



MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES

INFORME DE INVESTIGACIÓN:

INTERACCIÓN AGUA-ESTRUCTURA DE LOS ESTRIBOS DEL PUENTE CORNELIO VINTIMILLA Y LA AV. DE LOS MIGRANTES SOBRE EL RÍO MACHÁNGARA

AUTOR (A):

ING. STALIN VICENTE PARREÑO QUISNANCELA

TUTOR:

ING. MSC. JAIME XAVIER NIETO CÁRDENAS

CUENCA – ECUADOR

2023

AUTORÍA

Yo, Stalin Vicente Parreño Quisnancela con C.I: 060380277-8, certifico por medio de la presente que, la investigación: “INTERACCIÓN AGUA-ESTRUCTURA DE LOS ESTRIBOS DEL PUENTE CORNELIO VINTIMILLA Y LA AV. DE LOS MIGRANTES SOBRE EL RÍO MACHÁNGARA” es de mi autoría.

Cuenca, octubre del 2023

.....

Ing. Stalin Vicente Parreño Quisnancela

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Nieto Cárdenas, Jaime Xavier, Ing. MSc. certifico que, el informe de investigación:
“INTERACCIÓN AGUA-ESTRUCTURA DE LOS ESTRIBOS DEL PUENTE CORNELIO VINTIMILLA Y LA AV. DE LOS MIGRANTES SOBRE EL RÍO MACHÁNGARA” es de autoría del Ing. Stalin Vicente Parreño Quisnancela, informe que ha sido realizado bajo mi supervisión y tutoría.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Cuenca, octubre del 2023

.....

Nieto Cárdenas, Jaime Xavier, Ing. MSc.

DEDICATORIA

A mi hija, Ana Paula, a la cual quiero enseñarle que en la vida todo se puede conseguir a base de sacrificio y amor por lo que se hace.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a la Virgencita de Agua Santa de Baños por las oportunidades que me ha brindado en la vida y por ponerme en el camino a personas que han sido mi respaldo durante este tiempo en especial a Katherin, por ser mi apoyo incondicional durante todo este proceso. De la misma forma expreso mi gratitud a mi tutor Ing. Xavier Nieto y al Ing. Juan Sebastián Maldonado, por su paciencia, apoyo y las ganas de trasmitirme sus conocimientos para culminar este proyecto.

Resumen

El estudio del puente sobre el Río Machángara integra análisis aerofotogramétrico, hidráulico y estructural, revelando conclusiones sobre su salud estructural y resistencia. A través de un DRONE con módulo RTK, se logró una precisa representación topográfica, esencial para anticipar cambios geomorfológicos. El análisis hidráulico proyecta un calado de 3 metros en un escenario de 100 años, indicando un riesgo potencial para la estructura debido a crecidas del río. Adicionalmente, el estudio estructural en Modelos de elementos finitos mostró la capacidad actual del hormigón del 70% en los esfuerzos internos del hormigón al considerar la variación por el empuje del agua lo que significa un aumento considerable para los respectivos análisis. Esta interacción agua-estructura podría acelerar patologías como la carbonatación, erosión, pérdida de recubrimiento y hasta la corrosión de las armaduras. Es crucial tomar medidas preventivas, como reforzar zonas críticas, implementar sistemas anti-socavación y realizar inspecciones periódicas. El mantenimiento regular y la conciencia comunitaria serán fundamentales para garantizar la seguridad y vida útil del puente, en el contexto de cambios hidrológicos y urbanísticos.

Palabras claves: Río Machángara, Agua-estructura, elementos finitos, caudal, fotogrametría, patología, puentes

Abstract

The study of the bridge over the Machángara River integrates aerial photogrammetric, hydraulic and structural analysis, revealing conclusions about its structural health and resistance. Through a DRONE with an RTK module, an accurate topographic representation was achieved, essential to anticipate geomorphological changes. The hydraulic analysis projects a depth of 3 meters in a 100-year scenario, indicating a potential risk to the structure due to river flooding. Additionally, the structural study in Finite Element Models showed the current capacity of concrete of 70% in the internal forces of the concrete when considering the variation due to the pressure of water, which means a considerable increase for the respective analyzes. This water-structure interaction could accelerate pathologies such as carbonation, erosion, loss of coating and even corrosion of reinforcement. It is crucial to take preventive measures, such as reinforcing critical areas, implementing anti-undermining systems and carrying out periodic inspections. Regular maintenance and community awareness will be essential to guarantee the safety and useful life of the bridge, in the context of hydrological and urban changes.

Keywords: Machangara River, Water-structure, Finite elements, Discharge, Photogrammetry, pathology, bridges

INDICE

AUTORÍA	I
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
INDICE.....	VII
INDICE DE IMÁGENES.....	VIII
INDICE DE TABLAS	IX
1. Introducción.....	10
1.1. Objetivos.....	10
1.1.1.Objetivo General.....	10
1.1.2.Objetivos Específicos	10
2. Justificación y antecedentes.....	11
3. Metodología de Investigación	17
3.1. Levantamiento de información.....	17
3.2. Modelo en un programa de análisis de crecidas	21
3.3. PROCESO PARA MODELACIÓN DE MODELOS FINITOS.....	25
4. Resultados.....	27
5. Discusión	36
6. Conclusiones.....	40
7. Recomendaciones	41
8. Referencias bibliográficas	42
9. ANEXOS.....	45

INDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1 Fotografías de la zona de estudio	17
Ilustración 2 Área de planificación del levantamiento	19
Ilustración 3 Análisis de fotogrametría mediante software de fotogrametría	20
Ilustración 4 Obtención de curvas de nivel en Arc Gis	21
Ilustración 5 Planta del río	22
Ilustración 6 Perfil del río.....	22
Ilustración 7 Datos de secciones en el programa de análisis de crecidas	23
Ilustración 8 Modelo de puente en EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE CRECIDAS	24
Ilustración 9 MDT del río.....	27
Ilustración 10 DSM del Rio	28
Ilustración 11 puente con calado de 3m	29
Ilustración 12 Caudales analizados	29
Ilustración 13 Cargas dinámicas insertadas.....	30
Ilustración 14 Modelo del estribo con cargas laterales del agua	31
Ilustración 15 Modelo del estribo sin cargas de presión de agua MPa	32
Ilustración 16 Modelo general analizado en FEM MPa.....	32
Ilustración 17 Gráfica de cargas cíclicas que se analizaran con cada caudal	34
Ilustración 18 Levantamiento topográfico	46
Ilustración 19 Delimitación de área de vuelo	47
Ilustración 20 Importación de puntos de la topografía.....	47
Ilustración 21 Creación de nube de puntos para topografía	48
Ilustración 22 Análisis de volúmenes para topografía	48
Ilustración 23 Ortofoto del río.....	49

Ilustración 24 DSM.....	49
Ilustración 25 DTM.....	50
Ilustración 26 Plan del modelo de río para análisis de crecidas	50
Ilustración 27 Secciones del río para análisis de crecidas.....	51
Ilustración 28 Análisis de caudales proyectados.....	51
Ilustración 29 Creación de partes para análisis FEM.....	52
Ilustración 30 Propiedades del hormigón para el modelo	52
Ilustración 31 Ensamblaje del modelo	53
Ilustración 32 Creación del caso de carga.....	53
Ilustración 33 Asignación de interacciones entre elementos.....	54
Ilustración 34 Asignación de cargas al elemento	54
Ilustración 35 Mallado del modelo.....	55
Ilustración 36 Análisis de esfuerzos en modelo FEM.....	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Análisis de ultrasonido.....	38
Tabla 2 Analisis de vibracion ambiental	39

1. Introducción

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Analizar la interacción Agua-estructura de los estribos del puente Cornelio Vintimilla y la Av. de los Migrantes de la ciudad de Cuenca mediante análisis computacionales de caudal y modelos FEM

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar levantamientos topográficos para definir características geométricas del puente y el río.
- Analizar el caudal máximo que llega al puente mediante estudio de crecidas máximas para determinar calados críticos del río en ese punto.
- Establecer modelos computacionales de la interacción estructura-agua en combinaciones críticas para determinar posibles afectaciones a estas estructuras

La ciudad de Cuenca, situada en la provincia de Azuay, ha experimentado un notable desarrollo urbano, derivando en la edificación de diversas infraestructuras que promueven la conectividad y movilidad en la región. Uno de estos ejemplares ingenieriles es el puente de hormigón armado localizado en la confluencia de la calle Cornelio Veintimilla con la Av. de los Migrantes, el cual se ubica sobre el Río Machángara. No obstante, la interacción del agua con estas estructuras no es un tema para evitar; esta dinámica puede generar posibles consecuencias a nivel estructural que, si no se estudian adecuadamente, pueden afectar la vida útil de la estructura.

En el presente artículo, se lleva a cabo un análisis sobre la interacción del agua con la

estructura de este puente, buscando comprender las dinámicas fluviales y sus eventuales impactos en la obra civil. Para lograr una visión integral, nos proponemos adquirir datos hidráulicos a través del software EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE CRECIDAS. Este nos facilita determinar las afectaciones que el puente sufriría a caudales máximos. Para estas simulaciones en EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE CRECIDAS, se consideraron caudales investigados previamente, así como las propiedades inherentes al flujo de agua.

En cuanto a la evaluación estructural y determinación de esfuerzos en el estribo del puente, recurriremos a la técnica de elementos finitos utilizando el software de análisis de crecidas.

La geometría del área de estudio se obtuvo a través de un levantamiento topográfico basado en aerofotogrametría. Al finalizar, con base en los datos y simulaciones, se discute las variaciones de esfuerzos en el estribo del puente a causa del empuje hidrodinámico, las implicaciones de estas variaciones y posibles medidas preventivas o correctivas, todo con el fin de preservar y asegurar la vida útil de este puente de estudio.

2. Justificación y antecedentes

La supervisión y mantenimiento regular de los puentes es esencial para garantizar su integridad estructural y funcional a largo plazo. A lo largo de su vida útil, los puentes pueden enfrentar una serie de desafíos, incluyendo desgaste natural, erosión, corrosión y cargas incrementadas debido al tráfico o cambios en su entorno. Los ensayos estructurales son vitales, ya que no solo evalúan la infraestructura subyacente sino también la superestructura que soporta las cargas operativas diarias. La falta de mantenimiento y supervisión adecuada puede resultar en problemas graves que, en el peor de los casos, pueden llevar a colapsos. A continuación, se presentan ejemplos históricos que ilustran las consecuencias trágicas de la negligencia en el mantenimiento y supervisión de los puentes.

1. Puente Morandi (Génova, Italia)

Colapso: 14 de agosto de 2018.

Causas: Se citó una combinación de factores, incluyendo el diseño del puente, el uso de materiales de baja calidad, y falta de mantenimiento.

Referencia: Investigaciones oficiales y medios de comunicación, que han documentado ampliamente los problemas de mantenimiento y supervisión que contribuyeron al colapso. (Luque, 2002)

2. Puente I-35W (Minneapolis, EE. UU.)

Colapso: 1 de agosto de 2007.

Causas: Fallo estructural debido a problemas con el diseño inicial y una falta de inspecciones detalladas para identificar y corregir problemas a tiempo.

Referencia: La cobertura mediática y los informes de investigación ofrecen detalles profundos sobre la serie de fallas que llevaron al colapso. (Wlazlo, 2003)

3. Puente de la Carretera Champlain (Canadá-EE. UU.)

Demolición: 2009.

Causas: Años de mantenimiento inadecuado que llevó a un deterioro significativo de su infraestructura, lo que finalmente llevó a su demolición.

Referencia: Diversos informes gubernamentales y medios de comunicación detallaron el estado del puente antes de su demolición. (SICE, 2019)

4. Puente Viaducto Alvear (Argentina)

Cierre para mantenimiento: Varios a lo largo de los años.

Causas: Años de negligencia resultaron en un desgaste significativo de su infraestructura, llevando a cierres para facilitar reparaciones urgentes.

Referencia: Comunicados de prensa y reportajes locales han cubierto los problemas y reparaciones del puente.(ElLitoral, 2015)

5. Puente Hammersmith (Londres, Reino Unido)

Cierre: Varios a lo largo de los años, el más reciente en 2019.

Causas: Deterioro progresivo debido a la falta de mantenimiento y reparación constante.

Referencia: Informes de autoridades locales y nacionales han detallado los problemas recurrentes y los esfuerzos de rehabilitación.(Garcia, 2019)

6. Puente Verrazzano-Narrows (Nueva York, EE. UU.)

Problemas de mantenimiento: Varios a lo largo de los años.

Causas: Este puente ha tenido que enfrentarse a problemas naturales de corrosión, y ha requerido mantenimiento constante para mantenerse operativo.

Referencia: Reportes gubernamentales y mediáticos han documentado los esfuerzos constantes para mantener el puente en buen estado.(Yepes, 2008)

7. Puente de Tacoma Narrows (Washington, EE. UU.)

Colapso: 7 de noviembre de 1940.

Causas: Un fenómeno de resonancia aerodinámica debido a un error de diseño estructural fue la causa principal del colapso.

Referencia: Estudios técnicos históricos y reportajes de medios han analizado en profundidad las causas del colapso.(Brawn, 2019)

8. Puente Silver Bridge (EE. UU.)

Colapso: 15 de diciembre de 1967.

Causas: El colapso fue debido a una grieta en un ojo de una barra de suspensión, exacerbada por la carga pesada y el mantenimiento insuficiente.

Referencia: Los informes técnicos y de medios de comunicación ofrecen un análisis detallado de las causas del colapso.(Idoate, 2021)

9. Puente de la Reina (España)

Problemas estructurales: Varios a lo largo de los años.

Causas: Aunque no ha colapsado, ha tenido problemas de mantenimiento y ha sido objeto de revisiones estructurales significativas.

Referencia: Medios locales y reportes de gobierno municipal han proporcionado detalles sobre los esfuerzos de mantenimiento. (Etxeberria Gabilondo et al., 2001)

10. Puente Presidente Costa e Silva (Brasil)

Problemas de mantenimiento: Varios a lo largo de los años.

Causas: Deterioro de la infraestructura debido a condiciones ambientales y mantenimiento insuficiente.

Referencia: Cobertura mediática local y comunicados gubernamentales han rastreado los problemas y las soluciones aplicadas a lo largo del tiempo.

La integridad de las infraestructuras urbanas es esencial para garantizar la seguridad y funcionalidad de las ciudades modernas. Los puentes, en particular, juegan un papel crucial al conectar regiones, facilitar la movilidad y potenciar el desarrollo económico y social. Es por ello que el monitoreo y estudio periódico de su salud estructural se vuelve imprescindible, más aún cuando se encuentran en entornos que presentan variabilidades y desafíos significativos, como es el caso del Río Machángara en Cuenca.

En la zona donde se erige el puente objeto de estudio, se ha observado un incremento notable en los calados del Río Machángara. Este aumento en el nivel del agua, aunque natural en ciertas estaciones, ha mostrado tendencias que podrían exceder las previstas durante la fase de diseño del puente, representando un potencial riesgo para la estructura y sus usuarios (El Universo, 2020).

Adicionalmente, se han detectado ciertas patologías en el puente que han suscitado preocupación entre la comunidad y expertos en la materia. Una de estas anomalías es la vibración excesiva del tablero, fenómeno que no solo afecta la percepción de seguridad entre quienes lo transitan, sino que también puede ser indicativo de problemas estructurales más profundos o desgaste acelerado de los materiales (Andrade et al., 1998).

Ante este panorama, surge una pregunta: ¿Qué sucedería si todos estos factores —el incremento en los calados del río, las vibraciones del tablero y otras potenciales patologías no detectadas— actuasen simultáneamente sobre el puente? Esta interrogante no solo evidencia la necesidad de un estudio profundo, sino que justifica plenamente el realizar un análisis meticuloso sobre la salud estructural del puente en base a los parámetros de interacción antes mencionados

El objetivo final de esta investigación no es simplemente identificar y catalogar los problemas, sino anticiparse a potenciales escenarios de riesgo, proponiendo soluciones y estrategias que garanticen la seguridad, durabilidad y eficiencia de esta infraestructura en el paisaje cuencano.

3. Metodología de Investigación

3.1. Levantamiento de información

El levantamiento aerofotogramétrico se llevó a cabo utilizando un dron de la marca DRONE, que contaba con un módulo RTK integrado. Este módulo RTK (Real-Time Kinematic) es esencial para la precisión geoespacial, ya que permite obtener coordenadas con exactitud centimétrica mediante correcciones en tiempo real de las señales GPS. El uso de un dron DRONE con RTK integrado garantizó que las imágenes capturadas no solo fueran de alta resolución, sino también georreferenciadas con gran precisión. Esta integración de tecnología avanzada hizo posible que el proceso de levantamiento fuera más eficiente y los datos recolectados de mayor fiabilidad, estableciendo una base sólida para las fases subsiguientes del análisis (Benítez, 2011).

En nuestro esfuerzo por comprender de manera profunda la interacción entre el agua del Río Machángara y la estructura del puente en Cuenca, se ha llevado a cabo un meticuloso levantamiento topográfico mediante la aerofotogrametría. Esta metodología permitió tener datos precisos y detallados del entorno. A continuación, se detallan los pasos que se han seguido y los hallazgos preliminares:



Ilustración 1 Fotografías de la zona de estudio

Levantamiento Topográfico Mediante Aerofotogrametría:

- **Planificación del Vuelo:** Se diseñó una ruta detallada para el dron, basándose en las características y dimensiones específicas del área circundante al puente y al Río Machángara. Esta planificación resultó esencial para garantizar una cobertura exhaustiva, teniendo en cuenta factores como la altitud, velocidad del dron, orientación de la cámara y las condiciones óptimas de luz.
- **Captura de Imágenes:** Con la ayuda de un dron equipado con una cámara de alta resolución y sensores RTK para la calibración precisa de datos geoespaciales, se obtuvieron imágenes detalladas del área de interés. La función RTK garantizó que las imágenes capturadas tuviesen georreferenciación con una precisión centimétrica, eliminando la necesidad de puntos de control terrestres adicionales y acelerando el proceso general de levantamiento.
- **Procesamiento de Datos:** Tras la recolección, las imágenes se sometieron a un proceso de análisis mediante software avanzado de fotogrametría. La información solapada y las perspectivas múltiples permitieron la construcción de un modelo tridimensional robusto del terreno. De este modelo, se derivaron el modelo digital del terreno (MDT) y el modelo digital de superficie (MDS), proporcionando una perspectiva detallada de la topografía, los elementos circundantes y las características geomorfológicas del área en estudio.
- **Validación en Terreno:** A pesar de la gran precisión que ofreció el dron con RTK, se realizaron mediciones en terreno para validar y ajustar los resultados obtenidos. Equipos especializados llevaron a cabo mediciones directas en puntos estratégicos,

garantizando que el modelo digital concuerde con la realidad. Esta etapa de validación se mostró esencial para calibrar y refinar el modelo digital, proporcionando una representación aún más exacta de la realidad.

Con la información obtenida del levantamiento topográfico aerofotogramétrico, estamos preparados para proceder a las siguientes fases del análisis. Los datos obtenidos servirán como fundamento para las próximas simulaciones y evaluaciones, facilitando el análisis de la interacción entre el agua del río y la estructura del puente. El uso de la tecnología RTK ha mejorado la precisión y confiabilidad de los datos recolectados.



Ilustración 2 Área de planificación del levantamiento

Durante la fase de planificación del levantamiento aerofotogramétrico, se utilizó el software **Google Earth Pro** para diseñar y programar la ruta de vuelo del dron. Esta herramienta, , permitió configurar de manera óptima los parámetros del vuelo (Ver Ilustración 2), garantizando una cobertura completa del área de estudio y asegurando que se capturaran imágenes con el solapamiento adecuado, la altitud correcta y en las condiciones de luz

idóneas. Una vez recolectadas las imágenes, se procedió con el análisis y procesamiento utilizando **Un programa de análisis de fotos aéreas** . Este software transformó las imágenes en modelos tridimensionales detallados del terreno y produjo tanto el modelo digital del terreno (MDT) como el modelo digital de superficie (MDS). La combinación de Google Earth Pro para la planificación y Un programa de análisis de fotos aéreas para el análisis aseguró un proceso fluido y resultados de alta calidad y precisión.

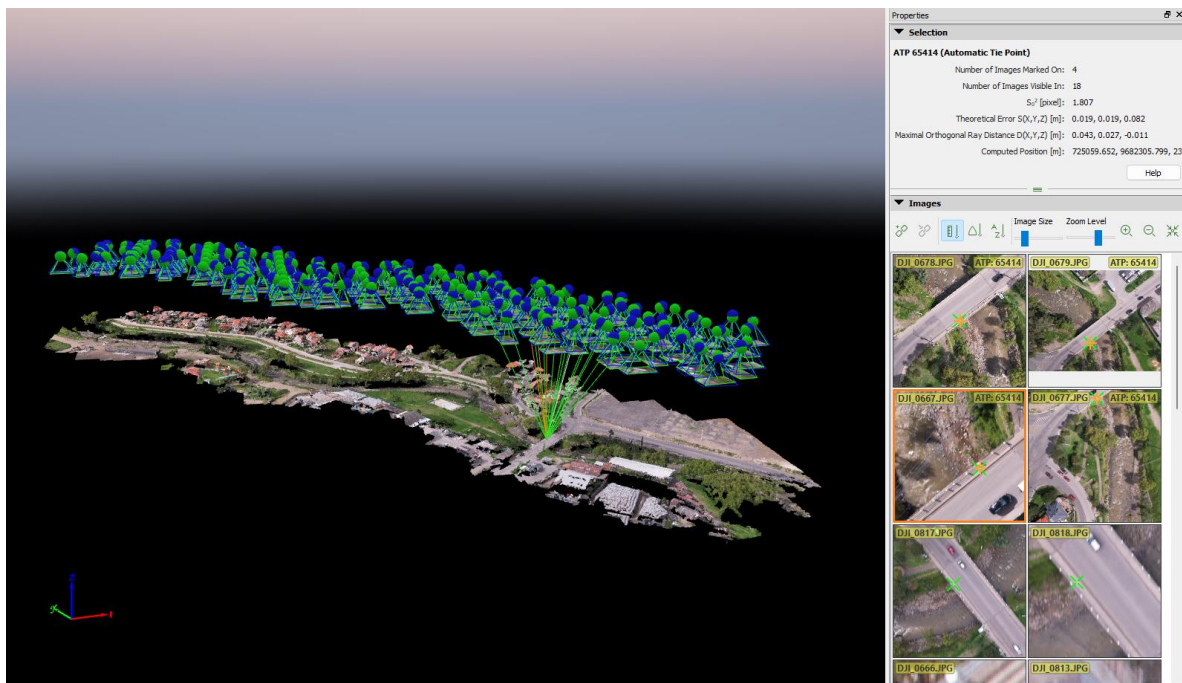


Ilustración 3 Análisis de fotogrametría mediante software de fotogrametría

3.2. Modelo en un programa de análisis de crecidas

Integración y Análisis Profundo del Caudal utilizando EL PROGRAMA DE ANALISIS DE CRECIDAS, ArcGIS y Civil 3D:

Transición desde Pix4D a Civil 3D:

La modelización del terreno a partir del levantamiento aerofotogramétrico procesado en Un programa de análisis de fotos aéreas fue el punto de partida. Este modelo digital detallado refleja las características morfológicas y topográficas precisas de la zona alrededor del puente sobre el Río Machángara. El programa Civil 3D nos facilitará el trabajo con estas superficies geométricas. Tras exportar a Civil 3D, se pudo adaptar la superficie del terreno según las necesidades del estudio, garantizando que la topografía se represente adecuadamente para los análisis posteriores.



Ilustración 4 Obtención de curvas de nivel en Arc Gis

Delineación de Secciones Transversales del Río:

La definición de las secciones transversales se realizó en Civil 3D. Cada sección brinda información detallada de las características fluviales y topográficas del río, fundamentales para comprender la naturaleza de la interacción agua-estructura en diferentes puntos a lo largo del río.

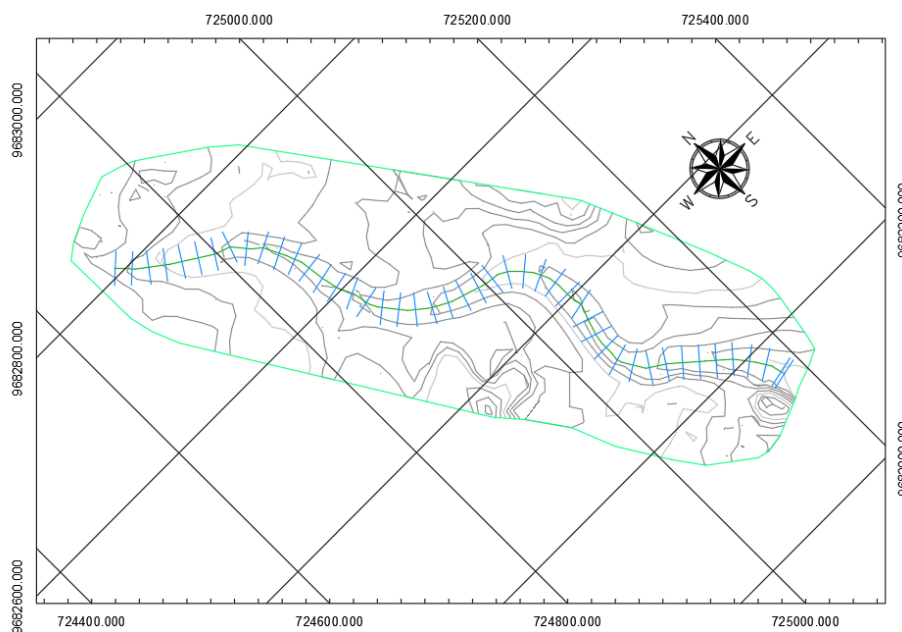


Ilustración 5 Planta del río

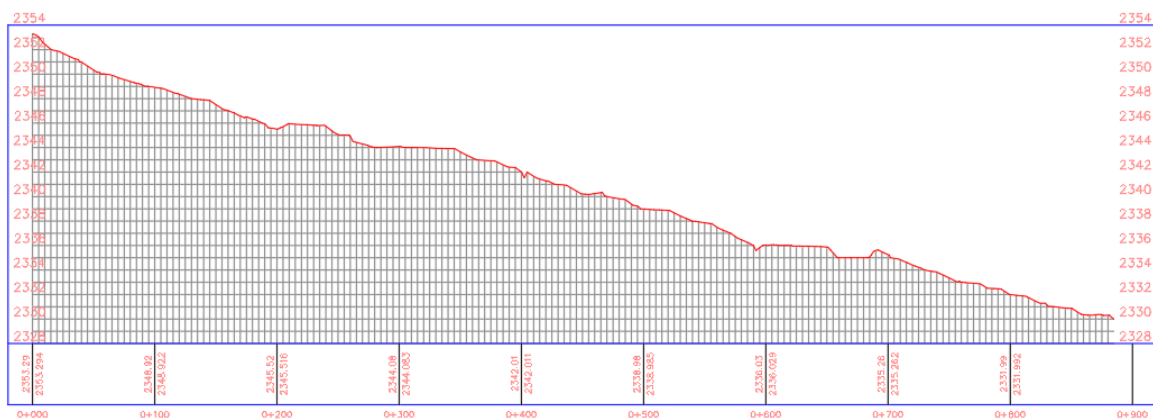


Ilustración 6 Perfil del río

Migración de Datos a el programa de análisis de crecidas:

La exportación de las secciones transversales a PCA (Programa de análisis de crecidas) se llevó a cabo de manera fluida y sistemática. Dada la naturaleza especializada de PCA en el análisis y modelado hidráulico, era crucial que se mantuviera la integridad de la información geométrica. Este proceso de migración se aseguró de que cada aspecto topográfico del área de estudio, recogido inicialmente en Pix4D y transformado en Civil 3D, se reflejara en el entorno de PCA.

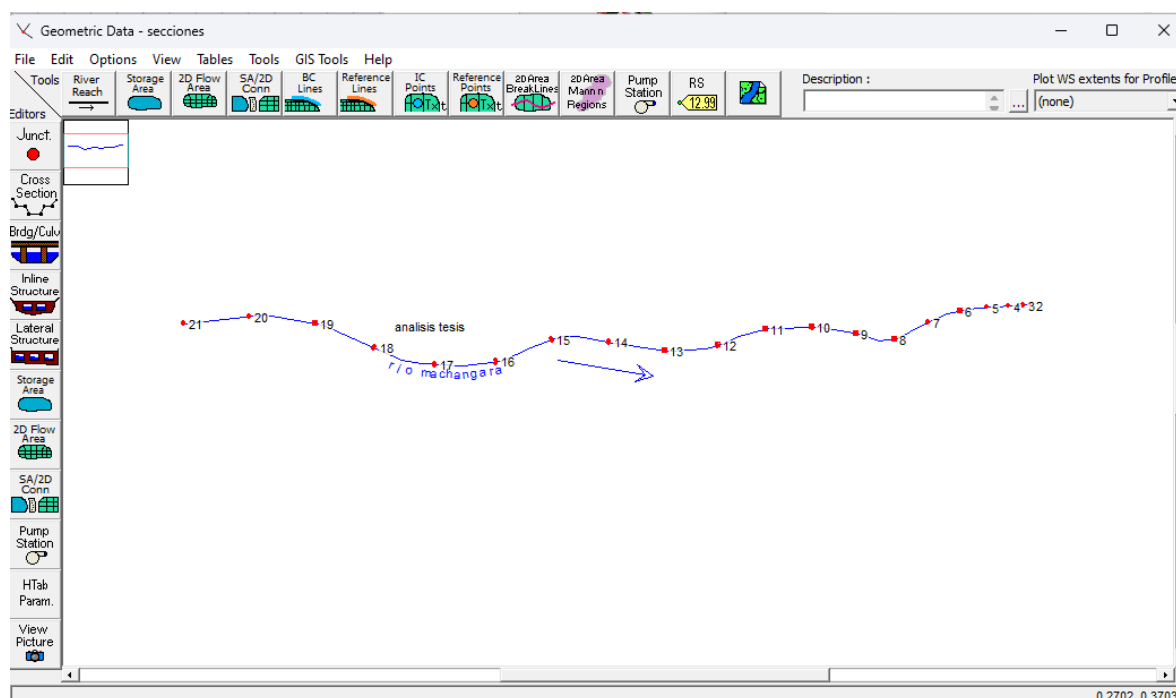


Ilustración 7 Datos de secciones en el programa de análisis de crecidas

Modelado Hidráulico en EL PROGRAMA DE ANALISIS DE CRECIDAS:

Una vez importadas las secciones en EL PROGRAMA DE ANALISIS DE CRECIDAS, se procedió a un análisis más detallado. Primero, se integró información geomorfológica adicional del Río Machángara, recopilada de investigaciones previas, para contextualizar y

afinar el modelo hidráulico. Esta data enriqueció el modelo, proporcionando detalles como rugosidades, pendientes y características fluviales. A este modelo se le incorporaron datos de caudales, tanto históricos como proyectados (ETAPA EP, 2020), datos que . La introducción del puente sobre el Río Machángara en el software, replicando sus dimensiones y características exactas, permitió simular de manera precisa su interacción con los diferentes escenarios de flujo de agua.

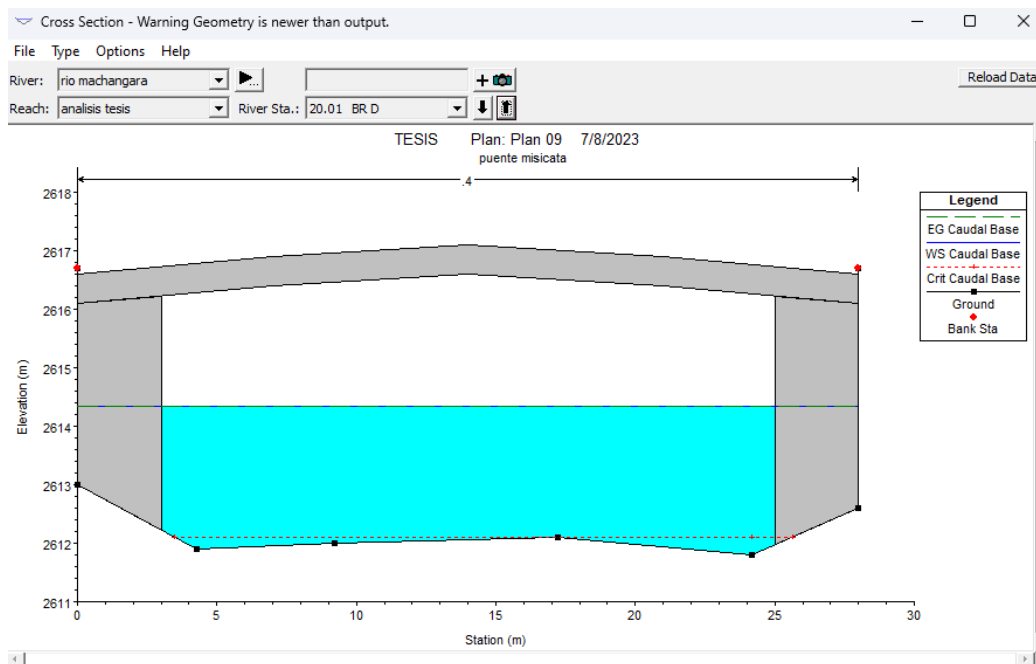


Ilustración 8 Modelo de puente en EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE CRECIDAS

En la Ilustración 8 se muestra cómo se ha modelado el puente que se encuentra en el punto estudiado del río Machángara. Esta representación gráfica exhibe con detalle la geometría específica del puente, permitiendo una apreciación clara de sus dimensiones y estructura. La modelación se ha llevado a cabo con precisión, tomando en cuenta las características únicas de la construcción real sobre el río Machángara, asegurando así la validez y la aplicabilidad de los resultados del estudio.

Interpretación y Proyección de Resultados:

Con las simulaciones en marcha, PAC proporcionó una comprensión de la relación entre el calado de agua del Río Machángara y la estructura del puente. Esta interpretación es esencial para identificar puntos críticos, áreas de interacción intensa y secciones del puente que podrían estar en riesgo durante eventos de alto caudal. Las simulaciones dieron una perspectiva valiosa sobre los posibles efectos erosivos, acumulaciones de sedimentos y otros fenómenos asociados a la interacción agua-estructura.

3.3. PROCESO PARA MODELACIÓN DE MODELOS FINITOS

Fase	Descripción
Recolección de Datos en Campo del Estribo	- Inspección del estribo del puente. Ensayos para determinar la condición estructural, dimensiones y materiales (Ultrasonido y Ensayo de detección de metales)
Análisis Preliminares y Obtención de Propiedades	- Análisis de los ensayos realizados en campo. (Ultrasonido y Ensayo de detección de metales) - Extracción de propiedades mecánicas y físicas esenciales del estribo
Transición a Modelos Finitos	- Introducción de la información recolectada en Modelos finitos Integración eficiente de datos de campo y propiedades del material en el modelo

Fase	Descripción
Simulaciones y Análisis en Modelos Finitos	<ul style="list-style-type: none"> - Creación de un modelo del estribo en FEM - Simulaciones bajo diferentes condiciones para evaluar resistencia, deformaciones y tensiones del estribo (Análisis de varios caudales)
Interpretación y Proyección de Resultados	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretación de los resultados de las simulaciones - Identificación de áreas de mejora y proyección de futuras intervenciones
Conclusión	<ul style="list-style-type: none"> - Obtención de una visión completa del estado y comportamiento del estribo a través de ensayos y simulaciones - Información crucial para futuras decisiones de ingeniería

4. Resultados

Levantamiento de información

Modelo Digital del Terreno (MDT): El MDT es una representación tridimensional del terreno sin incluir estructuras u objetos sobre él. En este caso, el MDT brindó una vista detallada de la superficie natural del terreno alrededor del puente, excluyendo el puente mismo y la vegetación, lo que es crucial para el análisis hidráulico posterior.

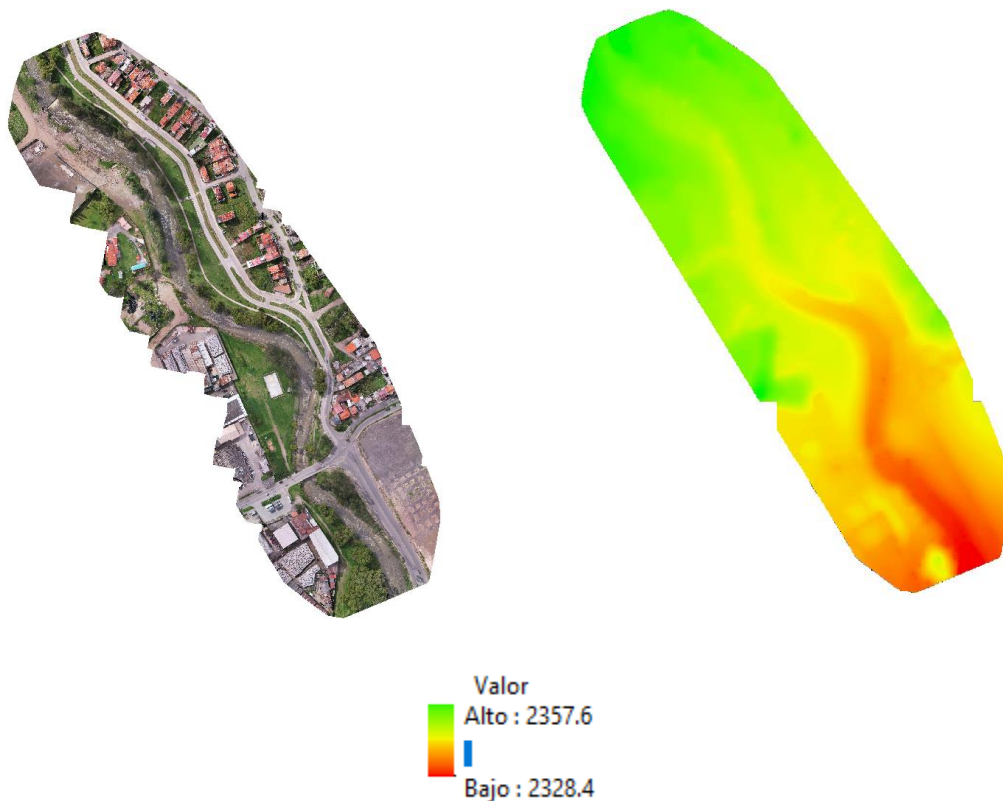


Ilustración 9 MDT del río

Modelo Digital de Superficie (DSM): A diferencia del MDT, el DSM incluye todos los objetos y estructuras sobre el terreno. En este estudio, el DSM fue esencial para entender la interacción entre el puente y su entorno inmediato, incluyendo árboles, edificios y otros

elementos. En las siguientes graficas se observa las diferentes elevaciones del proyecto.

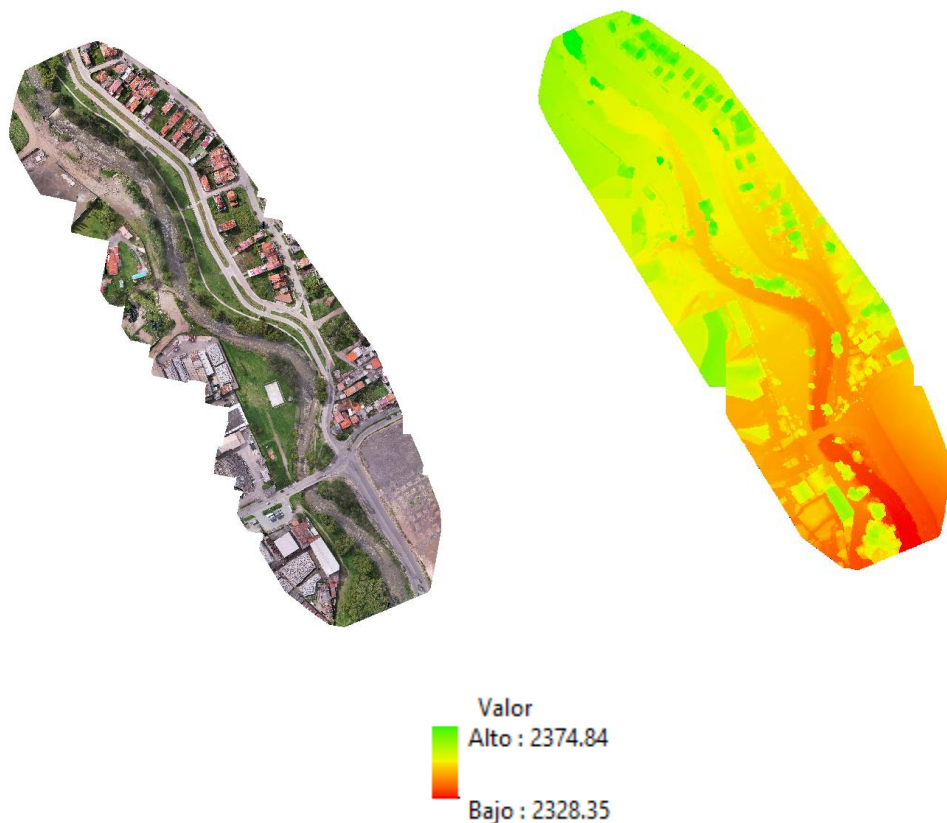


Ilustración 10 DSM del Rio

Analisis de Datos en HEC RAS

Simulaciones: Con los datos cargados, se realizaron simulaciones para el caudal base y una proyección de 26 m³/s este valor representa el caudal a 100 años y 14.6m³/s a 50 años según (ETAPA EP, 2020) además de esto el rio presenta un caudal base de 3m³/s. Estas simulaciones buscan prever el comportamiento del río y sus interacciones con el puente bajo diversas condiciones (Varios Caudales ingresados).

Resultados de las simulaciones:

Caudal base: Bajo las condiciones de caudal base, el río mantiene un comportamiento estable en relación con el puente, sin presentar amenazas inmediatas para la estructura.

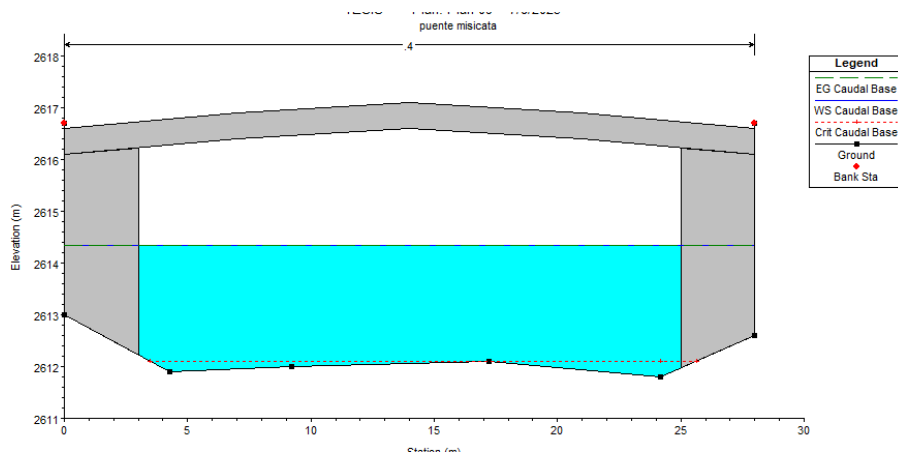


Ilustración 11 puente con calado de 3m

Proyección a 100 años con 26 m³/s: La simulación mostró que, al proyectar un caudal de 26 m³/s para un escenario a 100 años, se predice un calado de 3 metros. Esto significa que el nivel del agua alcanzará una profundidad de 3 metros en relación del fondo del río hasta la parte más alta del estribo, lo cual permite entender las presiones y fuerzas que actuarán sobre la estructura en el futuro.

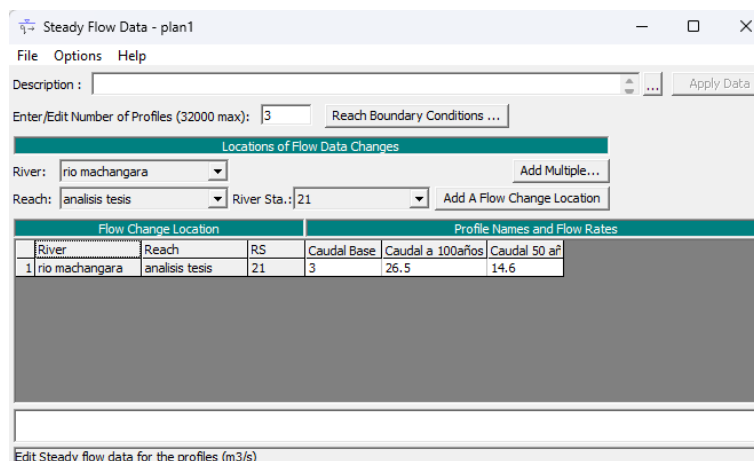


Ilustración 12 Caudales analizados

Análisis en MODELOS FINITOS

El modelo de elementos finitos se los realiza con un mallado de 500mm ya que al hacerlo más pequeño el análisis se vuelve muy alto para el equipo llegando a ser hasta 10 horas de corrida del programa. Como se observa en las siguientes figuras tenemos cargas vivas en el centro del vano analizadas en ensayos previos en vibración ambiental y las cargas en el estribo varían en función al calado previamente analizado.

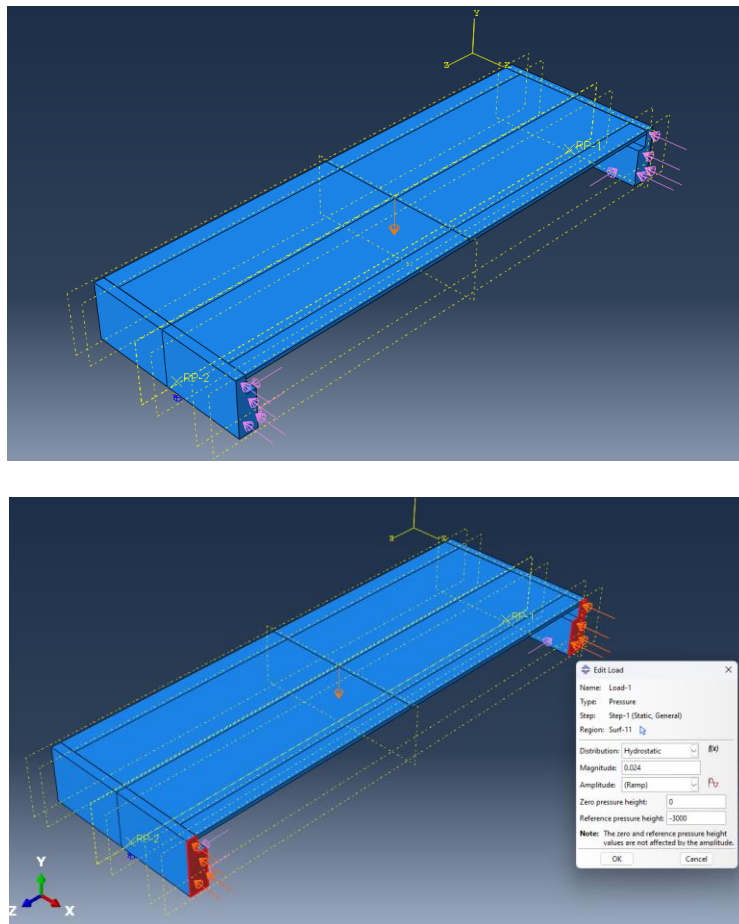


Ilustración 13 Cargas dinámicas insertadas

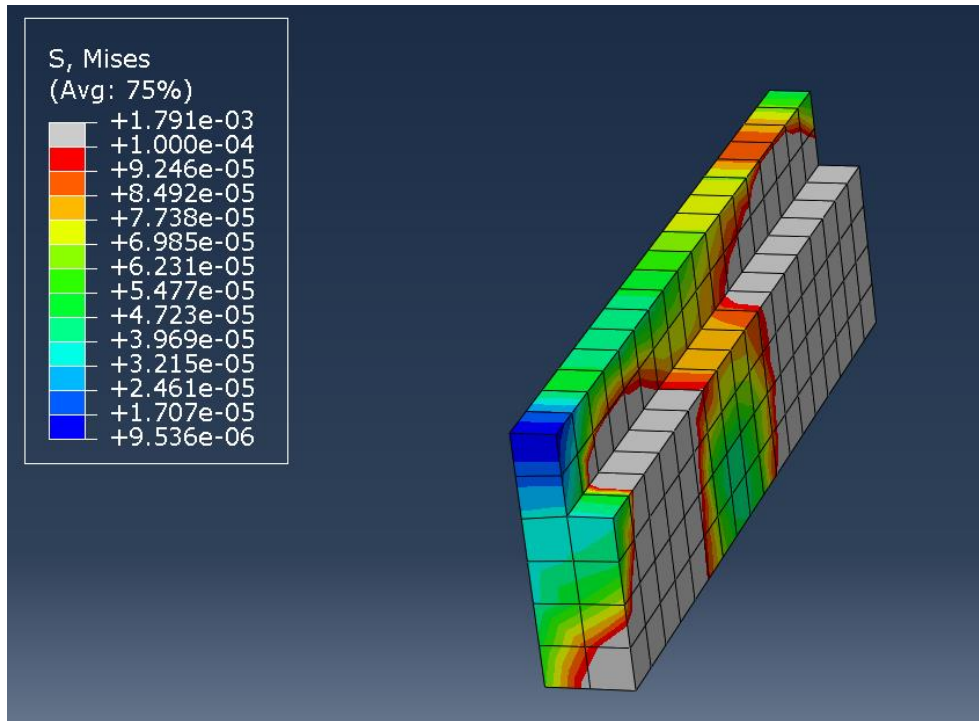


Ilustración 14 Modelo del estribo con cargas laterales del agua

Las unidades de análisis en los modelos finitos en esfuerzo son de MPa o N/mm².

Análisis en Modelos finitos:

Modelos finitos, una herramienta para el análisis de elementos finitos se utilizó para evaluar los esfuerzos y deformaciones en el puente, especialmente en el estribo y otros componentes estructurales, bajo distintas condiciones.

Proceso en Modelos finitos:

Definición de propiedades materiales: Se asignó al hormigón una resistencia característica de 240 kg/cm². Datos los cuales se realizaron con ensayos de ultrasonido.

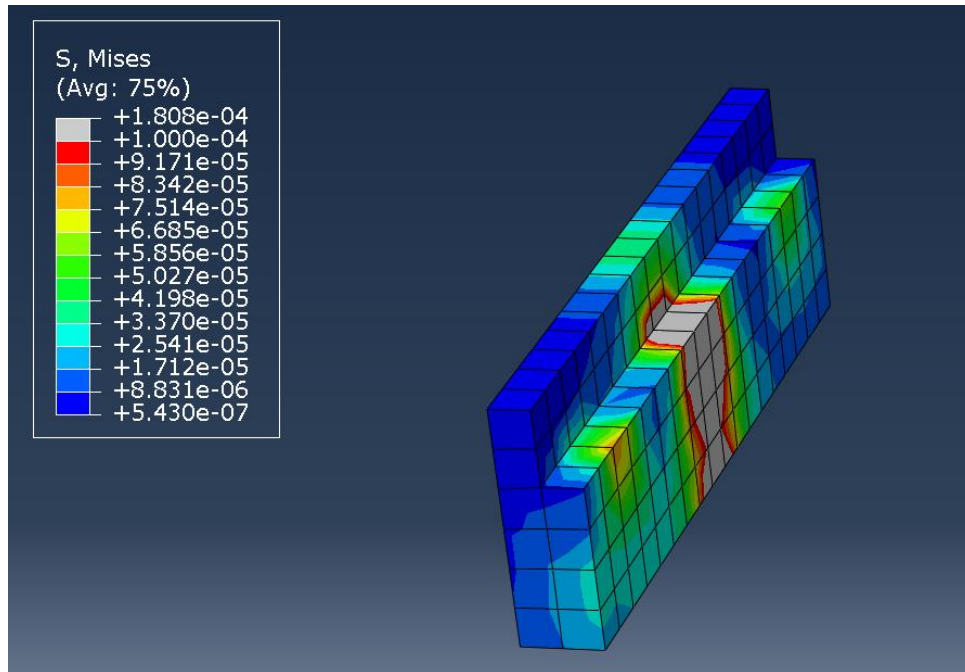


Ilustración 15 Modelo del estribo sin cargas de presión de agua MPa

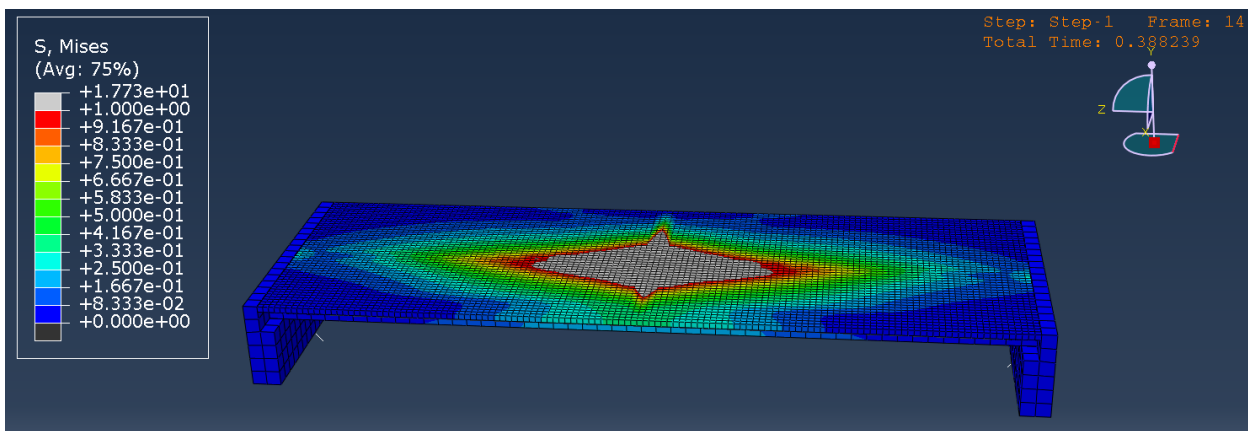


Ilustración 16 Modelo general analizado en FEM MPa

La ilustración anterior muestra los esfuerzos combinados de carga viva y muerta donde se observa que el esfuerzo es mucho mayor en la losa que en el estribo.

Modelado de la deriva: Basándose en estudios previos de vibración ambiental, se introdujo en el modelo una deriva de 4.2 cm. Esta deriva representa los desplazamientos máximos

esperados de la estructura debido a cargas dinámicas, como el tráfico vehicular y condiciones ambientales. Este análisis se resalta en base a análisis de vibración con un equipo sísmico para evaluar la rigidez del tablero al pasar un camión. Este estudio se lo realizó con un ensayo de vibración ambiental el cual tiene un geófono de 4Hz.

Incorporación de la presión hidrostática: Utilizando los datos de calado obtenidos de las simulaciones en EL PROGRAMA DE ANALISIS DE CRECIDAS, se aplicó la presión hidrostática en los muros correspondientes del puente. Esta presión representa las fuerzas del agua actuando sobre la estructura durante eventos de crecida.

En el desarrollo del proyecto, se ha implementado una fase crucial de análisis, especialmente en relación con las cargas. Para éstas, se añadió un análisis cíclico de los caudales base correspondientes a períodos de retorno de 50 y 100 años. La inclusión de estos caudales es esencial para obtener un modelo que represente de manera precisa las variaciones que se pueden presentar en diferentes escalas temporales. Los caudales se incorporaron de tal manera que la carga experimente variaciones en función del tiempo, como lo ilustra claramente la figura a continuación. Este enfoque metodológico permite una evaluación más comprensiva y realista de los efectos a largo plazo y de los impactos asociados a eventos de alta magnitud. La figura muestra cómo la carga varía cíclicamente, reflejando la influencia de los distintos caudales analizados, lo que proporciona una visión detallada de la variabilidad temporal de las cargas y permite ajustar el diseño o las operaciones según sea necesario.

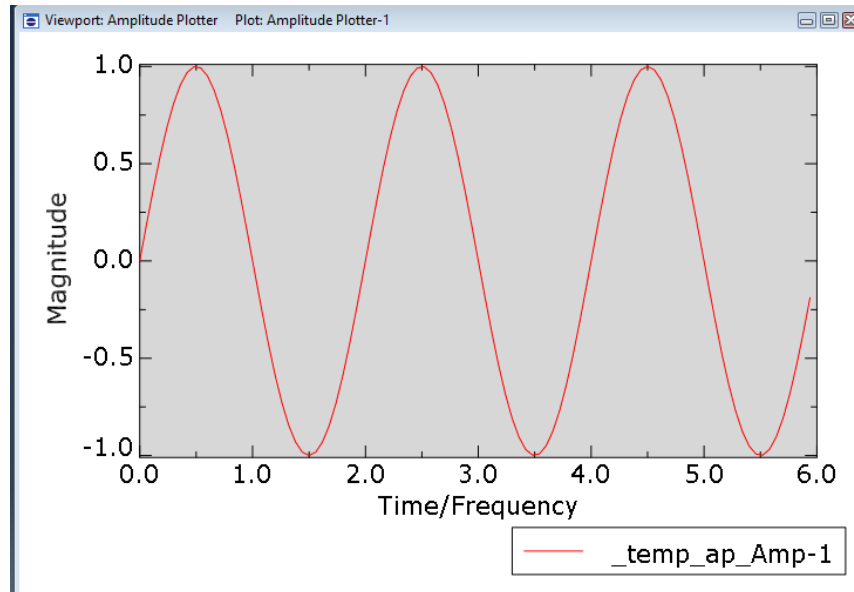


Ilustración 17 Gráfica de cargas cíclicas que se analizaran con cada caudal

Resultados del análisis en Modelos finitos:

Tras realizar las simulaciones, se pudo observar cómo afecta la presión hidrostática a los esfuerzos y deformaciones en la estructura del puente. Específicamente, al comparar los esfuerzos internos del hormigón entre el análisis sin consideración del empuje del agua durante una crecida y el análisis con dicho empuje, se encontró una capacidad del 70% a los 100 años de uso. Analizando la resistencia que se tiene versus el esfuerzo interno del elemento. Esta variación indica que el empuje del agua en eventos de crecida puede tener un impacto significativo en la salud estructural del puente.

El análisis en Modelos finitos refuerza la importancia de considerar tanto las cargas dinámicas como las cargas hidrostáticas en el diseño y evaluación de puentes. En el contexto del puente sobre el Río Machángara, los resultados destacan la necesidad de acciones correctivas o reforzamientos para garantizar la seguridad y durabilidad de la estructura ante futuros eventos hidrológicos extremos.

Para estos datos mostrados se evalúa la carga viva muerta y el crecimiento. La carga viva comprende la carga del camión, la muerta constituye el peso de los elementos

Caudal (m ³ /s)	Periodo de Diseño (años)	Esfuerzo actuante en el Estribo (MPa)	Porcentaje de funcionamiento
3.0	actual	10.35	43
14.6	50 años	15.65	65
26.0	100 años	17.05	70

En esta tabla:

Caudal (m³/s): Representa los distintos caudales que estás analizando.

Periodo de Diseño (años): Aquí debes ingresar el periodo de diseño correspondiente para cada caudal.

Esfuerzo en el Estribo (MPa): Aquí debes ingresar los valores de los esfuerzos en el estribo obtenidos a partir de tus simulaciones o ensayos para cada caudal.

Observaciones: Un campo adicional donde puedes añadir cualquier nota o detalle relevante sobre los resultados para cada condición de caudal.

5. Discusión

- A un caudal de 3 m³/s (condición actual), el estribo experimenta un esfuerzo de 10.35 MPa, y se encuentra funcionando al 43% de su capacidad. Teniendo en consideración que el 100% es la capacidad máxima que llega el estribo en su resistencia analizada en campo.
- Con un caudal aumentado a 14.6 m³/s (proyectado para un período de diseño de 50 años), el esfuerzo actuante aumenta a 15.65 MPa, y el porcentaje de funcionamiento es del 65%.
- A un caudal de 26 m³/s (proyectado para un período de diseño de 100 años), el estribo se encuentra bajo un esfuerzo de 17.05 MPa y funciona al 70% de su capacidad.
- Incremento progresivo del esfuerzo actuante: A medida que el caudal aumenta, el esfuerzo actuante en el estribo también incrementa. Esto indica una relación directamente proporcional entre el caudal y el esfuerzo actuante.
- Aumento en el porcentaje de funcionamiento: A medida que aumenta el caudal, el porcentaje de funcionamiento del estribo también aumenta, indicando que el estribo está más optimizado (en términos de diseño) para manejar caudales más elevados. Al tener mayor esfuerzo la capacidad soportante versus la admisible tiende a cambiar.
- Proyección a largo plazo: Al analizar el período de diseño, se observa que el estribo puede manejar caudales considerablemente más altos que el actual sin llegar a su máxima capacidad, demostrando que tiene un buen margen de

seguridad y durabilidad para el futuro, incluso considerando aumentos significativos en el caudal.

- Necesidad de monitoreo y mantenimiento: Aunque el estribo parece tener una buena capacidad para manejar incrementos en el caudal en el futuro, será esencial mantener un monitoreo regular para asegurar que el esfuerzo actuante no se acerque a los límites de seguridad de la estructura, para prevenir fallas estructurales y garantizar su funcionamiento seguro y efectivo a largo plazo.

El análisis integral de la interacción agua-estructura y la evaluación estructural del puente sobre el Río Machángara han arrojado una serie de conclusiones que vale la pena discutir detalladamente:

Implicaciones del Levantamiento Aerofotogramétrico:

El levantamiento realizado con el DRONE equipado con módulo RTK proporcionó datos con precisión. Las curvas de nivel, el MDT y el DSM revelaron características topográficas que no solo permiten entender la geomorfología de la zona, sino también anticipar posibles cambios en el curso y comportamiento del río. El entendimiento detallado del terreno circundante al puente es esencial para determinar zonas de erosión potencial o sedimentación que podrían impactar la estabilidad del puente a largo plazo esto nos dio como resultado las curvas de nivel con precisión ya que son un dato esencial para los modelamientos hidráulicos.

Resultados del Análisis Hidráulico:

La proyección de un calado de 3 metros en un escenario a 100 años resalta la importancia de preparar la infraestructura para enfrentar eventos extremos. La creciente urbanización

y cambios en el uso del suelo pueden alterar el comportamiento hidrológico del Río Machángara

Análisis Estructural en Modelos finitos:

La capacidad del hormigón es del 70% a los 100 años en los esfuerzos internos del hormigón, cuando se considera el empuje del agua, es una señal clara del impacto significativo que tiene el calado del agua en la estructura. Aunque este porcentaje podría parecer menor, en términos estructurales representa una carga adicional que, con el tiempo y bajo condiciones repetidas de crecida, podría acelerar la aparición de patologías o fallos estructurales. Es imprescindible considerar este factor en los planes de mantenimiento y en decisiones sobre posibles refuerzos o remodelaciones de la estructura.

Relevancia de los Datos en Campo:

La incorporación de datos reales, como la resistencia del hormigón y la deriva, brindan un nivel de realismo al modelo que no puede ser subestimado. La vibración ambiental, en particular, es una señal de que el puente ya está experimentando cargas dinámicas que, sumadas al empuje del agua, podrían poner en riesgo su integridad.

Análisis de Resistencia de Ultrasonido

Tabla 1 Análisis de ultrasonido

Componente del Puente	Resistencia de Ultrasonido (MPa)
Viga	23.55
Losa	24.12
Estribo	24.36

En esta tabla:

Componente del Puente: Lista de las diferentes partes del puente que se están analizando.

Resistencia de Ultrasonido (MPa): Los resultados de las pruebas de resistencia de ultrasonido para cada componente, expresados en megapascales (MPa).

Observaciones: Espacio para cualquier nota adicional o detalle relevante sobre los resultados de las pruebas de resistencia para cada componente.

Verificación de la Losa del Puente

Tabla 2 Analisis de vibracion ambiental

Parámetro	Unidad	Valor
Aceleración	m/s ²	15.3
Velocidad	m/s	1.52
Frecuencia	Hz	7.937
Periodo	s	0.126

6. Conclusiones

Análisis Hidráulico: La proyección del calado de 3 metros en un escenario de 100 años recalca la urgencia de adaptar la infraestructura actual para afrontar eventos extremos. El Río Machángara, con los cambios hidrológicos previstos, puede poner en riesgo la integridad del puente si no se toman medidas preventivas.

Evaluación Estructural: El análisis en Modelos finitos ha mostrado que la estructura actual podría experimentar una capacidad del 70% en los esfuerzos internos del hormigón al considerar el empuje del agua. Esta variación, aunque parece pequeña, puede tener significativas implicaciones estructurales a largo plazo como socavación, pérdida de capacidad del hormigón.

Impacto del Agua: El agua no solo ejerce una presión hidrostática sobre la estructura, sino que también puede inducir patologías en las estructuras de hormigón. La exposición continua al agua puede provocar la carbonatación del hormigón, reducir su alcalinidad y facilitar la corrosión de las armaduras. Además, la acción erosiva del flujo del agua puede llevar a problemas como la socavación en los estribos del puente. El estribo según mediciones previas se encuentra a 3.35m desde el nivel de la losa. Estas patologías pueden ser corrosión, desgaste, hongos, pérdida de recubrimiento y carbonatación.

7. Recomendaciones

Prevención de Socavación: Es vital establecer medidas de protección en los estribos del puente, como la instalación de escolleras o colchones reno, para evitar la socavación y garantizar la estabilidad de la estructura. Se debe realizar un monitoreo regular de las bases del puente para detectar tempranamente cualquier signo de erosión. Según (Espinoza & Gómez, 2010) Se determinó que el porcentaje de pérdida de suelo para que las pilas fallen por socavación varía entre 11% y 29%

Inspecciones Periódicas: Se recomienda llevar a cabo inspecciones periódicas para identificar y atender rápidamente cualquier patología emergente causada por el contacto con el agua, como grietas, desprendimientos o carbonatación del hormigón. Se recomienda hacer inspecciones anuales o semestrales.

Refuerzo y Mantenimiento: Basándose en los resultados obtenidos, es recomendable considerar refuerzos estructurales, especialmente en las zonas más expuestas al empuje del agua. El mantenimiento regular puede ayudar a prolongar la vida útil de la estructura y prevenir fallos catastróficos. Se puede recomendar colocar muros de contención antes de llegar al puente y así reducir la velocidad del agua al llegar al estribo. El mantenimiento correctivo es un muy buen apoyo para aumentar la vida útil de la estructura en los próximos años, reforzando las zonas que se vean desgastadas durante las visitas periódicas.

8. Referencias bibliográficas

Andrade, C., Alonso, C., & Sarría, J. (1998). *Influencia de la humedad relativa y la temperatura en las velocidades de corrosión de estructuras de hormigón.*

Benítez, J. (2011). *Estudio de la evolución de la velocidad de ultrasonidos en probetas de hormigón con distintos grados de humedad.*

El Universo. (2020). *Desborde de ríos causa inundaciones en zonas de Cuenca* .
<https://www.eluniverso.com/noticias/2020/05/02/nota/7830072/desborde-rios-causa-inundaciones-zonas-cuenca/>

ElLitoral. (2015). *Advierten que podría quedar relegada la edificación del puente entre Alvear-Itaqué - El litoral.* <https://www.ellitoral.com.ar/corrientes/2015-8-4-1-0-0-advierten-que-podria-quedar-relegada-la-edificacion-del-puente-entre-alvear-itaqui>

Espinoza, D., & Gómez, M. (2010). *VULNERABILIDAD POR SOCAVACIÓN DE PUENTES CARRETEROS ANTE AVENIDAS.* <https://www.researchgate.net/publication/261642846>

ETAPA EP. (2020). *ETAPA EP - Servicios de Telefonía, Televisión, Internet, Agua Potable, Alcantarillado de Cuenca - Ecuador > Noticias > Detalle.*
<https://www.etapa.net.ec/noticias/detalle/id/1340/contenido/reporte-de-caudales>

Etxeberria Gabilondo, F., Beguiristain Gúrpide, M. A., & Herrasti Erlogorri, L. (2001). Tres tumbas de la etapa hispano-goda en Gomacin, Puente la Reina (Navarra). *Cuadernos de Arqueología de La Universidad de Navarra, ISSN 1133-1542, Nº 9, 2001, Págs. 223-277, 9, 223–277.*

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=232671&info=resumen&idioma=SPA>

García, Jorge. (2019). Corte de soporte o pilar sin gatos. Postesado para estructura metálica: método cuña-contracuña; tecnología derivada. *Hormigón y Acero*.
<https://doi.org/10.1016/J.HYA.2018.11.001>

Idoate, L. (2021). *Puente Silver Bridge Fallas*.
<https://www.elcorreo.com/culturas/territorios/maldicion-hombre-polilla-20210814211341-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

Luque, M. (2002). *Hipótesis sobre las causas concurrentes que ocasionaron la caída del puente Morandi en Italia*.

Brawn. (2019). *¿Por qué colapsó el puente de Tacoma Narrows?*
<https://es.linkedin.com/pulse/por-qu%C3%A9-colaps%C3%B3-el-puente-de-tacoma-narrows-mat%C3%ADas-braun>

SICE. (2019). *El puente Samuel De Champlain abre al tráfico | SICE*.
<https://www.sice.com/actualidad/el-puente-samuel-de-champlain-abre-al-traffic>

Wlazlo, A. (2003). *LA CAUSA DE LA CAÍDA DEL PUENTE DE MINNEAPOLIS AÚN SIN RESOLVERSE – Revista Vial*. <https://revistavial.com/la-causa-de-la-caida-del-puente-de-minneapolis-aun-sin-resolverse/>

Yepes, V. (2008). *La construcción del puente de Verrazano-Narrows – El blog de Víctor Yepes*.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/11/25/la-construccion-del-puente-de-verrazano-narrows/>

- Tavares, A., Costa, A., & Varum, H. (2012). Common pathologies in composite adobe and reinforced concrete constructions. *Journal of performance of constructed facilities*, 26(4), 389-401.
- Courard, L., Gillard, A., Darimont, A., Bleus, J. M., & Paquet, P. (2012). Pathologies of concrete in Saint-Vincent Neo-Byzantine Church and Pauchot reinforced artificial stone. *Construction and Building Materials*, 34, 201-210.
- Oualit, M., Jauberthie, R., & Abadlia, M. T. (2019). Concrete pathologies in sewer structures: microstructural analysis. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 4(1), 1-10.
- Vazquez, E. G., Haddad, A. N., Qualharini, E. L., Alves, L. A., & Féo, I. A. (2016). Pathologies in Reinforced Concrete Structures. *Sustainable Construction*, 213.

9. ANEXOS



Cienfuegos, 20 de octubre de 2023


Editorial "Universo SUR"

hace constar que:

El Artículo Científico presentado por los autores: Stalin Parreño y Xavier Nieto, con el título "Interacción Agua-Estructura de los estribos del puente Cornelio Vintimilla y la Av. de los Migrantes sobre el río Machángara" ha sido aprobado por los pares evaluadores asignados por nuestra revista y será publicado en el Volúmen 19 número 94 correspondiente al período noviembre - diciembre 2023 de la Revista "CONRADO", con ISSN: 1990-8644. Misma que se encuentra certificada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) como Publicación Seriada Científico-Tecnológica. También se encuentra indexada en directorios, catálogos y bases de datos internacionales como: Emerging Sources Citation Index (ESCI) de la Web of Science, Directory of Open Access Journals (DOAJ), la Biblioteca Científico-Electrónica en Línea, (en inglés Scientific Electronic Library Online, SciELO).



Atentamente,


Dr. C. Denis Fernández Álvarez
Jefe de Departamento- Editorial "Universo Sur"
Universidad de Cienfuegos, Cuba



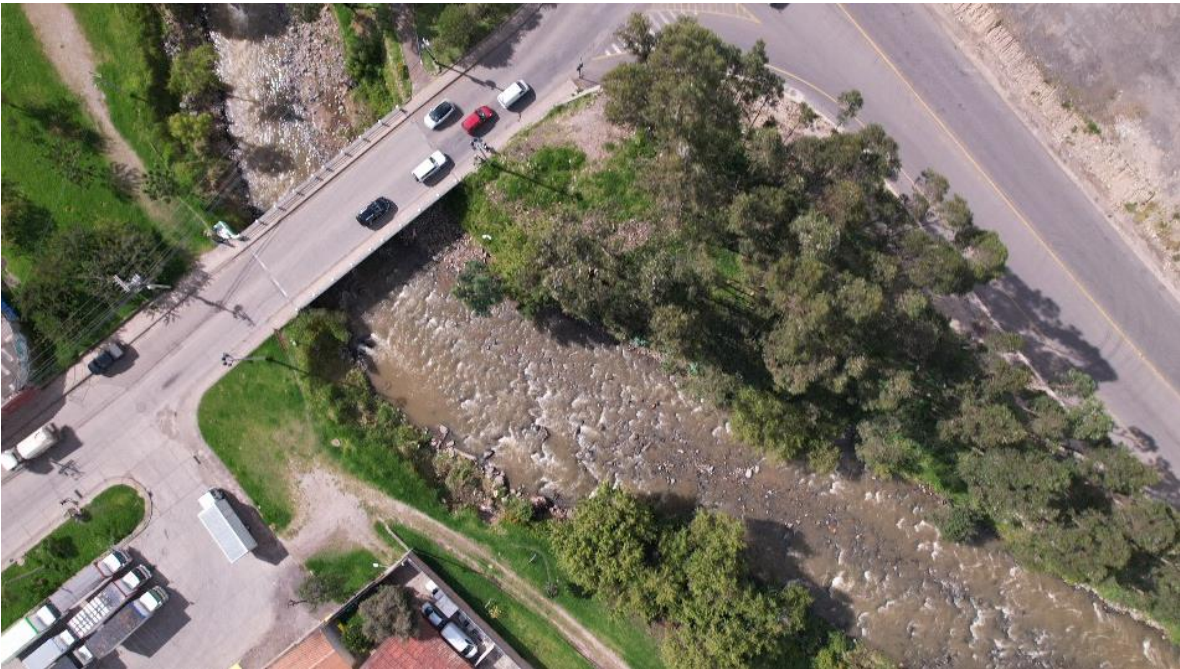


Ilustración 18 Levantamiento topográfico



Ilustración 19 Delimitación de área de vuelo

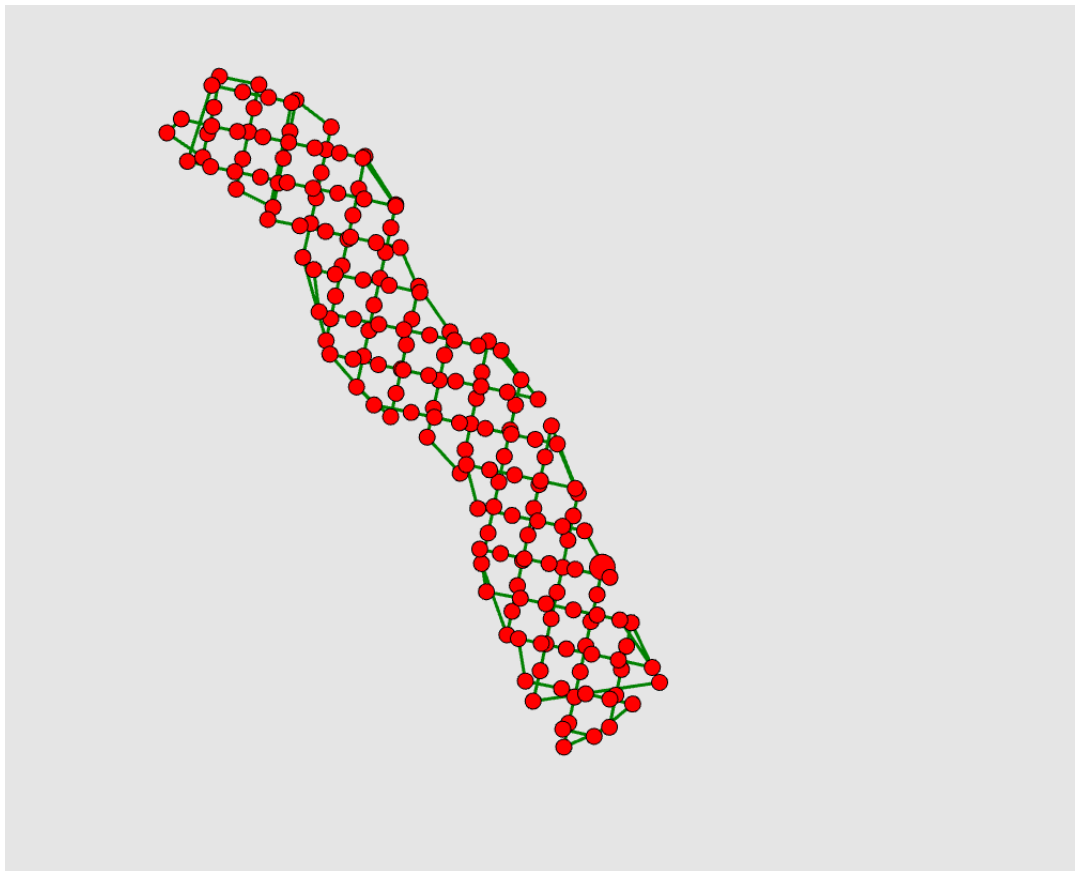


Ilustración 20 Importación de puntos de la topografía

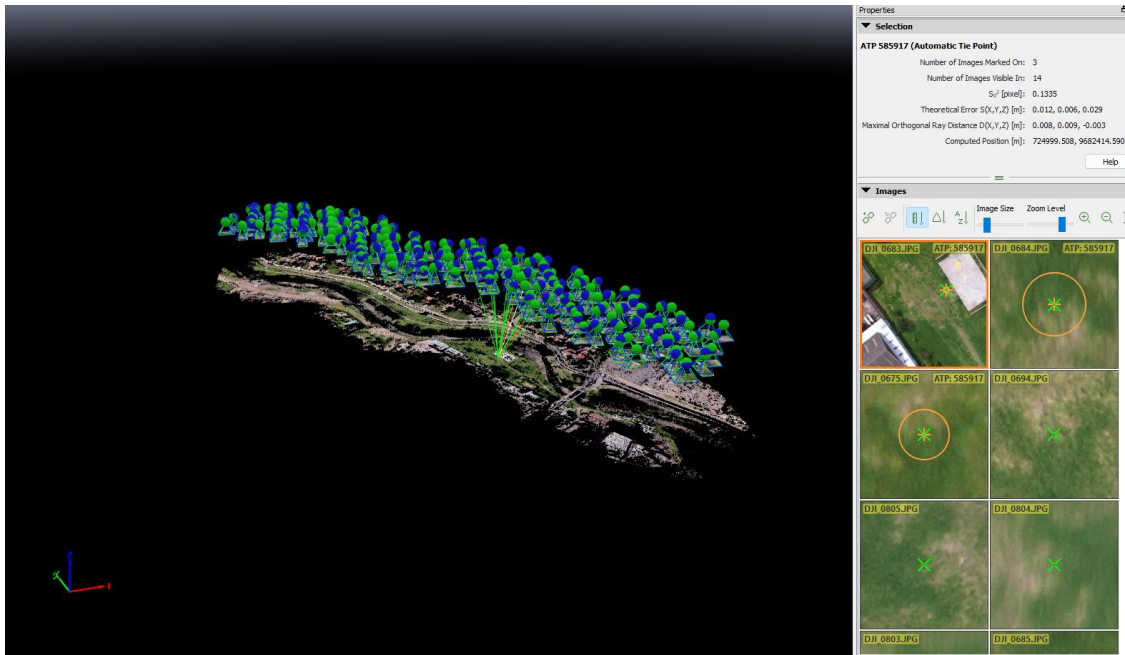


Ilustración 21 Creación de nube de puntos para topografía



Ilustración 22 Análisis de volúmenes para topografía



Ilustración 23 Ortofoto del río

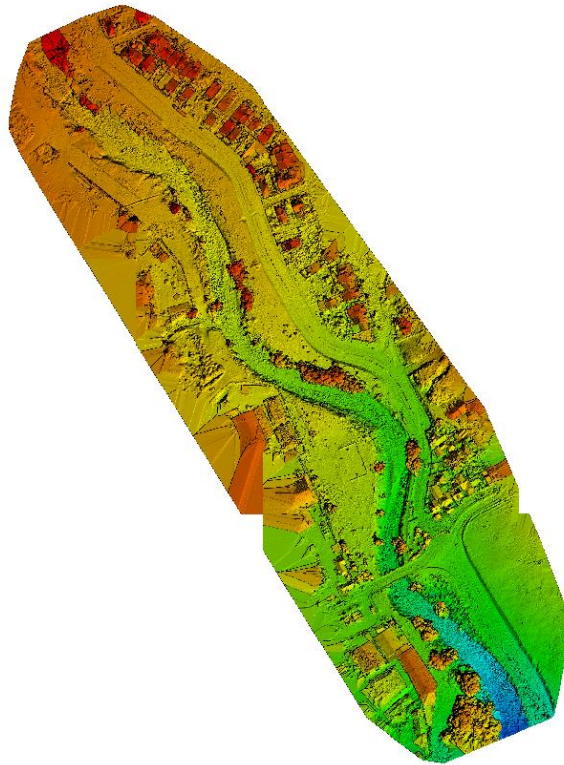


Ilustración 24 DSM

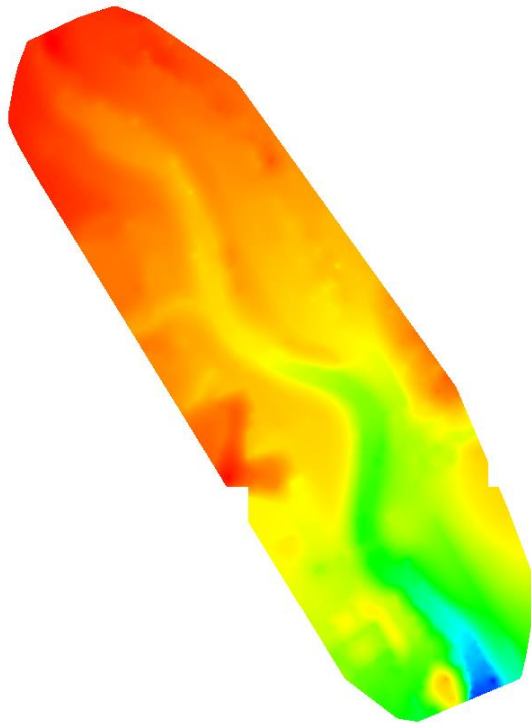


Ilustración 25 DTM

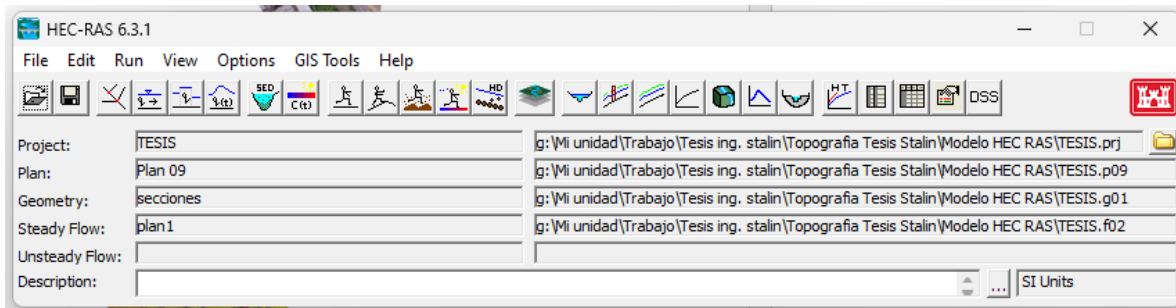


Ilustración 26 Plan del modelo de río para análisis de crecidas

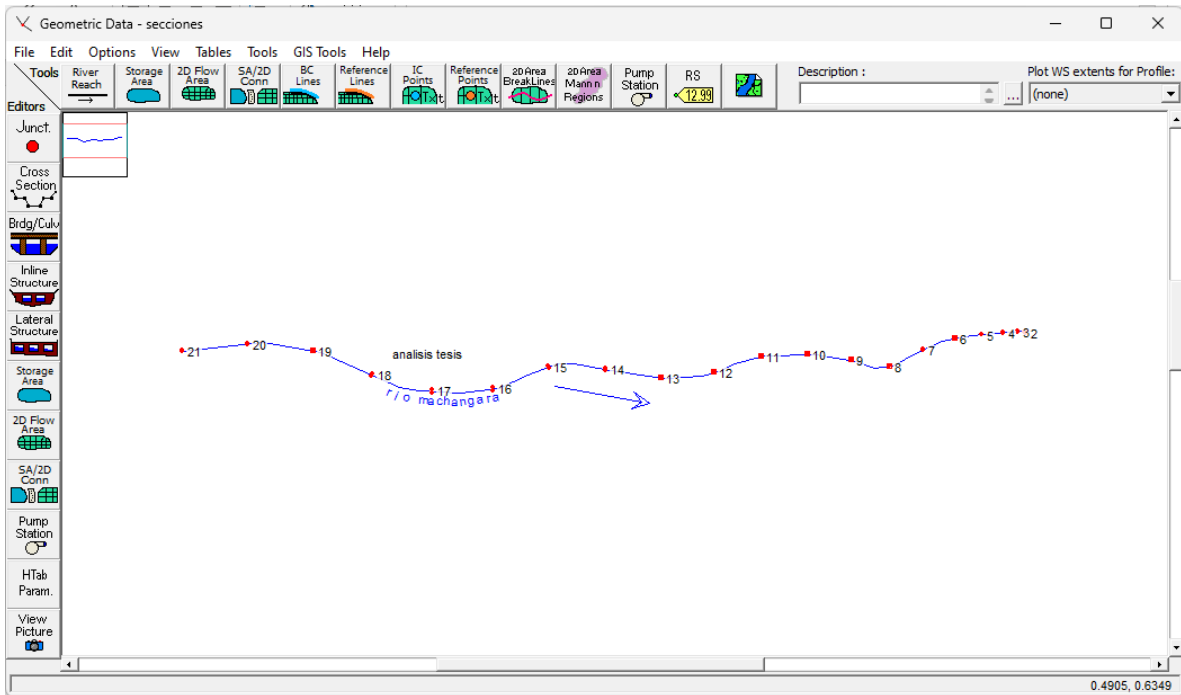


Ilustración 27 Secciones del río para análisis de crecidas

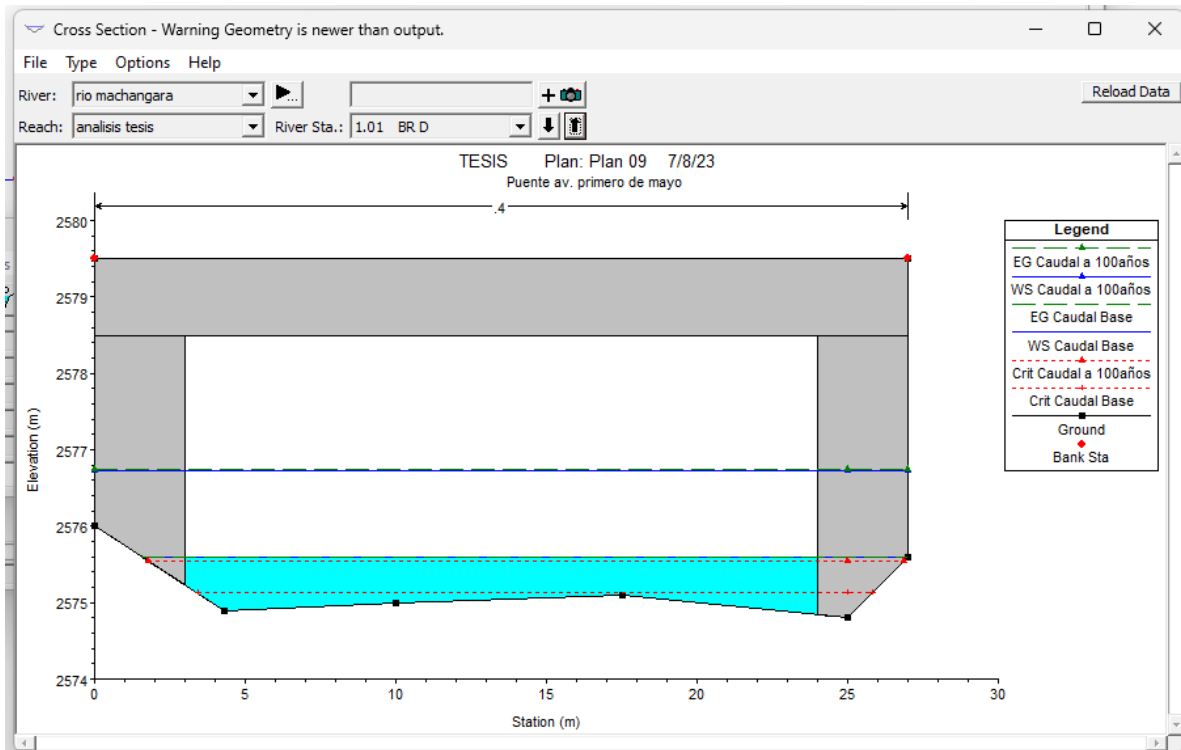


Ilustración 28 Análisis de caudales proyectados

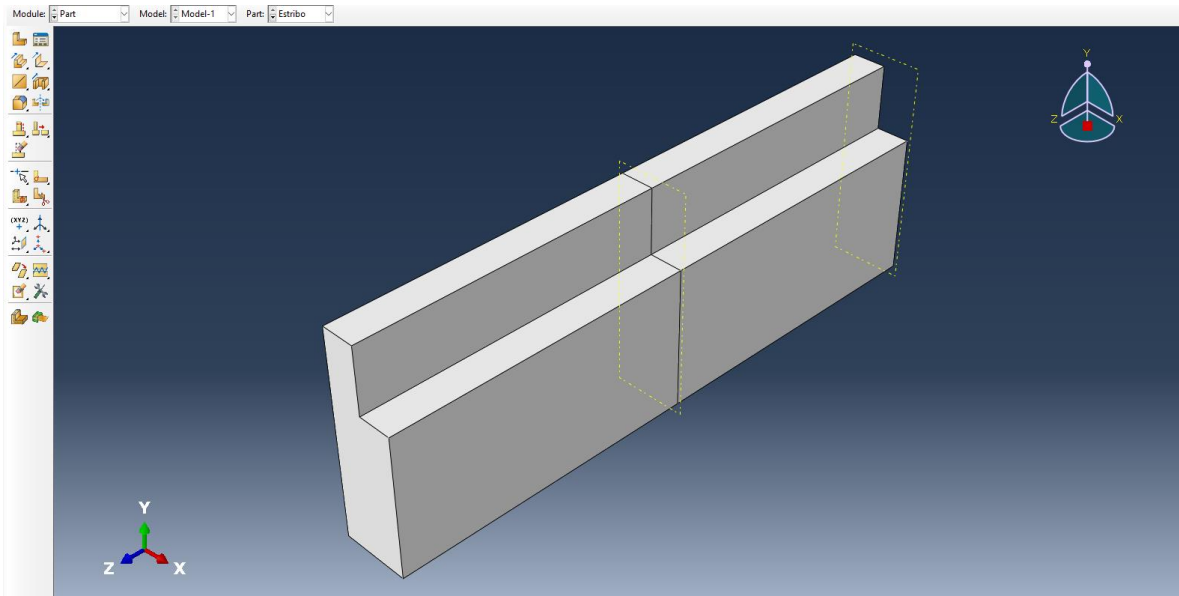


Ilustración 29 Creación de partes para análisis FEM

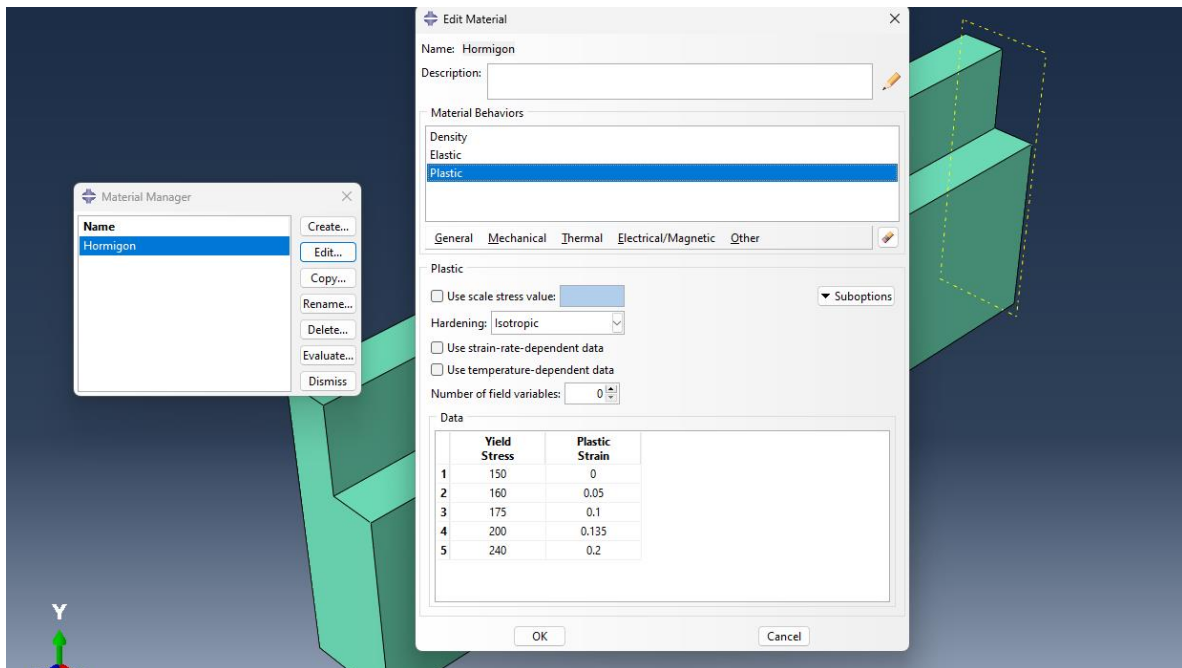


Ilustración 30 Propiedades del hormigón para el modelo

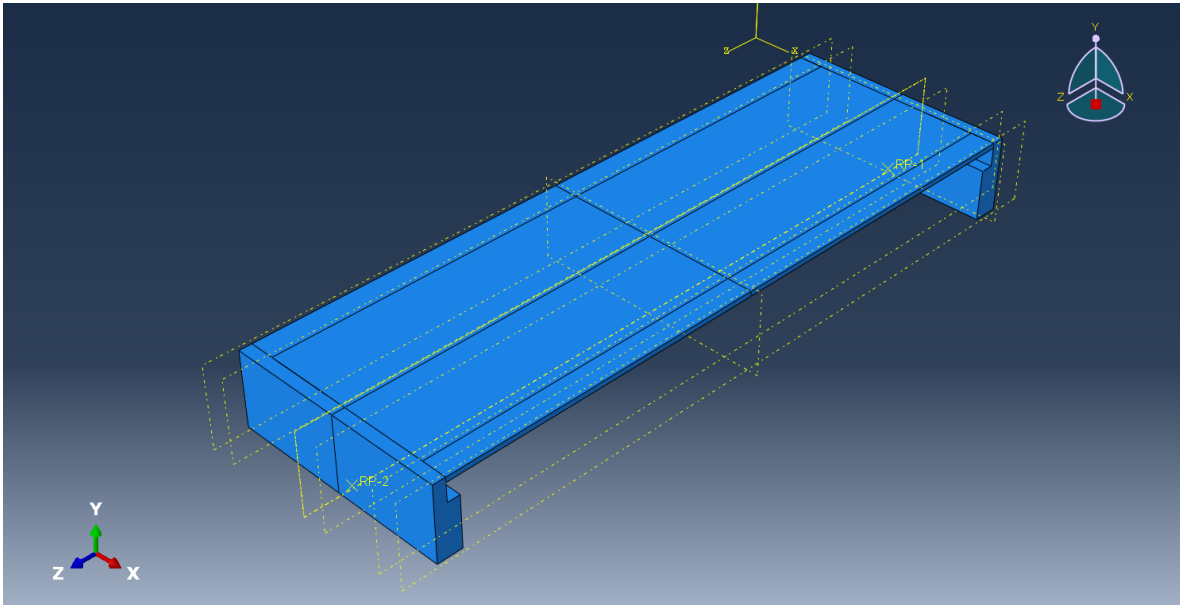


Ilustración 31 Ensamblaje del modelo

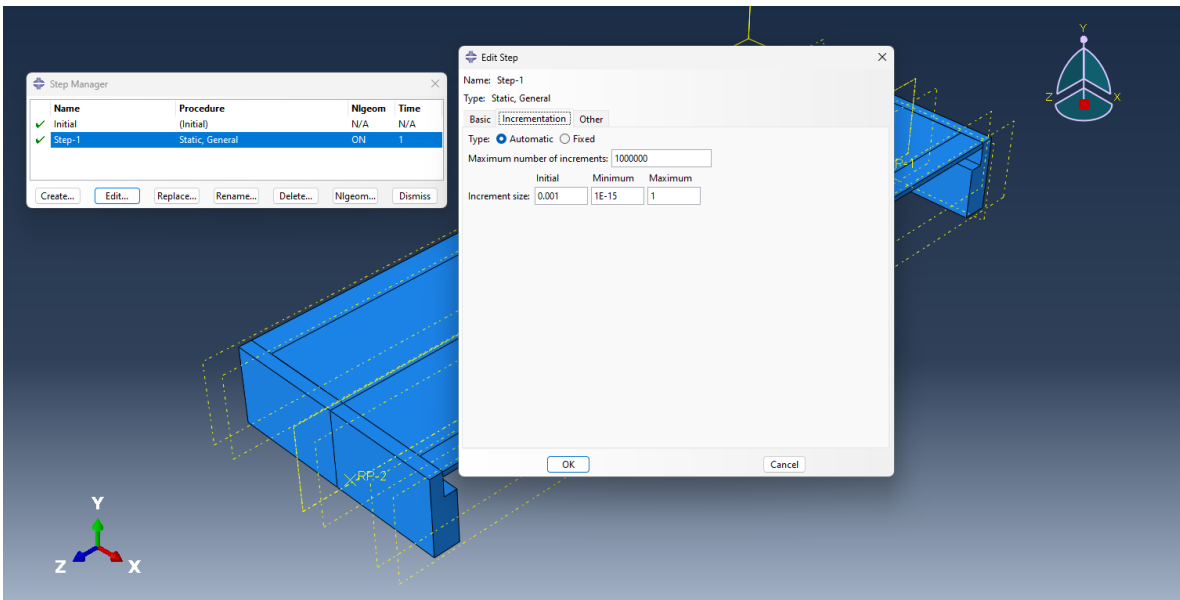


Ilustración 32 Creación del caso de carga

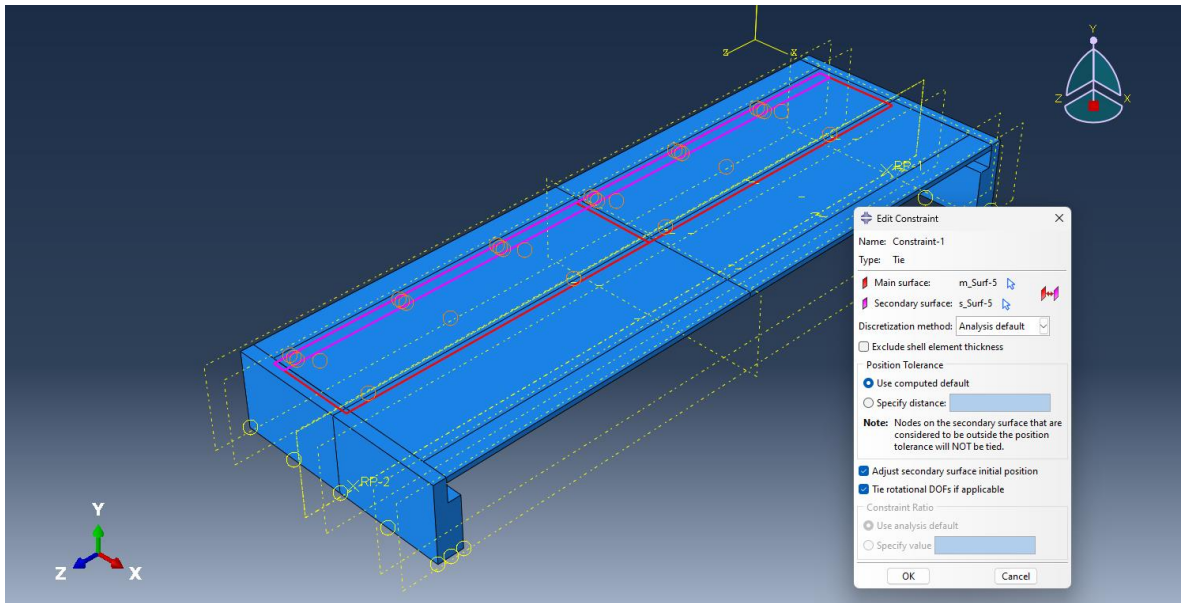


Ilustración 33 Asignación de interacciones entre elementos

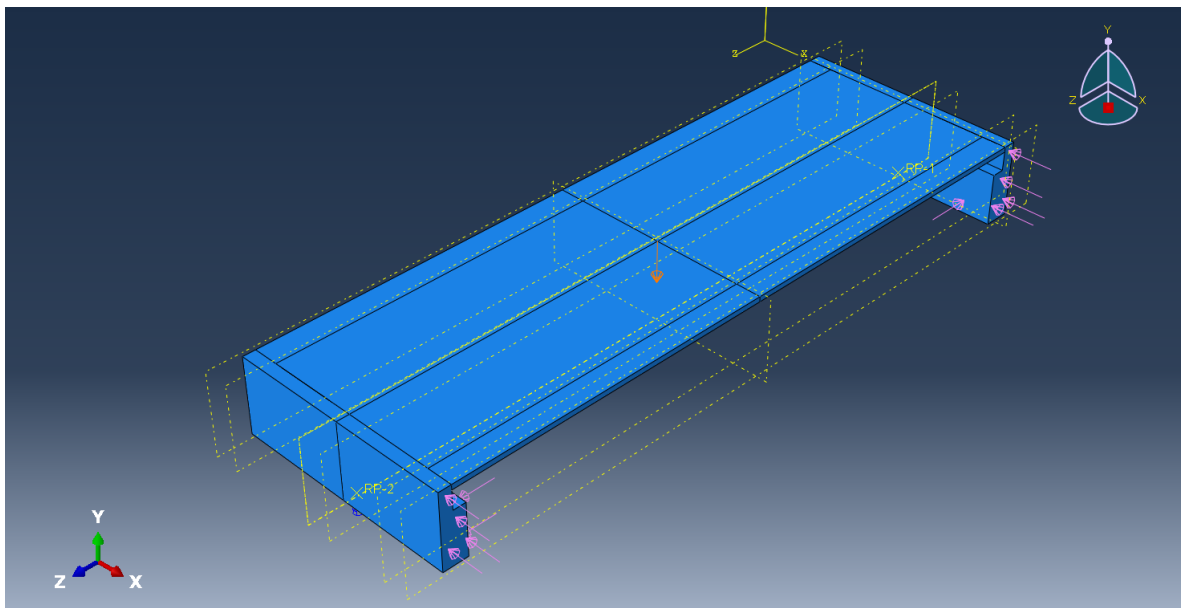


Ilustración 34 Asignación de cargas al elemento

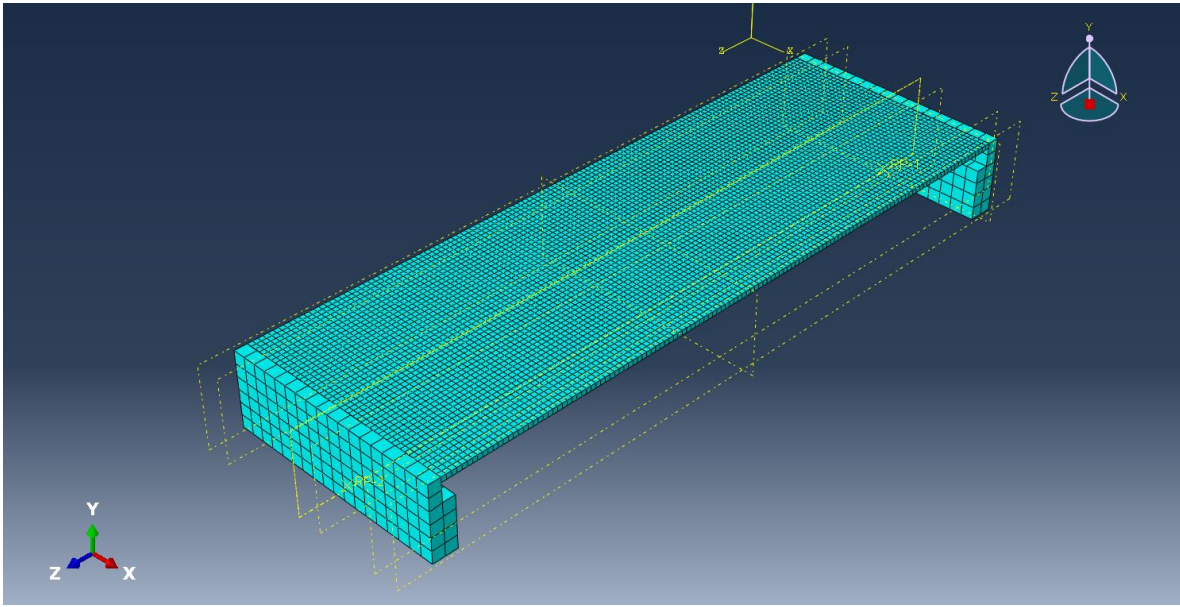


Ilustración 35 Mallado del modelo

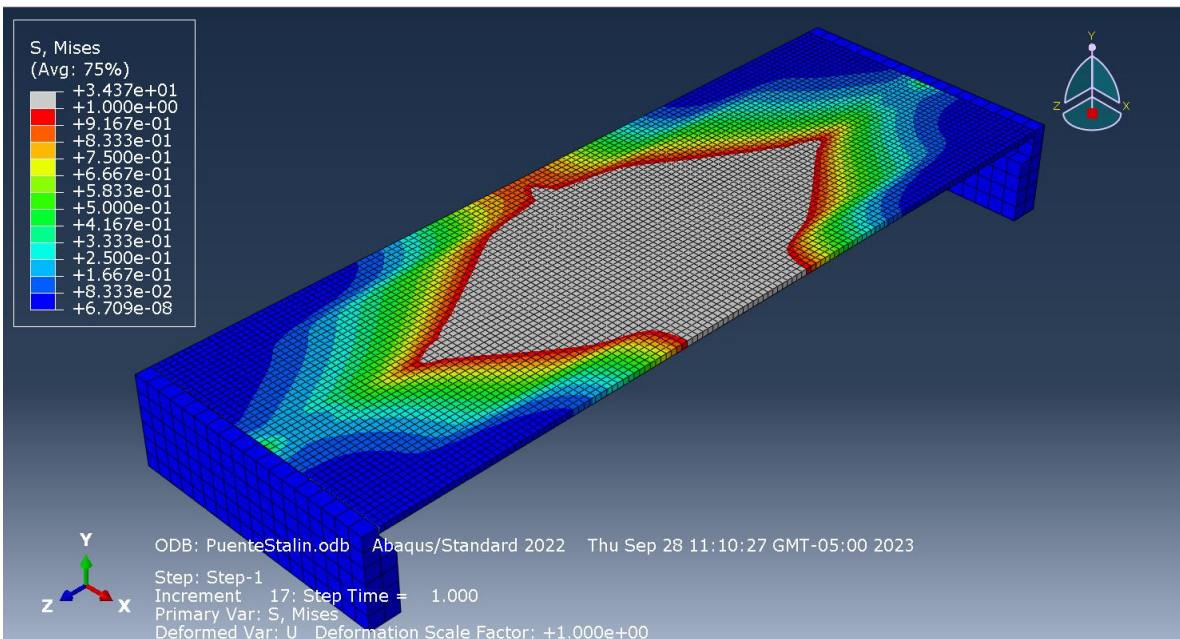


Ilustración 36 Análisis de esfuerzos en modelo FEM