por kilogramo y los pernos por unidad. Los materiales de unión y protección, en cambio, no se midieron, sino que se incluyeron dentro de los APUs con factores fijos: 0,025 kg de soldadura y 0,005 galones de anticorrosivo por kilogramo de acero, y 0,1 cartucho de adhesivo por perno (MARDIRED S.A., 2022). Para reproducir este método en el estudio, los autores elaboraron hojas de cálculo de cómputo y presupuesto con la geometría de los planos y los APU del proyecto.

Figura 1

Encamisado metálico ejecutado: (a) pilar con platina lateral y pernos horizontales en la viga cabezal; (b) cara menor con pernos verticales en la viga cabezal y un perno por placa



Nota. Fotografías tomadas por los autores (2026).

Aplicativo paramétrico en Dynamo-Revit

Funcionamiento general y parámetros de entrada

Revit no dispone de una familia nativa para el encamisado metálico, por lo que se desarrolló un aplicativo en Autodesk Dynamo 2.18, acoplado a Revit 2024 y codificado en Python (CPython 3). Se optó por Dynamo porque da acceso a la interfaz de programación de aplicaciones (API) de Revit (Hamidavi et al., 2020) y permite manipular directamente los

elementos del modelo sin salir del entorno BIM (Yoo et al., 2024). El aplicativo identifica en el modelo las columnas del tipo indicado por el usuario y lee de cada una su sección (b y h) y su altura, medida entre sus niveles de base y tope. Con esas dimensiones y los valores de entrada, genera cada pieza del encamisado como un sólido de Revit (DirectShape) y le asigna una marca (*Mark*) que la identifica por tipo y dimensiones, parámetros de cantidad (volumen, peso, área superficial, longitud y volumen de epóxico) y parámetros de clasificación que indican el elemento, el rubro presupuestario, el pilar y el tipo de pilar al que pertenece, así como su estado normativo.

Este vínculo entre cada pieza, su cantidad y su rubro constituye la dimensión 5D del flujo, ya que las cantidades no se miden sobre planos, sino que se extraen del modelo mediante las tablas de planificación de Revit y se valoran directamente con los APU's del proyecto. El usuario controla el aplicativo con 28 parámetros de entrada, agrupados en once bloques temáticos, de modo que basta con modificar un valor y volver a ejecutar para regenerar el encamisado completo, junto con sus cantidades y su verificación. En el caso de estudio, los parámetros se calibraron con la geometría ejecutada (Tabla 2), y cada columna se modeló desde el fondo de la excavación hasta el fondo de la viga cabezal, con 4,60 m de altura.

Tabla 2 *Parámetros de entrada del aplicativo y valores adoptados en el caso de estudio*

Grupo	Parámetros	Valores adoptados
1. Identificación y soldadura	Tipo de pilar, prefijo de marca, tamaño del filete	PILA_65X90_CM; REF; 8 mm
2. Perfil L	Ala y espesor	150 mm; 15 mm
3. Placas horizontales	Alto y espesor	100 mm; 15 mm
4. Zona de excavación	Nivel superior, número de placas, separación	500 mm; 0 (se usa la separación); 150 mm
5. Zona normal	Número de placas, separación	11; 300 mm (no se usa)
6. Perno	Diámetro, longitud total, diámetro del taladro	12,7 mm ($\varnothing 1/2''$); 127 mm (5"); 16 mm
7. Pernos de la columna	Pernos por placa en la cara menor y en la cara mayor	1; 2
8. Placa base	Pernos por lado menor y por lado mayor	3; 3
9. Viga cabezal	Ancho de la viga, espesor y alto de la platina, pernos por cara menor y por platina, altura de los pernos en la platina	850 mm; 15 mm; 150 mm; 4; 6; en el eje
10. Pilares de extremo	Detección automática, ceja del perfil cortado	Activada; 25 mm
11. Verificación normativa	Resaltado en rojo de los elementos que no cumplen	Activado

Nota. Elaborado por los autores (2026).

La Figura 2 resume el flujo de trabajo, desde el modelo base en Revit hasta la comparación con el cómputo tradicional, e indica en cada etapa la herramienta empleada y la fuente de datos que la alimenta. El flujo parte del modelado de los pilares existentes y de la configuración de los parámetros en Dynamo Player; luego, la generación paramétrica produce de forma simultánea las cantidades por pieza, que se presentan en tablas de planificación, y la verificación según la NEC, cuyos incumplimientos se señalan en el propio modelo. Por último, las cantidades se valoran con los APUs en el presupuesto BIM 5D y se comparan con el cómputo tradicional. Como cada etapa depende solo de los parámetros de entrada, el procedimiento puede replicarse en otros proyectos de encamisado de pilares rectangulares.

Generación del encamisado

El aplicativo procesa cada pilar en ocho bloques secuenciales, de B0 a B7. Para cada bloque se describe primero su lógica y luego los valores con que se aplicó en el caso de estudio.

Figura 2 Flujo de trabajo BIM 5D para la cuantificación, el presupuesto y la verificación normativa del encamisado metálico



Nota. Elaborado por los autores (2026).

B0. Limpieza del modelo. Antes de generar un pilar, el aplicativo elimina las piezas que creó en ejecuciones anteriores dentro del volumen de ese pilar, y las reconoce por un código interno. De esta forma, el modelo puede regenerarse las veces que sea necesario sin duplicar elementos.

B1. Ángulos de esquina. En cada esquina de la columna se extruye un perfil L con el ala y el espesor ingresados, a lo largo de toda la altura. En el caso de estudio se generaron cuatro ángulos L 150 × 150 × 15 mm por pilar, de 4,60 m de longitud.

B2. Placas horizontales. La altura de la columna se divide en una zona de excavación y una zona normal, cada una definida por un número de placas o por una

separación. En la zona de excavación, la primera placa coloca su borde superior en el nivel indicado y las siguientes descienden hacia el marco de la placa base; en la zona normal, en cambio, las placas ascienden hasta el marco superior. En ambas zonas la separación calculada se redondea al centímetro, sin que las placas se superpongan ni invadan los marcos, y si falta espacio para las placas solicitadas, o sobra espacio para una más, el aplicativo emite una alerta sin detener la ejecución. En el caso de estudio resultaron dos placas a 150 mm en la zona de excavación y once a 350 mm en la zona normal, es decir, 13 niveles de cuatro placas cada uno.

B3. Pernos de la columna. Son los pernos que anclan las placas horizontales a las caras del pilar. En cada nivel, el aplicativo los distribuye de forma equidistante en el tramo libre de cada cara, es decir, entre las alas de los ángulos: si el tramo libre mide L y la cara lleva n pernos, la separación es $L/(n + 1)$. Cada perno se genera con su arandela y su tuerca hexagonal pesada ASTM A194 2H. En el caso de estudio se colocaron un perno por placa en las caras menores y dos en las caras mayores, lo que suma seis pernos por nivel y 78 por pilar.

El empotramiento de los pernos no se ingresa, sino que el aplicativo lo calcula restando a la longitud total del perno la altura de la tuerca, el espesor de la arandela y el espesor de la pieza metálica que atraviesa. En el caso de estudio, el perno de 5" resultó con un empotramiento de 97,7 mm, valor coherente con la perforación de 5" del rubro 2.27D (Tabla 1

B4. Cordones de soldadura. Las placas se unen a las alas de los ángulos mediante semicordones verticales, ocho por nivel, con el tamaño de filete ingresado y una longitud igual al alto de la placa. En el caso de estudio el filete fue de 8 mm, y entre placas y marcos se generaron 130 cordones por pilar.

B5. Marco de placa base. El aplicativo crea cuatro perfiles L apoyados sobre la cimentación, de longitudes $b + 2e$ y $h + 2e$, donde b y h son las dimensiones de la sección de la columna y e es el espesor del perfil L, y los une con cuatro cordones de esquina y ocho cordones de unión con los ángulos. Sobre el ala horizontal de cada perfil se colocan los pernos verticales de anclaje, distribuidos de forma equidistante a lo largo del lado mayor y del lado menor de la columna: si un lado mide L y lleva n pernos, la separación es L/n y los pernos extremos quedan a media separación de las esquinas. En el caso de estudio se colocaron tres pernos en cada lado, es decir, 12 por pilar.

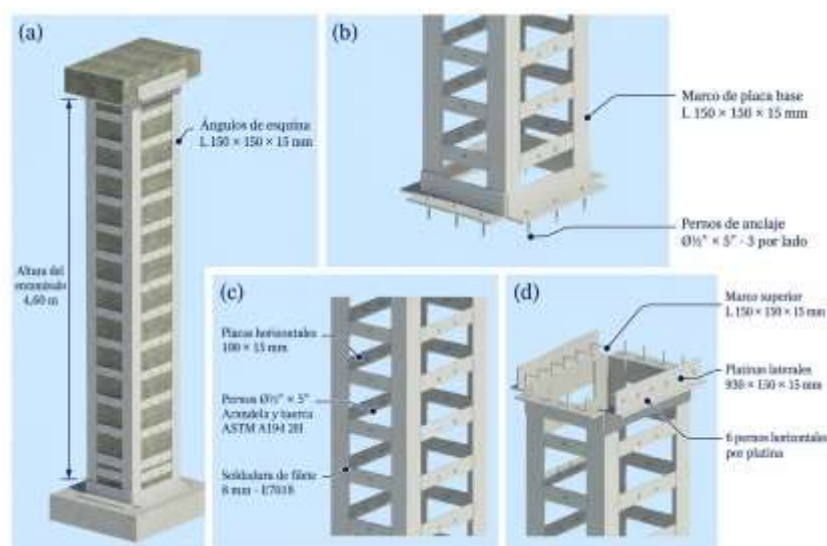
B6. Conexión con la viga cabezal. Bajo la viga se genera un marco superior de cuatro perfiles L y, en las caras mayores, dos platinas laterales, cada una soldada al marco con un cordón. Los pernos de esta conexión se distribuyen con el mismo criterio de equidistancia de la placa base: los verticales suben a la viga desde las caras menores, y los horizontales atraviesan las platinas a la altura indicada o, si no se indica, en su eje. Además, el aplicativo identifica los pilares de extremo de cada eje agrupando las columnas por su coordenada X, y en ellos omite los pernos verticales de la cara exterior y reemplaza el perfil superior de esa cara por un perfil cortado.

En el caso de estudio se emplearon cuatro pernos verticales por cara menor y platinas de $930 \times 150 \times 15$ mm con seis pernos horizontales cada una, ubicados en el eje de la platina, a 75 mm del fondo de la viga. Así, los pilares interiores llevan 20 pernos de viga cabezal y los seis pilares de extremo, 16, con una ceja de 25 mm en el perfil cortado.

B7. Verificación normativa. Una vez generada la geometría, el aplicativo evalúa los requisitos de detallado que se describen en el apartado 2.5.

Con los valores adoptados, cada pilar interior suma 110 pernos y cada pilar de extremo 106, lo que da un total de 1.626 pernos en los 15 pilares. La Figura 3 muestra el modelo resultante, con los ángulos de esquina, las placas en sus dos zonas, los pernos con arandela y tuerca, los cordones, el marco de placa base y la conexión con la viga cabezal, incluido el perfil cortado de los pilares de extremo.

Figura 3 Modelo BIM del encamisado metálico generado en Dynamo-Revit: (a) vista 3D de un pilar encamisado; (b) marco de placa base con sus pernos verticales de anclaje; (c) placas horizontales con los pernos de la columna; (d) conexión con la viga cabezal mediante el marco superior y las platinas laterales



Nota. Elaborado por los autores (2026) a partir del modelo en Revit 2024.

Verificación normativa según la NEC

Normas y requisitos verificados

La verificación sigue la cadena de referencias que establece la NEC. Para el acero y las soldaduras, la NEC-SE-AC adopta la ANSI/AISC 360-10, cuya sección J2 rige el diseño de las juntas soldadas (MIDUVI, 2014a). Para los anclajes, la NEC-SE-HM remite al ACI 318 sin fijar su edición (MIDUVI, 2014b); sin embargo, la edición que refiere la AISC 360-10, el ACI 318-08, no regula los anclajes adhesivos, por lo que sus requisitos se tomaron del apéndice D del ACI 318-11, la primera edición que los incorpora (American Concrete Institute [ACI], 2011).

La Tabla 3 presenta los 18 requisitos que el aplicativo evalúa en cada pilar, agrupados en cinco familias: soldadura, anclajes adhesivos, distancias a los bordes, esbeltez de los perfiles

y consistencia geométrica. Los límites se calculan a partir de los parámetros de entrada, de modo que se actualizan automáticamente si cambian el diámetro del perno, el espesor de las piezas o la geometría de la conexión. Este planteamiento sigue la línea de Singh et al. (2019), quienes integraron en objetos paramétricos de Revit, mediante Dynamo, las reglas de la coordinación modular para guiar al modelador mientras crea el modelo.

Tabla 3 Requisitos de detallado verificados por el aplicativo

Código	Elemento verificado	Requisito	Criterio de aceptación	de Norma y numeral
No1	Cordones de soldadura	Tamaño mínimo del filete según la parte más delgada unida	$w \geq 3, 5, 6 \text{ u } 8 \text{ mm}$ para $t \leq 6, \leq 13, \leq 19$ y $> 19 \text{ mm}$	AISC 360-10, Tabla J2.4 (NEC-SE-AC)
No2	Cordones de soldadura	Tamaño máximo del filete en bordes de placa	$w \leq t - 2 \text{ mm}$ ($t \geq 6 \text{ mm}$)	AISC 360-10, J2.2b
No3a–No3d	Pernos de la columna, de placa base y de viga cabezal	Empotramiento dentro del rango del modelo de adherencia	$4 \cdot d_a \leq h_{ef} \leq 20 \cdot d_a$	ACI 318-11, D.4.2.3 (NEC-SE-HM)
No4	Todos los pernos	Holgura entre el taladro y el perno	$1,5 \text{ mm} \leq d_{tal} - d_a \leq 6,5 \text{ mm}$	Ficha del adhesivo (ACI 318-11, D.9.1)
No5a–No5d	Pernos de los cuatro grupos	Separación mínima entre anclajes	$s \geq 6 \cdot d_a$	ACI 318-11, D.8.1
No6a	Pernos de la columna	Distancia al borde de la columna	$c \geq 6 \cdot d_a$	ACI 318-11, D.8.3
No6b	Pernos verticales de viga cabezal	Distancia al borde lateral de la viga	$c \geq 6 \cdot d_a$	ACI 318-11, D.8.3
No6c	Pernos horizontales de las platinas	Distancia al borde inferior de la viga	$c \geq 6 \cdot d_a$	ACI 318-11, D.8.3
No6d	Pernos de placa base	Distancia al borde de la cimentación	$c \geq 6 \cdot d_a$ (informativo sin datos de la zapata)	ACI 318-11, D.8.3
No7	Pernos de la columna	Pernos de caras opuestas sin cruce en el núcleo	$2 \cdot h_{ef} < \text{lado menor}$	Consistencia geométrica
No8	Ángulos y perfiles L	Esbeltez local del ala	$b/t \leq 0,45 \cdot \sqrt{(E/F_y)}$	AISC 360-10, Tabla B4.1a
N10	Platinas laterales	Apoyo de la platina sobre el ala del perfil superior	Solape > 0	Consistencia geométrica

Nota. d_a = diámetro del perno; h_{ef} = empotramiento efectivo; d_{tal} = diámetro del taladro; s = separación; c = distancia al borde; w = tamaño del filete; t = espesor de la parte más delgada; b/t = relación ancho-espesor del ala. Las placas horizontales no se verifican. Elaborado por los autores (2026) con base en AISC (2010) y ACI (2011).

Identificación de las faltas a la normativa

Cada requisito recibe uno de tres estados: «cumple», cuando el valor del modelo está dentro del límite; «no cumple», cuando lo excede; e «informativo», cuando faltan datos para evaluarlo, como ocurre con la geometría de la zapata en No6d. Los resultados se agrupan por tipo de columna, de modo que, si un requisito falla en solo uno de los pilares, se considera incumplido en todo el tipo y se reporta el valor del peor caso.

Cuando una pieza no cumple, el aplicativo lo señala en el propio modelo. En la vista activa de Revit la pinta de color rojo con relleno sólido, de manera que el modelador ubica la falta a simple vista; al mismo tiempo, registra en los parámetros de la pieza su estado y los códigos incumplidos, y escribe en el tipo de columna un resumen con el número de requisitos que cumplen, que no cumplen y que son informativos. Finalmente, genera en una vista de dibujo un cuadro con el código, el valor, el límite, el estado y la referencia normativa de cada requisito, listo para colocarse en las láminas del proyecto. Este recurso de señalización por colores, programado en Dynamo sobre los propios elementos del modelo, ya se ha empleado para representar niveles de riesgo en la gestión de la seguridad y salud de edificaciones (Cortés-Pérez et al., 2020) y de túneles (Guo y Zhang, 2021). Conviene precisar que se trata de requisitos de detallado geométrico mínimo, por lo que la verificación no sustituye el diseño por resistencia de los anclajes, las soldaduras ni los perfiles.

Para ilustrar el funcionamiento del bloque, la Tabla 4 reúne ejemplos de faltas que el aplicativo detecta al modificar una entrada. Todos son casos hipotéticos, salvo NO6c, que corresponde a la geometría real del proyecto y se muestra en la Figura 4.

Tabla 4 Ejemplos de faltas a la normativa detectadas por el aplicativo

Código	Entrada modificada	Valor obtenido	Límite	Interpretación
No1	Filete de 5 mm en placas de 15 mm	5 mm	≥ 6 mm	La soldadura es menor que el mínimo para ese espesor
No2	Filete de 14 mm en placas de 15 mm	14 mm	≤ 13 mm	El filete excede el máximo admitido en el borde
No3	Perno de 3" en lugar de 5"	46,9 mm	50,8–254 mm	El empotramiento queda fuera del rango del modelo de adherencia
No4	Taladro de 20 mm para perno $\varnothing 1/2$ "	7,3 mm	1,5–6,5 mm	La holgura es excesiva para el adhesivo
No5b	Nueve pernos por lado menor en la placa base	72,2 mm	$\geq 76,2$ mm	Los pernos quedan demasiado próximos
No6b	Viga cabezal de 600 mm de ancho	56,2 mm	$\geq 76,2$ mm	Los pernos verticales quedan cerca del borde lateral
No6c	Geometría real, pernos en el eje de la platina	75,0 mm	$\geq 76,2$ mm	Los pernos horizontales quedan cerca del borde inferior
No8	Ángulos L 150 × 150 × 10 mm	15,0	$\leq 10,83$	El ala del perfil es demasiado esbelta
N10	Viga cabezal de 600 mm de ancho	Sin solape	Solape > 0	La platina no se apoya sobre el ala del perfil superior

Nota. Valores calculados con los criterios de la Tabla 3. Elaborado por los autores (2026).

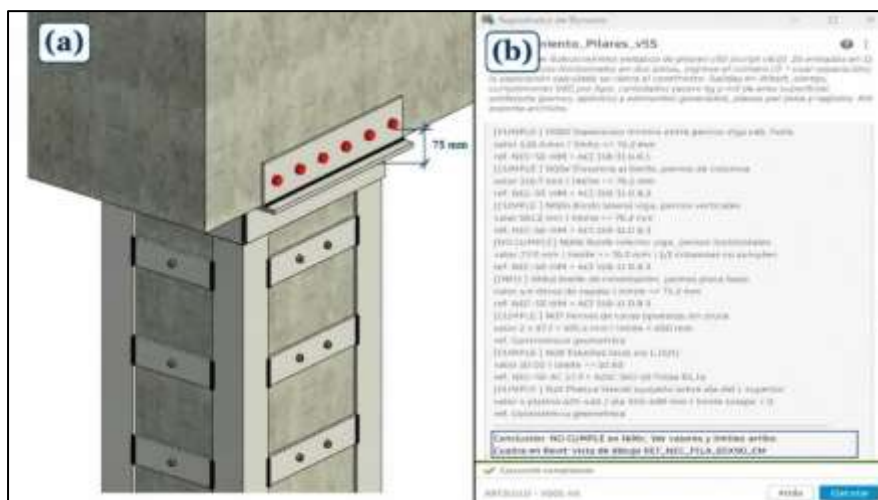
Cálculo de los materiales de unión y protección por rendimiento

En el flujo BIM 5D, los materiales de unión y protección se calculan a partir de una variable geométrica del modelo y del rendimiento declarado en la ficha técnica de cada producto. El acero, por su parte, se obtiene como el volumen del modelo multiplicado por una densidad de 7.850 kg/m³.

Figura 4

Incumplimiento normativo identificado por el aplicativo en un pilar del caso de estudio: (a)

pernos horizontales de la conexión con la viga cabezal resaltados en rojo por no cumplir la distancia mínima al borde (No6c); (b) resultados de la verificación en el Reproductor de Dynamo al finalizar la ejecución, con la referencia al cuadro generado en la vista de dibujo.



Nota. Elaborado por los autores (2026) a partir del modelo en Revit 2024.

Soldadura

El metal depositado se calcula con la longitud de cordón que entrega el modelo. Sin embargo, no todo el electrodo se convierte en cordón, de modo que la masa de electrodo necesaria se obtiene al dividir ese metal para la eficiencia global del electrodo, como se expresa en la Ecuación 1:

$$W_{el} = L_c \cdot (f^2/2) \cdot \rho \cdot 1,10 / \eta \quad [\text{Ecuación 1}]$$

donde L_c es la longitud total de cordón, f el tamaño del filete, ρ la densidad del acero, 1,10 el factor de sobremonta y η la eficiencia global del electrodo. Esta eficiencia combina la eficiencia de depósito del electrodo con la pérdida por colilla. Para el electrodo E7018 de 1/8" se tomó como referencia el Sureweld 7018, cuya ficha técnica indica una eficiencia de depósito de 71,6 % (ESAB, s. f.), y la colilla se estimó en 50 mm de un electrodo de 356 mm, es decir, una pérdida del 14 %; por lo tanto, $\eta = 0,716 \times 0,86 \approx 0,62$. En el caso de estudio, con un filete de 8 mm, cada metro de cordón deposita 0,276 kg de metal y requiere 0,446 kg de electrodo, lo que equivale a un rendimiento de 2,24 m de cordón por kilogramo de electrodo.

Adhesivo epóxico

El adhesivo ocupa el espacio anular entre el taladro y el perno a lo largo del empotramiento, y a ese volumen se le agrega un 10 % por la purga del mezclador y el residuo en la boquilla, como se expresa en la Ecuación 2:

$$V_{res} = (\pi/4) \cdot (d_{tal}^2 - d_p^2) \cdot h_{ef} \cdot 1,10 \quad [\text{Ecuación 2}]$$

donde d_{tal} es el diámetro del taladro, d_p el diámetro del perno y h_{ef} el empotramiento. El número de cartuchos resulta de dividir el volumen total para el volumen útil del cartucho. Como referencia se consultó la ficha técnica del producto Sika AnchorFix-3001, un adhesivo epóxico de dos componentes para anclaje de pernos en hormigón que se comercializa en

cartuchos de 600 ml (Sika Ecuador, 2025); no obstante, en este estudio se adoptó un cartucho de 330 ml como supuesto conservador. En el caso de estudio, cada perno requiere 7,99 ml, de modo que un cartucho de 330 ml rinde para 41 pernos.

Pintura anticorrosiva

El aplicativo calcula el área superficial de todas las caras de cada pieza de acero, ya que el anticorrosivo se aplica antes del montaje. Con esa área, el volumen de pintura se obtiene en la tabla de planificación de Revit mediante un campo calculado, según la Ecuación 3:

$$V_{ac} = A \cdot n \cdot (e/e_{ref}) / [R_t \cdot (1 - p)] \quad [\text{Ecuación 3}]$$

donde A es el área superficial del acero, n el número de manos, e el espesor seco por mano, R_t el rendimiento teórico de la ficha técnica medido al espesor de referencia e_{ref} , y p la fracción de pérdidas por aplicación. Como producto de referencia se tomó el Anticorrosivo Mate PIN3 de Pinturas Cóndor, un recubrimiento alquídico para metales ferrosos cuya ficha técnica declara un rendimiento teórico de $14 \pm 2 \text{ m}^2/\text{L}$ a 1 mil (milésima de pulgada) ($25 \mu\text{m}$) de espesor seco, equivalente a $53,0 \text{ m}^2/\text{gal}$, y recomienda dos manos en ambientes muy corrosivos (Pinturas Cóndor, 2025). En el caso de estudio se consideraron dos manos de 1 mil y un 30 % de pérdidas por la aplicación con brocha y en altura, con lo que el rendimiento práctico es de $37,1 \text{ m}^2/\text{gal}$ por mano y, con dos manos, cada galón cubre unos $18,5 \text{ m}^2$ de acero. La Tabla 5 resume los datos y supuestos con que se calculó cada material.

Presupuestos y métricas de comparación

Para comparar ambos métodos se elaboraron dos presupuestos de los cuatro rubros del encamisado. El del cómputo tradicional se calculó con las cantidades liquidadas y los APU del proyecto, mientras que el BIM 5D se calculó con las cantidades del modelo y con los APU en los que solo se reemplazaron las cantidades de los materiales de unión y protección por las obtenidas con las Ecuaciones 1, 2 y 3. En ambos se mantuvieron los equipos, la mano de obra, los precios de los insumos y el 15 % de costos indirectos. La precisión de la cuantificación se midió con el índice de desviación de cuantificación (IDC), definido en la Ecuación 4:

$\text{IDC} (\%) = |Q_{ref} - Q_{BIM}| / Q_{BIM} \times 100$ [Ecuación 4] donde Q_{ref} es la cantidad contratada o liquidada y Q_{BIM} la cantidad del modelo. A su vez, la diferencia entre ambos presupuestos se descompuso en dos efectos cuya suma reproduce la diferencia total: el efecto cantidad (Ecuación 5), que mide la parte que se debe a la diferencia de cantidades, y el efecto APU (Ecuación 6), que mide la parte que se debe al cambio de precio unitario.

$$E_Q = (Q_{BIM} - Q_{liq}) \cdot PU_{proy} \quad [\text{Ecuación 5}]$$

$$E_{APU} = (PU_{BIM} - PU_{proy}) \cdot Q_{BIM} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

donde Q_{liq} es la cantidad liquidada, PU_{proy} el precio unitario del APU del proyecto y PU_{BIM} el precio unitario del APU recalculado con las cantidades del modelo.

Como las cantidades liquidadas intervinieron en la calibración, la exactitud del cálculo del aplicativo se comprobó por separado, con un cálculo manual que no utiliza la liquidación:

para cada marca, el área de la sección se multiplicó por la longitud de la pieza, por la densidad del acero y por el número de piezas, y los pernos se contaron a partir de la distribución de cada grupo.. Por último, se evaluó la sensibilidad de la diferencia a cuatro supuestos: el volumen del cartucho (330 y 500 ml), la eficiencia del electrodo (0,55 a 0,70), el desperdicio de resina (5 % a 20 %) y las pérdidas de pintura (20 % a 40 %).

Tabla 5

Datos y rendimientos de los materiales de unión y protección del caso de estudio

Material	Producto de referencia	Variable del modelo	Dato de la ficha técnica	Supuestos adoptados	Rendimiento calculado
Electrodo E7018 Ø1/8"	ESAB Sureweld 7018	Longitud de cordón	Eficiencia de depósito de 71,6 %	Filete de 8 mm; sobremonta de 10 %; colilla de 50 mm	2,24 m de cordón por kg
Adhesivo epóxico	Sika AnchorFix-3001	Número de pernos y empotramiento	Cartuchos de 600 ml	Cartucho de 330 ml; desperdicio de 10 %	41 pernos por cartucho
Anticorrosivo o alquídico	Pinturas Cóndor, Anticorrosivo Mate PIN3	Área superficial del acero	14 ± 2 m ² /L a 1 mil	Dos manos de 1 mil; pérdidas de 30 %	37,1 m ² /gal por mano

Nota. Elaborado por los autores (2026) con base en ESAB (s. f.), Sika Ecuador (2025) y Pinturas Cóndor (2025).

Tiempo de actualización del diseño

El tiempo de actualización del diseño (TAD) es el tiempo, expresado en minutos (min), que transcurre desde que se introduce una modificación en el diseño del encamisado hasta obtener su geometría, sus cantidades y su presupuesto actualizados. Esta métrica refleja la capacidad de cada método para responder a los cambios que son habituales durante el diseño y la ejecución de un reforzamiento. La literatura reporta ahorros de tiempo generales para el BIM (Khosakitchalert et al., 2020; Stanley y Thurnell, 2014), pero no tiempos para modificaciones específicas de un encamisado metálico ni una expresión validada para estimarlos. Por esa razón, el TAD se estimó con un modelo de actividades propio, de carácter empírico, formulado por los autores: cada actualización se descompone en las tareas que exige cada método, a cada tarea se le asigna un tiempo unitario y el TAD resulta de sumar, para todas las tareas, el producto entre el número de veces que se repite y su tiempo unitario. Como las variables son conteos adimensionales y los coeficientes se expresan en minutos por tarea, el TAD de ambos métodos resulta en minutos.

En el método tradicional, actualizar el diseño exige corregir las vistas afectadas en los planos CAD 2D, volver a medir los tipos de elemento modificados, actualizar el cómputo y los APU's en las hojas de cálculo descritas en el apartado 2.3, consolidar el presupuesto y revisar manualmente los requisitos de detallado comprometidos. El TAD de este método se estimó con la Ecuación 7:

$$TAD_T = 20 \cdot V + 15 \cdot T + 10 \cdot (R + A) + 5 \cdot \delta + 10 \cdot C \quad [\text{Ecuación 7}]$$

donde V es el número de vistas CAD por corregir, T el número de tipos de elemento por volver a medir, R el número de rubros cuyas cantidades cambian, A el número de APU's cuyo precio unitario cambia, δ vale 1 cuando cambia el presupuesto y 0 en caso contrario, y C el número de grupos de requisitos que deben revisarse a mano. Los coeficientes, en minutos por tarea, se adoptaron a partir de la experiencia de los autores en el dibujo y el cómputo de proyectos de reforzamiento, con el siguiente criterio: 20 min por vista, porque corregir una elevación o un corte en CAD exige redibujar las piezas afectadas, sus cotas y sus textos; 15 min por tipo de elemento, que es lo que toma volver a contar y medir sus piezas en los planos y recalculan su peso en la hoja de cálculo; 10 min por rubro o por APU, para actualizar su cantidad o su análisis de precio; 5 min para consolidar el presupuesto; y 10 min por grupo de requisitos, para ubicar el numeral de la norma, calcular el límite y compararlo con el detalle.

En el flujo BIM 5D, en cambio, la actualización consiste en modificar los parámetros de entrada en Dynamo Player, ejecutar el aplicativo, volver a etiquetar las vistas de la lámina y trasladar las cantidades a la hoja de presupuesto, cuyos APU's se recalculan por fórmulas. Como las vistas y las tablas de planificación ya están creadas en el modelo, la geometría, las cantidades y la verificación normativa se actualizan de inmediato con la propia ejecución. Su TAD se estimó con la Ecuación 8:

$$TAD_B = 2 \cdot P + 16,5 + 2 \cdot R + 5 \cdot A + 3 \cdot \delta \quad [\text{Ecuación 8}]$$

donde P es el número de parámetros modificados. A diferencia de la Ecuación 7, el término constante de 16,5 min no es un supuesto, sino la suma de dos tiempos registrados por los autores al aplicar los escenarios en el caso de estudio: la ejecución del aplicativo en los 15 pilares, que tomó aproximadamente 1,5 min, y el reetiquetado de las vistas de la lámina, que tomó unos 15 min. Los demás coeficientes, también en minutos por tarea, se adoptaron con el mismo criterio que en el método tradicional: 2 min por parámetro, para ubicarlo y editarlo en Dynamo Player; 2 min por rubro, para trasladar su cantidad desde la tabla de planificación a la hoja de presupuesto; 5 min por APU, para revisar su recálculo; y 3 min para revisar el presupuesto consolidado. Las variables R , A y δ tienen el mismo significado que en la Ecuación 7, aunque en un mismo escenario pueden tomar valores distintos en cada método, como se explica en la nota de la Tabla 6, de modo que TAD_B , al igual que TAD_T , resulta en minutos.

Tabla 6 Escenarios de modificación del diseño y variables empleadas en la estimación del TAD

Escenario	Modificación	V	T	R	A	C	P
E1	Espesor de las placas horizontales de 15 a 12 mm	3	2	1	0 / 2	2	1
E2	Separación de las placas de la zona normal de 350 a 300 mm	2	3	4	0 / 1	1	2
E3	Pernos por placa en la cara mayor de 2 a 3	2	1	3	0	2	1
E4	Perno de Ø1/2" a Ø5/8", con	4	4	3	3	4	2

	taladro de 20 mm						
E5	Perfil L de 150 × 150 × 15 mm a 125 × 125 × 12 mm	4	6	1	0 / 2	3	2
E6	Filete de soldadura de 8 a 6 mm	1	1	0	0 / 1	1	1
E7	Nivel superior de la zona de excavación de 500 a 700 mm	2	3	4	0 / 1	1	1
E8	Altura de los pernos de las platinas, del eje a 80 mm, para cumplir NO6c	2	0	0	0	1	1

Nota. V = vistas CAD por corregir; T = tipos de elemento por volver a medir; R = rubros cuyas cantidades cambian; A = APU's cuyo precio unitario cambia; C = grupos de requisitos por revisar a mano; P = parámetros modificados en el aplicativo. Cuando A difiere entre métodos, el primer valor corresponde al método tradicional y el segundo al flujo BIM 5D. En el método tradicional los APU's solo cambian cuando cambia el insumo (E4), porque la soldadura, el adhesivo y la pintura se estiman con factores fijos; en el flujo BIM 5D, en cambio, el APU del rubro 505(2)E se recalcula cuando varía la relación entre el acero, los cordones y el área pintada (E1, E2, E5, E6 y E7), y el del rubro 2.25C, cuando varía el empotramiento de los pernos (E1 y E5). En E6, $\delta = 0$ en el método tradicional y $\delta = 1$ en el flujo BIM 5D. Elaborado por los autores (2026).

Dado que los coeficientes de las Ecuaciones 7 y 8, salvo el término constante de la Ecuación 8, provienen de la experiencia de los autores, la robustez del resultado frente a ese posible sesgo se evaluó de tres maneras. En primer lugar, se calculó el factor de equilibrio, es decir, el factor por el que tendrían que multiplicarse todos los coeficientes del método tradicional para que su TAD igualara al del flujo BIM 5D. En segundo lugar, se realizó una simulación de Monte Carlo de 100.000 iteraciones, en la que cada uno de los 11 coeficientes de ambas ecuaciones, incluidos los dos tiempos registrados, se multiplicó por un factor aleatorio independiente con distribución uniforme entre 0,5 y 1,5. Por último, se analizó un caso adverso, en el que los coeficientes del método tradicional se redujeron a la mitad y, de forma simultánea, los del flujo BIM 5D se aumentaron en un 50 %.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cuantificación BIM 5D

La Tabla 7 presenta las cantidades que el aplicativo generó para los 15 pilares, agrupadas por marca. El acero sumó 17.582,10 kg, es decir, 1.172,14 kg por pilar en promedio, con una superficie de 326,46 m² (18,57 m² por tonelada). Por su parte, los pernos sumaron 1.626 unidades, de las cuales 1.170 corresponden a la columna, 180 a la placa base y 276 a la viga cabezal, mientras que los cordones alcanzaron 237,90 m, con 65,74 kg de metal depositado, y la resina, 12.998,1 ml. El cálculo manual descrito en el apartado 2.7 reproduce el peso de cada marca, con diferencias atribuibles solo al redondeo, y el mismo total de 17.582,1 kg (Tabla 7). El conteo de los pernos da también el mismo resultado: 110 en cada uno de los nueve pilares interiores y 106 en cada uno de los seis de extremo, es decir, 1.626 en total. Esto

confirma que el aplicativo transforma la geometría en cantidades sin error, con independencia de la calibración.

Estas cantidades quedan documentadas en el propio modelo. La Figura 5 muestra las dos láminas generadas en Revit: la primera reúne el modelo tridimensional del puente, la distribución de los pilares en ambas direcciones y las tablas de planificación, y la segunda, el isométrico del pilar encamisado, sus elevaciones en las direcciones X e Y y los detalles de las conexiones con la cimentación, la placa base, la columna y la viga cabezal. La Figura 6, por su parte, reúne las tres tablas de planificación de las que se extrajeron las cantidades: la del acero estructural, la de los pernos con su volumen de epóxico y la de la pintura anticorrosiva, en la que el volumen de pintura se obtiene con el campo calculado de la Ecuación 3.

Tabla 7 *Cantidades del modelo BIM por marca para los 15 pilares*

Marca	Elemento	Unidades	Cantidad	Área (m ²)	Cálculo manual (kg)
REF_ANG_150x150x15	Ángulos de esquina (4,60 m)	60	9.262,22 kg	166,11	9.262,2
REF_PLC_100x15_MM	Placas horizontales (13 niveles)	780	4.638,17 kg	92,94	4.638,2
REF_PB_ANG_150x150x15	Marco de placa base	60	1.620,89 kg	29,49	1.620,9
REF_VCA_ANG_150x150x15	Marco de viga cabezal, perfiles completos	54	1.483,97 kg	26,99	1.484,0
REF_VCA_ANGC_150x40x15	Marco de viga cabezal, perfil cortado	6	84,07 kg	1,58	84,1
REF_VCA_PLA_929x150x15_MM	Platinas laterales	30	492,78 kg	9,34	492,8
Acero ASTM A588		990	17.582,10 kg	326,46	17.582,1
REF_PER_D12x127	Pernos de la columna	1.170	9.353 ml de resina		
REF_PB_PER_D12x127	Pernos de placa base	180	1.439 ml de resina		
REF_VCA_PER_D12x127	Pernos de viga cabezal (96 verticales y 180 horizontales)	276	2.206 ml de resina		
Pernos epóxicos Ø1/2" × 5"		1.626	12.998 ml de resina		
REF_CORD_F8MM	Cordones de soldadura, filete de 8 mm	1.950	237,90 m		

Nota. La marca de las platinas indica 929 mm porque el aplicativo trunca a un número entero la suma $h + 2e$, que Revit devuelve como 929,99 mm; la longitud real es de 930 mm. La columna «Cálculo manual» se obtuvo con el área de la sección, la longitud de cada pieza, la densidad de 7.850 kg/m³ y el número de piezas, sin utilizar la liquidación. Elaborado por los autores (2026) a partir de las tablas de planificación de Revit.

Cantidades BIM 5D frente al contrato y la liquidación

La Tabla 8 compara las cantidades del modelo con las contratadas y las liquidadas. En acero, el modelo difiere de la liquidación en apenas 0,30 kg (0,002 %) y, en pernos, coincide exactamente, lo que muestra que la geometría calibrada concilia la obra ejecutada. Como se explicó en el apartado 2.2, esta coincidencia no constituye una validación independiente, aunque sí confirma que dos cantidades independientes de la liquidación se explican con una misma geometría. Frente al contrato, en cambio, el IDC fue de 4,93 % en acero y de 7,01 % en pernos, porque lo construido no siguió el detalle contratado.

Tabla 8 Cantidades contratadas, liquidadas y del modelo BIM

Concepto	Unidad	Contrato	Liquidación	Modelo BIM	IDC contrato (%)	IDC liquidación (%)
Acero ASTM A588	kg	18.449,00	17.581,80	17.582,10	4,93	0,00
Pernos epóxicos	u	1.740	1.626	1.626	7,01	0,00
Electrodo E7018	kg	No aplica	439,55	106,03	No aplica	314,6
Adhesivo epóxico	cartucho s	No aplica	162,6	39,4	No aplica	312,8
Anticorrosivo	gal	No aplica	87,9	17,6	No aplica	399,5

Nota. Las cantidades de electrodo, adhesivo y anticorrosivo de la columna «Liquidación» resultan de aplicar los factores fijos de los APUs a las cantidades liquidadas, ya que no se pagan como rubros independientes. Elaborado por los autores (2026); las cantidades se tomaron de la planilla única de liquidación de la obra (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2023), y los precios unitarios, de los APUs presentados por la contratista MARDIRED S.A. (2022)

Figura 5a

Láminas del encamisado metálico generadas en Revit: (a) lámina P1, con el modelo tridimensional del puente, la distribución de los pilares y las tablas de planificación.

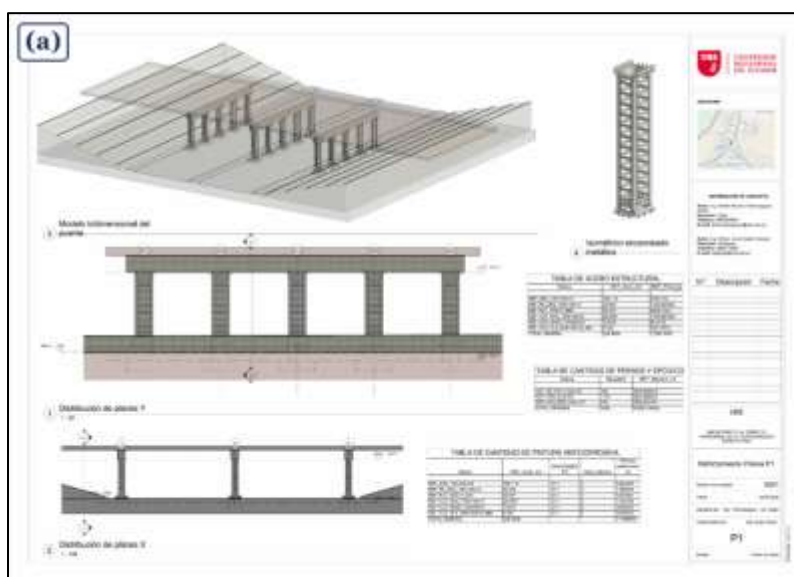


Figura 5b

Láminas del encamisado metálico generadas en Revit: (b) lámina P2, con el isométrico del pilar encamisado, sus elevaciones en las direcciones X e Y y los detalles de las conexiones



Nota. Elaborado por los autores (2026) a partir del modelo en Revit 2024.

La diferencia más marcada entre ambos métodos aparece en los materiales de unión y protección. Aplicados a las cantidades liquidadas, los factores de los APUs dan 439,55 kg de electrodo, 162,6 cartuchos de adhesivo y 87,9 gal de anticorrosivo, mientras que el modelo requiere 106,03 kg, 39,4 cartuchos y 17,6 gal, respectivamente. En otras palabras, el cómputo tradicional estima unas cuatro veces la soldadura y el adhesivo, y unas cinco veces el anticorrosivo.

Estas diferencias no se deben a los supuestos del cálculo, sino a que los factores de los APUs no son físicamente compatibles con el detalle del encamisado. Los 439,55 kg de electrodo, depositados en los 237,90 m de cordón del modelo, equivaldrían a un filete de 16,3 mm con la eficiencia de 0,62, y de 15,3 mm aun con la eficiencia más baja considerada (0,55). Ambos valores superan el filete de 8 mm del diseño y el máximo de 13 mm que admite la AISC 360-10 para placas de 15 mm; dicho de otro modo, ese electrodo alcanzaría para unos 985 m de cordón de 8 mm, es decir, 4,1 veces la longitud modelada. En el adhesivo, el APU no especifica el volumen del cartucho, pero el factor de 0,1 cartuchos por perno solo sería correcto con un cartucho de unos 80 ml, y con el de 330 ml asignaría 33 ml a cada perno, más que el volumen del taladro vacío de Ø16 mm × 127 mm (25,5 ml). En el anticorrosivo, los 87,9 gal sobre 326,46 m² equivalen a 3,7 m² por galón, es decir, a unas diez manos de 1 mil con un 30 % de pérdidas, cuando la ficha técnica recomienda dos.

Presupuesto BIM 5D frente al presupuesto tradicional

Al reemplazar los factores fijos por las cantidades del modelo, el electrodo pasó de 0,025 a 0,0060 kg por kilogramo de acero y el anticorrosivo, de 0,005 a 0,0010 gal por kilogramo, con lo que el APU del rubro 505(2)E bajó de USD 3,39 a 3,23 por kilogramo. Del mismo modo, el adhesivo pasó de 0,1 a 0,024 cartuchos por perno, y el APU del rubro 2.25C bajó de USD 3,90 a 1,70 por perno; los rubros 2.27D y PER-3 no cambiaron.

Figura 6

Tablas de planificación de Revit con las cantidades del encamisado agrupadas por marca: (a) acero estructural; (b) pernos y volumen de epóxico; (c) pintura anticorrosiva

(a)

TABLA DE ACERO ESTRUCTURAL		
Marca	REF_Area_m2	REF_Peso_kg
REF_ANG_150x150x15	166.113	9282.215
REF_PB_ANG_150x150x15	29.493	1620.887825
REF_PL_C_100x15_MM	92.937	4638.1725
REF_VCA_ANG_150x150x15	26.9937	1483.987925
REF_VCA_ANGC_150x40x15	1.5819	84.0738
REF_VCA_PLA_929x150x15_MM	9.342	482.78375
TOTAL GENERAL	326.4606	17582.1003

(b)

TABLA DE CANTIDAD DE PERNOS Y EPÓXICO		
Marca	Recuento	REF_Epoxico_ml
REF_PB_PER_D12x127	180	1438.905048
REF_PER_D12x127	1170	8352.882612
REF_VCA_PER_D12x127	276	2206.321074
TOTAL GENERAL	1626	12998.108934

(c)

TABLA DE CANTIDAD DE PINTURA ANTICORROSIVA					
Marca	REF_Area_m2	RENDIMIEN TO	Num_Manos	Pintura anticorrosiva	
REF_ANG_150x150x15	166.113	37.1	2	8.954879	
REF_PB_ANG_150x150x15	29.493	37.1	2	1.588918	
REF_PL_C_100x15_MM	92.937	37.1	2	5.010081	
REF_VCA_ANG_150x150x15	26.9937	37.1	2	1.455186	
REF_VCA_ANGC_150x40x15	1.5819	37.1	2	0.085278	
REF_VCA_PLA_929x150x15_MM	9.342	37.1	2	0.503612	
TOTAL GENERAL	326.4606			17.588934	

Nota. Elaborado por los autores (2026) a partir del modelo en Revit 2024.

Como muestran la Tabla 9 y la Figura 7, el presupuesto BIM 5D fue de USD 67.846,98, frente a USD 74.236,30 del cómputo tradicional. La diferencia, de USD 6.389,32, equivale al 8,61 % del presupuesto de los rubros y al 2,17 % del monto contractual. Dado que el efecto cantidad fue de apenas USD 1,02, prácticamente toda la diferencia proviene de los APU: de ese efecto, el 56,0 % corresponde al adhesivo, cerca del 24 % al anticorrosivo y cerca del 20 % a la soldadura.

Tabla 9

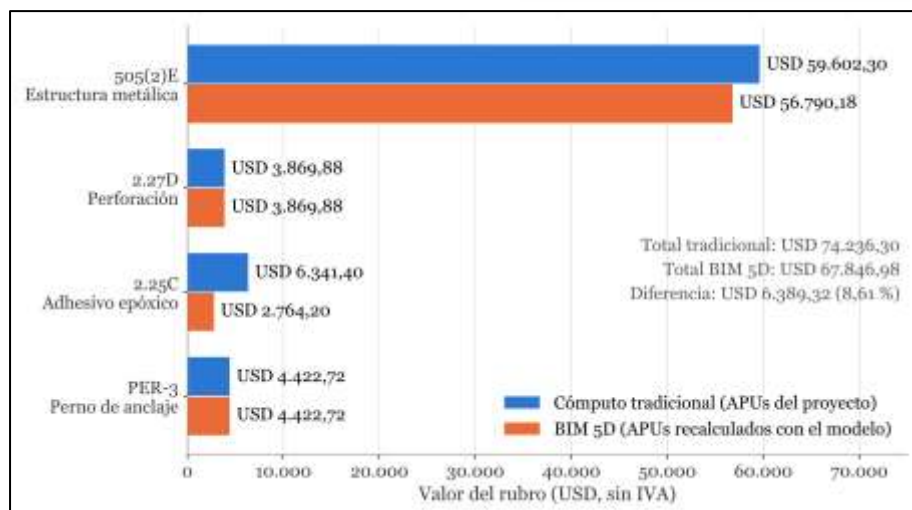
Presupuesto del cómputo tradicional frente al presupuesto BIM 5D y descomposición de la diferencia (USD)

Rubro	P.U. tradicional	Presupuest o tradicional	P.U. BIM 5D	Presupuest o BIM 5D	Efecto cantidad	Efecto APU
505(2)E	3,39	59.602,30	3,23	56.790,18	1,02	-2.813,14
2.27D	2,38	3.869,88	2,38	3.869,88	0,00	0,00
2.25C	3,90	6.341,40	1,70	2.764,20	0,00	-3.577,20
PER-3	2,72	4.422,72	2,72	4.422,72	0,00	0,00
Total		74.236,30		67.846,98	1,02	-6.390,34

Nota. Diferencia total = efecto cantidad + efecto APU = -USD 6.389,32 (Ecuaciones 5 y 6). Precios sin IVA, con 15 % de costos indirectos. Elaborado por los autores (2026); las cantidades se tomaron de la planilla única de liquidación de la obra (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2023), y los precios unitarios, de los APU presentados por la contratista MARDIRED S.A. (2022).

Figura 7

Valor de los rubros del encamisado con los APU del cómputo tradicional y con los APU recalculados desde el modelo BIM



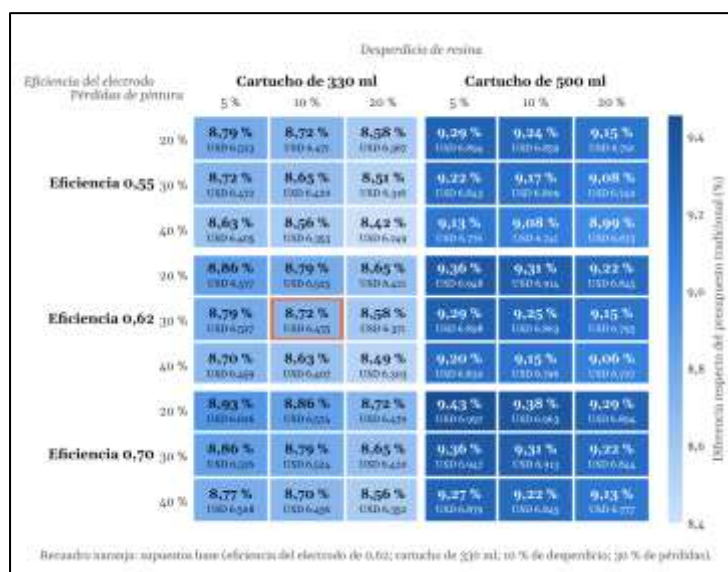
Nota. Elaborado por los autores (2026).

La Figura 8 presenta el análisis de sensibilidad en las 54 combinaciones de los cuatro supuestos. Calculada con precios sin redondear, la diferencia se mantuvo entre USD 6.248,65 y USD 6.997,39, es decir, entre el 8,42 % y el 9,43 % del presupuesto tradicional. El volumen del cartucho es el supuesto que más influye, ya que con el cartucho de 500 ml todas las combinaciones superan el 8,9 %, mientras que la eficiencia del electrodo y las pérdidas de pintura apenas modifican el resultado. El valor más bajo correspondió a la combinación más desfavorable para el modelo (eficiencia de electrodo de 0,55, cartucho de 330 ml, 20 % de desperdicio de resina y 40 % de pérdidas de pintura), y el más alto, a la combinación opuesta (eficiencia de 0,70, cartucho de 500 ml, 5 % de desperdicio y 20 % de pérdidas).

La Figura 8 se lee como una matriz de 9×6 celdas. Las filas se agrupan en tres bloques, uno por cada eficiencia del electrodo (0,55, 0,62 y 0,70), y dentro de cada bloque varían las pérdidas de pintura (20 %, 30 % y 40 %); las columnas, por su parte, se dividen en dos bloques según el volumen del cartucho (330 y 500 ml), y dentro de cada uno varía el desperdicio de resina (5 %, 10 % y 20 %). Cada celda indica la diferencia entre ambos presupuestos como porcentaje del presupuesto tradicional y en dólares, y su color se intensifica a medida que la diferencia crece. A partir del caso base, recuadrado en naranja (8,72 %; USD 6.475), el cambio al cartucho de 500 ml eleva la diferencia a 9,25 % (USD 6.863), es decir, unos 0,53 puntos porcentuales; en comparación, pasar del 5 % al 20 % de desperdicio de resina la reduce en 0,21 puntos (USD 156), aumentar las pérdidas de pintura del 20 % al 40 % la reduce en 0,16 puntos (USD 118) y mejorar la eficiencia del electrodo de 0,55 a 0,70 la aumenta en 0,14 puntos (USD 104). Esta jerarquía es coherente con la descomposición de la Tabla 9, en la que el adhesivo explica el 56,0 % del efecto APU, ya que el número de cartuchos depende directamente de su volumen útil. En todos los casos, los supuestos que aumentan el consumo de material en el modelo (menor eficiencia, mayor desperdicio y mayores pérdidas) reducen la diferencia, pero ninguna combinación la lleva por debajo de USD 6.248,65, de modo que el ahorro del flujo BIM 5D no depende de la elección de los supuestos.

Figura 8

Sensibilidad de la diferencia entre el presupuesto tradicional y el presupuesto BIM 5D frente a los supuestos de cálculo de los materiales de unión y protección



Nota. Cada celda indica la diferencia como porcentaje del presupuesto tradicional y en dólares. La celda resaltada corresponde a los supuestos base; su valor (8,72 %) difiere del 8,61 % de la Tabla 9 porque se calculó con precios unitarios sin redondear. Elaborado por los autores (2026).

Tiempo de actualización del diseño

La Tabla 10 y la Figura 9 presentan el TAD estimado con las Ecuaciones 7 y 8 en los ocho escenarios. La mediana fue de 132,5 min con el método tradicional y de 34,0 min con el flujo BIM 5D, lo que representa una reducción del 74,3 %; en conjunto, los ocho escenarios suman 1.070 min con el primero y 257 min con el segundo. El flujo BIM 5D resultó más rápido en todos los escenarios, con reducciones que van del 41,1 % al 83,5 %.

El resultado se mantuvo en el análisis de robustez de los coeficientes. Para que la mediana del método tradicional igualara a la del flujo BIM 5D, sus coeficientes tendrían que estar sobrestimados unas cuatro veces (factor de equilibrio de 0,26), y el escenario más sensible fue E6, con un factor de equilibrio de 0,59. En la simulación de Monte Carlo, la reducción de la mediana del TAD se situó entre el 63,3 % y el 82,4 % (percentiles 5 y 95), con un valor mínimo de 42,8 %, y el flujo BIM 5D resultó más rápido en los ocho escenarios en el 98,1 % de las iteraciones. En el caso adverso, la mediana todavía se redujo un 23,0 %, aunque los escenarios E6 y E8, que modifican un solo detalle, se invirtieron a favor del método tradicional. Por lo tanto, la ventaja del flujo BIM 5D es robusta en los cambios que afectan a varias vistas y tipos de elemento, mientras que en los cambios puntuales su magnitud depende de los tiempos unitarios adoptados.

Tabla 10 Tiempo de actualización del diseño estimado por escenario (min)

Escenario	Método tradicional	Flujo BIM 5D	Reducción (%)
E1	125	33,5	73,2
E2	140	36,5	73,9
E3	110	27,5	75,0
E4	245	44,5	81,8
E5	215	35,5	83,5
E6	45	26,5	41,1
E7	140	34,5	75,4
E8	50	18,5	63,0
Mediana	132,5	34,0	74,3
Total	1.070	257	76,0

Nota. Valores estimados con las Ecuaciones 7 y 8 a partir de las variables de la Tabla 6.

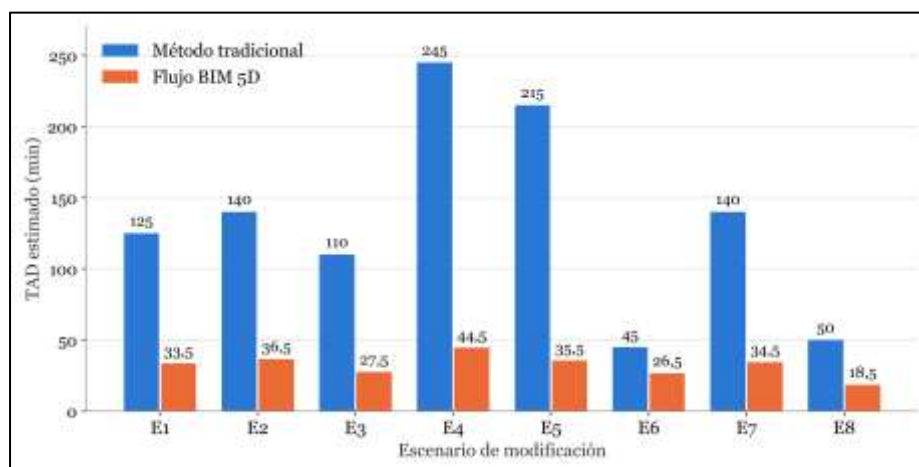
Elaborado por los autores (2026).

Verificación normativa del caso de estudio

La Tabla 11 resume la verificación del tipo de columna PILA_65X90_CM, cuyos resultados son idénticos en los 15 pilares, ya que todos tienen la misma sección. De los 18 requisitos, 16 se cumplieron, NO6d resultó informativo por falta de datos de la zapata y NO6c no se cumplió. Este último corresponde a los pernos horizontales de las platinas laterales, que quedaron a 75 mm del borde inferior de la viga cabezal, por debajo del mínimo de $6 \cdot d_a = 76,2$ mm; en consecuencia, los 180 pernos horizontales del modelo, junto con sus arandelas y tuercas, aparecieron en rojo en la vista 3D (Figura 4).

Figura 9

Tiempo de actualización del diseño estimado por escenario con ambos métodos



Nota. Elaborado por los autores (2026).

Tabla 11

Resultados de la verificación normativa por pilar

Código	Verificación	Valor	Límite	Referencia	Estado
No1	Filete mínimo ($t = 15$ mm)	8 mm	≥ 6 mm	AISC 360-10, Tabla J2.4	Cumple
No2	Filete máximo en borde	8 mm	≤ 13 mm	AISC J2.2b	Cumple
No3a–No3d	Empotramiento de pernos (columna,	97,7 mm	50,8–254 mm	ACI D.4.2.3	Cumple

	placa base, viga vertical y horizontal)					
No4	Holgura del taladro	3,3 mm	1,5–6,5 mm	Ficha del adhesivo (ACI 318-11, D.9.1)	Cumple	
No5a–No5d	Separación mínima entre pernos	150,0–216,7 mm	$\geq 76,2$ mm	ACI 318-11, D.8.1	Cumple	
No6a	Distancia al borde, pernos de la columna	325,0 mm	$\geq 76,2$ mm	ACI 318-11, D.8.3	Cumple	
No6b	Borde lateral de la viga, pernos verticales	181,3 mm	$\geq 76,2$ mm	ACI 318-11, D.8.3	Cumple	
No6c	Borde inferior de la viga, pernos horizontales	75,0 mm	$\geq 76,2$ mm	ACI 318-11, D.8.3	No cumple	
No6d	Borde de cimentación, pernos de placa base	Sin datos	$\geq 76,2$ mm	ACI 318-11, D.8.3	Informativo	
No7	Pernos de caras opuestas sin cruce	195,4 mm	< 650 mm	Consistencia geométrica	Cumple	
No8	Esbeltez del ala del ángulo (b/t)	10,00	$\leq 10,83$	AISC 360-10, Tabla B4.1a	Cumple	
N10	Apoyo de la platina sobre el ala del perfil	Solape de 15 mm	Solape > 0	Consistencia geométrica	Cumple	

Nota. Los códigos No3, No5 y No6 agrupan cuatro verificaciones cada uno, por lo que en total se evaluaron 18 requisitos por pilar. No6b y N10 se calcularon con un ancho de viga cabezal de 850 mm. Elaborado por los autores (2026).

DISCUSIÓN

Los resultados indican que el flujo BIM 5D supera al cómputo tradicional en los dos aspectos evaluados, la precisión de la cuantificación y la agilidad ante los cambios, y que además incorpora un control del detallado que el método tradicional no ofrece. El modelo reproduce la liquidación con una diferencia de 0,30 kg y con los mismos 1.626 pernos, y este resultado debe leerse en dos niveles. Por un lado, el cálculo manual, que no depende de la liquidación, reproduce las cantidades de cada marca, lo que demuestra que el aplicativo transforma la geometría en cantidades con exactitud y con trazabilidad, puesto que cada kilogramo y cada perno se asocian a una marca y a una pieza del modelo. Por otro, la coincidencia con la liquidación concilia la geometría ejecutada, pero no la valida de forma independiente, porque dos de sus parámetros se fijaron con esas mismas cantidades. La exactitud del cálculo concuerda con la reducción de la desviación presupuestaria que Wahab y Wang (2022) atribuyen a la extracción de cantidades desde modelos BIM. Coincide, además, con la mayor precisión de las estimaciones que Vigneault et al. (2020) asocian a las soluciones BIM 5D, y con la observación de Khosakitchalert et al. (2020), para quienes la exactitud de las cantidades depende de que cada material se modele como un elemento independiente, condición que el aplicativo cumple al generar cada pieza del encamisado como un sólido con su propia marca.

La diferencia entre el contrato y la ejecución, de 4,93 % en acero y 7,01 % en pernos, revela que el detalle contratado no fue el que se construyó, puesto que la contratista cambió la disposición de los pernos de la viga cabezal y de la placa base, y redujo el número de niveles de

placas respecto de los planos. En el cómputo tradicional, estos cambios solo aparecen en la liquidación final, mientras que en el modelo basta con modificar los parámetros de entrada y regenerar la cuantificación. Por lo tanto, el aporte del flujo BIM 5D no consiste en producir cantidades menores, sino en hacer explícitos los supuestos que hay detrás de cada cantidad.

El hallazgo más relevante para el presupuesto está en los materiales de unión y protección. Los factores fijos de los APUs sobrestiman unas cuatro veces el electrodo y el adhesivo, y unas cinco veces el anticorrosivo, porque no dependen de la geometría real: la soldadura se estima por kilogramo de acero y no por longitud de cordón; el adhesivo, por perno y no por volumen anular; y el anticorrosivo, por kilogramo de acero y no por área pintada. El análisis de compatibilidad física del apartado 3.2 refuerza esta lectura, ya que ninguno de los tres factores podría consumirse en el detalle construido sin exceder los límites del propio diseño. El resultado guarda relación con el de Lu et al. (2017), aunque en sentido contrario, ya que en su caso la estimación aproximada subestimaba los materiales, mientras que aquí los factores fijos los sobrestiman; en ambos casos, el error de las reglas globales solo se hace visible cuando el detalle se modela. Los rendimientos con que se calcularon estos materiales provienen de las fichas técnicas de tres productos disponibles en el mercado: el electrodo ESAB Sureweld 7018, el adhesivo epóxico Sika AnchorFix-3001 y el Anticorrosivo Mate PIN3 de Pinturas Cóndor. Como el efecto cantidad es prácticamente nulo, la diferencia de USD 6.389,32 se explica casi por completo por las reglas de estimación de los APUs, y el análisis de sensibilidad muestra que la conclusión no depende de los supuestos, ya que la diferencia se mantiene entre el 8,42 % y el 9,43 % en todas las combinaciones evaluadas.

Este resultado amplía lo reportado por Saenpaeng et al. (2025), quienes automatizaron con Dynamo la cuantificación del acero y del hormigón, al extender la automatización a los materiales que determinan buena parte del costo de los rubros de un reforzamiento. Tiene, además, una ventaja práctica: si en obra se emplea otro producto, basta con reemplazar el rendimiento de su ficha técnica para actualizar el cálculo.

La reducción estimada del 74,3 % en la mediana del TAD confirma la ventaja de la parametrización frente a los cambios de diseño, en línea con los beneficios que D'Angelo et al. (2022) describen para los flujos BIM de rehabilitación y con la regeneración automática de alternativas que Hamidavi et al. (2020) y Ninić et al. (2017) lograron al vincular reglas y parámetros con el modelo. Además, el aplicativo atiende dos de los vacíos que Lim et al. (2021) identifican en el uso del BIM para edificaciones existentes, el nivel de automatización y la modificación del diseño, y los extiende a la infraestructura vial. El escenario E6 revela, además, una limitación del cómputo tradicional puesto que, como la soldadura se estima con un factor fijo por kilogramo de acero, reducir el filete no modifica ninguna cantidad del presupuesto, mientras que el flujo BIM 5D sí refleja el menor consumo de electrodo en el APU del rubro 505(2)E.

A su vez, la verificación automatizada amplía el alcance del flujo BIM 5D más allá de la cuantificación. El caso de NO6c muestra que un requisito de distancia al borde, que pasó inadvertido en el diseño tradicional, puede detectarse en el modelo y quedar señalado en rojo desde la primera ejecución. Su corrección, que consiste en elevar los pernos al menos 1,2 mm sobre el eje de la platina o en aumentar el alto de esta, se resuelve en el mismo flujo, como se planteó en el escenario E8. Esta retroalimentación inmediata durante el diseño es la misma ventaja que Yoo et al. (2024) obtuvieron al integrar en Dynamo-Revit un análisis que antes se realizaba fuera del modelo, y permite corregir el diseño antes de que llegue a obra. En todo caso, la verificación se limita al detallado geométrico y no reemplaza el diseño por resistencia ni la evaluación del desempeño sísmico del encamisado.

Los requisitos verificados dependen, además, de las ediciones de las normas que adopta la NEC. Si se adoptaran el ACI 318-19 y la AISC 360-22, la lógica de la verificación se mantendría, pero cambiarían las referencias y algunas condiciones. En los anclajes, los requisitos del apéndice D pasan al capítulo 17 del ACI 318-19, según el cual la distancia mínima al borde de los anclajes adheridos es la mayor entre el recubrimiento especificado, dos veces el tamaño máximo del agregado y el valor del informe de evaluación del producto según ACI 355.4, o $6 \cdot d_a$ cuando no se dispone de esa información (ACI, 2019, Tablas 17.9.2(a) y 17.9.2(b)). Como el aplicativo calcula los límites a partir de un conjunto de valores que se transfiere a la rutina de verificación, la adopción de otras ediciones consistiría en incorporar un perfil normativo seleccionable como parámetro de entrada, sin modificar la generación de la geometría. En todo caso, mientras la NEC mantenga como referencia la AISC 360-10, esas ediciones solo podrían emplearse de forma complementaria.

Por último, estos resultados deben interpretarse considerando algunas limitaciones del estudio. Se analizó un solo proyecto, con pilares de sección idéntica, por lo que no hay variabilidad entre pilares y la comparación con la liquidación se restringe a dos rubros agregados. Además, la falta de anexos de cálculo obligó a reconstruir la geometría ejecutada con fotografías y con dos parámetros ajustados a la liquidación, de modo que la coincidencia con ella constituye una conciliación y no una validación independiente. Los materiales de unión y protección se compararon con su requerimiento técnico, calculado con productos de referencia que no pudieron confirmarse con los empleados en obra, y no con registros de consumo real. Como la NEC-SE-HM no fija la edición del ACI 318, se adoptó la de 2011 por ser la primera que regula los anclajes adhesivos. Asimismo, salvo la ejecución del aplicativo y el reetiquetado de las vistas, el TAD se estimó con tiempos unitarios adoptados por los autores; el análisis de robustez muestra que la ventaja del flujo BIM 5D se mantiene ante variaciones amplias de esos tiempos, pero su magnitud absoluta todavía no se ha contrastado con mediciones de operadores independientes.

CONCLUSIONES

El aplicativo desarrollado en Dynamo-Revit suple la ausencia de familias nativas para el encamisado metálico de pilares y cuantifica sus ángulos, placas, marcos, platinas, pernos y cordones con trazabilidad por pieza. Un cálculo manual independiente reproduce sus cantidades por marca y, calibrado con la geometría ejecutada, el modelo concilia la liquidación de la obra (17.582,10 kg de acero ASTM A588 y 1.626 pernos epóxicos), por lo que el flujo BIM 5D constituye una base confiable para la cuantificación y el control de obra del reforzamiento estructural.

Frente al cómputo tradicional, el principal aporte económico del flujo BIM 5D no está en el acero, sino en los materiales de unión y protección. Calculados con la longitud de cordón, el volumen anular del taladro y el área pintada, junto con los rendimientos de las fichas técnicas, estos materiales resultan entre cuatro y cinco veces menores que los estimados con los factores fijos de los APUs, factores que, además, no serían físicamente compatibles con el detalle construido. Con ello, el presupuesto de los rubros del encamisado se reduce en USD 6.389,32 (8,61 %). Este procedimiento permite elaborar APUs ajustados al diseño real y sustentar las cantidades ante la entidad contratante, algo especialmente relevante en la contratación pública ecuatoriana, donde la trazabilidad presupuestaria es un requisito.

La verificación automatizada evaluó 18 requisitos de detallado por pilar conforme a la NEC-SE-AC y la NEC-SE-HM, a través de la AISC 360-10 y el ACI 318-11, e identificó y marcó en rojo un incumplimiento de distancia al borde en la conexión con la viga cabezal. Sumada a la reducción estimada del TAD, esta verificación permite corregir el detallado antes de la ejecución y conocer de inmediato su efecto en las cantidades y el costo, algo que el cómputo tradicional no ofrece.

Estos resultados se obtuvieron en un solo caso, con pilares idénticos y una geometría reconstruida a partir de fotografías y de la liquidación. Aun así, la comprobación manual de las cantidades, la estabilidad de la diferencia de costo en el análisis de sensibilidad y la robustez del TAD frente a los tiempos unitarios respaldan la validez de las conclusiones.

Como líneas futuras se propone, en primer lugar, validar el aplicativo en otros proyectos que cuenten con planos de obra ejecutada y con registros de cantidades independientes de la liquidación, y contrastar los parámetros calibrados con una inspección de la estructura existente. En segundo lugar, se plantea documentar el consumo real de soldadura, adhesivo y anticorrosivo, ya sea mediante los registros de bodega y de fiscalización de nuevas obras o mediante ensayos controlados en un tramo del encamisado. En tercer lugar, se propone medir el TAD con operadores independientes, con un diseño en el que cada participante aplique ambos métodos en orden alternado, de manera que los tiempos puedan analizarse con la prueba de rangos con signo de Wilcoxon y los coeficientes de las Ecuaciones 7 y 8 puedan estimarse por regresión. Finalmente, se plantea extender el aplicativo a pilares de sección circular, cuyo encamisado habitual es una camisa continua de dos semicilindros de plancha rolada con un relleno de mortero en el espacio anular (Priestley et al., 1996). Esto exige reemplazar los ángulos y las placas por la camisa y sus anillos, distribuir los pernos de forma radial, incorporar el relleno como una nueva cantidad 5D y adaptar las verificaciones. También se propone extender el enfoque a otras técnicas de reforzamiento, como las de vigas y losas, integrarlo con software de cálculo estructural mediante IFC para incluir requisitos de resistencia e incorporar la planificación 4D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (2011). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary*.
- American Concrete Institute. (2019). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318-19) y comentario de requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318R-19)*.
- American Institute of Steel Construction. (2010). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10)*.
- American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-22)*.
- Cortés-Pérez, J. P., Cortés-Pérez, A., y Prieto-Muriel, P. (2020). BIM-integrated management of occupational hazards in building construction and maintenance. *Automation in Construction*, 113, Artículo 103115. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103115>
- Cunalata Vásquez, F., y Caiza Sánchez, P. (2022). Estado del arte de estudios de vulnerabilidad sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.06>
- D'Angelo, L., Hajdukiewicz, M., Seri, F., y Keane, M. M. (2022). A novel BIM-based process workflow for building retrofit. *Journal of Building Engineering*, 50, Artículo 104163. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104163>
- ESAB. (s. f.). *Sureweld 7018* [Hoja de datos técnicos]. https://www.weldingsuppliesfromioc.com/cdn/shop/files/Sureweld_7018_Specs.pdf
- Guo, K., y Zhang, L. (2021). Multi-source information fusion for safety risk assessment in underground tunnels. *Knowledge-Based Systems*, 227, Artículo 107210. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107210>
- Hamidavi, T., Abrishami, S., y Hosseini, M. R. (2020). Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution. *Journal of Building Engineering*, 32, Artículo 101685. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101685>
- Khosakitchalert, C., Yabuki, N., y Fukuda, T. (2020). Automated modification of compound elements for accurate BIM-based quantity takeoff. *Automation in Construction*, 113, Artículo 103142. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103142>
- Lim, Y.-W., Chong, H.-Y., Ling, P. C. H., y Tan, C. S. (2021). Greening existing buildings through Building Information Modelling: A review of the recent development. *Building and Environment*, 200, Artículo 107924. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107924>
- Lu, M., Zheng, C., Yi, C., y Hasan, M. (2017). Synthesizing engineering design, material takeoff and simulation-based estimating on a bridge deck reinforcement case. En *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference* (pp. 2507-2517). IEEE. <https://www.informs-sim.org/wsc17papers/includes/files/206.pdf>
- MARDIRED S.A. (2022). *Análisis de precios unitarios del contrato COTO-MIMG-005-2022* [Documento contractual no publicado].
- M.I. Municipalidad de Guayaquil. (2021a). *Informe de prefactibilidad: Mantenimiento del paso vehicular elevado ubicado en la intersección entre la Av. del Bombero y la Av. Rodríguez Bonín, parroquia Tarqui* [Informe técnico]. Dirección de Obras Públicas Municipales.
- M.I. Municipalidad de Guayaquil. (2021b). *Mantenimiento del paso vehicular elevado ubicado en la intersección entre la Av. del Bombero y la Av. Rodríguez Bonín, parroquia Tarqui: Especificaciones técnicas* [Documento técnico]. Dirección de Obras Públicas Municipales.
- M.I. Municipalidad de Guayaquil. (2023). *Planilla Única de Avance de Obra, contrato COTO-MIMG-005-2022: Mantenimiento del paso vehicular elevado ubicado en la intersección entre la Av. del Bombero y la Av. Rodríguez Bonín, parroquia Tarqui* [Documento contractual]. Dirección de Obras Públicas Municipales.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014a). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Estructuras de acero (NEC-SE-AC)*.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014b). *Norma Ecuatoriana de la Construcción:*

Estructuras de hormigón armado (NEC-SE-HM).

- Ninić, J., Koch, C., y Stascheit, J. (2017). An integrated platform for design and numerical analysis of shield tunnelling processes on different levels of detail. *Advances in Engineering Software*, 112, 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.05.012>
- Pinturas Cóndor. (2025). *Anticorrosivo mate PIN3, serie 6300M* [Hoja técnica]. <https://www.pinturascondor.com/wp-content/uploads/2024/07/TDS-6300M-ANTICORROSIVO-MATE-V3.pdf>
- Priestley, M. J. N., Seible, F., y Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.
- Saenpaeng, W., Tantrairatn, S., y Chaphirom, A. (2025). Development of an automated workflow for reinforced concrete structural quantity takeoff and cost estimation using visual programming in a BIM environment. *Engineering and Technology Horizons*, 42(4), Artículo 420402. <https://doi.org/10.55003/ETH.420402>
- Sika Ecuador. (2025). *Sika AnchorFix-3001* [Hoja de datos del producto]. https://ecu.sika.com/dam/dms/ec01/a/sika_anchorfix_-3001.pdf
- Singh, M. M., Sawhney, A., y Borrmann, A. (2019). Integrating rules of modular coordination to improve model authoring in BIM. *International Journal of Construction Management*, 19(1), 15–31. <https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1358077>
- Stanley, R., y Thurnell, D. (2014). The benefits of, and barriers to, implementation of 5D BIM for quantity surveying in New Zealand. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 14(1), 105–117. <https://doi.org/10.5130/ajceb.v14i1.3786>
- Vigneault, M.-A., Botton, C., Chong, H.-Y., y Cooper-Cooke, B. (2020). An innovative framework of 5D BIM solutions for construction cost management: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27, 1013–1030. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09341-z>
- Wahab, A., y Wang, J. (2022). Factors-driven comparison between BIM-based and traditional 2D quantity takeoff in construction cost estimation. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(2), 702–715. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2020-0823>
- Yoo, W., Clayton, M. J., y Brown, R. D. (2024). From BIM to thermal comfort: Leveraging BIM for rapid outdoor comfort assessments. *Energy and Buildings*, 321, Artículo 114664. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114664>

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles.

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior