

**Reparación de pilas de concreto
reforzado mediante encamisados
de Concreto de Ultra-Alto
Desempeño (UHPC) aplicado a
un puente existente de Costa
Rica**

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA de PRESENTACIÓN PÚBLICA del TRABAJO FINAL de GRADUACIÓN

Reparación de pilas de concreto reforzado mediante encamisados de concreto de ultra alto desempeño (UHPC) aplicado a un puente existente en Costa Rica


Llevado a cabo por la estudiante:

Fonseca Obando Nazareth

Carné: 2018319730

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el lunes 31 de marzo de 2025 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

 Firmado digitalmente por
JOSE ANDRES ARAYA
OBANDO (FIRMA)
Fecha: 2025.04.28 12:41:26
-06'00'

Dr. Ing. José Andrés Araya Obando
Director de la Escuela

GIANNINA ORTIZ
QUESADA (FIRMA)
Firmado digitalmente
por GIANNINA ORTIZ
QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2025.04.07
09:21:49 -06'00'

Ing Giannina Ortiz Quesada, MSc.
Profesora Guía

HUGO EDUARDO
NAVARRO
SERRANO
(FIRMA)
Firmado digitalmente
por HUGO EDUARDO
NAVARRO SERRANO
(FIRMA)
Fecha: 2025.04.24
09:42:32 -06'00'

Ing. Hugo Navarro Serrano, MSc.
Profesor Lector

ANGEL
HUMBERTO
NAVARRO MORA
(FIRMA)
Firmado digitalmente por
ANGEL HUMBERTO
NAVARRO MORA (FIRMA)
Fecha: 2025.04.28
08:28:38 -06'00'

Ing. Ángel Navarro Mora, MSc.
Profesor Observador

Resumen

La presente investigación analiza el uso de encamisados de concreto ultra alto desempeño (UHPC) en pilas de concreto reforzado mediante el desarrollo de un estudio paramétrico en el que se evalúan distintas variables, como el espesor del encamisado, la resistencia del UHPC y del concreto del núcleo en columnas a escala, modeladas en el software Atena. El objetivo del análisis consiste en determinar el efecto de confinamiento y su interacción con el núcleo de concreto del elemento existente. Asimismo, se aplica este tipo de reparación a una pila de un puente ubicado en Costa Rica. Primeramente, se modela esta columna en el software Response2000, para luego realizar un análisis seccional y de esta manera determinar el efecto de este sobre la pila seleccionada. Los resultados, tanto del estudio paramétrico como del análisis seccional, indican que el uso de UHPC como encamisado mejora la resistencia a la compresión y aún más significativamente la deformabilidad de las pilas. De igual manera, este mecanismo de intervención mejora la durabilidad de la estructura, lo que lo convierte en una posible alternativa para la rehabilitación y refuerzo estructural en edificaciones existentes que presentan deficiencias estructurales.

Palabras clave: UHPC, encamisado, puentes de concreto reforzado, reparación de pilas, refuerzo estructural, estudio paramétrico, Atena Software, análisis seccional.

Abstract

This research analyzes the use of ultra-high performance concrete (UHPC) jackets as a mechanism for reinforcing concrete pillars. This is done by developing a parametric study in which different variables are evaluated, such as casing thickness, UHPC and core concrete strength in scale columns modeled in the Atena software. The main objective is to determine the confinement effect and its interaction with the existing concrete core. To do so, this type of repair is applied to a bridge pier located in an existing bridge of Costa Rica by modeling this column first in the Response2000 software and then performing a sectional analysis to determine its effect on the selected pier. The results of both the parametric study and the sectional analysis indicate that the use of UHPC jackets improves the compressive strength and even more significantly the deformability of the pillars, as well as the improving in terms of durability of the structure, which makes it a possible alternative for the rehabilitation and structural reinforcement for existing buildings that present structural deficiencies.

Keywords: UHPC, jacketing, reinforced concrete bridges, pier repair, structural reinforcement, parametric study, Atena Software, sectional analysis.

Reparación de pilas de concreto reforzado mediante encamisados de Concreto de Ultra-Alto Desempeño (UHPC) aplicado a un puente existente de Costa Rica

NAZARETH DE LOS ÁNGELES FONSECA OBANDO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Febrero del 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

IV

Contenido

Resumen ejecutivo	VI
Introducción	VIII
Antecedentes	XI
Alcance	XIII
Limitaciones	XIII
Agradecimientos	XIV
Objetivos	XV
Capítulo 1: Marco teórico	8
Capítulo 2: Marco metodológico	24
Capítulo 3: Resultados y análisis	30
Conclusiones y recomendaciones	66
Referencias	68
Apéndices	72
Anexos	103

Resumen ejecutivo

Esta investigación analiza el desempeño estructural del uso de encamisados de concreto ultra alto desempeño (UHPC), como un método de reparación para pilares de concreto reforzado a través de un estudio paramétrico, donde se estudian variables clave como el espesor del encamisado, la resistencia a compresión y tensión del UHPC y del núcleo de concreto convencional, así como la deformación en el punto máximo de esfuerzo del UHPC; lo cual se logra mediante la generación de modelos de columnas a escala en el software Atena. Además, se aplica esta técnica a un pilar de un puente en Costa Rica, modelando su comportamiento en el software Response2000 para luego realizar un análisis seccional y así determinar el resultado del confinamiento en su capacidad estructural.

Para la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, este proyecto representa una investigación que aporta información y datos que no se había investigado antes en el país, además presenta la generación de modelos en un software poderoso como lo es Atena, el cual podría llegar a ser útil en el análisis estructural de otro tipo de elementos de concreto reforzado, además de columnas. Este programa permite obtener resultados con bastante precisión, así como también el patrón de las grietas de los elementos cuando se encuentran bajo cierto mecanismo de esfuerzos. En general, la realización de este proyecto permite generar el interés de realizar más investigaciones relacionadas con este novedoso método de rehabilitación o reparación que utiliza el UHPC, lo cual abre las puertas para su estudio en el país.

Además, para la Universidad de York en Toronto, Canadá; en la cual se llevó a cabo esta investigación en conjunto, existía el interés de estudiar la aplicación de encamisados de UHPC como método de reparación en un puente de Latinoamérica, especialmente para determinar el efecto de su aplicación teórica y determinar qué resultados importantes se generan a partir de esto, considerando que este método de rehabilitación es relativamente reciente y no es común en un país como Costa Rica.

También es importante mencionar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la presente investigación, los cuales son el ODS 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación, esto porque, la investigación permitirá fomentar la innovación en Costa Rica, relacionada con la reparación de pilares en puentes mediante encamisados de UHPC, así como también podría aportar a la construcción de infraestructuras resilientes. Es importante reconocer que ya en algunas investigaciones sobre el desempeño sísmico de encamisados de UHPC en pilares, se han evidenciado resultados positivos, ya que, este mecanismo de encamisado permitiría mantener su desempeño ante un sismo importante, por ejemplo, y así evitar que los daños generen un mayor deterioro de la estructura globalmente. Esto es particularmente relevante para Costa Rica debido a que es un país con

actividad sísmica importante. Invertir en infraestructuras (como es el caso de los puentes) y en tecnología avanzada o innovadora, empoderan a las comunidades de muchos países en el mundo, lo cual ayuda a alcanzar este objetivo. En la misma línea, aporta al ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, específicamente a conseguir que las ciudades sean más seguras. Las ciudades representan el futuro del modo de vida global, y las carreteras y puentes permiten la fácil interconexión entre varias ciudades de un país. Según este Objetivo, muchas de las ciudades no están preparadas para la rápida urbanización que existe actualmente, por lo que el desarrollo de las infraestructuras se ve superado. Relacionado con esto, la infraestructura vial es fundamental ya que tiene el propósito de resguardar la seguridad de los usuarios y a su vez contemplar el efecto del crecimiento urbano.

El objetivo principal del presente proyecto consiste en analizar el desempeño estructural de la aplicación de encamisados con concreto de ultra alto desempeño (UHPC) mediante un estudio paramétrico y su aplicación como método de reparación de pilas de concreto reforzado en un puente existente en Costa Rica. Así que uno de los objetivos es determinar el efecto de confinamiento y su interacción con el núcleo estructural existente.

Primeramente, se realiza una revisión de las propiedades mecánicas que aportan los encamisados de UHPC fibroreforzados a las columnas de puentes de concreto reforzado. Esta información es tanto teórica como experimental, para posteriormente realizar el estudio paramétrico mediante el modelado computacional de columnas reparadas experimentalmente con encamisados de UHPC colados en sitio, para determinar el efecto de confinamiento que ejercen sobre la columna.

Los resultados generados a partir de esto demuestran que existe un aumento en la capacidad de la columna. Asimismo, uno de los resultados más significativos es el aumento en la deformación, lo cual permite concluir que los encamisados, bajo ciertas condiciones de carga, permiten que la estructura se deforme mucho más con el encamisado que sin este.

El último objetivo consiste en analizar seccionalmente la aplicación de encamisado de UHPC colado en sitio para un pilar en un puente costarricense, para determinar el efecto del uso del encamisado de UHPC. En este caso, se determinó que la columna reparada aumenta significativamente la capacidad de la estructura, ya que alcanza mayores momentos flectores para un mismo valor de curvatura cuando la columna presenta encamisado.

En general, los resultados demuestran que el uso de UHPC mejora significativamente la resistencia a la compresión, y aún más la deformabilidad de los pilares, así como también la durabilidad de la estructura, lo que lo convierte en una alternativa atractiva para la rehabilitación de estructuras de puentes como los pilares tipo columna sencilla que presente deficiencias estructurales.

Introducción

Los puentes de concreto reforzado pueden presentar signos de envejecimiento acelerado debido a la exposición ambiental (los climas cálidos en combinación con el aumento de la humedad aceleran los procesos de carbonatación del hormigón, corrosión del refuerzo y agrietamiento debido a los efectos térmicos). Mientras que los puentes están diseñados con una vida útil que excede significativamente la de los edificios residenciales, ya que pueden ser de hasta 100 años; las inspecciones del sitio incluso después de 20 o 30 años desde la construcción en muchos casos muestran daños notables. Con base en esta condición, se ha concluido que debido a la exposición a los elementos y al aumento de las cargas que pasan sobre ellas, las estructuras de los puentes tienen muchas más probabilidades de experimentar daños graves antes de alcanzar incluso el 50% de su vida útil en comparación con los edificios.

La rehabilitación es un método disponible para extender la funcionalidad del puente y retrasar los fenómenos de degradación. En esta área, las tecnologías emergentes del hormigón brindan oportunidades únicas para el desarrollo de esquemas de modernización que mitiguen los efectos deprecatorios de la exposición ambiental. El concreto de ultra alto desempeño, UHPC por sus siglas en inglés, es una de estas nuevas tecnologías de materiales emergentes, ya que es muy denso, tiene una baja tasa de penetración, presenta una resistencia espectacular tanto a la compresión como a la tracción y es muy dúctil debido al confinamiento interno realizado por las fibras distribuidas, entre otras características.

Actualmente, se están llevando a cabo investigaciones exhaustivas y trabajos normativos con la intención de facilitar la transición del concreto convencional al UHPC en la construcción de puentes, abarcando una variedad de temas relacionados con su rendimiento. Por esta razón, la presente tesis presenta un resumen de algunos trabajos relacionados que se centran en la rehabilitación sísmica de pilares de puentes mediante revestimiento o encamisados utilizando UHPC.

En Costa Rica, según un informe elaborado por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se determinó que el 25,33% del total de puentes que se inventariaron son de concreto preesforzado y un 37,96% de concreto reforzado, para un total de 63,29% de puentes construidos con concreto. Además, se determinó que un 35% de estos poseen una longitud media que ronda los 15 - 30 metros.

Las técnicas de reparación de elementos estructurales en puentes de concreto en Costa Rica no incluyen soluciones de mayor tecnología como lo es el uso de encamisados con UHPC debido a que existe poco conocimiento del tema y el UHPC no se fabrica en el país, por lo que se pretende realizar un análisis de desempeño estructural al aplicar este tipo de reparación de manera teórica, con el fin de determinar si

estos resultados permiten utilizar este método como una alternativa para la reparación en el futuro, aplicado en las pilas de los puentes de Costa Rica. Además, uno de los objetivos también consiste en establecer la contribución de estos revestimientos al rendimiento de los pilares, a partir de la eficacia del confinamiento proporcionado por los revestimientos de UHPC en el concreto revestido y el desarrollo de un modelo de confinamiento. Este modelo se utiliza para estudiar y analizar (después de la calibración con resultados experimentales) la respuesta de pilares de puentes después de que estos hayan sido reforzados con revestimiento de UHPC.

Este proyecto se desarrolló en la Universidad de York, Canadá, debido a la experiencia que esta posee en investigaciones relacionadas con concretos de ultra alto desempeño (UHPC) para la reparación o reforzamiento de estructuras de concreto reforzado (CR). El proyecto se realiza en conjunto con el grupo de investigación de *eBridge*, el cual forma parte del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), que forma parte de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El CIVCO; brindará información relevante para este proyecto en relación con el inventario de puentes en Costa Rica con el que ellos han venido trabajando.

Este proyecto contribuye al aporte de un mayor conocimiento técnico relacionado con reparación de pilares de RC mediante encamisados de UHPC, tomando como referencia un puente en Costa Rica, lo que representa una alternativa novedosa en el país de reparación para este tipo de estructuras, además de que se podría generar el interés de realizar posteriormente más investigaciones que brinden mayor información técnica al respecto, lo cual en el futuro podría permitir hacer uso de esta técnica y con este material que ha revolucionado la construcción y rehabilitación de infraestructuras, ya que ha brindado resultados eficientes y durables en otros países de todo el mundo, como por ejemplo en Canadá.

Además, es importante mencionar que la presente propuesta pretende aportar a los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): ODS 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación, esto porque, la investigación permitirá fomentar la innovación en Costa Rica, relacionada con la reparación de pilares en puentes mediante encamisados de UHPC, lo cual no ha sido aún estudiado en el país; así como también podría aportar a la construcción de infraestructuras resilientes, ya que en algunas investigaciones sobre el desempeño sísmico de encamisados de UHPC en pilares, se han evidenciado resultados positivos como se observó anteriormente (Tong et al., 2020), esto quiere decir que los encamisados permitirían mantener su desempeño ante un sismo importante, por ejemplo, y así evitar que los daños generen una mayor deterioro de la estructura globalmente, lo cual en Costa Rica es bastante importante debido a ser un país con actividad sísmica importante. Invertir en infraestructuras (como es el caso de los puentes) y en tecnología avanzada o innovadora, empoderan a las comunidades de muchos países en el mundo, lo cual ayuda a alcanzar el Objetivo 9.

Asimismo, aportará al ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, específicamente a conseguir que las ciudades sean más seguras. Las ciudades representan el futuro del modo de vida global, y las carreteras y puentes permiten la fácil interconexión entre varias ciudades

de un país. Según este Objetivo, muchas de las ciudades no están preparadas para la rápida urbanización que existe actualmente, por lo que el desarrollo de las infraestructuras se ve superado. Relacionado con esto, la infraestructura vial, la cual incluye puentes, es fundamental ya que debe resguardar la seguridad de los usuarios y a su vez contemplar el efecto del crecimiento urbano.

Antecedentes

El uso de los UHPC es una de las tecnologías más recientes del concreto estructural, y destaca por su elevada resistencia a la compresión, la cual podría ir desde los 1600 a 1800 kg/cm². De acuerdo con Fernández (2005), otras propiedades que destacan de este material es su alta durabilidad, la alta impermeabilidad que ayuda a combatir la corrosión, requiere pequeñas cantidades de agua, así como también poseen un comportamiento dúctil debido a su elevada capacidad de deformación a tensión. Debido a lo anterior, la cuantía de acero es poca o nula en comparación con las demás técnicas de encamisado de concreto reforzado. El UHPC permite que la intervención sea más ligera y que requiera menos recursos para su ejecución como lo son el agua, mano de obra y cantidad de materiales.

Recientemente se han implementado encamisados de UHPC para reparar deficiencias en concretos estructurales. Algunas investigaciones relacionadas con lo anterior han sido desarrolladas por Mahsa et al. (2019): “*Retrofitting of Bridge Columns Using UHPC*”, donde se estudia la reparación de columnas usando UHPC. Además, en investigaciones del 2021, por Chung-Chan Hung et al.: “*Cast-in-place and prefabricated UHPC jackets for retrofitting shear-deficient RC columns with different axial load levels*”, muestra los resultados de los encamisados prefabricados y colados en sitio con UHPC para reparar columnas que presentan deficiencias en su capacidad de fuerza cortante al aplicar distintos niveles de carga axial; asimismo se realiza una revisión del comportamiento sísmico del UHPC en elementos de concreto en el artículo “*A review on seismic behavior of ultra-high performance concrete members*”, el cual fue realizado por Rui et al (2021).

También, en una investigación realizada por Tong et al. (2020) denominada “*Experimental investigation and seismic vulnerability assessment of low flexural strength rectangular bridge piers retrofitted with ultrahigh-performance concrete jackets*”, se investigó la eficacia de una técnica de modernización que utiliza encamisados de UHPC para pilares de puentes con baja resistencia a la flexión. Realizaron una prueba de carga cíclica en las muestras de pilares, dos de los cuales fueron modernizados con un encamisado de UHPC de una sola tira ancha y los otros dos con un encamisado de UHPC de múltiples tiras estrechas. Se compararon sus respuestas sísmicas en cuanto a evolución del daño, comportamiento histerético, curva del esqueleto, ductilidad y disipación de energía. La conclusión es que los revestimientos mitigaron la deriva residual y el daño al concreto, mejorando así la resiliencia sísmica de los pilares.

Tsiotsias en su tesis de doctorado realizada en la Universidad de York (2023), realizó un estudio para evaluar, mediante una combinación de investigación experimental y numérica, el desempeño de encamisados de UHPC como método de reacondicionamiento sísmico de columnas con detalles frágiles bajo cargas

cíclicas. Tsiotsias construyó una serie de elementos de columna de concreto reforzado de diseño convencional con base en metodologías de detallado de estándares anteriores a 1980. Después de impartir daño preliminar a las columnas (simulando los efectos posteriores a un sismo), se reparó la zona de articulación plástica mediante el reemplazo de la cubierta por una cubierta de UHPC y se probó bajo inversiones de desplazamiento cíclicas para obtener evidencia cuantificada con respecto al desempeño de esta metodología de reacondicionamiento.

Entre los resultados importantes obtenidos, destacan las mejoras significativas en la resistencia y ductilidad tanto en los especímenes reparados como reforzados con UHPC, se eliminaron los modos de falla asociados con las limitaciones de las conexiones traslapadas en la zona columna-zapata, y también se evidencia la contribución de las cubiertas de UHPC en la prolongación de la respuesta sísmica de los miembros reparados.

Alcance

Este proyecto contempla únicamente la generación de los modelos computacionales de dos columnas distintas a escala que fueron elaborados experimentalmente en los laboratorios de la Universidad de York para realizar el estudio paramétrico. Debido a que las columnas fueron elaboradas a escala en laboratorio, estas no presentan acero de refuerzo. Este estudio será de tipo determinístico.

Para llevar a cabo la aplicación de encamisados de UHPC en un puente existente de Costa Rica, se tomó únicamente una pila del puente seleccionado, y se realizará el modelo de esta sin en el encamisado mediante el uso del software Response2000. Para determinar el efecto del encamisado sobre la columna o pila se utilizarán las ecuaciones que han sido previamente deducidas a partir de investigaciones, las cuales también han sido realizadas por profesionales de la Universidad de York. En este caso, la única variable será el espesor del encamisado para realizar la comparación entre ellos y determinar el comportamiento al modificar una sola variable. Se debe tomar en cuenta que la aplicación no toma en cuenta en el refuerzo que aporta el traslape en la conexión columna-fundación. Además, se tomó en cuenta únicamente la carga muerta para llevar a cabo el análisis seccional la pila del puente costarricense, esto debido a que, si se toman en cuenta los diferentes tipos de carga, la extensión del proyecto sería mucho mayor.

Limitaciones

De acuerdo con la revisión del inventario de puentes, la mayoría de los daños en la subestructura de estos no se encuentran en las pilas; sin embargo, existe el interés de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de York por llevar a cabo esta investigación para este tipo elemento estructural en puentes en Costa Rica, ya que las pilas o columnas son un elemento estructural fundamental de estas estructuras. Por esta razón se seleccionó una pila que posee algunos daños, pero donde la seguridad de la estructura no se encuentra comprometida.

Agradecimientos

Externo mis agradecimientos, primeramente, a Dios por ser mi guía en cada momento. A mi familia por darme su amor y apoyo incondicional, incluso a la distancia.

Gracias a cada una de las personas que me externó su ayuda de tantas maneras distintas, a mis compañeras de la universidad, que ahora son amigas y colegas, por estar presentes desde el día que nos conocimos y por su significativa ayuda durante la carrera.

Agradezco a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica por brindarme su apoyo desde la concepción de este proyecto para realizarlo en conjunto con la Universidad de York. Asimismo, a los investigadores de *eBridge* por su colaboración con la información que requerí de ellos.

Especiales gracias a York University, por la oportunidad brindada y por ofrecerme siempre su ayuda para contar con todo lo necesario para llevar a cabo mi proyecto de graduación; y muy en especial a la Dr. Voula Pantazopoulou, sin ella nada de esto hubiese sido posible. Gracias por su confianza, su invaluable esfuerzo para llevar a cabo este proyecto de la mejor manera y también por su ayuda en tantos aspectos de mi vida.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el desempeño estructural de la aplicación de encamisados utilizando concreto de ultra alto desempeño (UHPC) mediante un estudio paramétrico y su aplicación como método de reparación de pilas de concreto reforzado existentes en un puente costarricense.

Objetivos específicos

1. Revisar las propiedades mecánicas que aportan los encamisados de UHPC fibroreforzados a las columnas de puentes de concreto reforzado con base en investigaciones realizadas para recopilar información teórica y experimental.
2. Realizar un estudio paramétrico mediante el modelado computacional de columnas a escala reparadas experimentalmente con encamisados de UHPC colados en sitio con el fin de determinar el efecto de confinamiento que ejercen sobre la columna.
3. Analizar seccionalmente la aplicación de encamisado de UHPC colado en sitio para un pilar en un puente piloto costarricense para determinar el efecto sobre el comportamiento estructural a partir de encamisados de diferente espesor.

Capítulo 1: Marco teórico

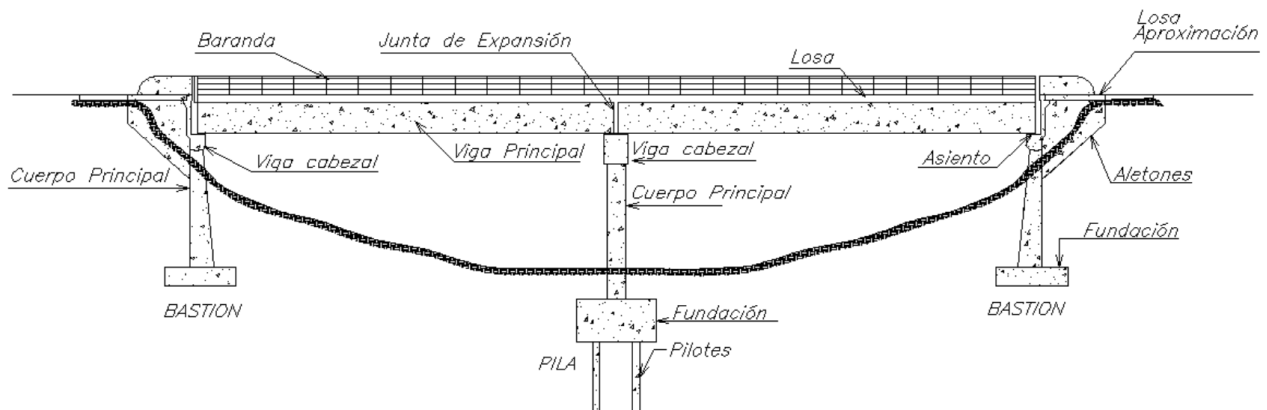
En el presente capítulo se desarrollarán los conceptos teóricos necesarios para la comprensión de este proyecto.

1.1 Elementos típicos de puentes de concreto reforzado

Los principales elementos que componen la estructura de los puentes de concreto reforzado (CR), de acuerdo con el Manual de Inspección de Puentes (2007) del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT); consisten en: subestructura, superestructura, accesos de aproximación, soportes físicos y los accesorios, estos últimos no tienen alguna función estructural, sin embargo, permiten que la estructura funcione de acuerdo con su diseño previsto. Algunos de los accesorios más comunes son la superficie de rodamiento, las juntas de expansión, aceras y barandas que permiten de manera segura el paso peatonal.

En la Figura 1 se observa la distribución de los elementos principales de un puente típico costarricense.

Figura 1. Distribución de los elementos principales que componen los puentes costarricenses.



Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, (2007).

Los accesos de aproximación, por lo general, consisten en una losa que permite mitigar los efectos de la diferencia de los desplazamientos verticales que ocurren entre la superficie de ruedo y el tablero del puente. Por otra parte, la superestructura puede ser de varios tipos y generalmente está compuesta por vigas,

viguetas, losas, cerchas, diafragmas y sistemas de suspensión, en el caso de los puentes colgantes y atirantados. Los elementos principales están destinados a soportar las cargas que provienen de la superficie de ruedo y para transmitir los esfuerzos hacia la subestructura.

Por su parte, la subestructura tiene el objetivo de soportar las cargas debidas al peso de la superestructura y las cargas a las que se somete el puente. Estas cargas pueden ser dinámicas: paso vehicular y peatonal y la presión que ejerce el viento; y estáticas, como lo es el peso propio de la estructura; entre otras.

De acuerdo con el Manual de Inspección de Puentes (2007), los principales elementos de la subestructura son: los apoyos, los cuales tienen el objetivo de transmitir las cargas provenientes de la superestructura a la subestructura y además garantizar los grados de libertad del diseño del puente; los bastiones, los cuales principalmente disipan el empuje que genera el terreno, y se componen por aletones, viga cabezal, la fundación y el cuerpo de los mismos; y por último, las pilas, las cuales se detallarán a continuación, ya que consisten en el estudio principal de este proyecto.

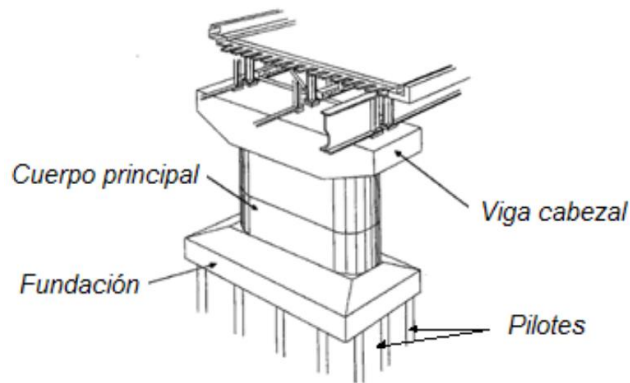
1.1.2 Pilas de concreto reforzado

Estos elementos, por lo general, se diseñan y construyen de concreto reforzado (CR) en Costa Rica. De acuerdo con el informe “*Inventario de puentes en rutas Nacionales de Costa Rica 2014-2018*”, elaborado por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se determinó que en Costa Rica el 25,33% del total de puentes que inventarió son de concreto presforzado y un 37,96% son de concreto reforzado, para un total de 63,29% de puentes construidos con CR.

Los elementos que conforman las pilas son: la viga cabezal, el cuerpo principal y la fundación. La viga cabezal se encuentra en la parte superior de la pila, y esta soporta los apoyos de las vigas longitudinales principales del tablero. Por otro lado, la fundación se encuentra en la parte inferior, y esta permite transmitir las cargas de la subestructura al suelo.

La viga cabezal se encuentra sobre el cuerpo principal del pilar. Existen varios tipos de pilares de CR como lo son los pilares tipo muro, marco rígido, columna múltiple y tipo columna. Estas últimas por lo general tienen una sección transversal circular, elíptica o rectangular. Para ilustrar lo descrito en esta sección, se puede observar la siguiente figura:

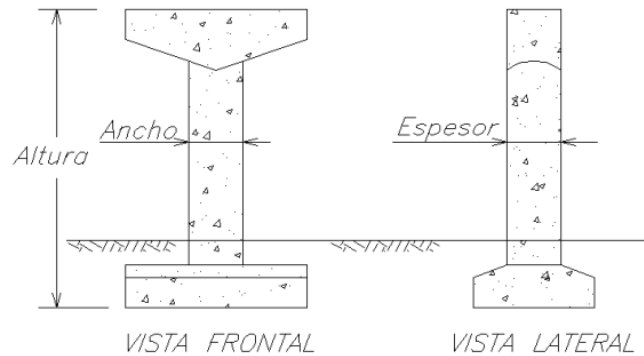
Figura 2. Elementos que componen una pila.



Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, (2007).

Para el desarrollo de este proyecto, se considerarán dos pilares de tipo columna. Una a la que se hace referencia en adelante como CR, con sección transversal rectangular. La segunda se denominará como CC, y tendrá una sección transversal circular. La figura 3 ilustra un pilar tipo columna:

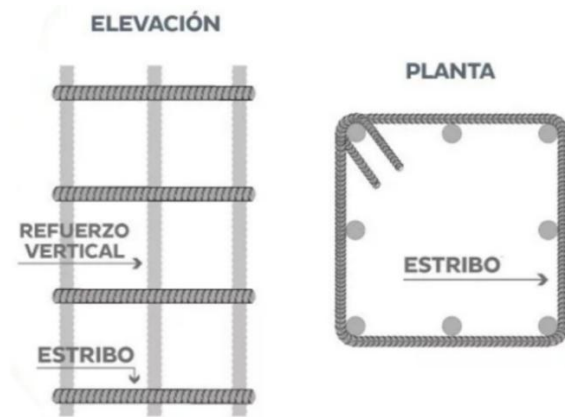
Figura 3. Pilares tipo columna simple.



Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, (2007).

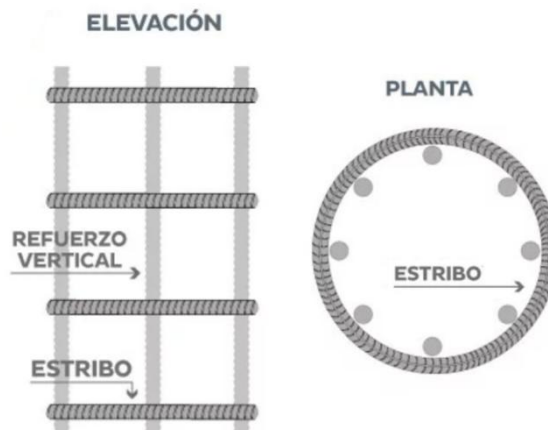
El refuerzo por lo general consiste en barras de acero transversal y vertical. Para el caso de las columnas con sección transversal rectangular, el acero de refuerzo consiste en estribos o aros como refuerzo transversal, y la sección circular puede, de igual manera, estar diseñada con aros o con acero colocado en forma de espiral circular (también llamado zuncho). A continuación, se muestra gráficamente lo descrito anteriormente:

Figura 4. Refuerzo transversal y vertical de un pilar tipo columna rectangular visto en elevación y planta.



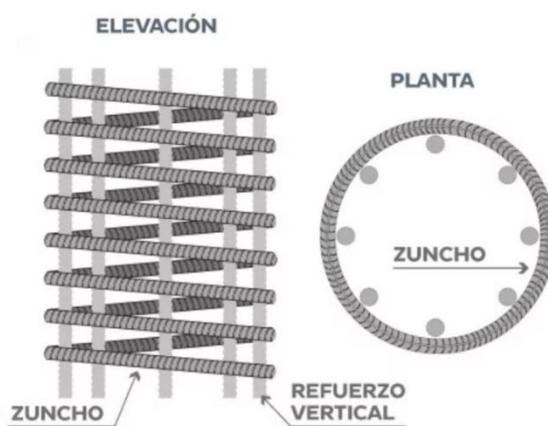
Fuente: Tomado y adaptado de Aceros Arequipa (s.f.).

Figura 5. Refuerzo transversal con estribos y vertical de un pilar tipo columna circular visto en elevación y planta.



Fuente: Tomado y adaptado de Aceros Arequipa (s.f.).

Figura 6. Refuerzo transversal con espiral circular y vertical de un pilar tipo columna circular visto en elevación y planta.



Fuente: Tomado y adaptado de Aceros Arequipa (s.f.).

Las dimensiones de los pilares de puentes pueden variar significativamente dependiendo de varios factores, como el tipo de puente, la cantidad de tráfico, las condiciones geográficas y geológicas, las normativas locales, entre otros. Generalmente, el concreto utilizado en estructuras de puentes posee una resistencia a compresión que suele estar en el rango de 25 a 40 MPa (250 a 400 kgf/cm²). Sin embargo, en algunos países estos valores pueden variar debido a las normativas de construcción: las normas ACI en los Estados Unidos definen los requisitos mínimos de resistencia a compresión para las estructuras de concreto.

1.2 Modelado de estructuras de concreto reforzado

El modelado y análisis de las estructuras de concreto reforzado para este proyecto se realizará utilizando los softwares Response2000 y ATENA, pero ¿qué es el modelado estructural? Lo anterior se refiere al “proceso mediante el cual se genera una idealización matemática que pretende representar la conducta real de la estructura actualmente o al ser construida” (Gómez, 2011, p. 89). Parte del proceso consiste en obtener las fuerzas que actúan sobre la estructura, por lo que se idealizan la geometría de los elementos y las condiciones de apoyo mediante un modelo matemático que debe reflejar de manera aproximada las condiciones reales que posee o que tendrá la estructura con las propiedades de los materiales.

El análisis estructural es un proceso mediante el cual se determinan los esfuerzos (fuerzas internas) y las deformaciones o desplazamientos que se producen en los elementos de una estructura debido a cargas aplicadas. Esto se puede hacer mediante métodos analíticos o numéricos, como el método de los elementos finitos (FEM).

1.2.1 ATENA

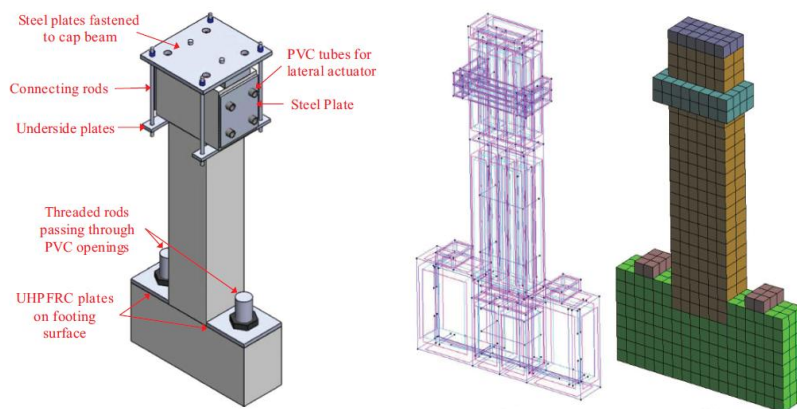
ATENA es un software avanzado de análisis no lineal basado en elementos finitos que se utiliza para el análisis detallado de estructuras de concreto. Los modelos de materiales se basan en la teoría de la plasticidad y mecánica de fracturas, fue diseñado para el análisis mecánico de CR. De acuerdo con lo descrito en su página web oficial, este programa permite simular el comportamiento real de las estructuras de concreto e inclusive es posible simular el agrietamiento, aplastamiento, rendimiento del refuerzo y comportamiento de endurecimiento por deformación bajo inversiones cíclicas. Estas características permiten estimar la capacidad de carga y deformación de los elementos con una alta precisión (Cervenka Consulting, s.f., <https://www.cervenka.cz/products/atena/>). Algunas de las ventajas de utilizar este software son:

- Es posible evaluar estructuras nuevas o existentes.

- Apoya la investigación avanzada en estructuras de CR o materiales cementicios modernos, como lo es el UHPC.
- Presenta una visualización única de la propagación de grietas.
- Está equipado con modelos de materiales avanzados para concreto, refuerzo, acero, roca, suelo y mampostería.
- Es compatible con el análisis de materiales de concreto reforzado con fibra modernos: SHCC, ECC, HPRFC, UHPFRC.
- Para el diseño de estructuras de concreto reforzado económicas, ATENA considera automáticamente la redistribución de la fuerza interna debido al agrietamiento, lo que puede generar ahorros en el refuerzo.
- Permite visualizar en tiempo real de los resultados incluso durante el análisis no lineal.
- Se puede utilizar para realizar análisis dinámicos, estáticos, de fluencia, térmicos y de humedad.
- Se puede modelar la durabilidad estructural y corrosión de refuerzo.

Para el modelado de los elementos como las pilas de los puentes, incluyendo encamisados de UHPC, ATENA brinda los resultados necesarios para llevar a cabo esta investigación, además de generar el comportamiento realístico que poseen los elementos que se estudiarán. Por ejemplo, en una investigación realizada por Tsiotsias y Pantazopoulou (2024), se implementaron simulaciones de elementos finitos no lineales, con el objetivo de obtener información sobre el comportamiento real del esquema de reacondicionamiento utilizando encamisados de UHPC en pilares con sección transversal rectangular.

Figura 7. Descripción general del diseño de la muestra con detalles de conexión, definición de bloques de elementos y la geometría de la malla realizada en ATENA.



Fuente: Tsiotsias y Pantazopoulou (2024).

En dicho estudio, los resultados de los análisis se obtuvieron en puntos de control de fuerza y desplazamiento en el punto de carga. Luego se compararon las respuestas de fuerza-desplazamiento de los modelos con los resultados experimentales.

1.2.2 Response2000

Hadrian Software Works es una rama del software técnico desarrollado por el profesor Evan Bentz de la Universidad de Toronto, a su vez, el programa Response2000 fue desarrollado originalmente por Bentz en esta universidad durante los años 1995 y 2000. Este es un programa de análisis seccional que permite calcular la resistencia y ductilidad de una sección transversal de concreto reforzado sometida a cortante, momento y carga axial. Las tres cargas se consideran simultáneamente para encontrar la respuesta de carga-deformación completa utilizando la última investigación basada en la teoría del campo de compresión modificada.

Response puede calcular la resistencia de vigas y columnas tradicionales y además puede hacer predicciones de resistencias al corte para secciones que hoy en día no se pueden modelar fácilmente, como columnas circulares y vigas de alma cónica. Gracias a su rápida entrada y salida, con una interfaz basada en Windows y una amplia salida gráfica, que permite una fácil comprobación de los resultados, Response2000 permite a los ingenieros examinar el comportamiento de vigas y columnas con precisión.

1.3 Método de reparación de columnas de CR mediante encamisados de UHPC

Debido a que las estructuras de CR son altamente resistentes ante ciertas cargas, es el material elegido para la construcción de estructuras de puentes. Sin embargo, la experiencia sobre el estado de los puentes en el campo indica que las estructuras son susceptibles al deterioro y la corrosión. Los puentes más antiguos diseñados bajo los códigos anteriores al año 1980 también son susceptibles a sufrir daños debidos a sismos importantes; y por esta razón estos activos usualmente requieren de rehabilitaciones o reparaciones que aseguren su continuo funcionamiento y resguarden la seguridad de los usuarios.

En el caso de las pilas de un puente, es fundamental realizar un diagnóstico adecuado de las causas de los daños: diseño mal realizado, ejecución errónea en los procesos constructivos, filtración de agua hacia el acero de refuerzo, corrosión, erosión, condiciones climáticas, entre otras patologías posibles.

Actualmente, existen diversos tipos de reparación para estructuras de CR. Para el caso de las columnas y pilas, recientemente se ha estudiado la aplicación de encamisados con UHPC como método de reparación o de reacondicionamiento. Existen diversos dispositivos de encamisados: los prefabricados, y colados en sitio; sin embargo, este proyecto se centrará en la aplicación de encamisados colados en sitio para el confinamiento del concreto revestido.

1.3.1 Concreto fibro-reforzado (FRC)

Las fibras han surgido como un método alternativo de reforzamiento para concreto. En el mercado existen diversas fibras fabricadas de distintos materiales y tamaños. De acuerdo con el Anexo 8A del *Canadian Highway Bridge Design Code*, para utilizar fibras en el UHPC, estas deben tener una resistencia a tensión mínima de 1000 MPa y una relación de aspecto (longitud a diámetro) del orden de 65 o superior, con el fin de garantizar que se intercepten así la propagación de grietas cuando aún son pequeñas.

También, el Código canadiense indica que el concreto reforzado con fibra (FRC por sus siglas en inglés) se clasificará en función de la resistencia a la compresión y del comportamiento de tracción uniaxial. El comportamiento de tracción del FRC se clasificará como ablandamiento por tracción (*Tension Softening*, TSFRC por sus siglas en inglés), o endurecimiento por tracción (*Tension Hardening*, THFRC por sus siglas en inglés). En la literatura, los materiales THFRC son clasificados como HPFRC, ECC, y también como UHPFRC (que abreviado sería UHPC), y para distinguirlos se utiliza la resistencia a compresión f'_c , en América del Norte requiere que sea mayor a 120 MPa (17.4 ksi) de acuerdo con el Anexo 8A del CSA-S6 (2019) y de acuerdo con el ACI Code Committee 239, o mayor que 150 MPa (21.7 ksi) para la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (Mohammed et al., 2023).

El tipo de fibra utilizada en la producción de este concreto tiene una influencia significativa en f'_c , ya que las fibras de acero conducen a mayores resistencias a la compresión y a la tracción, como es el caso del UHPC. Por lo que, a partir de distintos tipos de materiales de fibra, longitudes de fibra y tamaño de grano de mortero, combinados de manera apropiada, se puede obtener un endurecimiento por deformación posterior al agrietamiento, lo que en algún momento se creía imposible de obtener para materiales como el concreto.

1.3.2 Concreto de Ultra-Alto Desempeño (UHPC)

De acuerdo con Mohammed et al. (2023), el UHPC se caracteriza por ser dúctil en tensión y por poseer una resistencia a la tracción significativa (en comparación con el concreto de uso normal) que puede mantenerse a altos niveles de deformación por tracción ($f_{Fu} > 4.9$ MPa según el Anexo 8A del CSA-S6). La ductilidad de la deformación que aporta la densa red de fibras permite mejorar el diseño y reacondicionamiento sísmico, mientras que la durabilidad debida a la baja porosidad del material hace que este sea ideal para reacondicionamientos y reparaciones de elementos en puentes ya que pueden mitigar algunas de las limitaciones de los métodos existentes.

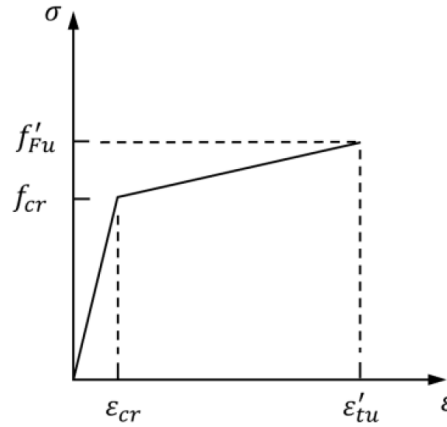
De acuerdo con CSA-S6 (2019), el THFRC se clasificará en función de valores específicos de resistencia a la compresión, f'_c , resistencia máxima a tensión, f'_{Fu} y deformación máxima a tensión, ϵ'_{tu} . Este material deberá cumplir lo siguiente:

$$f'_{Fu} \geq 1.1f_{cr} \quad (1)$$

$$\epsilon'_{tu} \geq 0.002 \quad (2)$$

Para los parámetros anteriores, se define el rango de la respuesta después del agrietamiento. Por lo tanto, la zona de “endurecimiento por deformación” para THFRC es definida por las propiedades al inicio del agrietamiento, (f_{cr} y ε_{cr}), y las propiedades post-agrietamiento especificadas (f'_{Fu} y ε'_{tu}). Lo anterior puede observarse en la Figura 8:

Figura 8. Modelo simplificado de tracción directa para el material THFRC.



Fuente: CSA-S6 (2019).

La resistencia a la fisura f_{cr} se obtiene de acuerdo con la Cláusula 8.4.1.8 del CSA-S6 (2019). La tensión de agrietamiento ε_{cr} , se determina utilizando la Ec. 3:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_c} \quad (3)$$

La resistencia máxima a la tracción especificada f'_{Fu} , no debe tomarse mayor que el valor característico de la resistencia máxima a la tracción, $f'_{Fu,c}$. La deformación máxima a la tracción especificada ε'_{tu} , no se tomará como mayor que 0.8 veces la deformación máxima a la tracción promedio, $\varepsilon_{tu,m}$.

Por otra parte, la deformación uniaxial ε_c al alcanzar la tensión máxima en ausencia de confinamiento es:

$$\varepsilon_c = \frac{f_c}{E_c} \quad (4)$$

Los valores de E_c se obtienen a partir de pruebas de precalificación realizadas para la caracterización del material THFRC; según Graybeal (2012), una estimación conservadora para el módulo elástico de THFRC es:

$$E_c = 4070 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} = 49000 \sqrt{f'_c} \text{ (psi)} \quad (5)$$

1.3.3 Encamisados de UHPC

El encamisado de pilas de CR con UHPC es una solución moderna y eficaz para la reparación y refuerzo de pilas de puentes que presentan alguna deficiencia estructural. Algunas investigaciones demuestran que el reemplazo la cubierta de concreto de elementos de CR con THFRC es una alternativa viable y atractiva a otros métodos de reacondicionamiento sísmico o de reparación. También es una alternativa de reemplazo al concreto en las zonas donde se desarrolla la articulación o flexión plástica de la columna cuando es cargada lateralmente, o cuando el recubrimiento ha sido dañado por la presencia de corrosión en el refuerzo.

Sobre la articulación plástica, cuando una columna se somete a flexión, desarrollará su resistencia a la flexión en las regiones críticas (ubicaciones de momento máximo) a lo largo de la longitud de la columna. Para cargas laterales, la región crítica está en la base en la conexión del pilar con el cimiento, y en la parte superior del pilar está conectado monolíticamente con el tablero. La longitud en la que el momento excede el momento de fluencia es la longitud de la articulación plástica del elemento.

Como mencionan Mohammed et al. (2023), los THFRC pueden ser innovadores en la rehabilitación sísmica de construcciones antiguas porque son compatibles con el concreto convencional, son duraderos, mitigan la aparición de grietas localizadas anchas y son resistentes a la deformación por tensión. Se debe tomar en cuenta que el uso de UHPC suele ser más costoso en comparación con métodos de reparación convencionales debido a la tecnología avanzada que implica su fabricación y construcción. Se requiere de personal capacitado ya que requiere de una elevada exigencia técnica. Sin embargo, su durabilidad y dado su menor requerimiento de mantenimiento podrían hacer que, a largo plazo, sea una excelente alternativa.

Por hace aproximadamente una década, se han realizado varios estudios experimentales para investigar el reacondicionamiento de pilares de puentes con materiales THFRC. Se han realizado pruebas en columnas que han sido dañadas previamente debido a cargas laterales cíclicas inversas (Li et al., 2017), o columnas que han sido dañadas bajo desplazamientos cíclicos inversos, con el fin para evaluar el rendimiento de la cubierta reemplazada como reforzamiento o método de reparación (Li et al., 2017).

En otros estudios, como el realizado por Tong et al., (2019), se trató de reemplazar por completo de la zona de articulación plástica dañada o, alternativamente, el reemplazo del recubrimiento del concreto (para que la cubierta estuviera en contacto con el refuerzo longitudinal incrustado) y se ha descubierto que la adherencia del refuerzo mejora significativamente cuando las barras están incrustadas en THFRC (Saikali et al., 2022). Asimismo, en la investigación realizada por Farzad et al. (2019) en columnas previamente corroídas que luego fueron revestidas con UHPC, han demostrado una capacidad de carga y ductilidad mayor a los valores originales, y se determinó también que existe un agrietamiento controlado, en comparación con sus contrapartes sin fortalecer.

El espesor del encamisado se ha estudiado como un parámetro de reacondicionamiento en pilares con sección transversal circular y rectangular. Sin embargo, Mohammed et al. (2023) menciona que, si el espesor del encamisado es más grueso que 50 mm, puede ocurrir una reubicación de la zona de articulación

plástica fuera de la región del encamisado, ya sea por encima del extremo de la longitud de este, o por una mayor demanda de anclaje en el cimiento si este no se había reacondicionado también. Un daño extenso en el cimiento, más allá de un cierto nivel de deriva, elimina cualquier efectividad y beneficio del encamisado.

De acuerdo con la conclusión de Thermou y Elnashai (2006), aunque el espesor sea pequeño, el área activa total de THFRC en las zonas de tensión y compresión del elemento produce resultantes de tensión significativas, contribuyendo así al equilibrio seccional; aumentan notablemente la resistencia a la flexión y la rigidez de la columna, lo que hace que este tipo de reacondicionamiento pueda clasificarse como una intervención global leve (que afecta el período estructural) o local (que no afecta en absoluto la rigidez).

1.3.4 Confinamiento

En un elemento de CR cuando se somete a compresión, como un pilar o una columna, el concreto tiende a expandirse lateralmente. En ausencia de un adecuado refuerzo transversal, esta expansión puede llevar a una falla frágil cuando el concreto alcanza su resistencia a la compresión. El refuerzo transversal tiene el objetivo de evitar este comportamiento frágil, resistiendo la expansión lateral, lo que permite que la columna siga soportando mayores cargas de forma dúctil. Por lo que el confinamiento hace referencia a esa restricción en las deformaciones laterales que presenta el concreto.

Un mecanismo por el cual el THFRC refuerza una sección transversal de CR es a través del confinamiento, el cual ocurre mediante la resistencia a la tracción sostenida del material cuando funciona como una cubierta, restringiendo así la expansión lateral del núcleo revestido (Mohammed et al., 2023). El confinamiento que aportan los encamisados de THFRC surge en respuesta a la tendencia de expandirse del núcleo cubierto, como lo han demostrado los resultados de Tsiostsias y Pantazopoulou (2022), mediante una serie de pruebas realizadas en núcleos de concreto cilíndricos y rectangulares, que mostraron una mejora significativa de la capacidad de deformación, pero también un aumento moderado en la resistencia a la compresión del concreto del núcleo.

El uso de THFRC eliminó los tipos de falla que están asociados a la fragilidad quebradiza en columnas más antiguas, como el pandeo de las barras y la interacción de corte en la zona de flexión plástica, pero el THFRC tiene la ventaja, si se compara con los resultados del FRP (Rabehi et al., 2014), de que también contribuye a la resiliencia al fuego y una mejor durabilidad del núcleo cubierto.

Para cuantificar las propiedades mecánicas de los encamisados de THFRC en una columna, se requiere de resultados de tensión-deformación del material para realizar análisis de secciones y miembros. La contribución de las características de endurecimiento del material se debe a dos tipos diferentes de confinamiento que se producen, y según Mohammed et al. (2023), estos son:

1. El confinamiento interno debido a las fibras, ya que las fibras interceptadas por las grietas desarrollan tensiones de tracción f_t , que se equilibran mediante una presión de confinamiento interna $q_{f,lat}$. Esta

presión interna retrasa la expansión lateral cuando el material se prueba bajo compresión, y las grietas tienden a desarrollarse paralelas al eje de compresión.

2. El confinamiento externo que el encamisado de THFRC ejerce sobre el núcleo encerrado de concreto convencional, junto con la acción de los aros o estribos de refuerzo (si están disponibles), causa una presión de confinamiento interna pasiva $\sigma_{j,lat}$, la cual mejora la capacidad de deformación y puede además afectar levemente la resistencia del núcleo de concreto.

Se ha estimado que la presión de confinamiento interna impartida por las fibras es cercana en magnitud a la resistencia a la tracción del material (Georgiou y Pantazopoulou, 2016).

Por otra parte, el valor de diseño de la resistencia a la tracción f_{td} del material se utiliza en lugar del valor obtenido a partir de pruebas de caracterización (f_t), tomando en cuenta la influencia del factor de orientación de la fibra γ_f :

$$f_{td} = \gamma_f \cdot f_t \quad (6)$$

Los cálculos analíticos de los elementos reacondicionados se basan en el siguiente modelo propuesto para THFRC en compresión (Ec. 7), el cual se basa en el polinomio ajustado por Popovics (1973):

$$\sigma_a = f'_c \cdot \left[\frac{n \cdot \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{co}} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{co}} \right)^{nk}} \right] \quad (7)$$

Donde ε_{co} es la deformación uniaxial al alcanzar la tensión máxima en ausencia de confinamiento. Cuando $\varepsilon_a < \varepsilon_{co}$, $k = 1$. La deformación en la tensión máxima se obtiene de:

$$\varepsilon_{co} = \frac{f'_c}{E_c} \quad (8)$$

Donde E_c se puede obtener de la Ec. 5.

Ahora bien, la tensión de confinamiento interna, $q_{f,lat}$ se estima a partir de:

$$q_{f,lat} = \varphi_c \cdot f_{td} \quad (9)$$

El factor de resistencia del material φ_c , utilizado para el UHPC en el diseño de puentes es igual a 0.75, de acuerdo con CSA-S6 (2019).

Para los cálculos teóricos, teniendo en cuenta la incertidumbre de la orientación real de la fibra en un molde de campo, la resistencia a la tracción nominal puede tomarse igual al límite inferior aceptable para UHPC, por ejemplo:

$$f'_{cr} = 0.6 \sqrt{f'_c} \quad (10)$$

$$q_{f,lat} = 0.75 \cdot f'_{cr} \quad (11)$$

Por tanto, la deformación en la tensión máxima del concreto confinado se estima con referencia a la magnitud de la tensión de confinamiento a partir de lo siguiente:

$$\varepsilon_{cc,o} = \varepsilon_{co} \left(1 + 6 \left(\frac{q_{f,lat}}{f'_c} \right) \right) \quad (12)$$

El final de la meseta de deformación en el diagrama analítico de esfuerzo-deformación por compresión se determina por la magnitud de deformación $\varepsilon_{cc,o}$, que se obtiene de la Ecuación 12 al sustituir la Ecuación 11.

De manera similar, considerando la resistencia confinada y la mejora de la deformación del hormigón, se estima una capacidad de deformación ε_{cu} correspondiente al 75% del esfuerzo pico en la envolvente posterior al pico, según la Ecuación 13:

$$\varepsilon_{cu,75\%} = \varepsilon_{co} \left(1 + 20 \left(\frac{q_{f,lat}}{f'_c} \right) \right) \leq 0.0045 \quad (13)$$

Ahora, para los cálculos de diseño de THFRC en compresión, se recomienda utilizar el modelo especificado por las siguientes ecuaciones (14-16) (CSA-S6, 2019).

$$\varepsilon_{co} = \frac{f'_c}{E_c} < 0.003 \quad (14)$$

$$f_{cd} = \alpha_1 \cdot \varphi_c \cdot f'_c \quad (15)$$

Con:

$$\varphi_c = 0.75; \text{ y } \varepsilon_{co,d} = \frac{f_{cd}}{E_c} < 0.00225$$

$$\varepsilon_{cu,d} \leq 0.004 \quad (16)$$

Las acciones sísmicas para el diseño o reacondicionamiento con UHPC pueden definirse de acuerdo con cualquier código de diseño de puentes que sea compatible con los Principios de Diseño Basados en el Desempeño. Con referencia a los niveles mínimos de desempeño de la Tabla 4.15 y los criterios de desempeño de la Tabla 4.16 de (CSA.S6, 2019), se recomienda que en los componentes de THFRC y en los diseños de reacondicionamiento de componentes se cumplan los siguientes criterios:

- Para asegurar daños mínimos, las deformaciones de compresión del concreto no deben ser mayores que 0.004 y las deformaciones del acero de refuerzo no deben superar 0.008.
- Para daños reparables, las deformaciones de tensión del acero no deben ser mayor que 0.015.
- Para el límite de seguridad de vida, el daño sufrido por el elemento no debe causar el aplastamiento del núcleo de hormigón revestido del componente encamisado y las deformaciones de tensión del acero de refuerzo no deben superar 0.06.

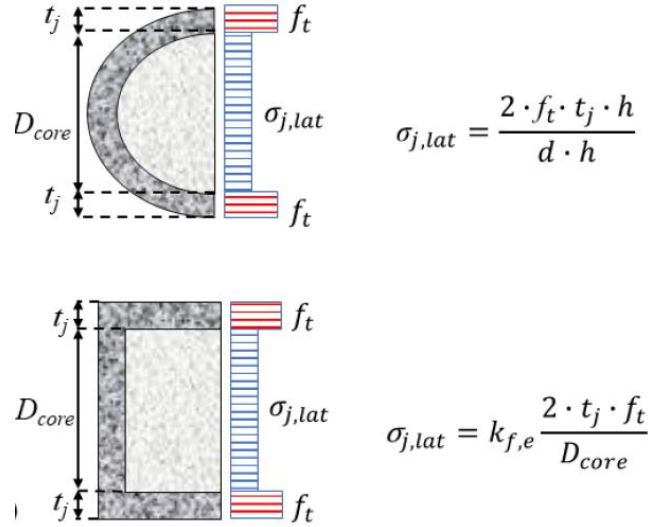
1.3.4.1 Reacondicionamiento con encamisados de THFRC

Cuando se utiliza THFRC como encamisado alrededor del concreto convencional (para reacondicionamiento), la presión de confinamiento efectiva ejercida sobre el concreto revestido se calculará utilizando la siguiente Ec. 17:

$$\sigma_{j,lat} = 2 \cdot k_{e,f} \cdot \varphi_c \cdot f_t \cdot \left(\frac{t}{h} \right) \quad (17)$$

Donde t es el espesor del encamisado, h la dimensión de la sección transversal encerrada por la cubierta de UHPC y $k_{e,f}$ es la eficacia de confinamiento que se obtiene a partir de la relación entre el área de la sección efectivamente confinada y el área encerrada total. En la siguiente figura se ilustra mejor lo anterior:

Figura 9. Presión de confinamiento efectiva, $\sigma_{j,lat}$.



Fuente: Tsiostsias y Pantazopoulou (2022).

La investigación sobre la efectividad del confinamiento utilizando revestimientos de UHPC en columnas ha llevado a una estimación del coeficiente de efectividad del confinamiento, $k_{e,f}$ que es prácticamente idéntico al obtenido para envolturas de FRP (Pantazopoulou et al., 2016):

$$k_{e,f} = 1 - \frac{(b^2 + h^2)}{3(1 - \rho_{sc})bh} \quad (18)$$

Cuando existe refuerzo de confinamiento (aros y estribos), la Ec. 17 se modifica para tener en cuenta la contribución del confinamiento de los estribos a la presión de confinamiento $\sigma_{st,lat}$.

En la Ec. 19, k_{eff} es el factor de efectividad del confinamiento, ρ_w es la relación volumétrica, y $f_{y,st}$ es la tensión de fluencia para el refuerzo de confinamiento:

$$\sigma_{st,lat} = 0.5 \cdot k_{eff} \cdot \rho_w \cdot f_{y,st} \quad (19)$$

Como el concreto encerrado es convencional, la parte ascendente del material de la relación esfuerzo-deformación compresión uniaxial se define según la parábola de Hognestad (1951), es decir, la Ec. 20. Para la rama descendente, se utiliza el modelo constitutivo modificado por Kent y Park (1971) (Ec. 21), hasta la rama residual que se describe en Ec. 22.

$$f_e = f_{cc,e} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cc,e}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cc,e}} \right)^2 \right], \varepsilon_e \leq \varepsilon_{cc,e} \quad (20)$$

$$f_e = f_{cc,e} \cdot [1 - Z_e \cdot (\varepsilon_e - \varepsilon_{cc,e})], \varepsilon_{cc,e} < \varepsilon_e \leq \varepsilon_{cu,e} \quad (21)$$

$$f_e = 0.2 \cdot f_{cc,e}, \varepsilon_e > \varepsilon_{cc,e} \quad (22)$$

Donde, $f_{cc,e}$ y $\varepsilon_{cc,e}$ son la tensión y la deformación del concreto confinado según Ec. 23 y 24:

$$f_{cc,e} = f_{c,e} \cdot K_e \quad (23)$$

$$\varepsilon_{cc,e} = \varepsilon_{co,e} \cdot K_e \quad (24)$$

Luego, Z_e describe la pendiente de la rama descendente (Ec. 25):

$$Z_e = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29[0.0285] \cdot f_{c,e}}{145[14.2] \cdot f_{c,e} - 1000} + 0.75 \cdot \rho_v \cdot \left(\frac{h}{s}\right)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_{co,e} \cdot K_e} \quad [MPa] \quad (25)$$

Donde ρ_v es la relación volumétrica del refuerzo transversal, h es el ancho del núcleo de concreto, s es el espaciamiento de los estribos y K_e es el factor de aumento de la resistencia del concreto revestido debido al confinamiento:

$$K_e = 1 + \frac{\lambda \cdot \sigma_{tot,lat}}{f_{c,e}} \quad (26)$$

Donde λ es el factor de sección y $\sigma_{tot,lat}$ es la suma de las tensiones de confinamiento lateral del encamisado de UHPC y el refuerzo transversal, como se definió en Ec. 17 y 19, respectivamente.

Por último, para el acero de refuerzo se puede utilizar una ley constitutiva de endurecimiento por deformación elastoplástica, de acuerdo con las siguientes tres ecuaciones:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (27)$$

$$f_s = f_y, \quad \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \quad (28)$$

$$f_s = f_y + E_{sh} \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) \cdot \left[1 - \frac{E_{sh} \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})}{4 \cdot (f_{su} - f_y)}\right], \quad \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s - \varepsilon \quad (29)$$

Donde f_s es la tensión del acero, E_s es el módulo de elasticidad del acero, ε_s es la deformación del acero, ε_y es la deformación límite, ε_{sh} es la deformación al inicio del endurecimiento, E_{sh} es el módulo de endurecimiento y f_{su} es la tensión última.

Según lo expuesto por Mohammed et al. (2023), la metodología anterior consiste en una propuesta integral de disposiciones sísmicas para la rehabilitación de pilares de puentes con cubiertas de materiales de THFRC para el diseño basado en el desempeño. La metodología propuesta presenta modelos de tensión-deformación de compresión y tensión que se requieren para el diseño y análisis de elementos estructurales cubiertos con THFRC.

Para la tensión, se recomiendan los modelos de análisis y diseño del Anexo 8 del CSA-S6 (2019) y para la compresión, se formula un modelo de análisis, en ambos casos con convergencia satisfactoria. En la relación tensión-deformación propuesta para THFRC en compresión, la longitud de la meseta de deformación en el pico de tensión y la pendiente posterior al pico están relacionadas con la presión de confinamiento interna efectiva impartida por el contenido de fibra del material.

Finalmente, se concluye que el revestimiento de THFRC como método de reacondicionamiento de columnas y pilares contribuye a mejorar tanto la resistencia como la capacidad de deformación del componente, a través de:

1. La participación de la capa de THFRC en el desarrollo de tensiones normales de compresión y tracción, participando así en el equilibrio de la sección transversal, y
2. como un mecanismo de confinamiento a través del encierro de la sección transversal de hormigón convencional. De esta manera, tanto la resistencia como la capacidad de deformación del elemento se mejoran significativamente.

Capítulo 2: Marco metodológico

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo de la presente investigación. Se detallan los métodos de recolección y análisis de datos, las técnicas utilizadas para obtener los resultados, y se justifica la elección de estos de acuerdo con el objetivo de la investigación y el marco teórico previamente expuesto. Este proyecto se realizó en conjunto con el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y la Universidad de York, en Canadá, por lo que a continuación se detalla la metodología de investigación empleada.

2.1 Tipo de investigación

Para el presente proyecto, el enfoque de investigación se define como descriptiva, debido a que esta permite utilizar el método de análisis, caracterizar el objeto de estudio y señalar sus características y propiedades. La forma en que se recolecta la información será a través de la colaboración del equipo de investigación de *eBridge*, y se obtiene información de los pilares de RC de puentes en Costa Rica de la base de datos que se elaboró con el propósito de generar el informe llamado “Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica 2014-2018”; además se realiza una revisión bibliográfica de investigaciones experimentales relacionadas con columnas reacondicionadas con encamisados de UHPC, tanto a escala como en tamaño real.

2.2 Definición de categorías y variables

Las categorías y variables son conceptos fundamentales que permiten organizar y analizar los datos de manera coherente y sistemática. Para la presente investigación se definieron las siguientes categorías y variables por estudiar:

Cuadro 1. Definición de categorías y variables utilizadas en la investigación.

Categorías y variables de investigación	
Categorías	Tipo de sección transversal del pilar
	Espesor del encamisado
Variables	Resistencia a la compresión
	Resistencia a la tensión
	Deformación unitaria

A continuación, se define conceptualmente cada una de las categorías y variables:

2.2.1 Tipo de sección transversal del pilar

El tipo de sección transversal, como se describió en 1.1.2, se define como categoría ya que, tanto para el caso de la sección transversal rectangular como la sección circular que se utilizarán para llevar a cabo esta investigación paramétrica, poseen las mismas variables de estudio. Los pilares pueden tener distinta geometría, y esto depende del tipo de puente. En Costa Rica, a partir de una revisión de los puentes de rutas nacionales que se encuentra en el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP), se lograron identificar pilares con sección transversal circular, rectangular y elíptica.

Debido a lo anterior, se pretende realizar el estudio paramétrico utilizando dos tipos distintos de geometría en columnas o pilares, cilíndrica y prismática, y de esta manera utilizar las mismas variables de estudio para determinar en cada caso el efecto del confinamiento que aportan los encamisados de UHPC a una columna o pilar.

2.2.2 Resistencia a la compresión del concreto f'_c

La resistencia a compresión de un concreto es una medida de la capacidad del material para resistir fuerzas de compresión sin deformarse o fallar de manera irreversible, es decir, más allá de su rango elástico. El UHPC puede alcanzar una alta resistencia a la compresión que supera los 120 MPa (1200 kg/cm²), y esto se debe a su mínima porosidad, que además disminuye la permeabilidad, otorgándole una alta durabilidad (Chung-Chan et al., 2021).

Debido a que el valor específico de la resistencia a la compresión del UHPC influye en el desempeño del encamisado, como se mencionó anteriormente, es que se considera un parámetro de estudio para esta

investigación. Además, la resistencia a la compresión del concreto convencional del núcleo (la columna) también consiste en una variable de estudio, de esta manera se podrá determinar el efecto del encamisado sobre distintos valores de resistencia a la compresión que podría presentar la columna que se pretende reparar.

2.2.3 Resistencia a la tensión del concreto f'_t

Para mejorar esta propiedad mecánica, se incorporan fibras metálicas al UHPC que aumentan la capacidad del material para resistir fuerzas de tensión, reduciendo así la formación de grietas y mejorando la durabilidad del encamisado. Por esta razón, la resistencia a la tensión del UHPC como encamisado influye en el desempeño de las columnas cuando estas son sometidas a compresión. Debido a esto se considerará como una variable de estudio, ya que se pretende determinar el efecto de la resistencia en tensión del UHPC en los resultados del confinamiento que le aporta el encamisado al cambiar el valor de este parámetro.

2.2.4 Espesor del encamisado de UHPC t_{jacket}

Este es uno de los parámetros más estudiados para determinar la efectividad de los encamisados de UHPC. El espesor se considera una variable en la presente investigación ya que se propone estudiar la efectividad de este método de reparación con diferentes dimensiones para obtener diferentes resultados y así luego determinar en cuál consiste la opción óptima. De acuerdo con la *sección 1.3.3*, se mencionan que los espesores del encamisado pueden ser pequeños, y pueden ir desde los 15 mm hasta los 50 mm, según algunas investigaciones. Esta variable puede aportar tanto a la resistencia de la columna o el pilar, como al confinamiento final.

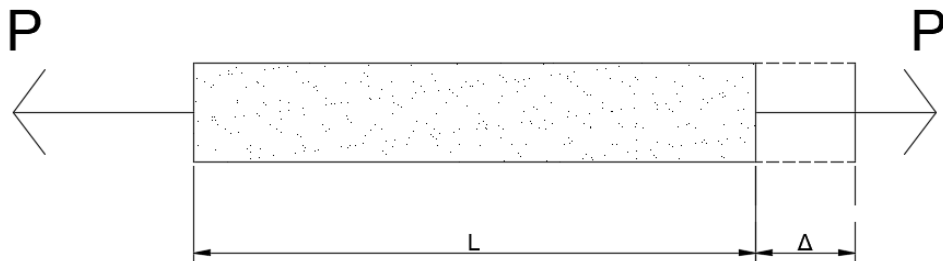
2.2.5 Deformación unitaria ε

La deformación unitaria ε consiste en la deformación que experimenta un material al cual se le aplica un esfuerzo. Es una cantidad adimensional que se obtiene como la relación entre el cambio de longitud Δ y la longitud original L :

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L} \quad (30)$$

Lo anterior se puede observar en la siguiente figura:

Figura 10. Diagrama de deformación unitaria de un elemento sobre la que se le aplica un esfuerzo.



Fuente: Elaboración propia mediante Autocad.

Donde P es el esfuerzo aplicado.

2.3 Sujetos de información

Estos consisten en la muestra sobre los cuales se lleva a cabo el estudio de la presente investigación. Para este caso, se estudiarán dos columnas a escala rehabilitadas con encamisados de UHPC colados en sitio. Además, se aplicará esta rehabilitación en una sección transversal rectangular o circular a un pilar de un puente de Costa Rica. Idealmente se pretende que esta pila posea alguna deficiencia estructural para repararla utilizando encamisados de UHPC de manera teórica.

2.4 Fuentes de información

Para la presente investigación se cuentan con fuentes primarias y secundarias, las cuales se describen a continuación.

Las fuentes primarias consisten en:

- Información disponible (daños, planos estructurales) de los puentes seleccionados que provienen de la base de datos de SAEP y del inventario de puentes realizado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica para el CONAVI y el MOPT.
- Resultados experimentales de columnas a escala de la tesis de Doctorado de Tsiotsias (2023).

Y las fuentes secundarias son:

- Estudios experimentales y analíticos relacionados con la aplicación de encamisados de UHPC colados en sitio en pilares y columnas realizados por la Universidad de York.

- Artículos realizados en otros países que hayan desarrollado investigaciones relacionadas con la aplicación de encamisados de UHPC como métodos de rehabilitación o reparación en pilares de puentes, y que cuenten con otras condiciones que también son aplicables al presente proyecto.

2.5 Técnicas e instrumentos de recolección

Las técnicas y los instrumentos de recolección consisten en los procedimientos y herramientas que se utilizan para obtener la información necesaria para alcanzar los objetivos de la presente investigación. En esta sección se detallarán cada una de las técnicas utilizadas, así como también los instrumentos.

Una de las técnicas de recolección consiste en la búsqueda de la información en la base de datos de puentes del SAEP. Para esto, se filtrará la información para obtener los puentes construidos con CR de rutas nacionales que posean pilas del mismo material. Además, mediante la base de datos con la que cuenta el TEC sobre puentes de Costa Rica, se obtendrá más información de los puentes seleccionados, y a partir de esto, se procederá a realizar una revisión de los daños presentes en las pilas o columnas, sus dimensiones y características para seleccionar un pilar (rectangular o circular) y llevar a cabo la aplicación de encamisados de UHPC de manera teórica.

Además, partiendo de las investigaciones experimentales realizadas en la Universidad de York, se tomarán dos columnas a escala rehabilitadas con encamisados de UHPC y se modelarán utilizando el Software Atena. A partir de esto se realizará el estudio paramétrico para determinar el confinamiento que aportan los encamisados, tomando en cuentas las distintas variables descritas anteriormente. Además, se utilizará el software Response2000 para el análisis estructural correspondiente de la pila seleccionada.

En relación con los instrumentos, se utilizará el software Microsoft Excel para guardar la información que se requiere sobre los daños de los puentes, asimismo para realizar cálculos de una manera más sencilla y eficiente (como para realizar el análisis seccional del pilar seleccionado), y también procesar y analizar los resultados necesarios.

2.6 Análisis y procesamiento de la información

El análisis de la información consiste en examinar los datos recolectados a lo largo de la investigación para identificar patrones y relaciones entre ellos. Esto implica organizar la información y también comparar diferentes elementos para generar conclusiones. Por su parte, el procesamiento de la información se refiere a la transformación de los datos de forma que puedan ser analizados y comprendidos, esto incluye su

organización y estructuración. Seguidamente se detallará cómo se llevará a cabo para la presente investigación.

2.6.1 Presentación de los resultados

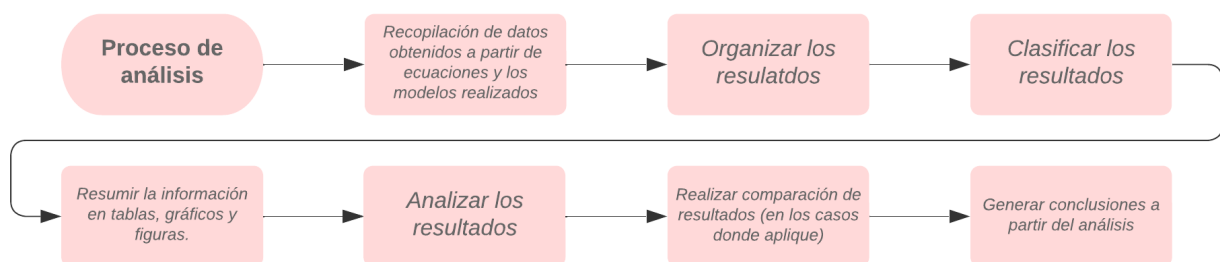
Los resultados obtenidos de la investigación se presentarán por medio de cuadros, figuras y gráficos elaborados mediante Microsoft Excel. En la primera parte (estudio paramétrico), los modelos realizados se presentarán en forma de figuras para mejorar la comprensión de lo realizado en los softwares de análisis estructural. También, se tabularán y graficarán los resultados de los diagramas carga-desplazamiento y esfuerzo-deformación para cada columna o pilar.

En la segunda parte (aplicación del método de reparación), los resultados de los daños presentes en los pilares y también sus características que son relevantes para la investigación se mostrarán en cuadros. Los resultados obtenidos del método de reparación propuesto (encamisados de UHPC colados en sitio) se presentarán en cuadros para su posterior análisis y comprensión. Se realizarán tablas comparativas sobre los resultados obtenidos del método de reparación seleccionado.

2.6.2 Descripción del proceso de análisis

Por último, para realizar el proceso de análisis se tomarán los resultados y por medio de las tablas comparativas donde se encuentran los resultados obtenidos del método de reparación seleccionado para cada pilar y también mediante gráficos de datos, se procederá a analizar cuál es la opción más optimizada que permita reparar eficientemente ambas columnas de manera teórica. Por último, una vez analizados todos los datos, se procede a obtener las conclusiones de la investigación. A continuación, se muestra un diagrama de flujo que describe lo anterior:

Figura 11. Proceso de análisis en la investigación.



Capítulo 3: Resultados y análisis

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos del presente proyecto.

3.1 Propiedades mecánicas del concreto

Revisar las propiedades mecánicas del concreto convencional y del UHPC es fundamental en la modelación de las columnas en el programa computacional Atena, tanto como para validar los modelos de las columnas experimentales como para llevar a cabo el estudio paramétrico, por tanto, primeramente se describe la composición del UHPC.

El desarrollo del UHPC inició en la década de 1970, utilizando la mezcla al vacío y el curado térmico, logrando una resistencia a la compresión de 510 MPa (Roy et al, 1972). Sin embargo, el material desarrollado era frágil y poseía baja trabajabilidad cuando se le agregaban fibras. En 1995, Richard y Cheyrezy desarrollaron el concreto en polvo reactivo mejorando la homogeneidad sin utilizar agregados gruesos, optimizando así la distribución del tamaño de partícula, aumentando la microestructura mediante el curado térmico, mejorando la ductilidad al añadir fibras de acero y logrando una resistencia a la compresión de 810 MPa.

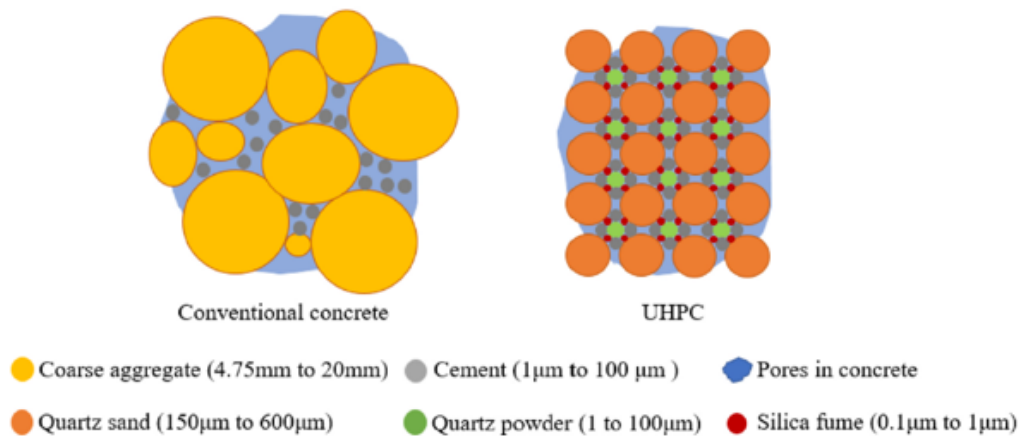
El UHPC está compuesto por polvos finos como el cemento Portland, polvo de cuarzo y humo de sílice; un aditivo superplastificante y agua, esto según Shi et al (2015). Sin embargo, de acuerdo con Arora et al (2019), se pueden utilizar adiciones minerales en la mezcla para reducir el consumo de cemento, como cenizas volantes y escoria de alto horno. Para la producción de UHPC, Graybeal (2007) menciona que es similar a la del concreto de resistencia normal; sin embargo, tiene una relación agua-cemento extremadamente baja que puede ser incluso inferior a 0.20.

En la siguiente figura se puede observar la composición típica que posee una mezcla de este tipo de concreto, además de su distribución en la mezcla, características que presentan diferencias significativas al compararse con el concreto convencional:

Figura 12. Mezcla típica de UHPC.

Constituents	lb/yd ³ (kg/m ³)	lb/ft ³	Percent by Weight
Sand	1462 (867)	54.1	35.30%
Cement	1329 (789)	45.9	32.10%
Water	311 (184)	11.5	7.50%
Superplasticizer	31 (18)	1.15	0.70%
16.3 mm fiber	66 (39)	2.4	1.60%
19.5 mm fiber	131 (78)	4.8	3.20%
Defoamer	1 (0.5)	0.04	0.02%
Shrinkage-reducing agent	13 (8)	0.48	0.30%
Premix *	797 (473)	29.5	19.30%
Total	4142 (2457)	153.4	100%

* Silica fume, ground quartz, and other performance enhancers.



Fuente: Guo et al (2023).

Una de las principales diferencias entre el UHPC y el concreto convencional, es que el UHPC posee una mezcla más estructurada, además que posee una porosidad casi nula. También que no comparten todos los elementos o materiales que los componen.

En los últimos años se ha estado intentando desarrollar un UHPC más sostenible añadiendo minerales como cenizas volantes, humo de sílice, escoria de alto horno y rellenos, reduciendo el contenido de cemento, lo que reduce el costo y el impacto ambiental de este concreto (Azmeem y Shafiq, 2018). La composición de dichos materiales ha permitido alcanzar propiedades mecánicas superiores al concreto convencional.

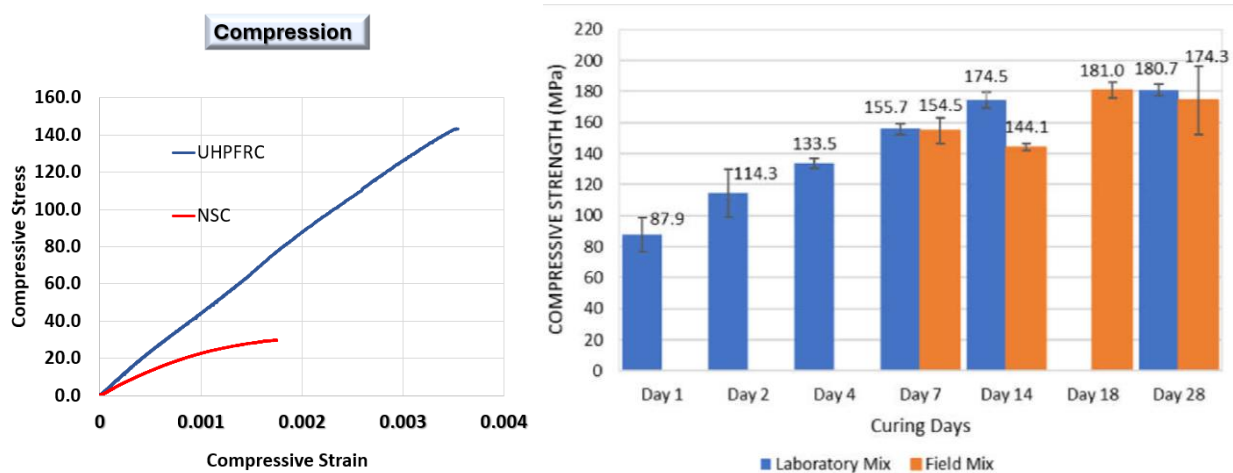
Las propiedades mecánicas, tanto del UHPC como del concreto convencional que son relevantes para esta investigación, se describen a continuación.

3.1.1 Resistencia a la compresión

El concreto convencional utilizado en pilares de puentes ronda los 30 – 40 MPa, mientras que, como se mencionó anteriormente, el UHPC puede tener una resistencia a la compresión superior a 150 MPa, lo que es significativamente superior a la del concreto convencional. De acuerdo con los resultados de la resistencia a la compresión de Tsotsias (2023) del concreto utilizado para la elaboración de las columnas a escala, para el concreto convencional es igual a 24.96 MPa para los cilindros y 28.00 MPa para los prismas (columnas con sección transversal rectangular). Para realizar columnas de tamaño real, el UHPFRC utilizado tuvo resultados entre 152.54 y 172.48 MPa.

En la siguiente figura se puede observar la resistencia que obtiene el UPHC a través de los días de curado:

Figura 13. Desarrollo de la resistencia a la compresión en MPa.



Fuente: Dr. Pantazopoulou y Kim et al. (2021), respectivamente.

3.1.2 Resistencia a la tensión

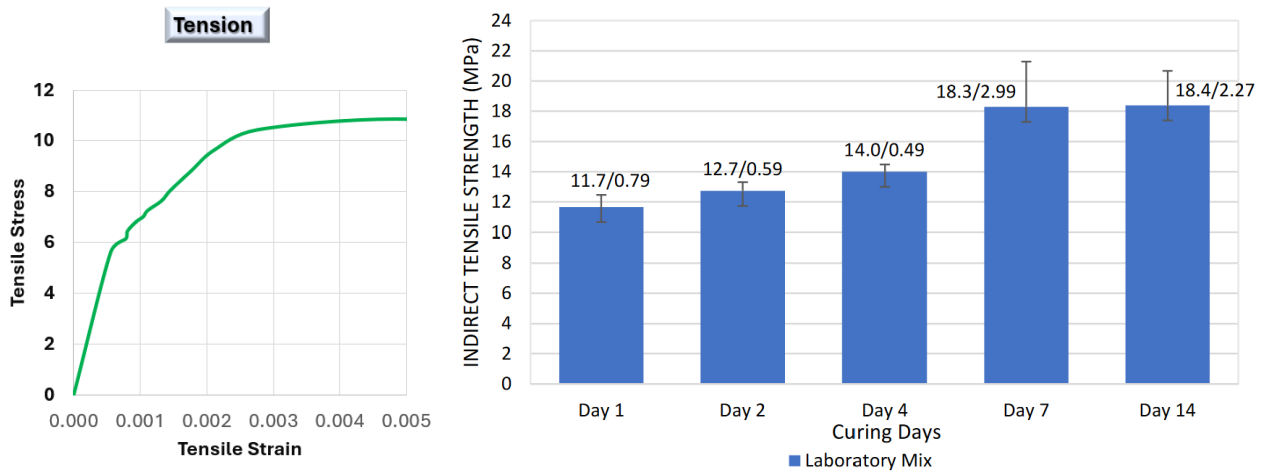
Por lo general el concreto convencional no posee una alta resistencia a la tensión, los valores se encuentran entre 2 y 5 MPa. Sin embargo, el UHPC también posee una resistencia mayor que este, ya que puede llegar a superar los 10 MPa. Este incremento en su resistencia a la tensión se consigue mediante el uso de fibras de acero, ya que mejoran la ductilidad del material. La resistencia al agrietamiento del UHPC ($f_{cr, UHPC}$), que es la tensión de tracción a la que comienza a agrietarse, se puede calcular mediante la Ec. 10. Y la resistencia a la tensión es posible calcularla mediante la siguiente Ec. 31:

$$f'_t = 1.1 \cdot f'_{cr} \quad (31)$$

Para todos los valores relacionados con la resistencia a la tensión, se aplicó el factor de 0.75 de acuerdo con la Ec. 11.

Con respecto con el esfuerzo a tensión indirecto, en la siguiente imagen se observa su comportamiento a través de los días de curado:

Figura 14. Desarrollo de la resistencia a la tensión en MPa.



Fuente: Dr. Pantazopoulou y Kim et al. (2021), respectivamente.

De la figura anterior se destaca que el comportamiento de la tensión en el gráfico esfuerzo vs. deformación se debe al enlace que generan las fibras en la mezcla.

3.1.3 Módulo de elasticidad

Esta propiedad es también conocida como módulo de Young, y es una medida de la rigidez de un material. Se define como la relación entre el esfuerzo aplicada a un material y la deformación resultante en la región elástica. Este valor se puede obtener mediante la Ec. 5. Para el caso del UHPC, su magnitud suele rondar los 40 GPa o 40000 kg/cm², lo que indica su rigidez y capacidad para deformarse elásticamente cuando se encuentran cargas aplicadas. En el caso del concreto convencional, el módulo de elasticidad va desde los 20 hasta los 40 MPa.

3.1.4 Energía de fractura

Para el caso del UHPC, este tiene una alta energía de fractura G_f , lo que significa que puede absorber una cantidad significativa de energía antes de fallar. Para obtener este valor se utilizó la siguiente ecuación:

$$G_f = 73 \cdot (f'_c)^{0.18} \quad (32)$$

Por lo que, a partir del valor de la resistencia a la compresión del concreto, se calculan estos valores.

3.2 Estudio paramétrico

Para llevar a cabo el estudio paramétrico que permitirá determinar el efecto del confinamiento en columnas utilizando encamisados de UHPC, inicialmente se tomaron como base dos de los cuatro diferentes especímenes experimentales elaborados por Tsiotsias (2023), en su tesis de doctorado realizada en la Universidad de York.

3.2.1 Modelos experimentales

La geometría de los dos diferentes especímenes experimentales elaborados por Tsiotsias (2023) para llevar a cabo su tesis de Doctorado, los cuales fueron seleccionados en esta ocasión para realizar la calibración o validación de los resultados, se detallan en el siguiente cuadro:

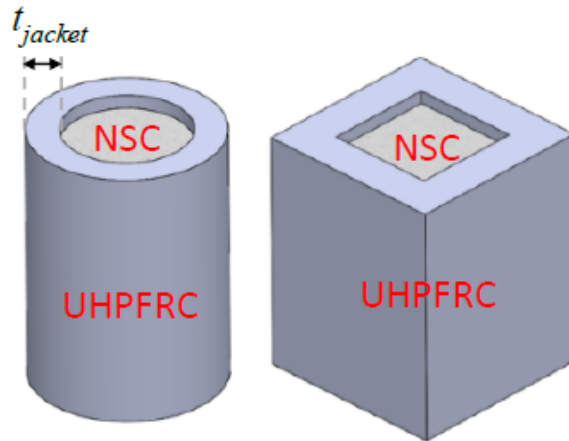
Cuadro 2. Geometría de los modelos a escala que se pretende modelar en el software Atena.

Sección transversal	Espécimen	Dimensiones b x d (D) x L (mm)	Espesor del confinamiento (mm)
Circular	CC25	100 x 200	25
Rectangular	CP375	100 x 100 x 200	37.5

Fuente: Tsiotsias (2023).

El esquema de los modelos se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 15. Esquema de cilindro y prisma elaborados experimentalmente por Tsiotsias (2023).



Fuente: Tsiotsias (2023).

Figura 16. Especímenes cilíndricos y prismáticos experimentales.



Fuente: Tsiotsias (2023).

A partir de lo anterior, se realizaron ambos modelos computacionales con sus respectivas dimensiones en el software Atena. Para esto, se modeló $\frac{1}{4}$ de columna respecto a su eje vertical debido a su simetría para simplificar la obtención de resultados. A continuación, se pueden observar ambos modelos:

Figura 17. Especímenes cilíndricos modelados en software Atena.

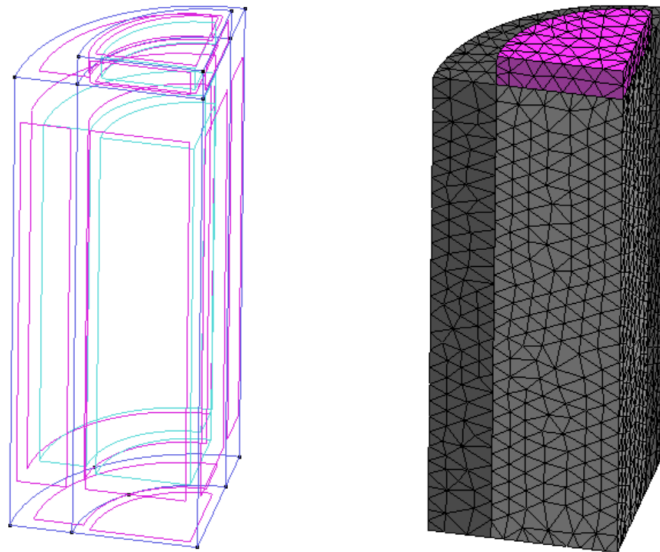
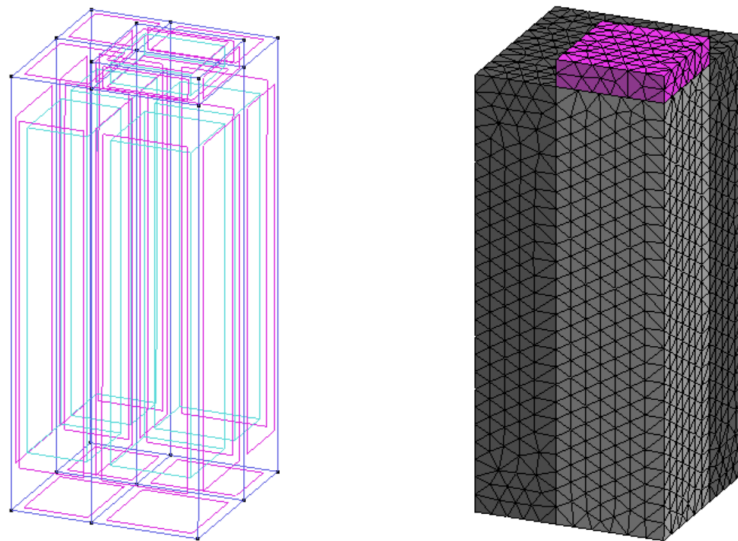


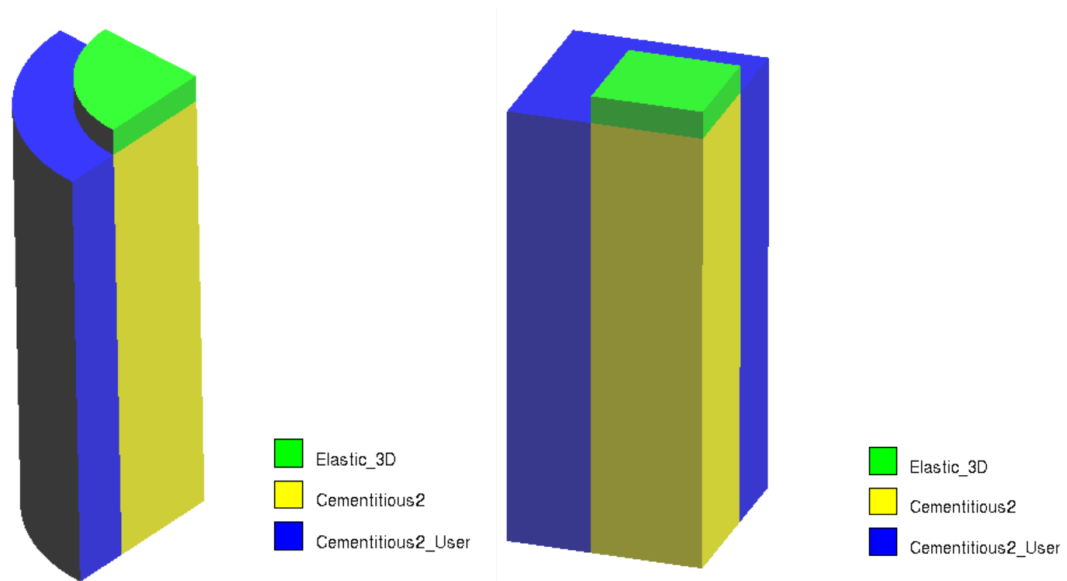
Figura 18. Especímenes cilíndricos modelados en software Atena.



A partir de la revisión de las propiedades mecánicas del concreto convencional y del UHPC, se definieron ambos materiales en Atena para asignarlos a la columna y al encamisado en ambos modelos, respectivamente. En la interfaz se utilizó la opción *Cementitious2* para el concreto convencional, *Cementitious2 User* para el caso del material de UHPC y *Solid Elastic 3D* para la placa donde se aplica la carga. Es importante mencionar que, la carga distribuida aplicada en la placa es igual a 1 mm con un número de pasos de carga igual a 50 y un multiplicador de intervalo de 30.

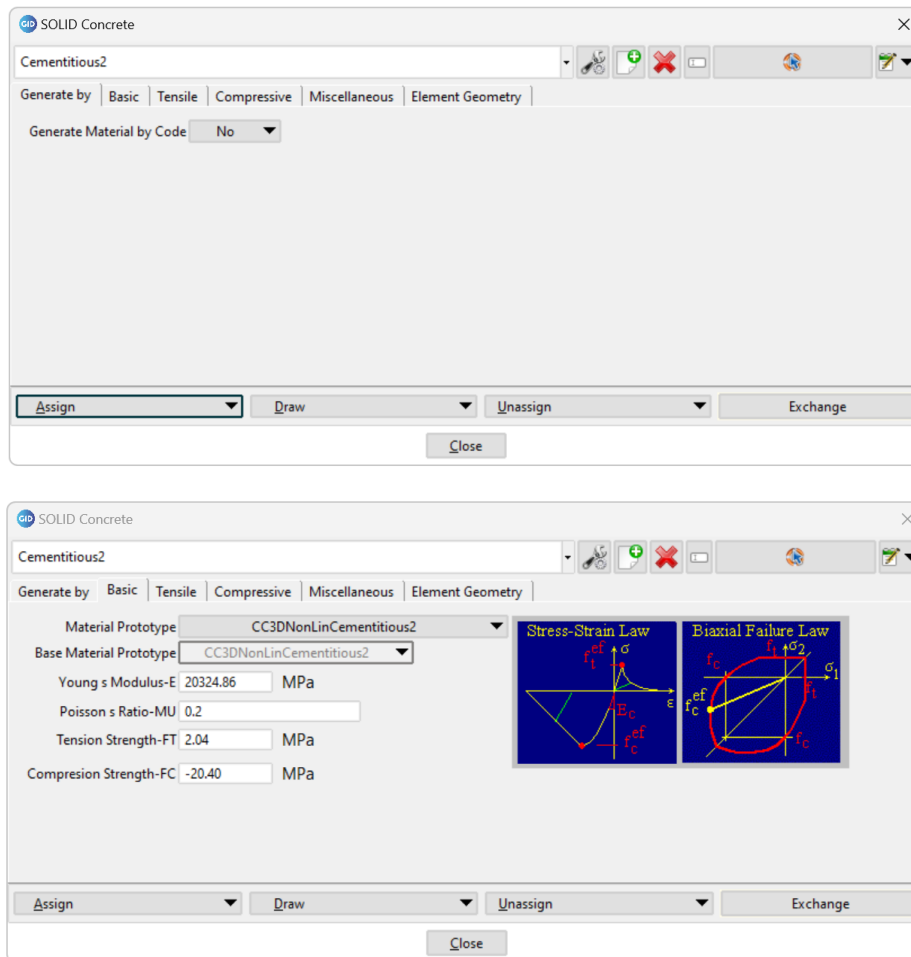
Los materiales definidos se pueden observar a continuación:

Figura 19. Materiales definidos para las columnas a escala en software Atena.



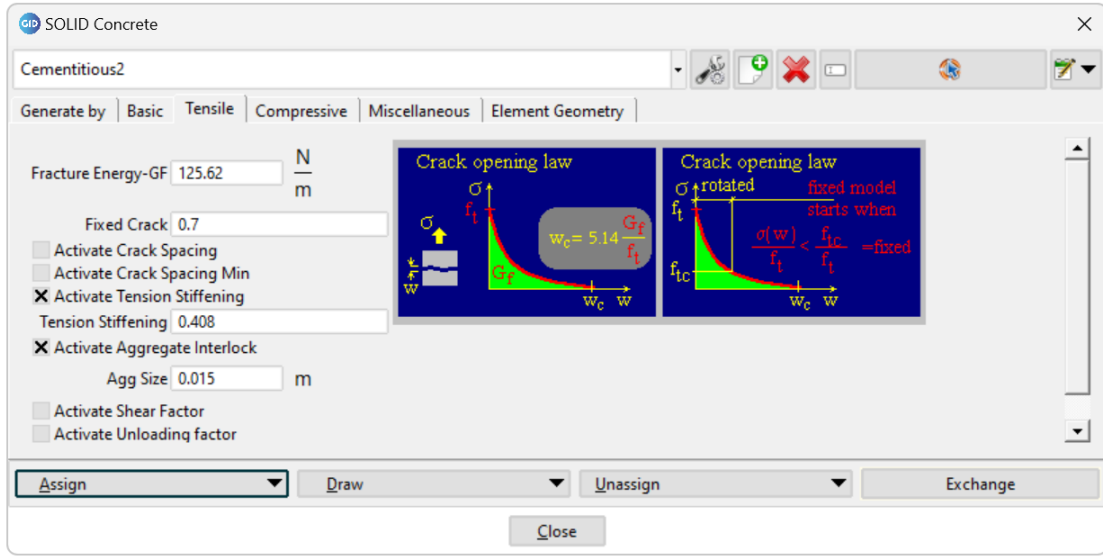
La selección de estos materiales en el software se realizó tomando en cuenta modelos realizados anteriormente. Ahora, los valores utilizados para las diferentes propiedades mecánicas de los materiales se describen a continuación. Primeramente, el material utilizado para el concreto del núcleo o columna, *Cementitious2*, posee las siguientes entradas:

Figura 20. Propiedades básicas para el concreto convencional de la columna.



Para las propiedades básicas del concreto convencional, se utilizó un valor igual a 20324.86 MPa, con coeficiente de Poisson de 0.2, una resistencia a la tensión f'_t igual 2.04 MPa ($1.1f'_c$) y una resistencia a la compresión f'_c de 20.40 MPa. Estos valores fueron tomados arbitrariamente, sin embargo, se eligieron de manera que tuviera congruencia con los resultados investigados tanto teórica como experimentalmente.

Figura 21. Propiedades de tensión del concreto convencional de la columna.



En esta sección, se obtuvo la energía de fractura G_f mediante la Ec. 32. Se activó la opción de endurecimiento por tracción (*Tension Stiffening*) utilizando un valor de 0,408 al igual que Tsiotsias (2023). Esta propiedad, el endurecimiento por tracción, se refiere al fenómeno por el cual el concreto entre las grietas de un elemento de RC continúa soportando tensiones de tracción incluso después que se fisura. Luego, el tamaño del agregado designado es de 15 mm. Las siguientes entradas no fueron modificadas:

Figura 22. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).

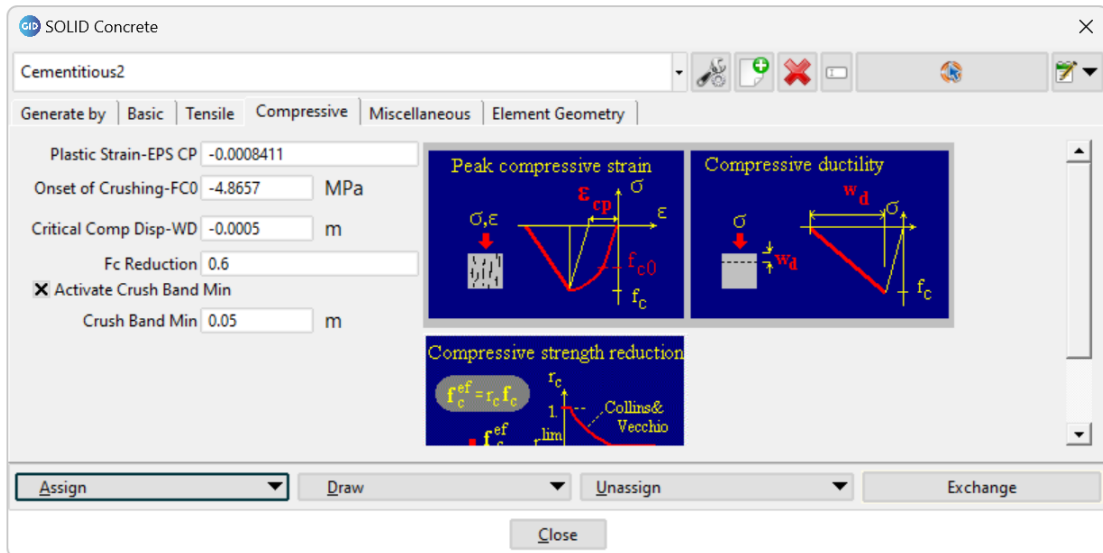


Figura 23. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).

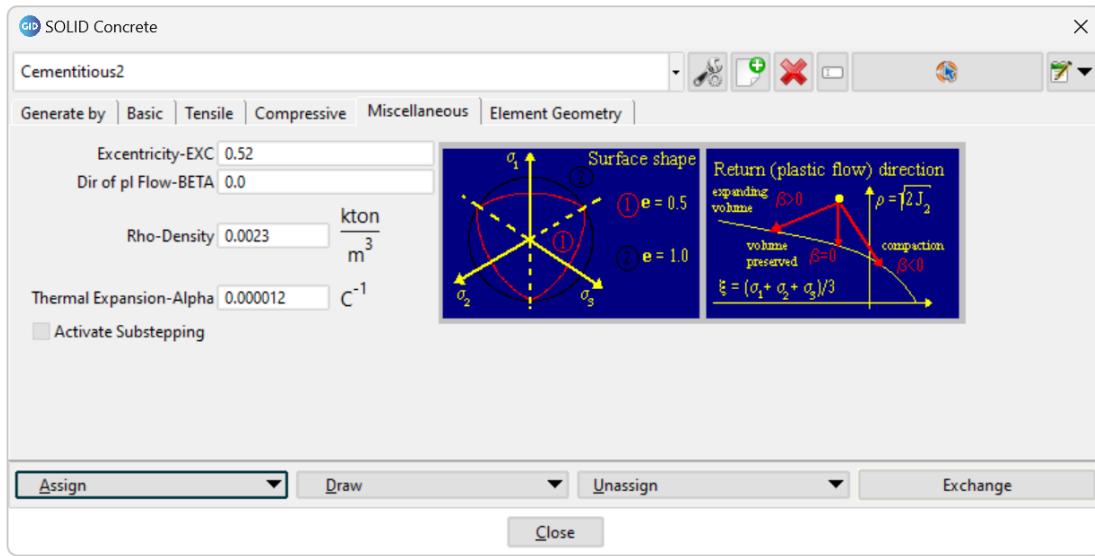
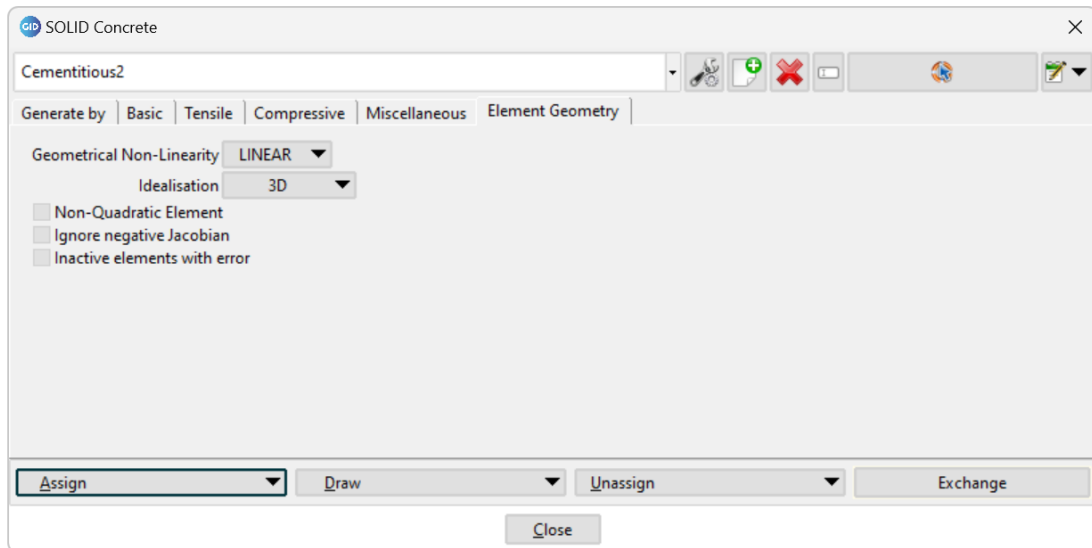
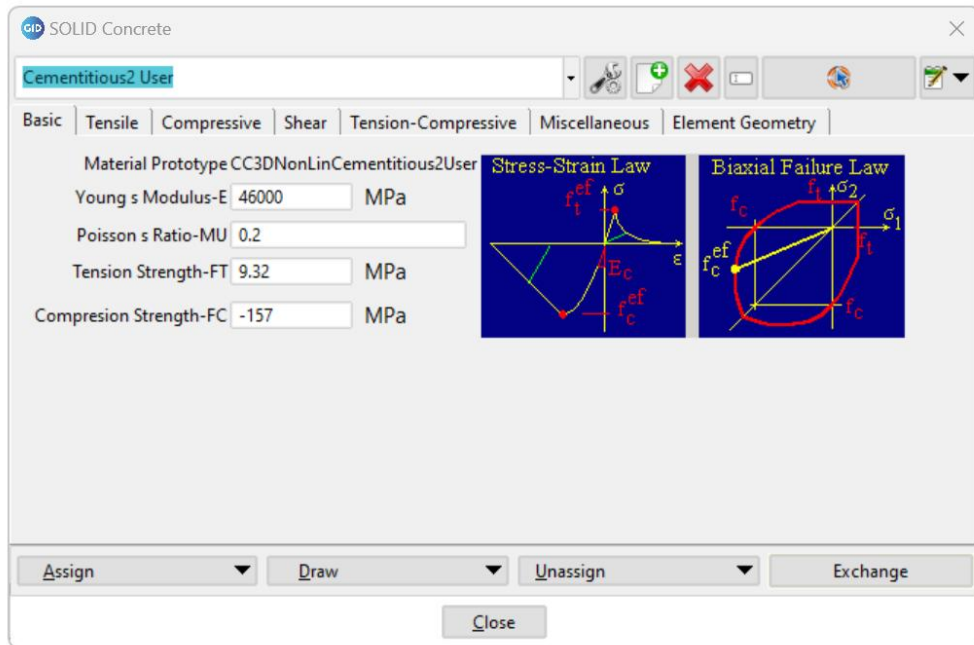


Figura 24. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).



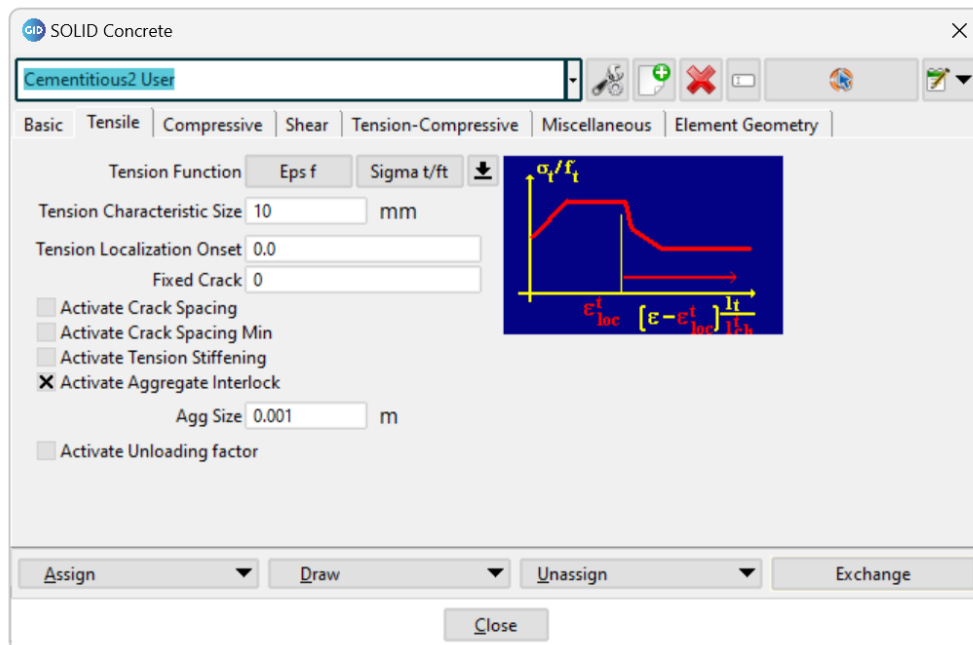
Ahora, para definir los valores del UHPC, se modificaron los siguientes valores del material *Cementitious2 User*.

Figura 25. Propiedades básicas del UHPC para el encamisado.



Se definió que el Módulo de Elasticidad es igual a 46000 MPa, mismo coeficiente de Poisson que el concreto de la columna, una resistencia a la tensión igual a 9.32 MPa con una resistencia a la compresión igual a 157 MPa. Estos valores se eligieron de manera que tuviera congruencia con los resultados investigados tanto teórica como experimentalmente.

Figura 26. Propiedades de tensión del UHPC para el encamisado.



Se utilizó un valor de *Tension Characteristic Size* igual a 10 mm, y un tamaño de agregado (*Agg Size*) de 1 mm, esto debido a que el UHPC posee agregados muy pequeños en la composición de su mezcla. Los valores con los que se definió la función de tensión del UHPC se muestran en la tabla de la Figura 27.

Figura 27. Función de tensión para el UHPC.

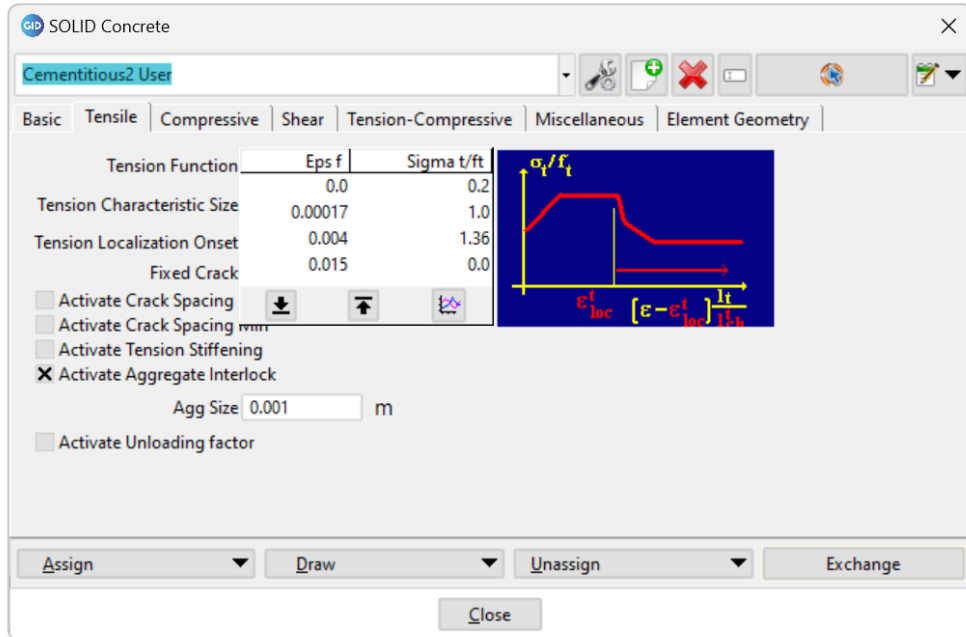
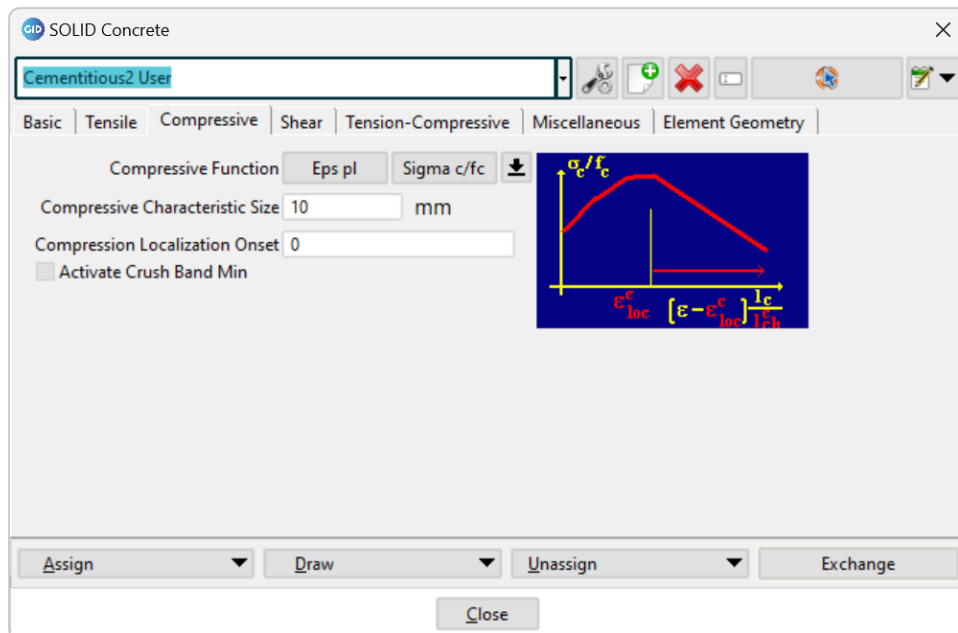


Figura 28. Propiedades de compresión del UHPC para el encamisado.



Ahora, los valores con los que se definió la función de tensión del UHPC se muestran en la tabla de la Figura 29:

Figura 29. Función de tensión para el UHPC.

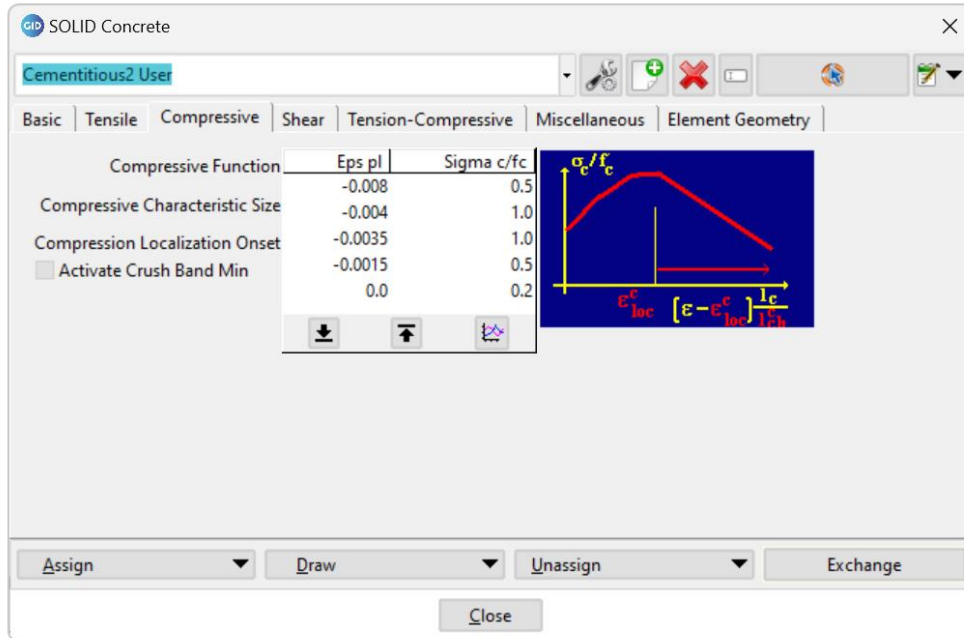


Figura 30. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).

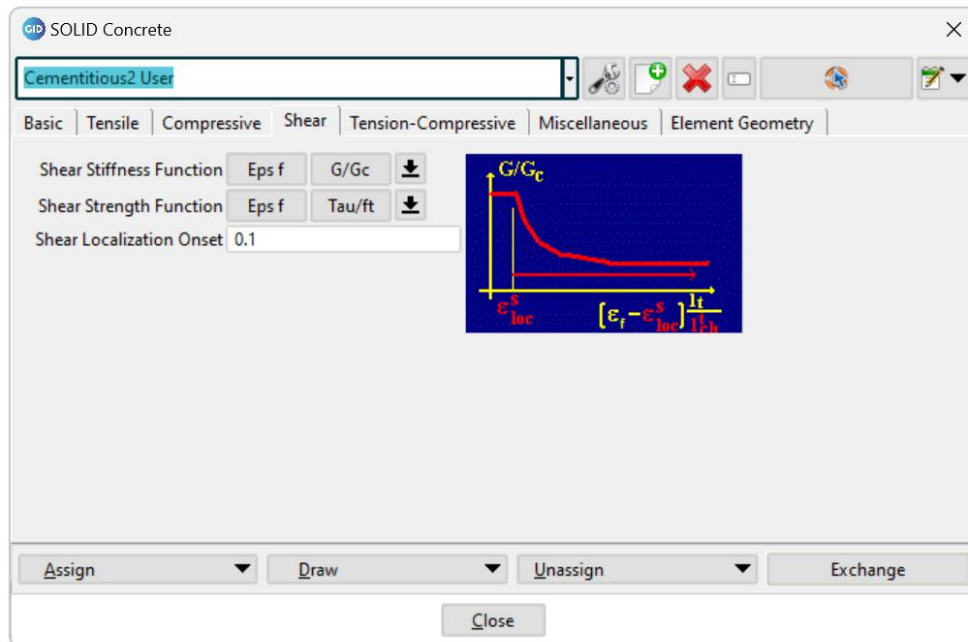


Figura 31. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).

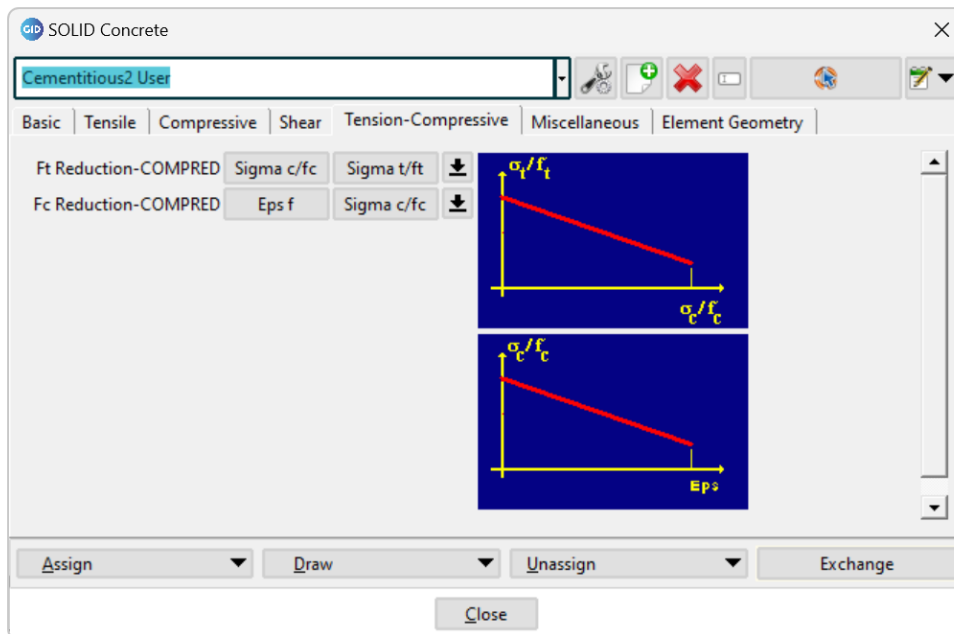


Figura 32. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).

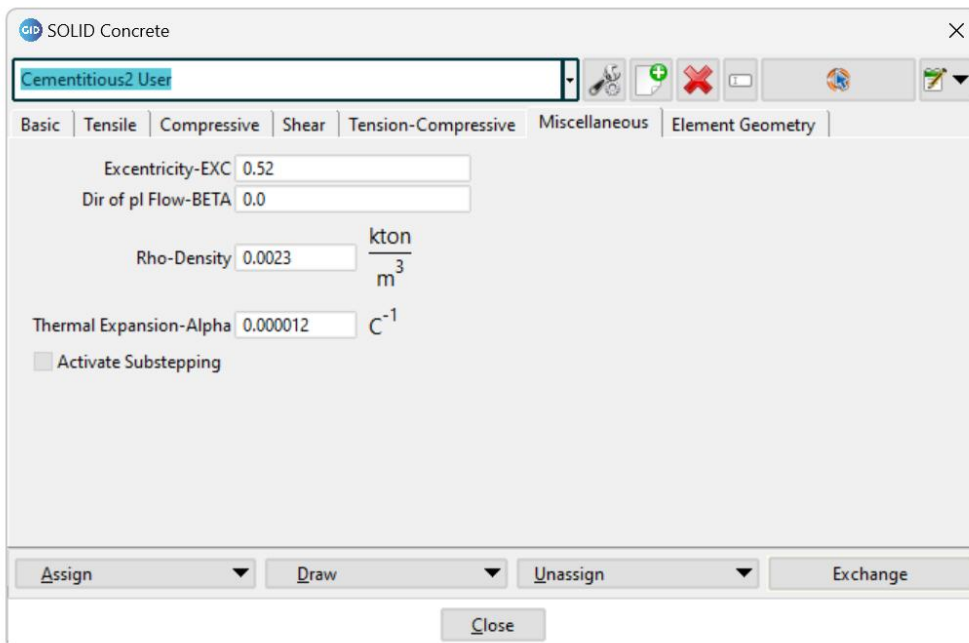
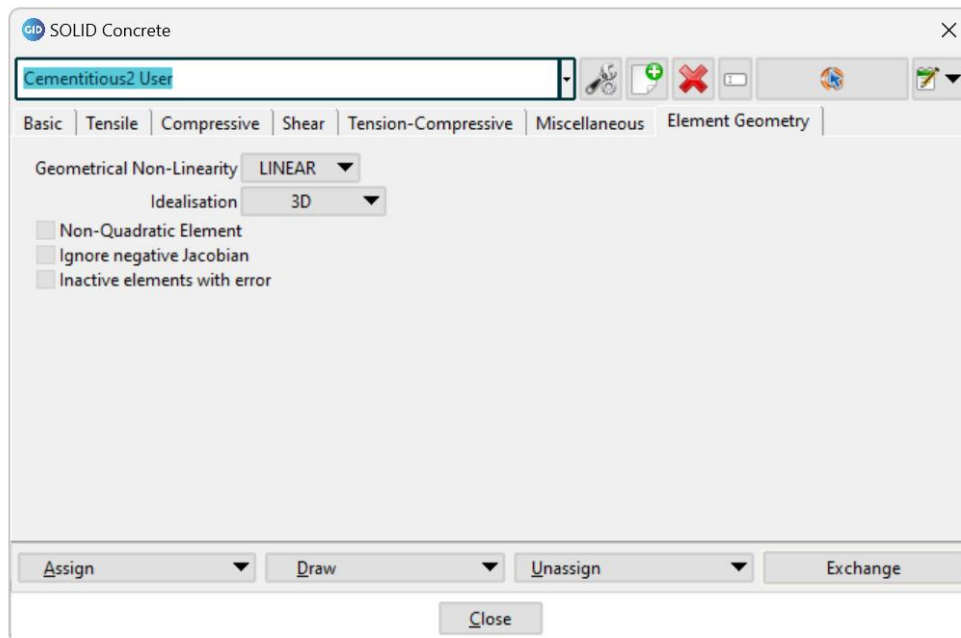


Figura 33. Propiedades sin modificar para el concreto convencional (valores predeterminados).



Para el caso del material de la placa, se mantuvieron los valores por predeterminados por el software. Esto se puede observar en las siguientes figuras:

Figura 34. Propiedades sin modificar para el material de la placa (valores predeterminados).

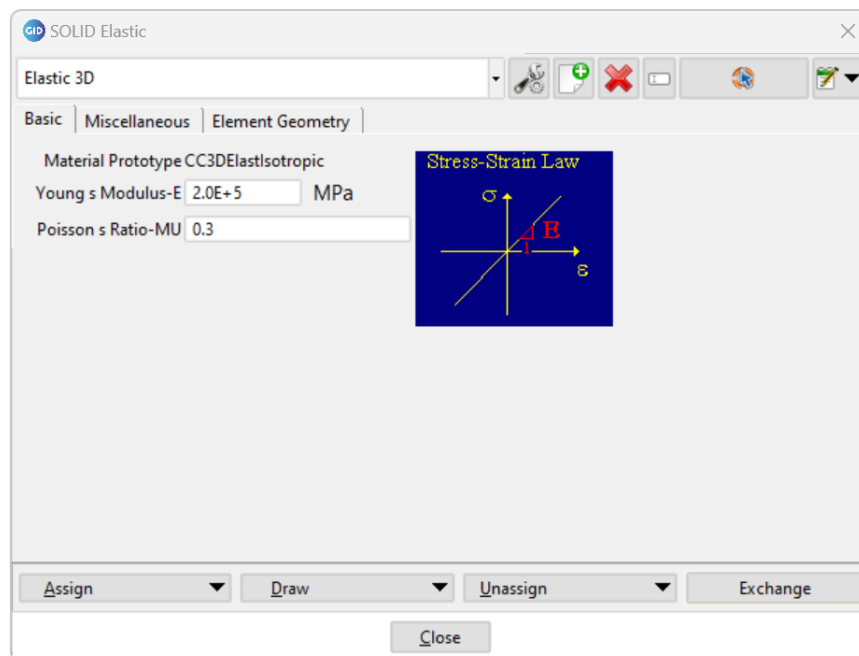


Figura 34. Propiedades sin modificar para el material de la placa (valores predeterminados).

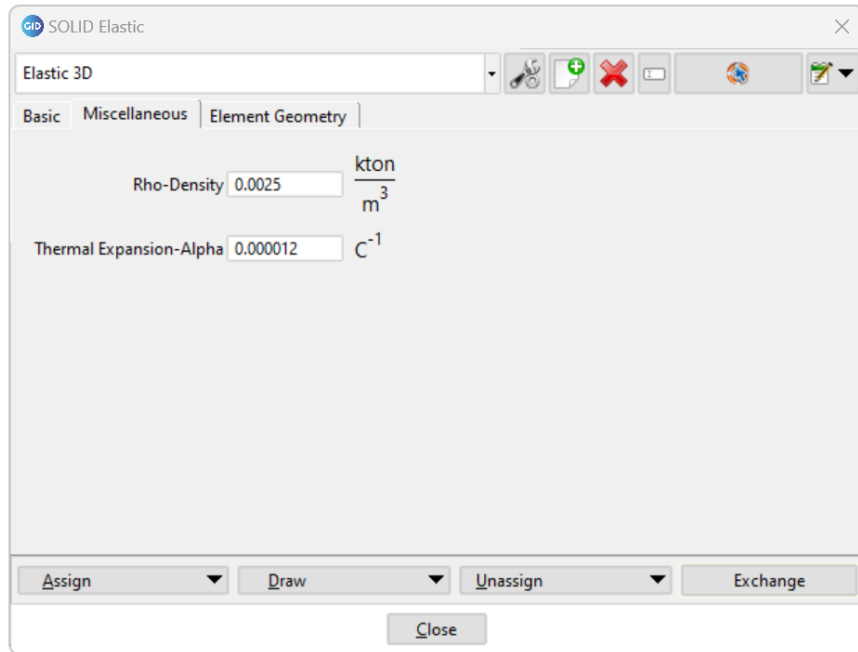
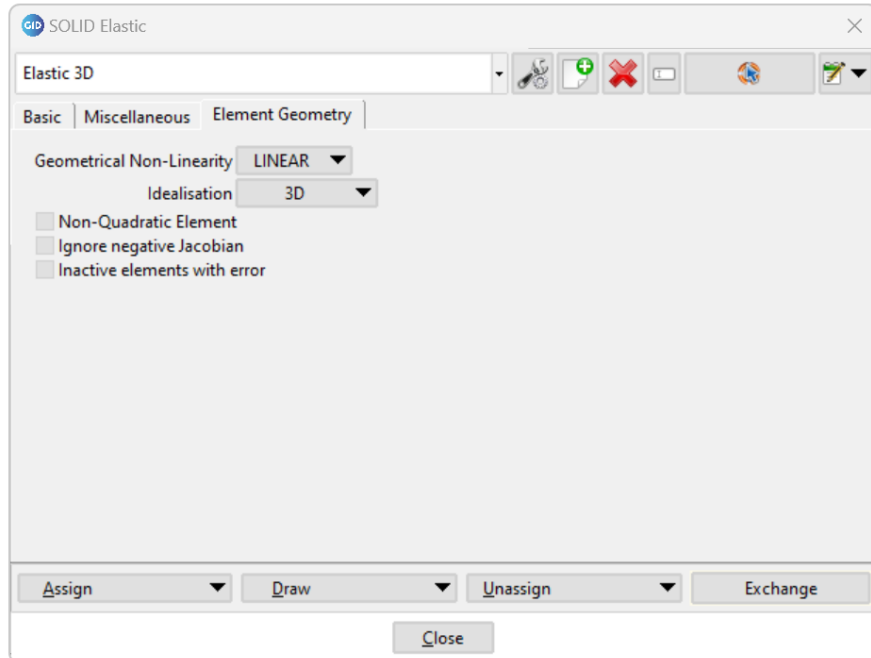


Figura 36. Propiedades sin modificar para el material de la placa (valores predeterminados).



Una vez finalizados los modelos se procedió a obtener el gráfico de esfuerzo-deformación de ambos para compararlos con los resultados experimentales (Apéndice 1 y 2). Para la columna con sección circular, los resultados tanto experimentales como teóricos se pueden observar en la siguiente figura:

Figura 37. Curva teórica de carga vs. desplazamiento del cilindro CC25.

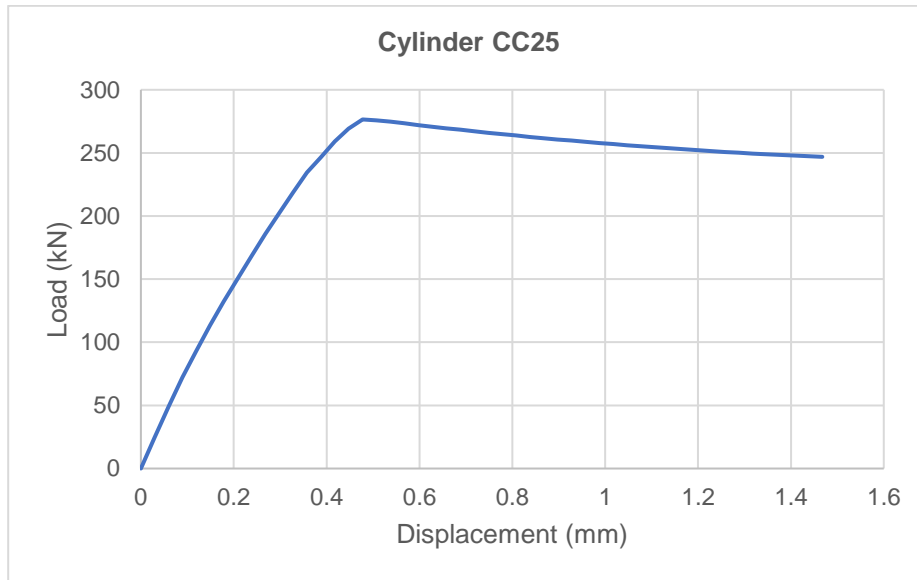
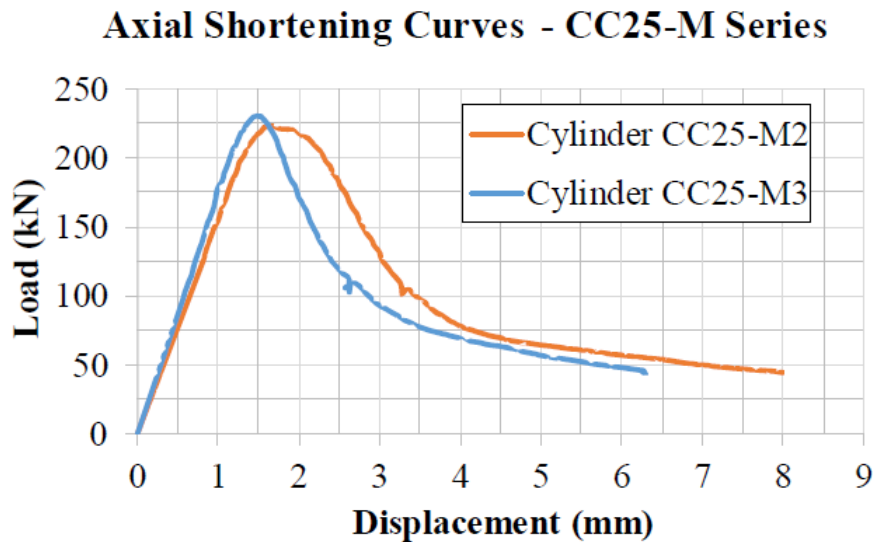


Figura 38. Curva experimental de carga vs. desplazamiento del cilindro CC25.



Fuente: Tsiostsias (2023).

Al comparar la Figura 37 y 38, se puede observar que el gráfico de la curva teórica indica un menor desplazamiento que la curva obtenida experimentalmente, y además que la carga máxima es superior en el caso teórico. Esto puede derivarse de diversas razones, ya que los especímenes elaborados en el laboratorio podrían presentar imperfecciones en su elaboración, como segregación, dimensiones inexactas, entre otros; lo que permite que existan diferencias significativas en el desempeño real del teórico.

Figura 39. Curva teórica de carga vs. desplazamiento del cilindro CR375.



El gráfico anterior muestra que, para el espécimen CR375, la carga máxima es superior a los 200 kN, mientras que el cilindro CC25 alcanza aproximadamente 275 kN. Además, si se realiza una comparación entre las Figuras 37 y 39, se puede observar que el modelo CC25 presenta mayor resistencia para un mismo desplazamiento vertical aplicado, además, el CC25 presenta mayor ductilidad que CR375, esto se puede observar en ambas curvas generadas, ya que la carga para CR375 decae significativamente más cuando se desplaza. Una vez determinado que los modelos presentan un buen comportamiento y representan se procede a realizar los distintos modelos del estudio paramétrico a partir de estos.

3.2.2 Definición del estudio paramétrico

En el siguiente cuadro se resumen los diferentes parámetros utilizados en las columnas de sección transversal circular para llevar a cabo el estudio paramétrico:

Cuadro 3. Parámetros por utilizar en el estudio paramétrico para la columna a escala de sección circular.

Columna sección transversal circular												
Columna	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9	CC10	CC11	CC12
t/d	0.05				0.1				0.15			
f _c (MPa)	30	30	40	40	30	30	40	40	30	30	40	40
f _{c,UHPC} (MPa)	120	120	150	150	120	120	150	150	120	120	150	150
f _{t,UHPC} (MPa)	7.2	7.2	8.0	8.0	7.2	7.2	8.0	8.0	7.2	7.2	8.0	8.0
f _{cr,UHPC} (MPa)	6.5	6.5	7.3	7.3	6.5	6.5	7.3	7.3	6.5	6.5	7.3	7.3
ε _{loc,UHPC}	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004

Y los parámetros utilizados en las columnas de sección transversal rectangular se encuentran en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Parámetros por utilizar en el estudio paramétrico para la columna a escala de sección rectangular.

Columna sección transversal rectangular												
Columna	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CR7	CR8	CR9	CR10	CR11	CR12
t/d	0.05				0.1				0.15			
f'_c (MPa)	30	30	40	30	30	40	30	30	40	30	30	40
$f'_{c,UHPC}$ (MPa)	120	120	150	120	120	150	120	120	150	120	120	150
$f'_{t,UHPC}$ (MPa)	7.2	7.2	8.0	7.2	7.2	8.0	7.2	7.2	8.0	7.2	7.2	8.0
$f'_{cr,UHPC}$ (MPa)	6.5	6.5	7.3	6.5	6.5	7.3	6.5	6.5	7.3	6.5	6.5	7.3
$\epsilon_{loc,UHPC}$	0.002	0.004	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.004	0.002

Donde f'_c es la resistencia a compresión del concreto de la columna confinada, $f'_{c,UHPC}$ es la resistencia a compresión del UHPC (encamisado), $f'_{t,UHPC}$ es la resistencia a tensión del UHPC (encamisado), $f'_{cr,UHPC}$ es la resistencia a la que el UHPC empieza a agrietarse (calculado) y $\epsilon_{loc,UHPC}$ es la deformación localizada en el punto de esfuerzo máximo para la función de compresión del concreto definida para el material UHPC en Atena.

Para obtener las distintas relaciones entre el espesor del encamisado y el diámetro/lado de la sección transversal de la columna (t/d) cilíndrica y prismática, respectivamente; se modificó únicamente el espesor de la columna, utilizando así una columna de misma dimensión para cada caso, respectivamente (sección transversal circular y rectangular).

Figura 40. Columna con una relación t/d igual a 0.05.

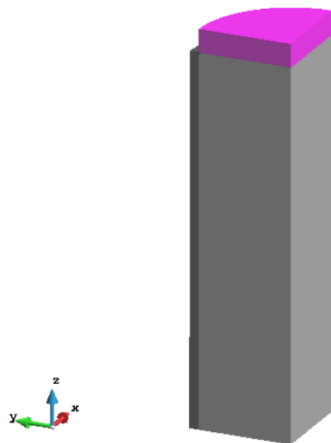


Figura 41. Columna con una relación t/d igual a 0.10.

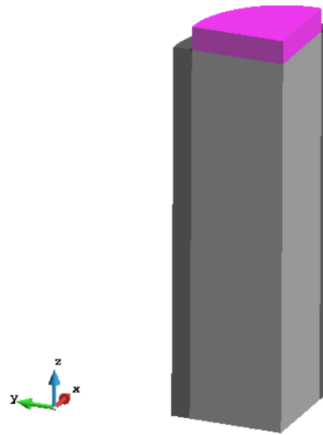


Figura 42. Columna con una relación t/d igual a 0.15.

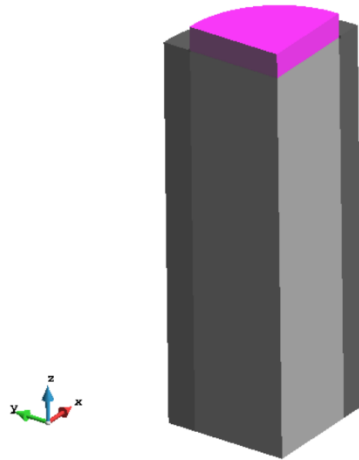


Figura 43. Columna con una relación t/d igual a 0.05.

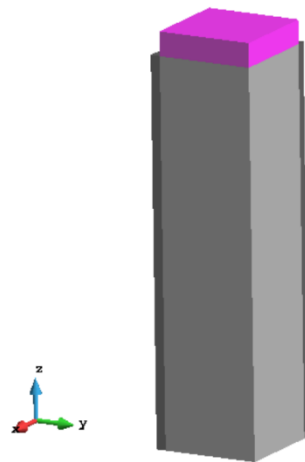


Figura 44. Columna con una relación t/d igual a 0.10.

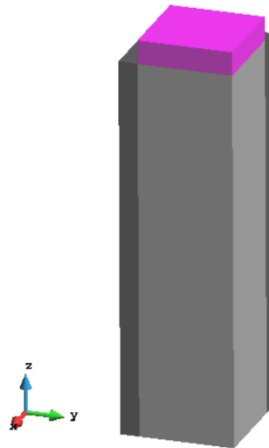
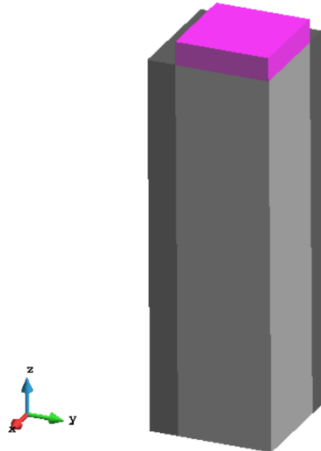
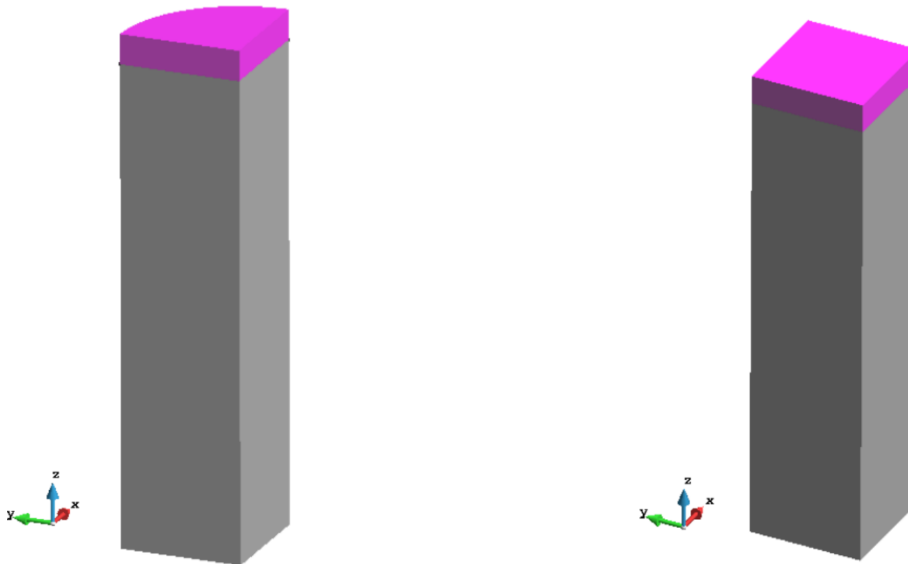


Figura 45. Columna con una relación t/d igual a 0.15.



Por tanto, al finalizar el estudio paramétrico se cuentan con 12 columnas cilíndricas y 12 columnas prismáticas con encamisado. Para determinar el efecto del confinamiento al compararlo con columnas sin encamisado, también se elaboraron dichos modelos. Estos se pueden observar en las siguientes figuras:

Figura 46. Columna circular y rectangular sin encamisado.



Una vez que se cuenta con los modelos, se procede a realizar el estudio paramétrico, y los resultados de este se muestran en la siguiente sección.

3.2.3 Análisis de resultados del estudio paramétrico

En esta sección se muestran y analizan los resultados obtenidos del estudio paramétrico. Los resultados consisten en la obtención de los gráficos donde se representen las magnitudes de esfuerzo y la deformación tanto axial como lateral de cada una de las 12 columnas definidas y elaboradas para el estudio paramétrico, además de las figuras donde se pueden observar gráficamente la magnitud de Sigma XX en el encamisado y en la columna confinada, asimismo, del Sigma ZZ en la sección transversal de la columna confinada (Apéndices 27 y 28). A continuación, se encuentran los gráficos de esfuerzo contra deformación axial y lateral (Apéndice del 3 al 26) para cada relación t/d de las columnas cilíndricas:

Figura 47. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal circular una relación t/d igual a 0.05.

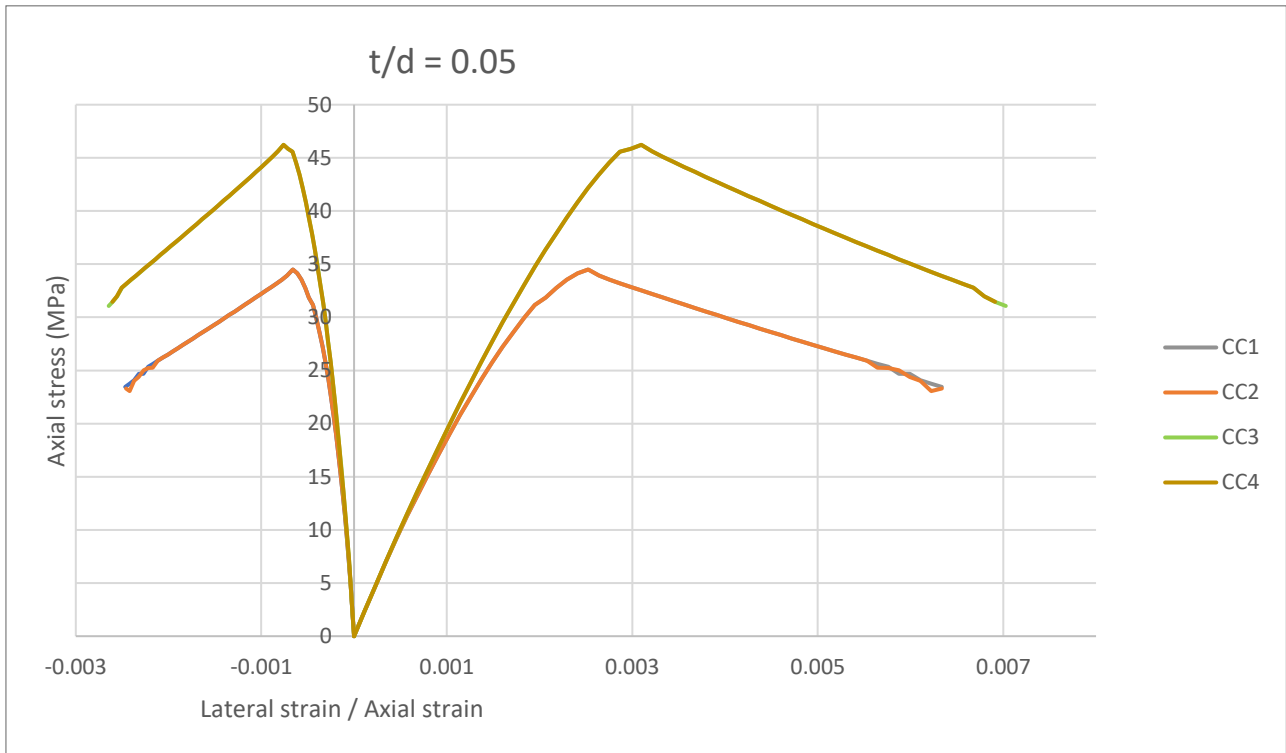


Figura 48. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal circular una relación t/d igual a 0.05 en comparación con la columna sin encamisado.

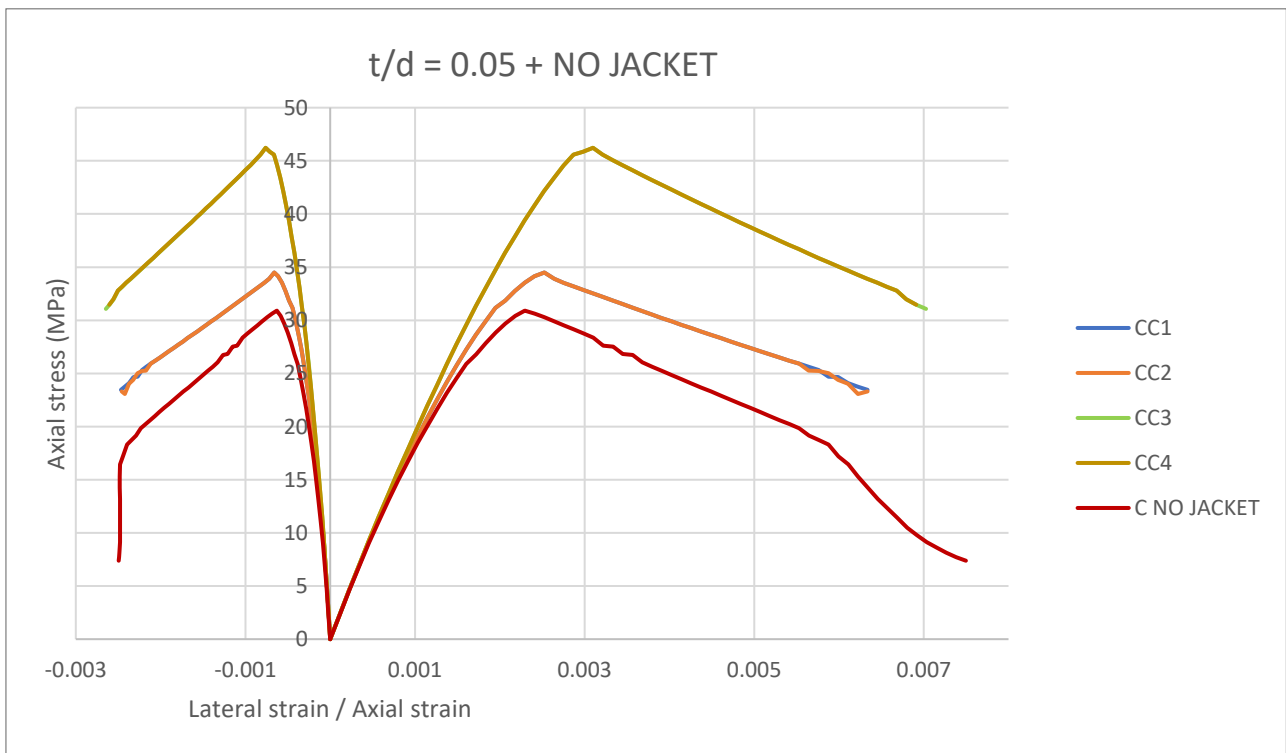


Figura 49. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal circular una relación t/d igual a 0.10.

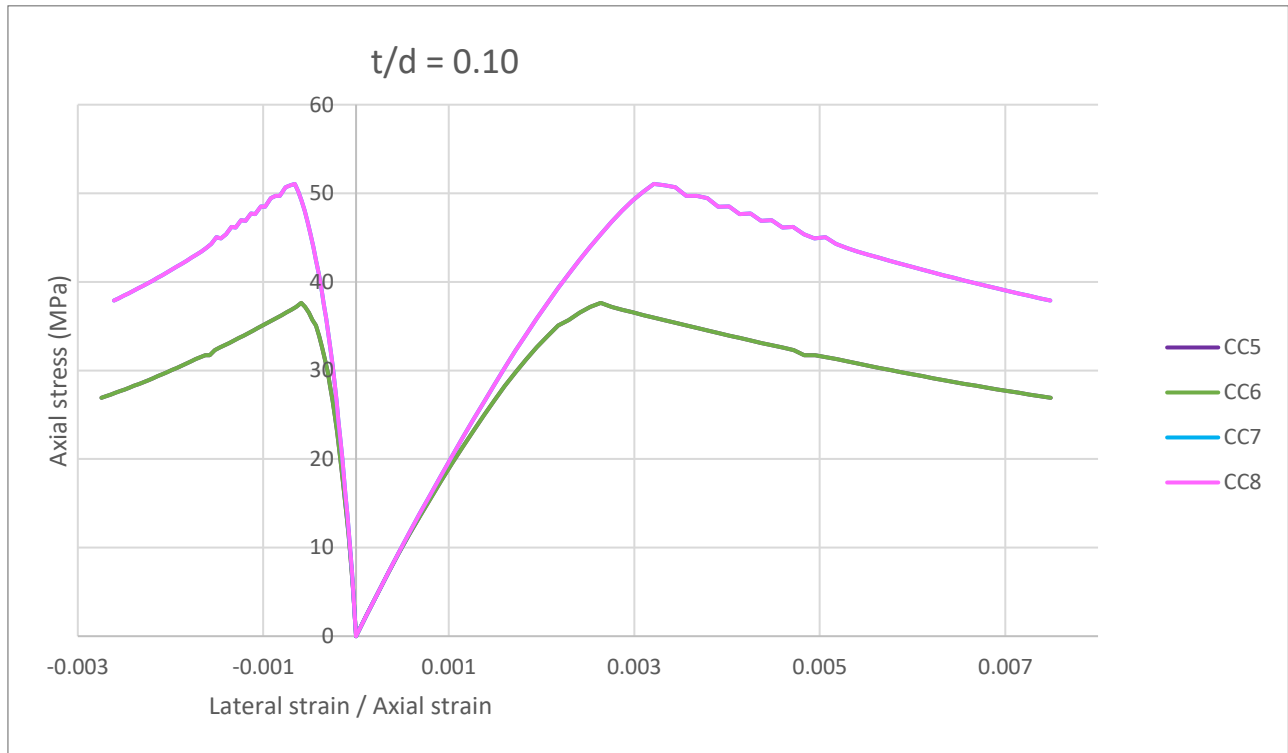


Figura 50. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal circular una relación t/d igual a 0.10 en comparación con la columna sin encamisado.

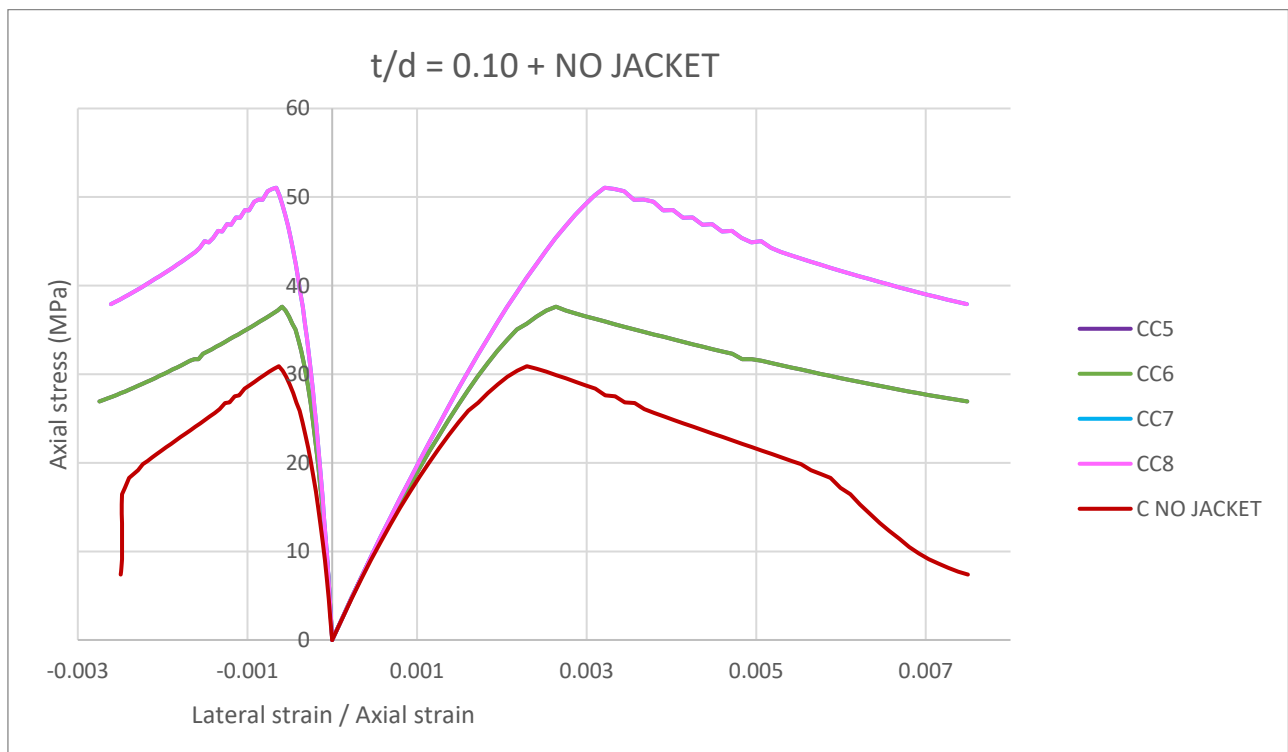


Figura 51. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal circular una relación t/d igual a 0.15.

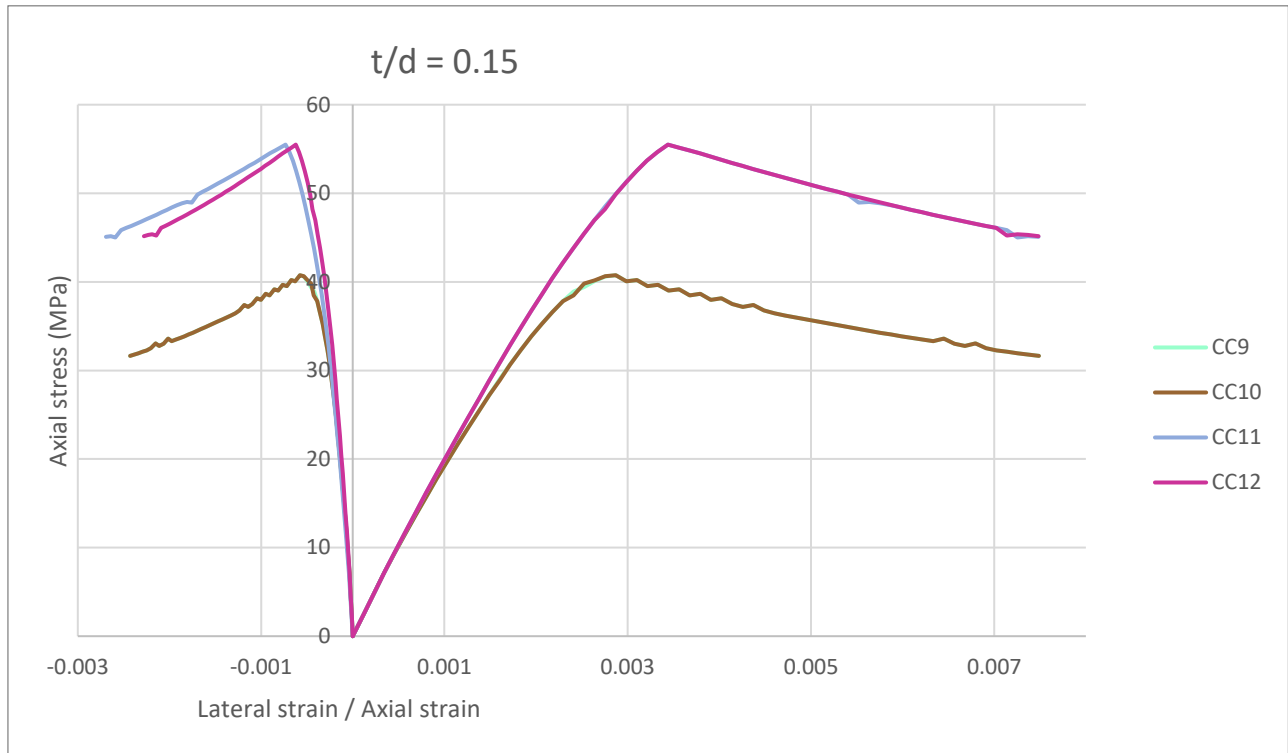
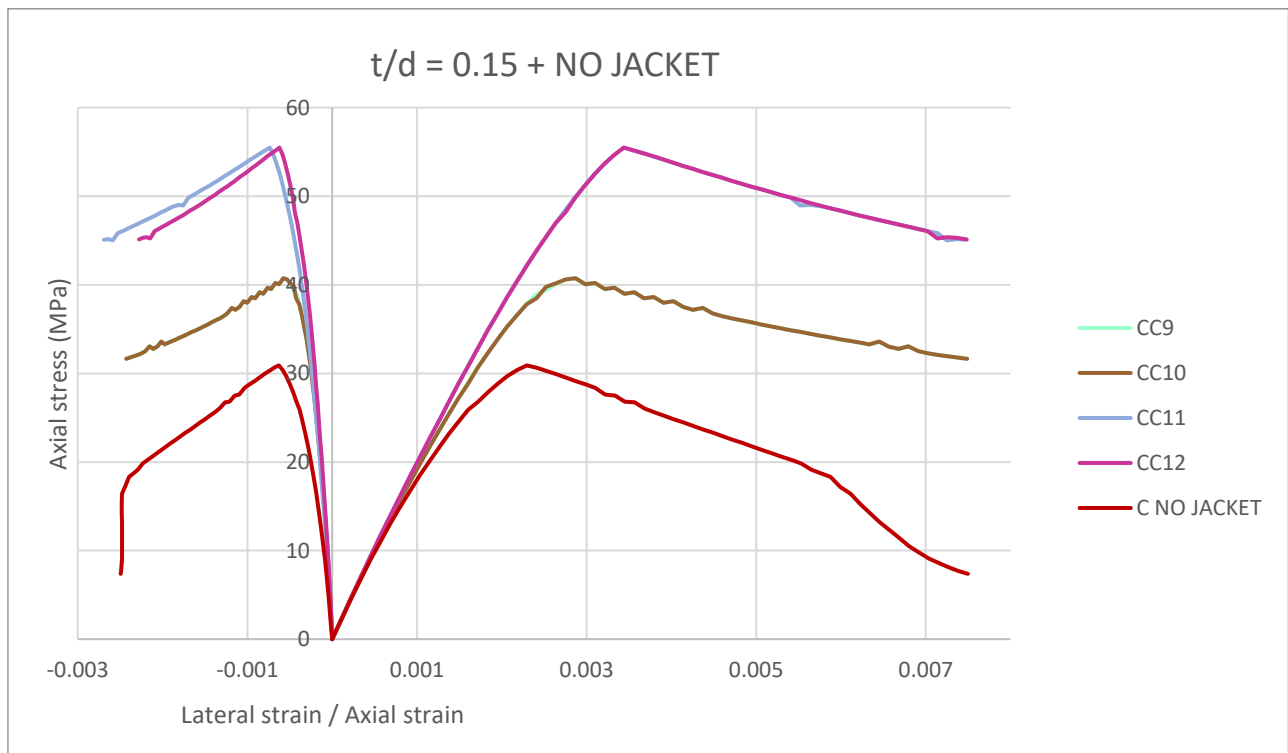


Figura 52. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal circular una relación t/d igual a 0.15 en comparación con la columna sin encamisado.



Ahora, los siguientes gráficos de esfuerzo contra deformación axial y lateral para cada relación t/d corresponden a las columnas prismáticas:

Figura 53. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal rectangular una relación t/d igual a 0.05.

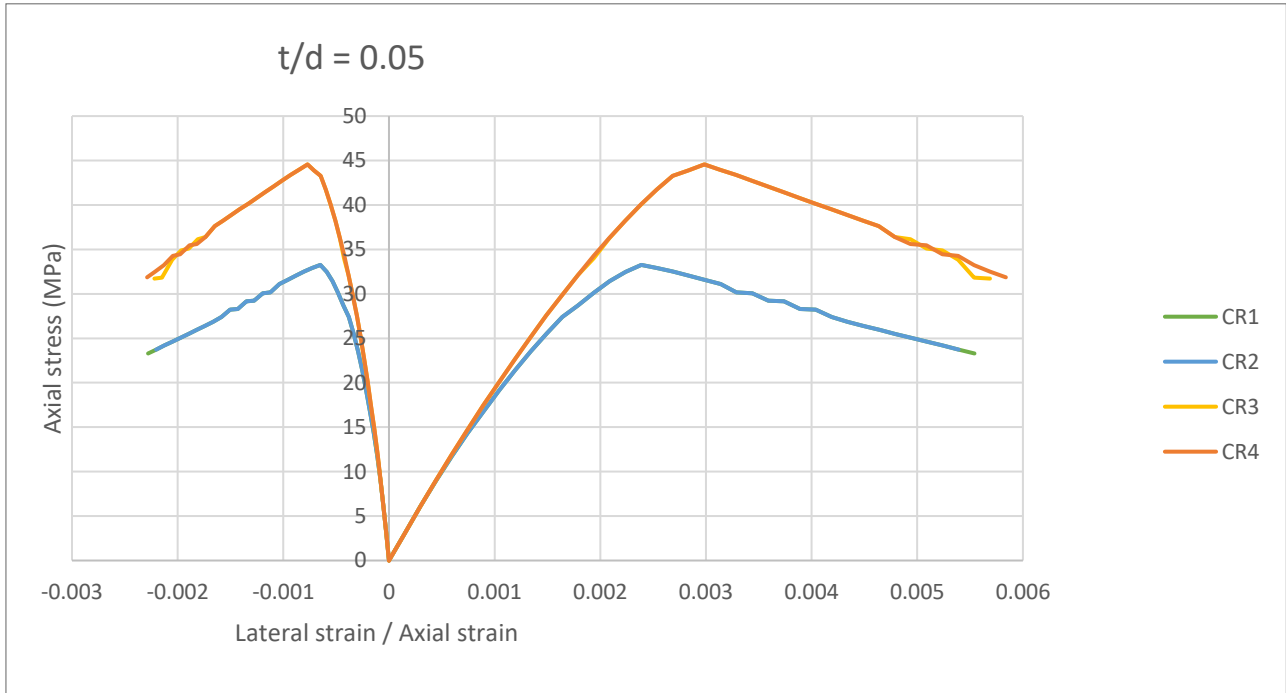


Figura 54. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal rectangular una relación t/d igual a 0.05 en comparación con la columna sin encamisado.

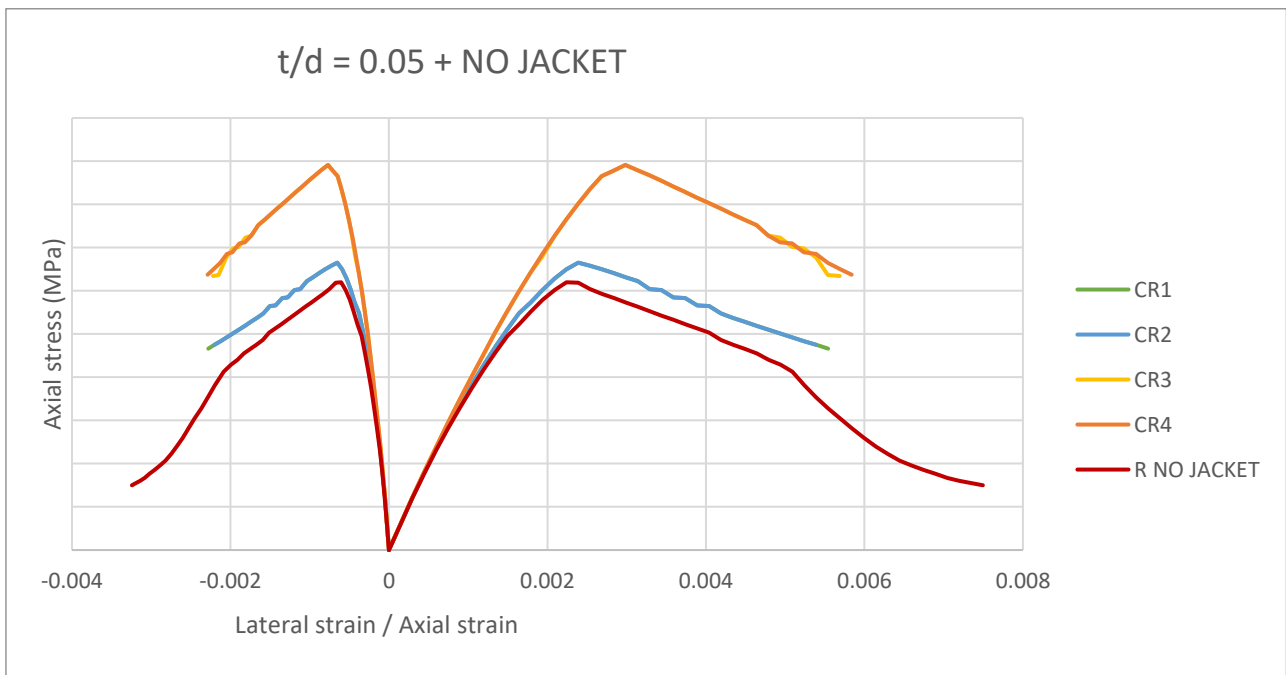


Figura 55. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal rectangular una relación t/d igual a 0.10.

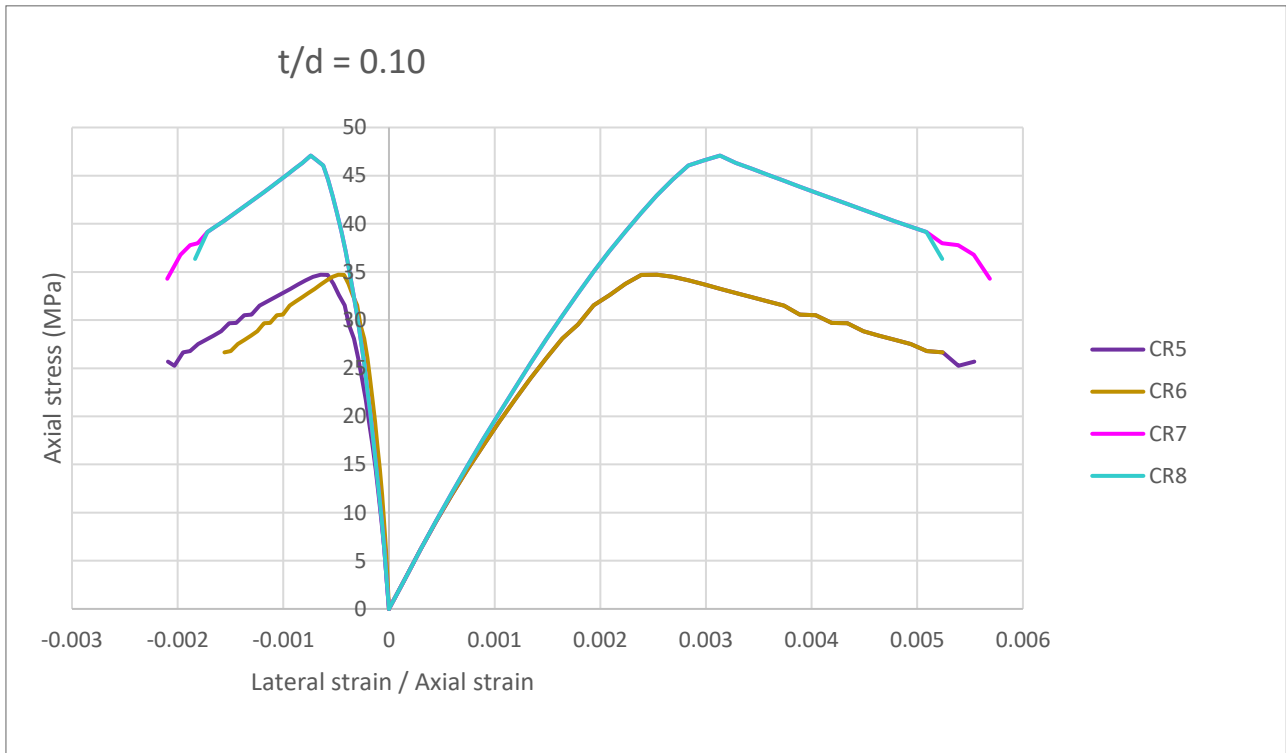


Figura 56. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal rectangular una relación t/d igual a 0.10 en comparación con la columna sin encamisado.

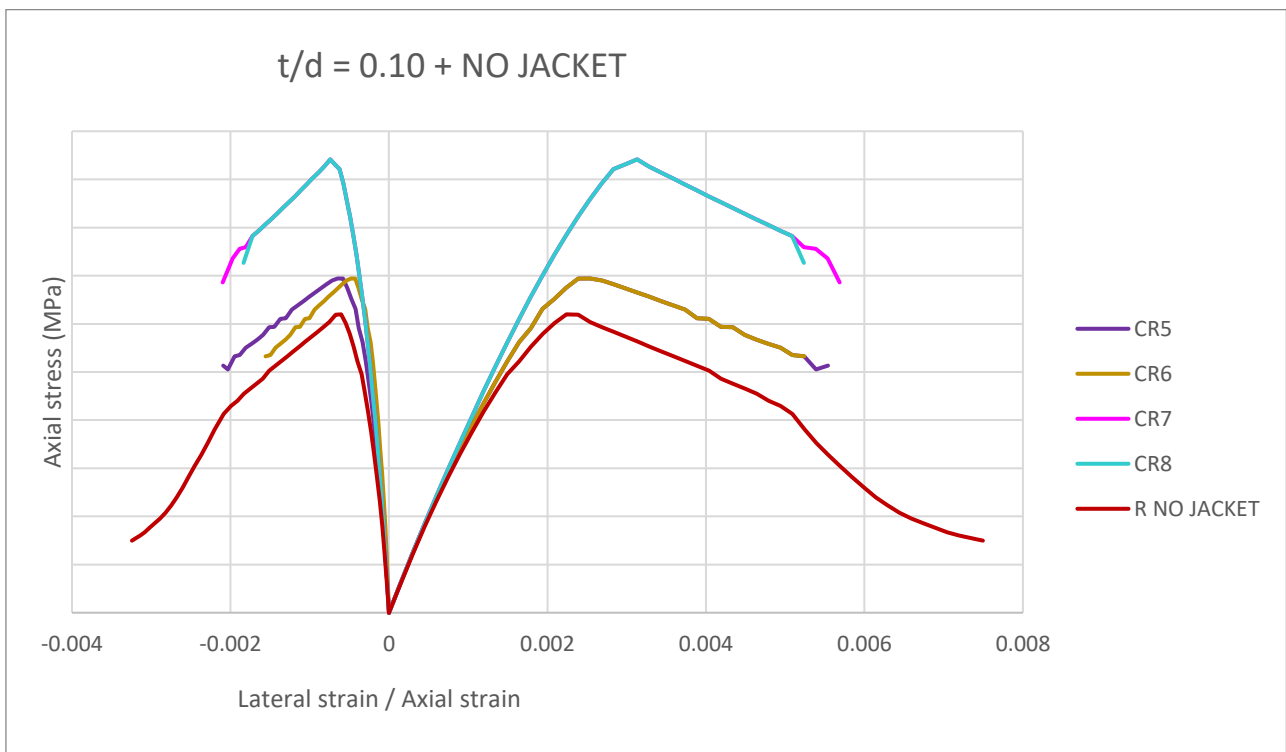


Figura 57. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal rectangular una relación t/d igual a 0.15.

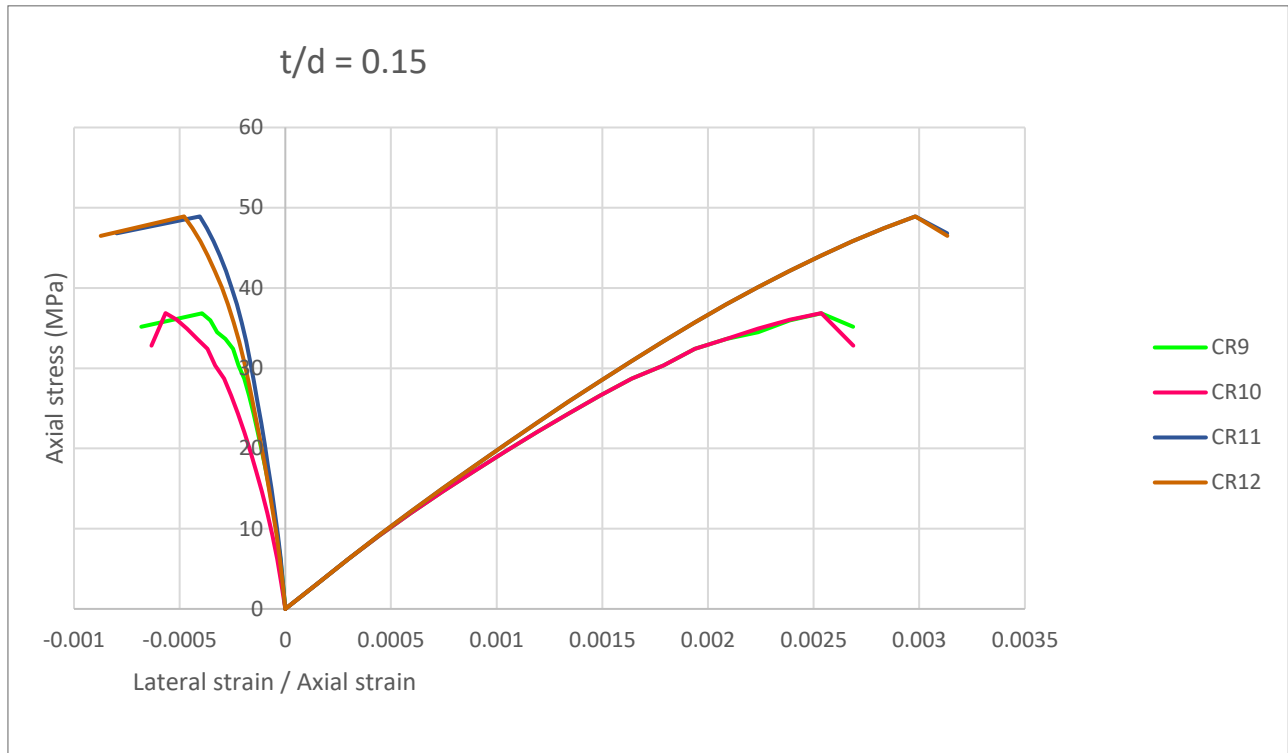
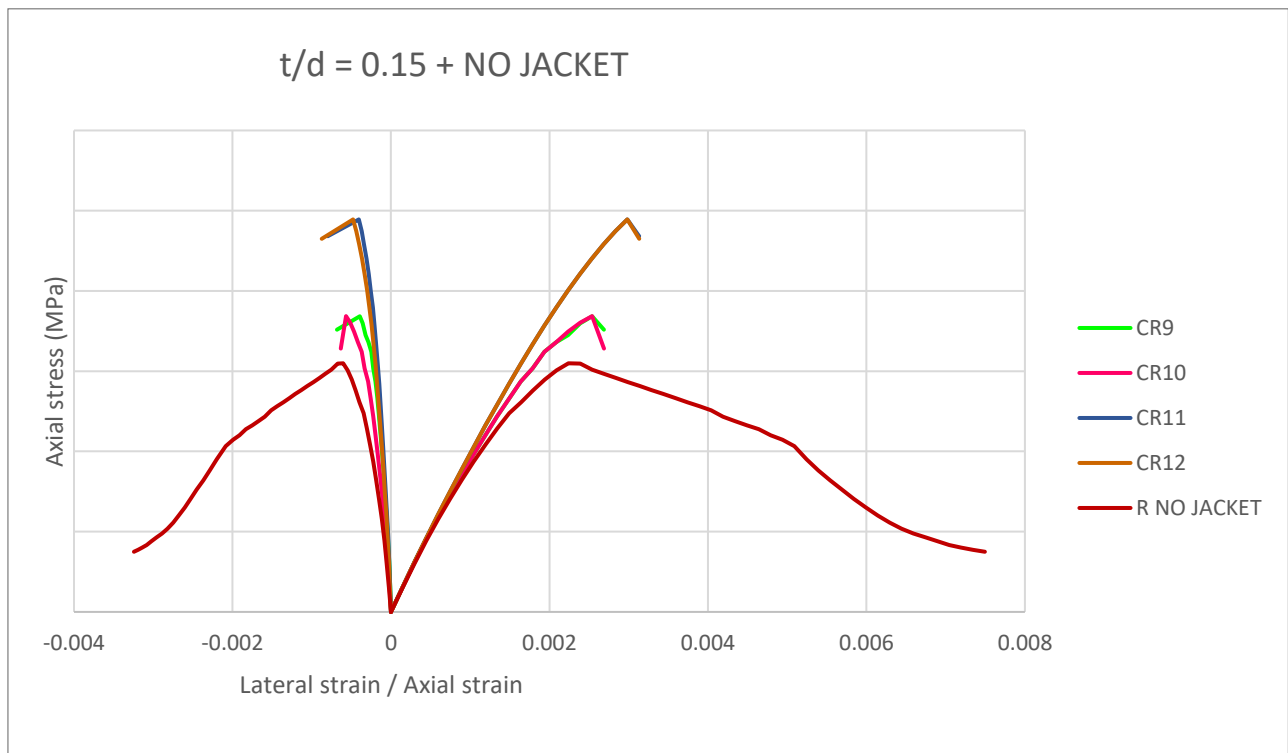


Figura 58. Esfuerzo contra deformación axial y lateral en columnas con sección transversal rectangular una relación t/d igual a 0.15 en comparación con la columna sin encamisado.



Para las columnas cilíndricas CC1, CC2, CC3 y CC4 en la Figura 48 se puede observar que existe un incremento en el esfuerzo de la columna cuando se aumenta la resistencia a la compresión del concreto convencional y del UHPC. Además, se puede observar en la Figura 48, que para el punto más alto de esfuerzo en las columnas que presentan encamisados, presentan mayores deformaciones que la columna que no presenta encamisado.

Si se comparan las curvas de esfuerzo deformación entre las diferentes relaciones de aspecto t/d, se puede observar que, para una misma resistencia a la compresión de ambos concretos, si se aumenta el espesor del encamisado, este permite alcanzar un mayor esfuerzo y asimismo mayores deformaciones en el máximo esfuerzo.

Un resultado importante se puede observar entre los pares de columnas CC1 y CC2, CC3 y CC4, CC5 y CC6, CC7 y CC8, CC9 y CC10 y CC11 y CC12; ya que entre cada uno de estos pares de columnas el parámetro diferente que poseen consiste es la deformación (función), cuando ocurre el máximo esfuerzo de la columna, sin embargo, las curvas de esfuerzo-deformación son casi idénticas. De la misma manera ocurre para los pares de columnas rectangulares CR1 y CR2, CR3 y CR4, CR5 y CR6, CR7 y CR8, CR9 y CR10; y CR11 y C12. Para el caso de estas últimas, también se determinó que entre mayor sea el espesor del encamisado, mayores esfuerzos y deformaciones alcanza.

El incremento del esfuerzo (MPa) y de la deformación para cada una de las 24 columnas con respecto a la columna correspondiente sin encamisado, en porcentajes, se observa en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. Incremento (%) de esfuerzo (MPa) y deformación de las columnas que poseen encamisado en comparación con la columna sin encamisado en el punto máximo de esfuerzo.

Columna sección circular			Columna sección rectangular		
Columna	Esfuerzo (%)	Deformación axial (%)	Columna	Esfuerzo (%)	Deformación axial (%)
CC1	11.65	9.97	CR1	7.36	6.65
CC2	11.65	9.97	CR2	7.36	6.65
CC3	49.58	34.93	CR3	43.83	33.27
CC4	49.58	34.93	CR4	43.83	33.27
CC5	21.78	14.98	CR5	12.04	13.35
CC6	21.78	14.98	CR6	12.04	13.35
CC7	65.24	39.90	CR7	51.97	39.93
CC8	65.24	39.90	CR8	51.97	39.93
CC9	31.88	25.00	CR9	18.92	13.31
CC10	31.88	25.00	CR10	18.92	13.31
CC11	79.58	49.87	CR11	57.88	33.18
CC12	79.58	49.87	CR12	57.88	33.18

Por otra parte, en los Apéndices 27 y 28 se puede observar de manera gráfica 1) el desplazamiento de lateral (en este caso se seleccionó el desplazamiento en el eje X); 2) el esfuerzo axial y 3) el esfuerzo lateral de cada una de las columnas, tanto las circulares como rectangulares; y se comparan con las columnas sin encamisado. A partir de este cuadro comparativo se determinó que el patrón de las grietas para los dos tipos de columnas, son verticales. Por lo general y según lo observado en experimentos de laboratorio, la falla de los encamisados se genera mediante grietas verticales.

En cuanto a los esfuerzos, se puede observar que, para los modelos con sección transversal circular, los valores no varían en el núcleo, es decir, la distribución del esfuerzo confinado es uniforme. Para los modelos con sección rectangular, se observa que existe una variación de valores del esfuerzo para el núcleo confinado: esto se debe a su geometría. Se observa que existe un mayor esfuerzo de confinamiento en las esquinas interiores, tanto en el esfuerzo lateral (σ_{XX}) como en el esfuerzo vertical (σ_{ZZ}).

En el Apéndice 28 también se puede observar el esfuerzo σ_{XX} en el encamisado, el cual varía según su espesor. Los valores máximos rondan los 8 MPa.

3.3 Aplicación de encamisado de UHPC en una pila de puente ubicado en Costa Rica.

El puente seleccionado para realizar la aplicación del método de reparación estudiado es el puente ubicado en la Ruta Primaria N°2 sobre el Río Lagarto en el kilómetro 316.14, ubicado en la provincia de Puntarenas, específicamente en el cantón de Golfito, en el distrito de Guaycara. Este puente fue diseñado el 12 de noviembre de 1957 y construido en el año 1961, y está conformado por tres pilas de concreto reforzado y el tablero, y este último elemento se conforma por una losa de concreto y vigas longitudinales de acero estructural. En la siguiente imagen se observa la vista general del puente:

Figura 59. Vista general del puente Río Lagarto.



Fuente: Informe de Inspección de Inventario y Visual de Daños en puentes (Puente Sobre Río Lagarto), TEC (2015).

Las pilas del presente puente presentan algunos daños, esto según el informe respectivo de daños elaborado en el año 2015 por el CIVCO para el CONAVI. Para determinar el efecto de la aplicación de encamisados de UHPC como método de reparación, se tomó la pila número 3 (última pila de izquierda a derecha), ya que, de acuerdo con este informe, en el cuerpo principal de la pila 3 se observaron manchas blancas producto de la eflorescencia, grietas en muchos lugares con un espesor de 0.30 mm en un sitio puntual, además de abrasión en la parte inferior de la pila. En el Anexo 1 se muestra el esquema de daños de la pila 3.

Si bien la mayoría de los puentes del país que poseen pilas en su subestructura no presentan daños importantes en estas, se tomó como base este puente y las dimensiones de la pila para determinar el efecto de confinamiento que aporta el encamisado a una sección circular particular. Para ello, primeramente, se estimó el peso de la estructura que recibe el puente.

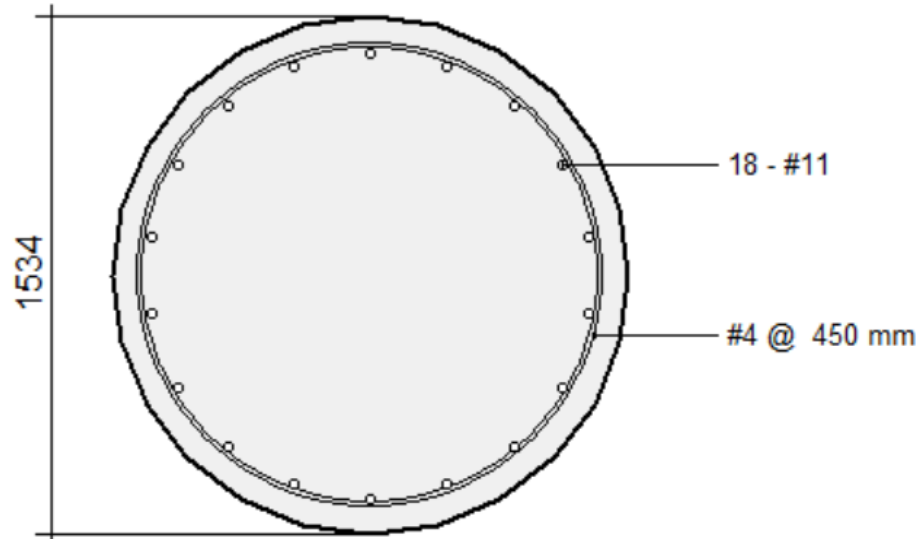
De acuerdo con el *Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica 2014-2018*, se menciona que los puentes deben ser capaces de resistir los tipos de cargas muertas, vivas primarias y secundarias. Las cargas muertas consisten en cargas estáticas relacionadas con el peso propio de la estructura, es decir,

estas actúan siempre sobre la estructura. Las cargas vivas primarias son cargas temporales, las cargas vehiculares son consideradas de este tipo. Los vehículos estándares utilizados para el diseño y desempeño de puentes son los establecidos por la AASHTO, también se debe tomar en cuenta el Decreto 33773 del MOPT establece el diagrama de pesos máximos permitidos en camiones unitarios y camiones tipo C3, C4 y T3-S2 para transporte de mezcla asfáltica en caliente, para rutas nacionales y cantonales.

Las cargas vivas secundarias que se debe considerar al menos son: fuerza sísmica, presión del terreno, fuerza centrífuga en puentes curvos, la carga viva por impacto (del vehículo a la entrada del puente) estimada como un 33% de la carga de diseño, carga por nieve, carga de viento, carga peatonal, entre otras. Sin embargo, en este caso se tomó en cuenta únicamente la carga muerta o permanente debido al alcance del presente proyecto, y para ello se estimó este valor, según el Apéndice 29, utilizando las dimensiones e información a partir de los planos (Anexos 1, 2, 3, 4 y 5). El valor de la carga estimada que soporta la pila 3 del puente seleccionado es 990 kN.

Asimismo, se modeló la columna en el software Response2000, para obtener el respectivo análisis sin la aplicación del encamisado. Para esto, se utilizó la información disponible de la sección transversal de la pila a partir de los planos estructurales (Anexo 4). Se determinó que la sección tiene un radio de 2'6", por lo que el diámetro es igual a 1534 mm, como se observa en la siguiente figura:

Figura 60. Dimensiones y refuerzo de acero de sección transversal de la pila 3.

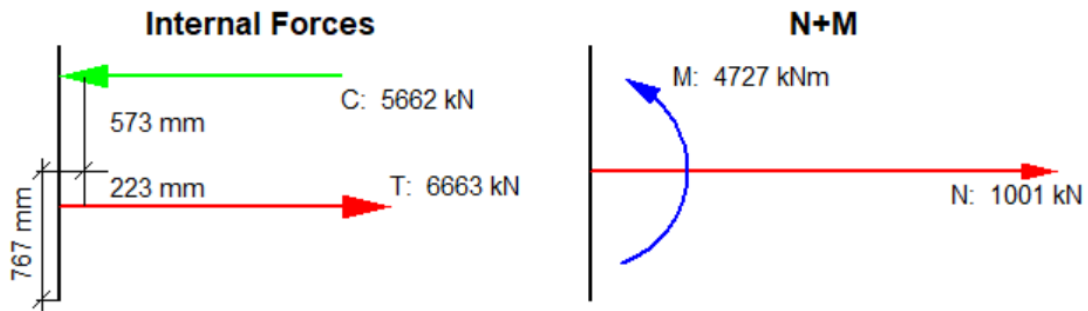


Fuente: elaboración propia mediante Response2000.

3.3.1 Análisis de resultados de la aplicación del encamisado

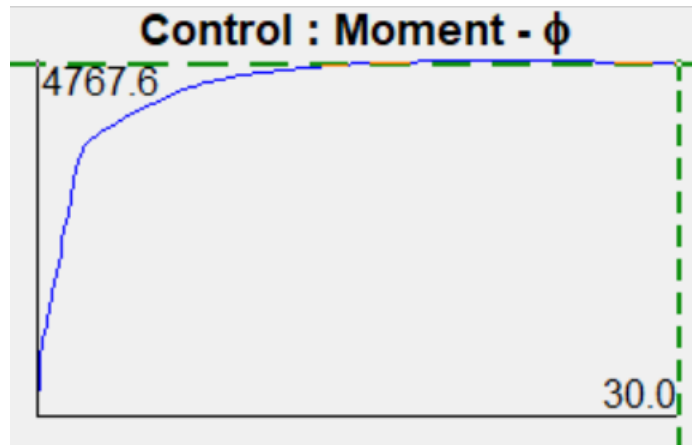
Algunos de los resultados relevantes obtenidos del análisis estructural de la pila Response2000 se observa en las siguientes figuras, como los valores de las fuerzas internas y momentos:

Figura 61. Diagrama de fuerzas internas y diagrama de carga y momento flexionante.



Fuente: obtenido mediante Response2000.

Figura 62. Gráfico Momento (eje vertical) vs. Curvatura (eje horizontal) de la pila 3 más allá del momento flector máximo.



Fuente: obtenido mediante Response2000.

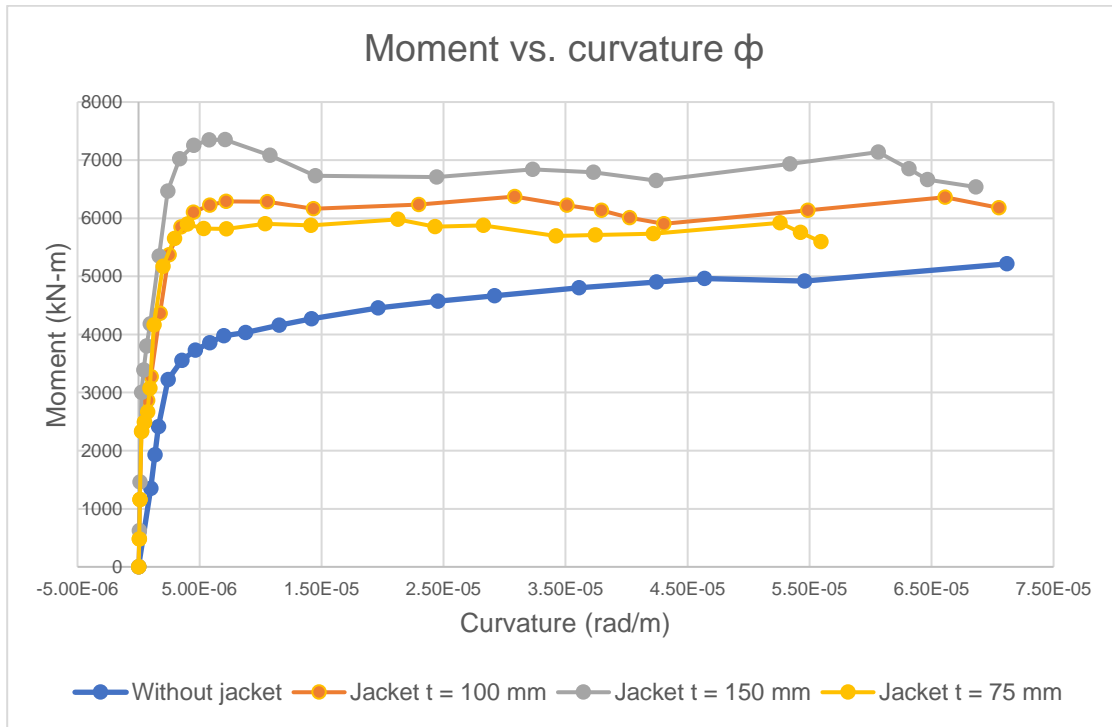
Donde el momento flector máximo es 4767 kN-m en la deformación máxima y la curvatura es 0.030 rad/m.

Ahora, para determinar cuál es el efecto al aplicar el encamisado a la columna, se realizó un análisis seccional. En este caso, se pretende determinar el comportamiento del gráfico Momento vs. Curvatura al utilizar tres diferentes espesores de encamisado. Para ello, se elaboró una hoja de cálculo (Apéndice 30) que permite determinar el gráfico Momento vs. Curvatura de la pila sin el encamisado, y asimismo graficar cada una de estas curvas con espesores de encamisado iguales a 75 mm, 100 mm y 150 mm. Se tomaron estos valores en específico debido a que un espesor de encamisado de 75 mm para una columna con un diámetro

de 1534 mm tiene una relación espesor/diámetro (t/d) de aproximadamente 0.05, y para una relación de 0.10, el espesor es aproximadamente 150 mm. Además, se seleccionó un tercer espesor de 100 mm.

A continuación, se observa el gráfico de Momento vs. Curvatura para la pila que no presenta encamisado, comparándolo con los tres diferentes casos de encamisado:

Figura 63. Gráfico Momento vs. Curvatura de la pila 3 para los cuatro diferentes casos estudiados.



El diagrama Momento vs. Curvatura representa gráficamente la relación que existe entre el momento flector y la curvatura de un elemento estructural, en este caso, de la pila seleccionada. Este diagrama es útil en el análisis de estructuras cuando se quiere estudiar el comportamiento de materiales no lineales, como el concreto reforzado. El momento flector es el momento que actúa sobre la pila y causa la flexión, por su parte, la curvatura es la medida de cuán curvado está el elemento en un punto dado, y está relacionada con la deformación de la pila cuando esta se encuentra bajo carga. Se mide como el inverso del radio de curvatura (1/m).

Al comparar la curva azul (pila sin encamisado) de la Figura 63 con la Figura 62 obtenida de Response2000, se puede observar que los resultados tanto del software como de la hoja de cálculo elaborada son muy similares ya que el máximo momento es aproximadamente 5000 kN-m. El gráfico de la figura 63 muestra cómo el momento flector varía en función de la curvatura a medida que la pila se deforma. Por lo que se puede observar que, cuando se aplica un encamisado de mayor espesor, el momento flector es mayor para un mismo valor de curvatura, por lo que el encamisado permite al elemento alcanzar un mayor momento flector. Estos gráficos permiten comprender el comportamiento de los elementos a lo largo de su vida útil, por

lo que, si se realiza un rehabilitación o reparación de este tipo, se puede predecir su comportamiento y compararlo con el actual.

La durabilidad en estructuras como los puentes de concreto reforzado es fundamental por varias razones, ejemplos de esto es la seguridad, ya que este tipo de infraestructuras deben resistir fuerzas y condiciones extremas durante un largo período sin comprometer su integridad estructural. Si lo anterior no se cumple, se pone en riesgo la seguridad de los usuarios. La durabilidad reduce los costos de inspección, mantenimiento o reparación, y esta es una característica que ofrece el UHPC, ya que requiere menos reparaciones y mantenimiento a lo largo de su vida útil.

Que un material sea durable, implica también que resisten muy bien las condiciones ambientales, es decir, no se deteriora prematuramente por el clima, como por ejemplo lluvia, calor, frío y viento; corrosión del acero de refuerzo, ni tampoco por el desgaste mecánico debido al tráfico vehicular. Además, se puede asegurar la funcionalidad de la estructura a largo plazo, especialmente si se trata de un puente sobre rutas nacionales.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Un UHPC que posee una alta resistencia a la compresión, posee a su vez una alta resistencia a la tracción, es decir, una muy alta capacidad de deformación en tensión; por lo que el UHPC presenta una mayor durabilidad que el concreto convencional, y esto permite que la vida útil operativa de las estructuras pueda llegar a ser superior a 150 años. Esto no solo se debe a las fibras que refuerzan el concreto mitigando la formación y propagación de grietas, sino también por su impermeabilidad a agentes corrosivos agresivos, y esto se debe a la mezcla estructurada del UHPC, ya que esto hace que su porosidad sea casi nula.

A partir de los modelos realizados en Atena de los especímenes elaborados por Tsiotsias en laboratorio, se obtuvo la curva esfuerzo-deformación. Al comparar los resultados teóricos con los experimentales se observaron algunas diferencias, especialmente en los desplazamientos laterales, sin embargo, se destaca que los concretos elaborados en laboratorio, principalmente el UHPC, difieren en sus propiedades y comportamiento teóricos o ideales (concretos definidos en Atena); sin embargo, los resultados se consideraron adecuados para realizar el estudio paramétrico. Por otra parte, al aumentar el espesor del encamisado de UHPC en los modelos computacionales, se aumentó el esfuerzo y la capacidad de deformación en el punto máximo de esfuerzo de las columnas con respecto a los modelos de referencia sin el encamisado. Sin embargo, los resultados para las columnas con sección transversal rectangular tendían a fallar prematuramente (en el software Atena) al aumentar el espesor del encamisado, aun así, el encamisado aumentó el esfuerzo y la deformación de la columna reparada. A su vez, al aumentar la resistencia a la compresión del UHPC, también se obtuvo un aumento en resistencia de las columnas (esfuerzo). Las figuras del apéndice 27, muestran que el confinamiento que aportan los encamisados para secciones transversales circulares (σ_{xx} y σ_{zz}) es el mismo en cualquier punto del área de la columna debido a su geometría, lo cual no sucede en las rectangulares, ya que se observa que el valor del esfuerzo σ_{xx} y σ_{zz} es distinto en la sección transversal, en esquinas y núcleo de la columna.

A partir del análisis seccional de la pila del puente ubicado en Costa Rica seleccionado para este estudio, se determinó que el momento flector aumenta cuando se utiliza un encamisado como método de reparación, y al aumentar el espesor del encamisado, también aumenta el momento flector que es capaz de resistir el pilar. Esto está relacionado con la durabilidad del elemento, por lo que se considera una excelente opción para rehabilitar estructuras y garantizar una mayor vida útil. Se concluye que, para aplicar este método de reparación en el contexto costarricense, es necesaria una mayor investigación del método y del concreto.

Recomendaciones

Debido a que sólo se realizó el estudio paramétrico utilizando tres relaciones de aspecto de espesor/diámetro, se recomienda realizar el estudio con más espesores diferentes para determinar el valor de t/d óptimo o sus valores recomendados para cada tipo de sección transversal. Ya que, como se mencionó anteriormente, los encamisados con un espesor muy grande por lo general no generan los resultados adecuados.

Al realizar los modelos en el software Atena, se recomienda dibujar de manera independiente (y en capas diferentes) los elementos que componen el modelo como la columna, el encamisado y la placa, esto debido a que se obtuvo errores al correr los modelos cuando las superficies dibujadas eran compartidas entre los elementos.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar los modelos en Atena incluyendo acero de refuerzo para así comparar el desempeño del encamisado de UHPC cuando la columna no está reforzada. Se recomienda también realizar investigaciones sobre como este método puede ser aplicado a otros elementos como vigas o losas.

Al modificar el valor de deformación de la función de compresión del UHPC utilizando dos valores distintos para el estudio paramétrico, se obtuvo resultados casi idénticos en ambos casos. Por lo que no se recomienda considerar esta variable en estudios paramétricos como el que se llevó a cabo en esta investigación.

Se recomienda aplicar un desplazamiento igual a 1 mm o menor en la placa, ya que, un desplazamiento mayor a 1 mm para el concreto se considera un valor muy elevado. Para investigaciones futuras se podría considerar variar esta magnitud, así como también el número de pasos de carga igual y del multiplicador de intervalo, para determinar si esto modifica los resultados al correr el modelo en el software Atena.

Para realizar el análisis seccional no se consideró la sección transversal que incluye el traslape de refuerzo de la cimentación con la pila debido a que estaba fuera del alcance del proyecto, sin embargo, en investigaciones previas se ha determinado que sí influye en los resultados del desempeño del encamisado aplicado, por lo que se recomienda estudiar también este caso. Debido a esto es que los resultados de la curva de Momento vs. Curvatura obtenidos para este proyecto parecen ser constantes después de alcanzar el momento máximo.

Iniciar investigaciones en Costa Rica, tanto teóricas como experimentales, que estén relacionadas con el uso de UHPC, podría ser beneficioso para el país ya que podría abrir la puerta a una futura implementación de este novedoso concreto, no solo sólo como método de reparación, sino también para la construcción de elementos estructurales. Se podría iniciar considerando la viabilidad de utilizar el concreto en el país.

Referencias

- Aceros Arequipa. (s. f.). *¿Qué son los zunchos y cómo se usan en columnas?*
<https://www.construyendoseguro.com/que-son-los-zunchos-y-como-se-usan-en-columnas/>
- Arora, A., Almujaiddi, A., Kianmofrad, F., Mobasher, B.; Neithalath, N. (2019). Material design of economical ultra high-performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103346. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2019.103346.
- Azmeem, N. M. and Shafiq, N. (2018). Ultra-High Performance Concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, 9, 00197. DOI 10.1016/j.cscm.2018.e00197.
- Centro de Investigación en Vivienda y Construcción. (2019). *Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica 2014-2018*.
- Cervenka Consulting. (s. f.). *ATENA*. <https://www.cervenka.cz/products/atena/>
- Chung-Chan, H., Chai-Wei, K & Yi, S. (2021). Cast-in-place and prefabricated UHPC jackets for retrofitting shear-deficient RC columns with different axial load levels. *Journal of Building Engineering*, 44(1).
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103305>
- CSA-S6 (2019) *Canadian Highway Bridge Design Code: Fibre-reinforced concrete (FRC)*. Anexo 8.1. Canadian Standards Association. Toronto, Canada.
- Farzad, M., Shafieifar, M. & Azizinamini, A. (2019). Retrofitting of Bridge Columns Using UHPC. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001497](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001497)
- Georgiou, A. V., & Pantazopoulou, S. J. (2016). Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites. *Construction & Building Materials*, 125, 1216–1228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.009>
- Gómez, M. A. (2011). *Diseño Estructural de Edificios Altos Tipo Torre Empleando Concreto de Alta Resistencia*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM.
http://132.248.9.195/ptb2011/reemplazo/0622690/0622690_A1.pdf

- Graybeal, B. A. (2007). Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 104(2), 146–152. DOI 10.14359/18577.
- Graybeal, B. A. (2012). Compression Response of a Rapid-Strengthening Ultra-High Performance Concrete Formulation, *FHWA-HRT-12-064*, Federal Highway Administration.
- Guo, Y., Wang, D., Ashour, A., Ding, S. and Han, B. (2023). Self-sensing ultra-high performance concrete: A review. *Measurement Science and Technology*, 35(3). DOI:10.1088/1361-6501/ad092d
- Hognestad, E. (1951). A study of combined bending and axial load in reinforced concrete. *Bulletin series*. 339, Illinois, USA, University of Illinois Experiment Station.
- Kent, D. C., & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *J. of the Structural Division*, ASCE, 97(ST7), 1969–1990.
- Kim, H., Moon, B., Hu, X., Lee, H.D, Ryu, G., Koh, K., Joh, C., Kim, B. S. and Keierleber, B. (2021). Construction and Performance Monitoring of Innovative Ultra-High-Performance Concrete Bridge. *Infrastructures*, 6(121). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6090121>
- Li, X., Wang, J., Bao, Y., & Chen, G. (2017). Cyclic behavior of damaged reinforced concrete columns repaired with high-performance fiber-reinforced cementitious composite, *Engineering Structures*, 136, 26–35.
- Li, X., Chen, K., Hu, P., He, W., Xiao, L., & Zhang, R. (2020). Effect of ECC jackets for enhancing the lateral cyclic behavior of RC bridge columns. *Engineering Structures*, 219(1). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110714>
- Mahsa, F., Mohamadreza, S. and Atorod, A. (2019). Retrofitting of Bridge Columns Using UHPC. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12), 04019121-1 – 13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001497](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001497)
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2007). *Manual de Inspección de Puentes*. <https://www.mopt.go.cr/sites/default/files/destacados/infraestructura/obraspublicas/puentes/manuales/inspeccion/manual-de-inspeccion-de-puentes-2007.pdf>
- Mohammed, I., Tsiotsias, K. & Pantazopoulou, S. J. (2023). Design of Bridge Pier Seismic Retrofit Using THFRC. M Shahria Alam (Editor), *SP-358: Advances in Repair/Retrofit/Strengthening, Design and Analysis of Structures*. ACI Technical Publication.

- Pantazopoulou, S. J., Tastani, S. P., Thermou, G. E., Triantafillou, T., Monti, G., Bournas, D., & Guadagnini, M. (2016). Background to the European seismic design provisions for retrofitting RC elements using FRP materials. *Structural Concrete*, 17(2), 194–219. <https://doi.org/10.1002/suco.201500102>
- Popovics, S. (1973). *A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete*. *Cement and concrete research*, 3(5), 583-599.
- Rabehi, B., Ghernouti, Y., Li, A., & Boumchedda, K. (2014). Comparative behavior under compression of concrete columns repaired by fiber reinforced polymer (FRP) jacketing and ultra high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *J. of Adhesion Science and Technology*, 28, 2327–2346. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.966885>
- Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. DOI 10.1016/0008-8846(95)00144-2.
- Roy, D. M., Gouda, G. R.; Bobrowsky, A. (1972). Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high-pressure techniques. *Cement and Concrete Research* 2(3), 349–366. DOI 10.1016/0008-8846(72)90075-0.
- Rui, H., Zhi, F., Caijun, S., Brahim, B. and Jie, S. (2021). A review on seismic behavior of ultra-high performance concrete members. *Advances in Structural Engineering*, 24(5), 1054–1069. <https://doi.org/10.1177/1369433220968451>
- Saikali, R. E., Pantazopoulou, S. J., & Palermo, D. (2022). Local Bond-Slip Behavior of Reinforcing Bars in High- Performance Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural J.*, 119(2), 139–153. <https://doi.org/10.14359/51734334>
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z. and Fang, Z. (2015). A review on ultra high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101, 741–751. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.
- Thermou, G. E., & Elnashai, A. S. (2006). Seismic retrofit schemes for RC structures and local-global consequences. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/pse.208>
- Tong, T., Lei, H., Yuan, S., & Liu, Z. (2020). Experimental investigation and seismic vulnerability assessment of low flexural strength rectangular bridge piers retrofitted with ultrahigh-performance concrete jackets. *Engineering Structures*, 206, DOI: 110132. 10.1016/j.engstruct.2019.110132

Tong, T., Yuan, S., Zhuo, W., He, Z., & Liu, Z. (2019). Seismic retrofitting of rectangular bridge piers using UHPFRC jackets. *Composite Structures*, 228: 111367. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111367>

Tsiotsias, K. & Pantazopoulou, S.J. (2022, 27 de junio – 1 de julio). *Cyclic Testing of Concrete Cores Under Confinement with UHPFRC Jackets* [Sesión de Congreso]. 12th National Conference on Earthquake Engineering, Salt Lake City, Utah, Estados Unidos.

Tsiotsias, K. (2023). Performance of RC Columns Retrofitted with UHPFRC Jackets Under Cyclic Displacement Reversals.

Tsiotsias, K. & Pantazopoulou, S. J. (2024). Cyclic Testing of Lap-Spliced Columns Retrofitted with UHPC-Cover Replacement. *American Society of Civil Engineers*. DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-12711.

Apéndices

Apéndice 1. Valores de salida de Atena de carga y desplazamiento para el cilindro CC25.

Load	Displacement		
	kN	m	mm
0	0	0	0
24.68	-2.98E-05	0.02977	
49.27	-5.95E-05	0.05953	
72.15	-8.93E-05	0.08931	
92.97	-0.00012	0.1191	
113.21	-0.00015	0.1489	
132.23	-0.00018	0.1787	
150.60	-0.00021	0.2086	
168.40	-0.00024	0.2384	
185.70	-0.00027	0.2682	
202.52	-0.0003	0.2981	
218.81	-0.00033	0.3279	
234.39	-0.00036	0.3578	
246.63	-0.00039	0.3876	
259.06	-0.00042	0.4175	
269.29	-0.00045	0.4474	
276.50	-0.00048	0.4774	
275.90	-0.00051	0.5074	
274.76	-0.00054	0.5374	
273.43	-0.00057	0.5674	
272.10	-0.0006	0.5974	
270.80	-0.00063	0.6274	
269.54	-0.00066	0.6574	
268.32	-0.00069	0.6874	
267.14	-0.00072	0.7174	
265.99	-0.00075	0.7474	
264.86	-0.00078	0.7775	
263.77	-0.00081	0.8075	
262.72	-0.00084	0.8375	
261.69	-0.00087	0.8675	
260.68	-0.0009	0.8975	
259.70	-0.00093	0.9275	
258.75	-0.00096	0.9575	
257.83	-0.00099	0.9875	
256.93	-0.00102	1.0175	
256.06	-0.00105	1.0475	
255.21	-0.00108	1.0775	
254.40	-0.00111	1.1076	
253.61	-0.00114	1.1376	
252.86	-0.00117	1.1676	
252.14	-0.0012	1.1976	
251.43	-0.00123	1.2276	
250.75	-0.00126	1.2576	
250.10	-0.00129	1.2876	
249.48	-0.00132	1.3176	
248.89	-0.00135	1.3476	
248.32	-0.00138	1.3776	
247.79	-0.00141	1.4076	
247.28	-0.00144	1.4376	
246.80	-0.00147	1.4676	
246.35	-0.0015	1.4976	

Apéndice 2. Valores de salida de Atena de carga y desplazamiento para el prisma CR375.

Load	Displacement		
	kN	m	mm
0	0	0	0
30.29	-2.98E-05	0.02978	
60.13	-5.96E-05	0.05957	
86.41	-8.94E-05	0.08938	
109.67	-0.00012	0.1192	
128.48	-0.00015	0.1491	
146.32	-0.00018	0.1789	
162.25	-0.00021	0.2088	
176.33	-0.00024	0.2387	
188.59	-0.00027	0.2686	
198.90	-0.0003	0.2986	
203.81	-0.00033	0.3285	
208.43	-0.00036	0.3585	
208.96	-0.00039	0.3885	
203.15	-0.00042	0.4185	
199.71	-0.00045	0.4486	
196.42	-0.00048	0.4786	
193.15	-0.00051	0.5086	
189.88	-0.00054	0.5386	
186.62	-0.00057	0.5687	
183.36	-0.0006	0.5987	
180.10	-0.00063	0.6287	
176.85	-0.00066	0.6587	
173.60	-0.00069	0.6887	
170.35	-0.00072	0.7188	
167.11	-0.00075	0.7488	
163.88	-0.00078	0.7788	
160.65	-0.00081	0.8088	
155.16	-0.00084	0.8389	
151.75	-0.00087	0.8689	
148.48	-0.0009	0.8989	
145.22	-0.00093	0.9289	
141.97	-0.00096	0.959	
138.73	-0.00099	0.989	
133.87	-0.00102	1.019	
130.50	-0.00105	1.049	
127.21	-0.00108	1.0791	
122.77	-0.00111	1.1091	
118.56	-0.00114	1.1391	
110.67	-0.00117	1.1692	
102.21	-0.0012	1.1992	
93.74	-0.00123	1.2292	
85.88	-0.00126	1.2592	
78.65	-0.00129	1.2892	
71.92	-0.00132	1.3193	
65.68	-0.00135	1.3493	
60.10	-0.00138	1.3793	
55.51	-0.00141	1.4093	
51.85	-0.00144	1.4394	
48.85	-0.00147	1.4694	

Apéndice 3. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC1.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002396	0.0001145	1.14985E-05
0.004792	0.000229	0.000023
0.007165	0.0003435	3.53077E-05
0.009477	0.000458	4.93692E-05
0.011742	0.0005725	6.39846E-05

0.013972	0.000687	7.88769E-05
0.01617	0.0008015	9.40462E-05
0.018339	0.000916	0.000109492
0.020481	0.001031	0.000125169
0.0226	0.0011455	0.000141077
0.024697	0.00126	0.000157231
0.026773	0.0013745	0.000173538
0.028827	0.001489	0.00019
0.030857	0.001604	0.000207077
0.032856	0.0017185	0.000224923
0.034814	0.001833	0.000244154
0.036723	0.001948	0.000264462
0.038579	0.0020625	0.000286154
0.040378	0.002177	0.000308769
0.042114	0.002292	0.000332769
0.043791	0.0024065	0.000357538
0.045411	0.0025215	0.000382923
0.046974	0.0026365	0.000409077
0.048187	0.002751	0.000439846
0.049838	0.002866	0.000464615
0.05124	0.002981	0.000492615
0.052513	0.003096	0.000522308
0.053665	0.0032105	0.000553231
0.054673	0.0033255	0.000585692
0.055493	0.003441	0.000620462
0.055177	0.0035565	0.000668308
0.054855	0.003672	0.000716
0.054506	0.0037875	0.000763846
0.054151	0.003903	0.000811846
0.053796	0.0040185	0.000859846
0.053445	0.004134	0.000907692
0.053098	0.0042495	0.000955692
0.052754	0.004365	0.001003538
0.052415	0.0044805	0.001051385
0.052081	0.004596	0.001099077
0.05175	0.0047115	0.001146923
0.051425	0.004827	0.001194615
0.051102	0.0049425	0.001242308
0.050785	0.005058	0.001289846
0.050472	0.0051735	0.001337385
0.050163	0.005289	0.001384923
0.049858	0.0054045	0.001432462
0.049558	0.00552	0.001479846
0.049262	0.0056355	0.001527231
0.04897	0.005751	0.001573846
0.048684	0.0058665	0.001621538
0.048402	0.005982	0.001669231
0.048124	0.0060975	0.001716923
0.047851	0.006213	0.001763077
0.047583	0.0063285	0.001810769
0.04732	0.0064435	0.001856923
0.047061	0.006559	0.001904615
0.046808	0.0066745	0.001950769
0.04656	0.00679	0.001998462
0.046316	0.0069055	0.002044615

0.046078	0.007021	0.002092308
0.04524	0.007137	0.002144615
0.04539	0.007252	0.002187692
0.045308	0.0073675	0.002232308
0.045144	0.007483	0.002278462

Apéndice 4. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC2.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002396	0.0001145	1.14985E-05
0.004792	0.000229	0.000023
0.007165	0.0003435	3.53077E-05
0.009477	0.000458	4.93692E-05
0.011742	0.0005725	6.39846E-05
0.013972	0.000687	7.88769E-05
0.01617	0.0008015	9.40462E-05
0.018339	0.000916	0.000109492
0.020481	0.001031	0.000125169
0.0226	0.0011455	0.000141077
0.024697	0.00126	0.000157231
0.026773	0.0013745	0.000173538
0.028827	0.001489	0.00019
0.030857	0.001604	0.000207077
0.032856	0.0017185	0.000224923
0.034814	0.001833	0.000244154
0.036723	0.001948	0.000264462
0.038579	0.0020625	0.000286154
0.040378	0.002177	0.000308769
0.042114	0.002292	0.000332769
0.043791	0.0024065	0.000357538
0.045411	0.0025215	0.000382923
0.046974	0.0026365	0.000409077
0.048187	0.002751	0.000439846
0.049838	0.002866	0.000464615
0.05124	0.002981	0.000492615
0.052513	0.003096	0.000522308
0.053665	0.0032105	0.000553231
0.054673	0.0033255	0.000585692
0.055493	0.003441	0.000620462
0.055177	0.0035565	0.000668308
0.054855	0.003672	0.000716
0.054506	0.0037875	0.000763846
0.054151	0.003903	0.000811846
0.053796	0.0040185	0.000859846
0.053445	0.004134	0.000907692
0.053098	0.0042495	0.000955692
0.052754	0.004365	0.001003538
0.052415	0.0044805	0.001051385
0.052081	0.004596	0.001099077
0.05175	0.0047115	0.001146923
0.051425	0.004827	0.001194615
0.051102	0.0049425	0.001242308
0.050785	0.005058	0.001289846

0.050472	0.0051735	0.001337385
0.050163	0.005289	0.001384923
0.049858	0.0054045	0.001432462
0.049558	0.00552	0.001479846
0.049262	0.0056355	0.001527231
0.04897	0.005751	0.001573846
0.048684	0.0058665	0.001621538
0.048402	0.005982	0.001669231
0.048124	0.0060975	0.001716923
0.047851	0.006213	0.001763077
0.047583	0.0063285	0.001810769
0.04732	0.0064435	0.001856923
0.047061	0.006559	0.001904615
0.046808	0.0066745	0.001950769
0.04656	0.00679	0.001998462
0.046316	0.0069055	0.002044615
0.046078	0.007021	0.002092308
0.04524	0.007137	0.002144615
0.04539	0.007252	0.002187692
0.045308	0.0073675	0.002232308
0.045144	0.007483	0.002278462

Apéndice 5. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC3.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.00235627	0.0001145	1.75636E-05
0.00471153	0.000229	3.52727E-05
0.00703416	0.00034355	5.42727E-05
0.00929814	0.00045805	7.41273E-05
0.01151109	0.0005725	0.0000946
0.01367737	0.000687	0.000115673
0.01580134	0.000802	0.000137273
0.01788531	0.0009165	0.000159364
0.01993236	0.001031	0.000182
0.02194304	0.0011455	0.000204909
0.02391718	0.0012605	0.000228727
0.0258515	0.001375	0.000253455
0.02773982	0.0014895	0.000279273
0.02957338	0.0016045	0.000306
0.03134767	0.001719	0.000333818
0.03306343	0.001834	0.000362545
0.03472567	0.0019485	0.000392182
0.03633377	0.0020635	0.000422727
0.03788417	0.002178	0.000454
0.03937295	0.002293	0.000486182
0.04079322	0.002408	0.000519273
0.04213827	0.0025225	0.000553455
0.04339659	0.0026375	0.000588727
0.0445531	0.0027525	0.000625455
0.04558712	0.0028675	0.000663818

0.04586204	0.002983	0.000712545
0.04622527	0.003098	0.000760182
0.04559338	0.0032135	0.000821091
0.04508017	0.0033295	0.000880545
0.04460112	0.003445	0.000939273
0.04413374	0.0035605	0.000998
0.04367156	0.003676	0.001056545
0.04321283	0.0037915	0.001115091
0.04275706	0.003907	0.001173455
0.0423042	0.0040225	0.001231818
0.04185393	0.004138	0.00129
0.04140646	0.0042535	0.001348182
0.04096175	0.0043695	0.001406182
0.04052019	0.004485	0.001464
0.04008138	0.0046005	0.001521636
0.03964567	0.004716	0.001579273
0.03921303	0.0048315	0.001636545
0.03878349	0.004947	0.001693636
0.03835767	0.0050625	0.001750545
0.03793495	0.005178	0.001807273
0.03751549	0.0052935	0.001863636
0.03709986	0.005409	0.00192
0.03668758	0.0055245	0.001974545
0.03627903	0.0056405	0.002030909
0.03587424	0.005756	0.002085455
0.03547317	0.0058715	0.00214
0.03507607	0.005987	0.002192727
0.03468274	0.0061025	0.002245455
0.03429354	0.006218	0.002298182
0.03390825	0.0063335	0.002350909
0.03352761	0.006449	0.002401818
0.03315063	0.0065645	0.002452727
0.03277879	0.00668	0.002501818
0.03196142	0.006796	0.002554545
0.03146577	0.0069115	0.002601818
0.03106282	0.007027	0.002645455

Apéndice 6. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC4.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.00235627	0.0001145	1.75636E-05
0.00471153	0.000229	3.52727E-05
0.00703416	0.00034355	5.42727E-05
0.00929814	0.00045805	7.41273E-05
0.01151109	0.0005725	0.0000946
0.01367737	0.000687	0.000115673
0.01580134	0.000802	0.000137273
0.01788531	0.0009165	0.000159364

0.01993236	0.001031	0.000182
0.02194304	0.0011455	0.000204909
0.02391718	0.0012605	0.000228727
0.0258515	0.001375	0.000253455
0.02773982	0.0014895	0.000279273
0.02957338	0.0016045	0.000306
0.03134767	0.001719	0.000333818
0.03306343	0.001834	0.000362545
0.03472567	0.0019485	0.000392182
0.03633377	0.0020635	0.000422727
0.03788417	0.002178	0.000454
0.03937295	0.002293	0.000486182
0.04079322	0.002408	0.000519273
0.04213827	0.0025225	0.000553455
0.04339659	0.0026375	0.000588727
0.0445531	0.0027525	0.000625455
0.04558712	0.0028675	0.000663818
0.04586204	0.002983	0.000712545
0.04622527	0.003098	0.000760182
0.04559338	0.0032135	0.000821091
0.04508017	0.0033295	0.000880545
0.04460112	0.003445	0.000939273
0.04413374	0.0035605	0.000998
0.04367156	0.003676	0.001056545
0.04321283	0.0037915	0.001115091
0.04275706	0.003907	0.001173455
0.0423042	0.0040225	0.001231818
0.04185393	0.004138	0.00129
0.04140646	0.0042535	0.001348182
0.04096175	0.0043695	0.001406182
0.04052019	0.004485	0.001464
0.04008138	0.0046005	0.001521636
0.03964567	0.004716	0.001579273
0.03921303	0.0048315	0.001636545
0.03878349	0.004947	0.001693636
0.03835767	0.0050625	0.001750545
0.03793495	0.005178	0.001807273
0.03751549	0.0052935	0.001863636
0.03709986	0.005409	0.00192
0.03668758	0.0055245	0.001974545
0.03627903	0.0056405	0.002030909
0.03587424	0.005756	0.002085455
0.03547317	0.0058715	0.00214
0.03507607	0.005987	0.002192727
0.03468274	0.0061025	0.002245455
0.03429354	0.006218	0.002298182
0.03390825	0.0063335	0.002350909
0.03352761	0.006449	0.002401818
0.03315063	0.0065645	0.002452727
0.03277879	0.00668	0.002501818

0.03196142	0.006796	0.002554545
0.03146577	0.0069115	0.002601818
0.03106282	0.007027	0.002645455

Apéndice 7. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC5.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.0023795	0.0001145	1.40533E-05
0.0047578	0.000229	2.82167E-05
0.007079	0.0003435	4.46667E-05
0.0093088	0.00045805	6.22167E-05
0.0114529	0.0005725	8.08333E-05
0.0135284	0.0006875	0.000100183
0.0155443	0.000802	0.000120183
0.0175067	0.0009165	0.000140767
0.0194193	0.001031	0.0001619
0.0212866	0.001146	0.0001835
0.0231092	0.0012605	0.000205667
0.0248824	0.0013755	0.000228667
0.0265968	0.00149	0.000253
0.0282367	0.001605	0.000278833
0.0297916	0.0017195	0.000306333
0.031252	0.0018345	0.0003355
0.0326199	0.0019495	0.000366
0.0338964	0.0020645	0.000397833
0.0350748	0.002179	0.000431167
0.0356938	0.0022945	0.000471667
0.0365046	0.0024095	0.000509667
0.0371814	0.0025245	0.000549167
0.037626	0.002640	0.0005915
0.0371765	0.0027555	0.000645167
0.0368471	0.002871	0.000697167
0.0365401	0.0029865	0.000748833
0.0362395	0.003102	0.0008005
0.0359422	0.0032175	0.000852167
0.0356477	0.003333	0.000903833
0.0353551	0.0034485	0.0009555
0.035065	0.003564	0.001007
0.0347776	0.0036795	0.001058667
0.0344921	0.0037945	0.001110167
0.0342093	0.00391	0.001161833
0.033929	0.0040255	0.001213333
0.0336509	0.004141	0.001264833
0.0333757	0.0042565	0.001316333

0.0331029	0.004372	0.001367833
0.0328332	0.0044875	0.001419167
0.0325656	0.004603	0.001470667
0.0323006	0.0047185	0.001522
0.0317054	0.004834	0.001577667
0.0317074	0.0049495	0.001625667
0.0315067	0.005065	0.001676667
0.0312653	0.0051805	0.001728333
0.0310172	0.005296	0.001778333
0.0307703	0.0054115	0.00183
0.0305261	0.005527	0.001881667
0.0302849	0.0056425	0.001931667
0.0300467	0.005758	0.001983333
0.029812	0.0058735	0.002035
0.0295808	0.005989	0.002085
0.0293528	0.0061045	0.002136667
0.0291285	0.00622	0.002188333
0.0289079	0.0063355	0.002238333
0.0286909	0.0064505	0.00229
0.028478	0.006566	0.00234
0.0282687	0.0066815	0.002391667
0.0280636	0.006797	0.002441667
0.0278623	0.0069125	0.002493333
0.027665	0.007028	0.002543333
0.0274722	0.0071435	0.002593333
0.0272835	0.007259	0.002645
0.0270989	0.0073745	0.002695
0.0269191	0.00749	0.002745

Apéndice 8. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC6.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.0023795	0.0001145	1.40533E-05
0.0047578	0.000229	2.82167E-05
0.007079	0.0003435	4.46667E-05
0.0093088	0.00045805	6.22167E-05
0.0114529	0.0005725	8.08333E-05
0.0135284	0.0006875	0.000100183
0.0155443	0.000802	0.000120183
0.0175067	0.0009165	0.000140767
0.0194193	0.001031	0.0001619
0.0212866	0.001146	0.0001835
0.0231092	0.0012605	0.000205667
0.0248824	0.0013755	0.000228667
0.0265968	0.00149	0.000253

0.0282367	0.001605	0.000278833
0.0297916	0.0017195	0.000306333
0.031252	0.0018345	0.0003355
0.0326199	0.0019495	0.000366
0.0338964	0.0020645	0.000397833
0.0350748	0.002179	0.000431167
0.0356938	0.0022945	0.000471667
0.0365046	0.0024095	0.000509667
0.0371814	0.0025245	0.000549167
0.037626	0.002640	0.0005915
0.0371765	0.0027555	0.000645167
0.0368471	0.002871	0.000697167
0.0365401	0.0029865	0.000748833
0.0362395	0.003102	0.0008005
0.0359422	0.0032175	0.000852167
0.0356477	0.003333	0.000903833
0.0353551	0.0034485	0.0009555
0.035065	0.003564	0.001007
0.0347776	0.0036795	0.001058667
0.0344921	0.0037945	0.001110167
0.0342093	0.00391	0.001161833
0.033929	0.0040255	0.001213333
0.0336509	0.004141	0.001264833
0.0333757	0.0042565	0.001316333
0.0331029	0.004372	0.001367833
0.0328332	0.0044875	0.001419167
0.0325656	0.004603	0.001470667
0.0323006	0.0047185	0.001522
0.0317054	0.004834	0.001577667
0.0317074	0.0049495	0.001625667
0.0315067	0.005065	0.001676667
0.0312653	0.0051805	0.001728333
0.0310172	0.005296	0.001778333
0.0307703	0.0054115	0.00183
0.0305261	0.005527	0.001881667
0.0302849	0.0056425	0.001931667
0.0300467	0.005758	0.001983333
0.029812	0.0058735	0.002035
0.0295808	0.005989	0.002085
0.0293528	0.0061045	0.002136667
0.0291285	0.00622	0.002188333
0.0289079	0.0063355	0.002238333
0.0286909	0.0064505	0.00229
0.028478	0.006566	0.00234
0.0282687	0.0066815	0.002391667
0.0280636	0.006797	0.002441667
0.0278623	0.0069125	0.002493333

0.027665	0.007028	0.002543333
0.0274722	0.0071435	0.002593333
0.0272835	0.007259	0.002645
0.0270989	0.0073745	0.002695
0.0269191	0.00749	0.002745

Apéndice 9. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC7.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002379472	0.0001145	1.40533E-05
0.004759166	0.000229	2.81167E-05
0.007107101	0.0003435	4.36333E-05
0.009396319	0.00045805	0.00006045
0.011638291	0.0005725	7.77667E-05
0.013839951	0.000687	0.0000955
0.016005049	0.0008015	0.000113617
0.0181366	0.0009165	0.0001321
0.020237974	0.001031	0.000150917
0.022310666	0.0011455	0.00017
0.024356044	0.00126	0.0001895
0.026373675	0.001375	0.000209333
0.028360596	0.0014895	0.000229667
0.030309875	0.001604	0.000251
0.032212808	0.0017185	0.0002735
0.034062315	0.0018335	0.000297167
0.03585305	0.001948	0.000322167
0.037584605	0.002063	0.000348
0.03926029	0.0021775	0.000374833
0.040880717	0.0022925	0.0004025
0.04244344	0.002407	0.000431
0.043943978	0.002522	0.000460167
0.045376322	0.002637	0.000490333
0.046732475	0.002752	0.0005215
0.047999959	0.0028665	0.000553667
0.049161816	0.0029815	0.000587333
0.050193853	0.0030965	0.000622333
0.051058485	0.0032115	0.000659667
0.050910076	0.003327	0.000709667
0.050678448	0.0034425	0.0007605
0.049704573	0.0035585	0.000820667
0.049718222	0.0036735	0.0008685
0.049469431	0.003789	0.0009195
0.048496268	0.003905	0.000979667
0.048516334	0.0040205	0.001027333
0.047664384	0.004136	0.001086167

0.047716842	0.0042515	0.0011335
0.046884602	0.004367	0.001192
0.046946328	0.0044825	0.001239167
0.046123968	0.004598	0.001297667
0.046192367	0.0047135	0.001344833
0.045378665	0.004829	0.001403167
0.044887755	0.0049445	0.0014575
0.045041817	0.00506	0.001503667
0.044276447	0.0051755	0.0015615
0.043805908	0.005291	0.001615667
0.043421237	0.005407	0.001668333
0.04306417	0.0055225	0.001721667
0.042718511	0.005638	0.001773333
0.042379269	0.0057535	0.001826667
0.042045018	0.005869	0.001878333
0.041715809	0.0059845	0.001931667
0.041391235	0.0061	0.001983333
0.041071601	0.0062155	0.002036667
0.0407565	0.006331	0.002088333
0.040446695	0.0064465	0.002141667
0.040141932	0.006562	0.002193333
0.039842314	0.0066775	0.002245
0.03954789	0.006793	0.002296667
0.039258966	0.0069085	0.00235
0.038975492	0.007024	0.002401667
0.038697569	0.0071395	0.002453333
0.038425453	0.0072545	0.002505
0.038158887	0.00737	0.002558333
0.037898332	0.0074855	0.00261

Apéndice 10. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC8.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002379472	0.0001145	1.40533E-05
0.004759166	0.000229	2.81167E-05
0.007107101	0.0003435	4.36333E-05
0.009396319	0.00045805	0.00006045
0.011638291	0.0005725	7.77667E-05
0.013839951	0.000687	0.0000955
0.016005049	0.0008015	0.000113617
0.0181366	0.0009165	0.0001321
0.020237974	0.001031	0.000150917
0.022310666	0.0011455	0.00017
0.024356044	0.00126	0.0001895
0.026373675	0.001375	0.000209333

0.028360596	0.0014895	0.000229667
0.030309875	0.001604	0.000251
0.032212808	0.0017185	0.0002735
0.034062315	0.0018335	0.000297167
0.03585305	0.001948	0.000322167
0.037584605	0.002063	0.000348
0.03926029	0.0021775	0.000374833
0.040880717	0.0022925	0.0004025
0.04244344	0.002407	0.000431
0.043943978	0.002522	0.000460167
0.045376322	0.002637	0.000490333
0.046732475	0.002752	0.0005215
0.047999959	0.0028665	0.000553667
0.049161816	0.0029815	0.000587333
0.050193853	0.0030965	0.000622333
0.051058485	0.0032115	0.000659667
0.050910076	0.003327	0.000709667
0.050678448	0.0034425	0.0007605
0.049704573	0.0035585	0.000820667
0.049718222	0.0036735	0.0008685
0.049469431	0.003789	0.0009195
0.048496268	0.003905	0.000979667
0.048516334	0.0040205	0.001027333
0.047664384	0.004136	0.001086167
0.047716842	0.0042515	0.0011335
0.046884602	0.004367	0.001192
0.046946328	0.0044825	0.001239167
0.046123968	0.004598	0.001297667
0.046192367	0.0047135	0.001344833
0.045378665	0.004829	0.001403167
0.044887755	0.0049445	0.0014575
0.045041817	0.00506	0.001503667
0.044276447	0.0051755	0.0015615
0.043805908	0.005291	0.001615667
0.043421237	0.005407	0.001668333
0.04306417	0.0055225	0.001721667
0.042718511	0.005638	0.001773333
0.042379269	0.0057535	0.001826667
0.042045018	0.005869	0.001878333
0.041715809	0.0059845	0.001931667
0.041391235	0.0061	0.001983333
0.041071601	0.0062155	0.002036667
0.0407565	0.006331	0.002088333
0.040446695	0.0064465	0.002141667
0.040141932	0.006562	0.002193333
0.039842314	0.0066775	0.002245
0.03954789	0.006793	0.002296667

0.039258966	0.0069085	0.00235
0.038975492	0.007024	0.002401667
0.038697569	0.0071395	0.002453333
0.038425453	0.0072545	0.002505
0.038158887	0.00737	0.002558333
0.037898332	0.0074855	0.00261

Apéndice 11. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC9.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002395995	0.0001145	1.14985E-05
0.0047917	0.000229	2.30154E-05
0.007144004	0.0003435	3.60462E-05
0.009395917	0.00045805	5.10308E-05
0.011570605	0.0005725	6.67692E-05
0.013683261	0.000687	8.30615E-05
0.015742456	0.000802	9.98462E-05
0.017754618	0.0009165	0.000117062
0.019724141	0.001031	0.000134677
0.021655783	0.001146	0.000152646
0.023550699	0.0012605	0.000170923
0.025410189	0.001375	0.000189692
0.027228992	0.00149	0.000209077
0.028994924	0.0016045	0.000229692
0.030690319	0.0017195	0.000252154
0.032305449	0.001834	0.000276308
0.033830841	0.001949	0.000302
0.035256156	0.0020635	0.000329385
0.03658058	0.0021785	0.000358154
0.037804774	0.0022935	0.000388154
0.03892278	0.0024085	0.000419385
0.039421381	0.0025235	0.000458308
0.040104143	0.002639	0.000494615
0.040608091	0.002754	0.000532769
0.040746416	0.002870	0.000575077
0.040070631	0.002985	0.000626769
0.040208905	0.0031005	0.000668923
0.039531796	0.003216	0.000720769
0.039673482	0.0033315	0.000762923
0.039003147	0.003447	0.000814462
0.039149926	0.003562	0.000856615
0.038486466	0.003678	0.000908154
0.038638287	0.003793	0.000950308
0.037981143	0.003909	0.001001692
0.038138414	0.004024	0.001043846
0.037487075	0.00414	0.001095231
0.037168256	0.0042555	0.001142769
0.037388832	0.0043705	0.001184

0.036763824	0.004486	0.001235077
0.036456464	0.0046015	0.001282462
0.036211136	0.004717	0.001329077
0.035980171	0.0048325	0.001375692
0.035753789	0.004948	0.001422
0.035531226	0.0050635	0.001468462
0.035311516	0.005179	0.001514769
0.035095218	0.0052945	0.001561538
0.034881823	0.00541	0.001607692
0.034671892	0.0055255	0.001653846
0.034465219	0.005641	0.0017
0.034261603	0.0057565	0.001746154
0.03406145	0.005872	0.001790769
0.033864658	0.0059875	0.001836923
0.03367138	0.0061025	0.001883077
0.033481413	0.006218	0.001929231
0.033295214	0.0063335	0.001975385
0.033584698	0.006449	0.002015385
0.033029362	0.0065645	0.002064615
0.032778381	0.00668	0.002110769
0.033064554	0.0067955	0.002152308
0.032517163	0.006911	0.002201538
0.032276164	0.0070265	0.002247692
0.032100101	0.007142	0.002293846
0.031940844	0.007257	0.002338462
0.031787953	0.0073725	0.002383077
0.031640155	0.007488	0.002429231

Apéndice 12. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC10.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002395995	0.0001145	1.14985E-05
0.0047917	0.000229	2.30154E-05
0.007144004	0.0003435	3.60462E-05
0.009395917	0.00045805	5.10308E-05
0.011570605	0.0005725	6.67692E-05
0.013683261	0.000687	8.30615E-05
0.015742456	0.000802	9.98462E-05
0.017754618	0.0009165	0.000117062
0.019724141	0.001031	0.000134677
0.021655783	0.001146	0.000152646
0.023550699	0.0012605	0.000170923
0.025410189	0.001375	0.000189692
0.027228992	0.00149	0.000209077
0.028994924	0.0016045	0.000229692
0.030690319	0.0017195	0.000252154
0.032305449	0.001834	0.000276308
0.033830841	0.001949	0.000302
0.035256156	0.0020635	0.000329385

0.03658058	0.0021785	0.000358154
0.037804774	0.0022935	0.000388154
0.038922278	0.0024085	0.000419385
0.039421381	0.0025235	0.000458308
0.040104143	0.002639	0.000494615
0.040608091	0.002754	0.000532769
0.040746416	0.002870	0.000575077
0.040070631	0.002985	0.000626769
0.040208905	0.0031005	0.000668923
0.039531796	0.003216	0.000720769
0.039673482	0.0033315	0.000762923
0.039003147	0.003447	0.000814462
0.039149926	0.003562	0.000856615
0.038486466	0.003678	0.000908154
0.038638287	0.003793	0.000950308
0.037981143	0.003909	0.001001692
0.038138414	0.004024	0.001043846
0.037487075	0.00414	0.001095231
0.037168256	0.0042555	0.001142769
0.037388832	0.0043705	0.001184
0.036763824	0.004486	0.001235077
0.036456464	0.0046015	0.001282462
0.036211136	0.004717	0.001329077
0.035980171	0.0048325	0.001375692
0.035753789	0.004948	0.001422
0.035531226	0.0050635	0.001468462
0.035311516	0.005179	0.001514769
0.035095218	0.0052945	0.001561538
0.034881823	0.00541	0.001607692
0.034671892	0.0055255	0.001653846
0.034465219	0.005641	0.0017
0.034261603	0.0057565	0.001746154
0.03406145	0.005872	0.001790769
0.033864658	0.0059875	0.001836923
0.03367138	0.0061025	0.001883077
0.033481413	0.006218	0.001929231
0.033295214	0.0063335	0.001975385
0.033584698	0.006449	0.002015385
0.033029362	0.0065645	0.002064615
0.032778381	0.00668	0.002110769
0.033064554	0.0067955	0.002152308
0.032517163	0.006911	0.002201538
0.032276164	0.0070265	0.002247692
0.032100101	0.007142	0.002293846
0.031940844	0.007257	0.002338462
0.031787953	0.0073725	0.002383077
0.031640155	0.007488	0.002429231

Apéndice 13. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC11.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002395995	0.0001145	1.35891E-05
0.004791766	0.000229	2.71818E-05
0.007165089	0.0003435	4.17273E-05
0.009476798	0.000458	5.83455E-05
0.011742385	0.0005725	7.56182E-05
0.013972205	0.000687	9.32182E-05
0.016169791	0.0008015	0.000111145
0.018338693	0.000916	0.0001294
0.020481219	0.001031	0.000147927
0.022600226	0.0011455	0.000166727
0.024696533	0.00126	0.000185818
0.026772525	0.0013745	0.000205091
0.028826754	0.001489	0.000224545
0.030857419	0.001604	0.000244727
0.032856048	0.0017185	0.000265818
0.03481368	0.001833	0.000288545
0.036722673	0.001948	0.000312545
0.038578954	0.0020625	0.000338182
0.04037794	0.002177	0.000364909
0.042114231	0.002292	0.000393273
0.043790782	0.0024065	0.000422545
0.045411209	0.0025215	0.000452545
0.046973627	0.0026365	0.000483455
0.048474012	0.002751	0.000515273
0.049904522	0.002866	0.000548182
0.051256957	0.002981	0.000582
0.052517464	0.003096	0.000617091
0.053665926	0.0032105	0.000653818
0.054673721	0.0033255	0.000692182
0.055493076	0.003441	0.000733273
0.055176701	0.0035565	0.000789818
0.054854623	0.003672	0.000846182
0.054506214	0.0037875	0.000902727
0.054151183	0.003903	0.000959455
0.053796408	0.0040185	0.001016182
0.053444994	0.004134	0.001072727
0.053097654	0.0042495	0.001129455
0.052754389	0.004365	0.001186
0.052415249	0.0044805	0.001242545
0.052080896	0.004596	0.001298909
0.051750465	0.0047115	0.001355455
0.051424617	0.004827	0.001411818
0.051102488	0.0049425	0.001468182

0.050784585	0.005058	0.001524364
0.050471572	0.0051735	0.001580545
0.050162582	0.005289	0.001636727
0.049857667	0.0054045	0.001692909
0.04894506	0.00552	0.001757273
0.049038617	0.0056355	0.001807818
0.048888477	0.005751	0.001861818
0.048653488	0.0058665	0.001916364
0.048390386	0.005982	0.001972727
0.048119746	0.0060975	0.002029091
0.047849615	0.006213	0.002083636
0.047582592	0.0063285	0.00214
0.047319846	0.006444	0.002194545
0.047061582	0.006559	0.002250909
0.046808207	0.0066745	0.002305455
0.046559569	0.00679	0.002361818
0.046316329	0.0069055	0.002416364
0.046077724	0.007021	0.002470909
0.04584462	0.0071365	0.002527273
0.045012277	0.0072525	0.002589091
0.045166849	0.0073675	0.00264
0.045090098	0.007483	0.002692727

Apéndice 14. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CC12.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.002395995	0.0001145	1.35891E-05
0.004791766	0.000229	2.71818E-05
0.007165089	0.0003435	4.17273E-05
0.009476798	0.000458	5.83455E-05
0.011742385	0.0005725	7.56182E-05
0.013972205	0.000687	9.32182E-05
0.016169791	0.0008015	0.000111145
0.018338693	0.000916	0.0001294
0.020481219	0.001031	0.000147927
0.022600226	0.0011455	0.000166727
0.024696533	0.00126	0.000185818
0.026772525	0.0013745	0.000205091
0.028826754	0.001489	0.000224545
0.030857419	0.001604	0.000244727
0.032856048	0.0017185	0.000265818
0.03481368	0.001833	0.000288545
0.036722673	0.001948	0.000312545
0.038578954	0.0020625	0.000338182
0.04037794	0.002177	0.000364909
0.042114231	0.002292	0.000393273

0.043790782	0.0024065	0.000422545
0.045411209	0.0025215	0.000452545
0.046973627	0.0026365	0.000483455
0.048474012	0.002751	0.000515273
0.049904522	0.002866	0.000548182
0.051256957	0.002981	0.000582
0.052517464	0.003096	0.000617091
0.053665926	0.0032105	0.000653818
0.054673721	0.0033255	0.000692182
0.055493076	0.003441	0.000733273
0.055176701	0.0035565	0.000789818
0.054854623	0.003672	0.000846182
0.054506214	0.0037875	0.000902727
0.054151183	0.003903	0.000959455
0.053796408	0.0040185	0.001016182
0.053444994	0.004134	0.001072727
0.053097654	0.0042495	0.001129455
0.052754389	0.004365	0.001186
0.052415249	0.0044805	0.001242545
0.052080896	0.004596	0.001298909
0.051750465	0.0047115	0.001355455
0.051424617	0.004827	0.001411818
0.051102488	0.0049425	0.001468182
0.050784585	0.005058	0.001524364
0.050471572	0.0051735	0.001580545
0.050162582	0.005289	0.001636727
0.049857667	0.0054045	0.001692909
0.04894506	0.00552	0.001757273
0.049038617	0.0056355	0.001807818
0.048888477	0.005751	0.001861818
0.048653488	0.0058665	0.001916364
0.048390386	0.005982	0.001972727
0.048119746	0.0060975	0.002029091
0.047849615	0.006213	0.002083636
0.047582592	0.0063285	0.00214
0.047319846	0.006444	0.002194545
0.047061582	0.006559	0.002250909
0.046808207	0.0066745	0.002305455
0.046559569	0.00679	0.002361818
0.046316329	0.0069055	0.002416364
0.046077724	0.007021	0.002470909
0.04584462	0.0071365	0.002527273
0.045012277	0.0072525	0.002589091
0.045166849	0.0073675	0.00264
0.045090098	0.007483	0.002692727

Apéndice 15. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR1.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003067024	0.0001489	2.55273E-05
0.006112656	0.0002978	5.18727E-05
0.0089974	0.0004468	8.06909E-05
0.01172292	0.000596	0.000111655
0.014313	0.000745	0.000144545
0.016781	0.000894	0.000179164
0.01913752	0.001043	0.000215455
0.02138568	0.0011925	0.000253091
0.02352512	0.0013415	0.000292545
0.02553484	0.001491	0.000334727
0.0273996	0.00164	0.000379091
0.0286892	0.0017895	0.000432
0.0301382	0.001939	0.000482
0.03142636	0.0020885	0.000534364
0.03249036	0.0022385	0.00059
0.03325684	0.002388	0.00065
0.03290888	0.002538	0.000726727
0.03249892	0.002688	0.000804
0.0320458	0.0028385	0.000881636
0.0315812	0.0029885	0.000959091
0.03111516	0.0031385	0.001036545
0.0301822	0.003289	0.001120909
0.0300796	0.003439	0.001193273
0.02923424	0.0035895	0.001276182
0.029151	0.0037395	0.001348182
0.02831032	0.0038895	0.001431091
0.02823456	0.0040395	0.001502909
0.02739588	0.00419	0.001585818
0.0268708	0.00434	0.001664182
0.0264044	0.0044905	0.001741636
0.02595084	0.0046405	0.001818182
0.02550228	0.0047905	0.001896364
0.02505732	0.004941	0.001972727
0.02461524	0.005091	0.002049091
0.02417668	0.005241	0.002127273
0.02374184	0.0053915	0.002203636
0.02331056	0.0055415	0.00228

Apéndice 16. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR2.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.000306702	0.0001489	2.55273E-05
0.000611266	0.0002978	5.18727E-05
0.00089974	0.0004468	8.06909E-05
0.001172292	0.000596	0.000111655
0.0014313	0.000745	0.000144545
0.0016781	0.000894	0.000179164
0.001913752	0.001043	0.000215455
0.002138568	0.0011925	0.000253091
0.002352512	0.0013415	0.000292545
0.002553484	0.001491	0.000334727
0.00273996	0.00164	0.000379091
0.00286892	0.0017895	0.000432
0.00301382	0.001939	0.000482
0.003142636	0.0020885	0.000534364
0.003249036	0.0022385	0.00059
0.003325684	0.002388	0.00065
0.003290888	0.002538	0.000726727
0.003249892	0.002688	0.000804
0.00320458	0.0028385	0.000881636
0.00315812	0.0029885	0.000959091
0.003111516	0.0031385	0.001036545
0.00301822	0.003289	0.001120909
0.00300796	0.003439	0.001193273
0.002923424	0.0035895	0.001276182
0.0029151	0.0037395	0.001348182
0.002831032	0.0038895	0.001431091
0.002823456	0.0040395	0.001502909
0.002739588	0.00419	0.001585818
0.00268708	0.00434	0.001664182
0.00264044	0.0044905	0.001741636
0.002595084	0.0046405	0.001818182
0.002550228	0.0047905	0.001896364
0.002505732	0.004941	0.001972727
0.002461524	0.005091	0.002049091
0.002417668	0.005241	0.002127273
0.002374184	0.0053915	0.002203636

Apéndice 17. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR3.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.00306702	0.0001489	2.55273E-05
0.00612223	0.0002978	5.16182E-05
0.00908572	0.00044675	7.92727E-05
0.01195484	0.0005955	0.000108182
0.01473984	0.0007445	0.000138273
0.01744748	0.0008935	0.000169473
0.0200826	0.001043	0.000201636
0.02264752	0.001192	0.000234909
0.02514328	0.001341	0.000269091
0.02756352	0.00149	0.000304727
0.02989088	0.001639	0.000342364
0.0321214	0.0017885	0.000381636
0.03398524	0.001938	0.000426182
0.0362524	0.002087	0.000464545
0.03822564	0.002236	0.000506909
0.04005148	0.0023855	0.000551636
0.04173716	0.002535	0.000598182
0.04326252	0.0026845	0.000647091
0.04387988	0.002834	0.000709273
0.04456532	0.002984	0.000770909
0.04397424	0.003134	0.000851818
0.04336652	0.0032845	0.000932364
0.04273372	0.0034345	0.001012545
0.042089	0.003585	0.001092545
0.04144188	0.003735	0.001172545
0.04079584	0.003885	0.001252182
0.04015256	0.0040355	0.001331818
0.0395126	0.0041855	0.001411273
0.03887604	0.004336	0.001490727
0.03824332	0.004486	0.001569818
0.03761436	0.0046365	0.001649091
0.03639172	0.0047865	0.001736545
0.03615636	0.004937	0.00181
0.03509012	0.005087	0.001894545
0.03489892	0.005237	0.001967273
0.03385552	0.0053875	0.002052727
0.0318226	0.0055385	0.002149091
0.0317192	0.0056885	0.00222

Apéndice 18. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR4.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.00306702	0.0001489	2.55273E-05
0.00612223	0.0002978	5.16182E-05
0.00908572	0.00044675	7.92727E-05
0.01195484	0.0005955	0.000108182
0.01473984	0.0007445	0.000138273
0.01744748	0.0008935	0.000169473
0.0200826	0.001043	0.000201636
0.02264752	0.001192	0.000234909
0.02514328	0.001341	0.000269091
0.02756352	0.00149	0.000304727
0.02989088	0.001639	0.000342364
0.0321214	0.0017885	0.000381636
0.03398524	0.001938	0.000426182
0.0362524	0.002087	0.000464545
0.03822564	0.002236	0.000506909
0.04005148	0.0023855	0.000551636
0.04173716	0.002535	0.000598182
0.04326252	0.0026845	0.000647091
0.04387988	0.002834	0.000709273
0.04456532	0.002984	0.000770909
0.04397424	0.003134	0.000851818
0.04336652	0.0032845	0.000932364
0.04273372	0.0034345	0.001012545
0.042089	0.003585	0.001092545
0.04144188	0.003735	0.001172545
0.04079584	0.003885	0.001252182
0.04015256	0.0040355	0.001331818
0.0395126	0.0041855	0.001411273
0.03887604	0.004336	0.001490727
0.03824332	0.004486	0.001569818
0.03761436	0.0046365	0.001649091
0.03639172	0.0047865	0.001736545
0.03615636	0.004937	0.00181
0.03509012	0.005087	0.001894545
0.03489892	0.005237	0.001967273
0.03385552	0.0053875	0.002052727
0.0318226	0.0055385	0.002149091
0.0317192	0.0056885	0.00222

Apéndice 19. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR5.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003091576	0.0001489	2.19833E-05
0.006165668	0.0002978	0.00004465
0.00908188	0.00044675	0.00006995
0.01184296	0.000596	9.71167E-05
0.01447684	0.000745	0.000125883
0.01699848	0.000894	0.0001561
0.01941804	0.001043	0.000187667
0.02174048	0.001192	0.0002205
0.02396776	0.0013415	0.000255
0.02608708	0.0014905	0.000292167
0.02808132	0.00164	0.000331833
0.02954116	0.0017895	0.000380167
0.03153924	0.0019385	0.00042
0.03258708	0.002088	0.000473667
0.03374832	0.0022375	0.000525
0.03468804	0.0023875	0.000579167
0.0347078	0.0025375	0.000646833
0.03449824	0.0026875	0.000717667
0.03411524	0.0028375	0.00079
0.03368344	0.0029875	0.0008625
0.0332412	0.003138	0.000934833
0.03279912	0.003288	0.001007167
0.03235908	0.003438	0.001079167
0.0319218	0.003588	0.001151333
0.03148748	0.0037385	0.001223333
0.03057852	0.0038885	0.001301667
0.0305102	0.0040385	0.001368833
0.02969868	0.004189	0.001445833
0.02965348	0.004339	0.0015125
0.0288508	0.004489	0.0015895
0.02835972	0.0046395	0.001662167
0.02792924	0.0047895	0.001733333
0.02751376	0.0049395	0.001805
0.02676876	0.00509	0.001881667
0.02662948	0.00524	0.001948333
0.02525844	0.0053905	0.002031667
0.02567296	0.00554	0.002091667

Apéndice 20. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR6.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003091576	0.0001489	2.19833E-05
0.006165668	0.0002978	0.00004465
0.00908188	0.00044675	0.00006995
0.01184296	0.000596	9.71167E-05
0.01447684	0.000745	0.000125883
0.01699848	0.000894	0.0001561
0.01941804	0.001043	0.000187667
0.02174048	0.001192	0.0002205
0.02396776	0.0013415	0.000255
0.02608708	0.0014905	0.000292167
0.02808132	0.00164	0.000331833
0.02954116	0.0017895	0.000380167
0.03153924	0.0019385	0.00042
0.03258708	0.002088	0.000473667
0.03374832	0.0022375	0.000525
0.03468804	0.0023875	0.000579167
0.0347078	0.0025375	0.000646833
0.03449824	0.0026875	0.000717667
0.03411524	0.0028375	0.00079
0.03368344	0.0029875	0.0008625
0.0332412	0.003138	0.000934833
0.03279912	0.003288	0.001007167
0.03235908	0.003438	0.001079167
0.0319218	0.003588	0.001151333
0.03148748	0.0037385	0.001223333
0.03057852	0.0038885	0.001301667
0.0305102	0.0040385	0.001368833
0.02969868	0.004189	0.001445833
0.02965348	0.004339	0.0015125
0.0288508	0.004489	0.0015895
0.02835972	0.0046395	0.001662167
0.02792924	0.0047895	0.001733333
0.02751376	0.0049395	0.001805
0.02676876	0.00509	0.001881667
0.02662948	0.00524	0.001948333
0.02525844	0.0053905	0.002031667
0.02567296	0.00554	0.002091667

Apéndice 21. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR7.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003091576	0.0001489	2.22167E-05
0.00617466	0.0002978	0.00004475
0.00916564	0.0004467	6.91333E-05
0.01206392	0.0005955	0.00009465
0.014884	0.0007445	0.000121133
0.0176334	0.0008935	0.000148517
0.02031724	0.0010425	0.000176667
0.02293888	0.0011915	0.000205833
0.02550004	0.001341	0.000235833
0.02799856	0.00149	0.000267333
0.03042344	0.001639	0.000301
0.03276388	0.001788	0.0003365
0.0350098	0.0019375	0.000373333
0.03715296	0.0020865	0.000411167
0.0391894	0.002236	0.000450333
0.04111388	0.002385	0.000490833
0.04291556	0.0025345	0.000532833
0.0445754	0.002684	0.000576667
0.04606384	0.0028335	0.000622833
0.0465768	0.002983	0.000682167
0.0470798	0.003133	0.000741667
0.04633112	0.003283	0.000817833
0.04570692	0.0034335	0.0008915
0.04509304	0.0035835	0.000964833
0.04447872	0.0037335	0.001038333
0.04386584	0.003884	0.001112167
0.04325664	0.004034	0.0011865
0.04265172	0.0041845	0.001261167
0.04205168	0.0043345	0.001336333
0.04145616	0.0044845	0.001412
0.04086604	0.004635	0.001488333
0.04028092	0.004785	0.001565167
0.0397012	0.004935	0.0016425
0.03912692	0.0050855	0.00172
0.03796828	0.005236	0.001808333
0.03778332	0.005386	0.001883333
0.03678428	0.005536	0.001971667
0.03429292	0.005687	0.002098333

Apéndice 22. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR8.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003091576	0.0001489	2.22167E-05
0.00617466	0.0002978	0.00004475
0.00916564	0.0004467	6.91333E-05
0.01206392	0.0005955	0.00009465
0.014884	0.0007445	0.000121133
0.0176334	0.0008935	0.000148517
0.02031724	0.0010425	0.000176667
0.02293888	0.0011915	0.000205833
0.02550004	0.001341	0.000235833
0.02799856	0.00149	0.000267333
0.03042344	0.001639	0.000301
0.03276388	0.001788	0.0003365
0.0350098	0.0019375	0.000373333
0.03715296	0.0020865	0.000411167
0.0391894	0.002236	0.000450333
0.04111388	0.002385	0.000490833
0.04291556	0.0025345	0.000532833
0.0445754	0.002684	0.000576667
0.04606384	0.0028335	0.000622833
0.0465768	0.002983	0.000682167
0.0470798	0.003133	0.000741667
0.04633112	0.003283	0.000817833
0.04570692	0.0034335	0.0008915
0.04509304	0.0035835	0.000964833
0.04447872	0.0037335	0.001038333
0.04386584	0.003884	0.001112167
0.04325664	0.004034	0.0011865
0.04265172	0.0041845	0.001261167
0.04205168	0.0043345	0.001336333
0.04145616	0.0044845	0.001412
0.04086604	0.004635	0.001488333
0.04028092	0.004785	0.001565167
0.0397012	0.004935	0.0016425
0.03912692	0.0050855	0.00172
0.03796828	0.005236	0.001808333
0.03778332	0.005386	0.001883333
0.03678428	0.005536	0.001971667
0.03429292	0.005687	0.002098333

Apéndice 23. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR9.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003109616	0.0001489	0.00001164
0.006206604	0.0002978	2.36308E-05
0.00915264	0.0004467	3.85846E-05
0.01194648	0.0005955	5.54615E-05
0.01462032	0.0007445	7.32462E-05
0.01719068	0.000894	9.17692E-05
0.01966756	0.001043	0.000110892
0.02205752	0.001192	0.000130569
0.0243648	0.001341	0.000150738
0.02658592	0.0014905	0.000171385
0.0287014	0.0016395	0.000193846
0.03033548	0.001789	0.000222154
0.0324248	0.001938	0.000247692
0.03363568	0.0020875	0.000283077
0.03448756	0.0022375	0.000322462
0.03596724	0.002387	0.000355077
0.03684008	0.002537	0.000394
0.0351796	0.002687	0.000681385

Apéndice 24. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR10.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003109616	0.0001489	1.91846E-05
0.006206604	0.0002978	3.87538E-05
0.00915264	0.0004467	6.11077E-05
0.01194648	0.0005955	8.53538E-05
0.01462032	0.0007445	0.000110846
0.01719068	0.000894	0.000137569
0.01966756	0.001043	0.000165385
0.02205752	0.001192	0.000194308
0.0243648	0.001341	0.000224154
0.02658592	0.0014905	0.000255692
0.0287014	0.0016395	0.000289538
0.03033548	0.001789	0.000331538
0.0324248	0.001938	0.000367692
0.03363568	0.0020875	0.000417231
0.03494452	0.002237	0.000464615
0.03605572	0.002387	0.000513846
0.0368618	0.0025365	0.000566769
0.0328086	0.002688	0.000633385

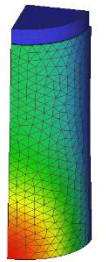
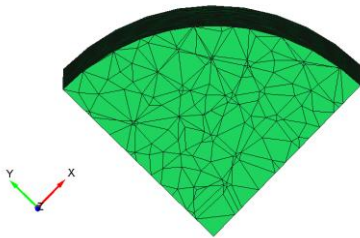
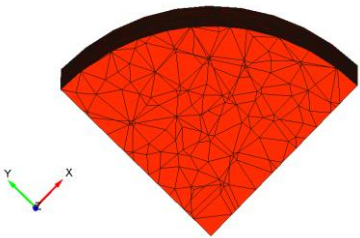
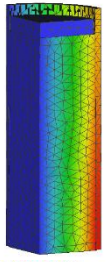
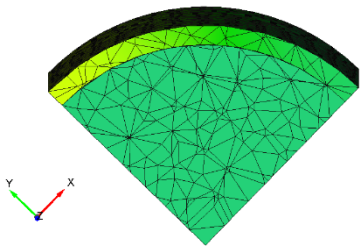
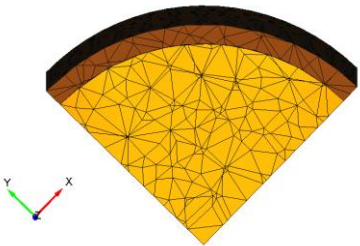
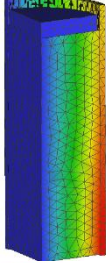
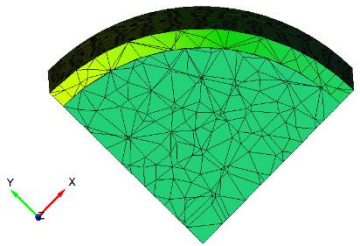
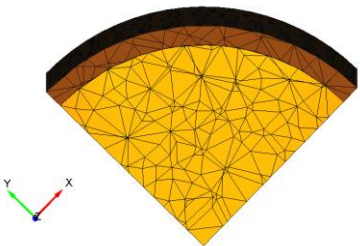
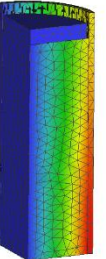
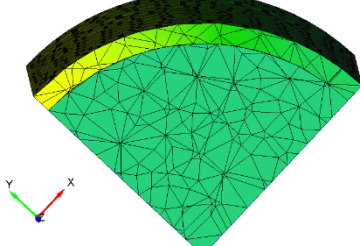
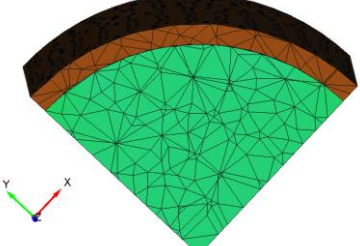
Apéndice 25. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR11.

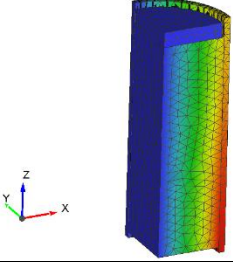
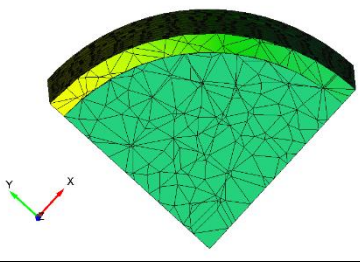
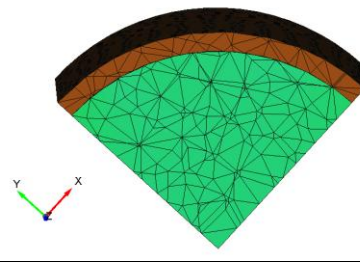
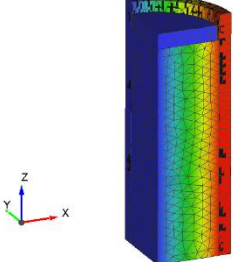
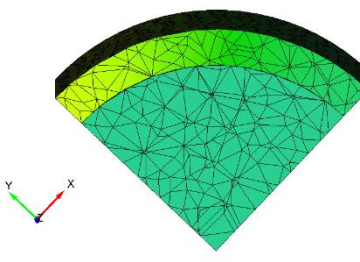
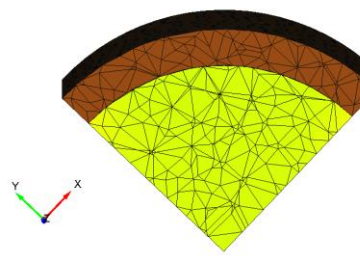
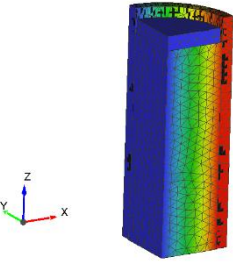
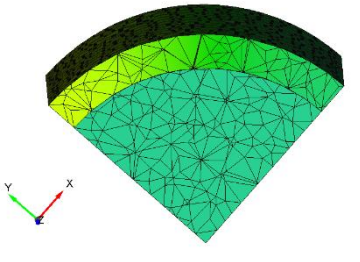
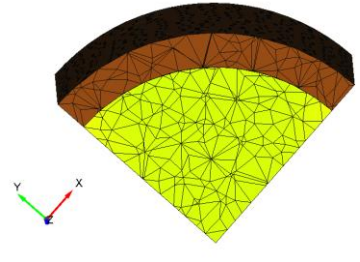
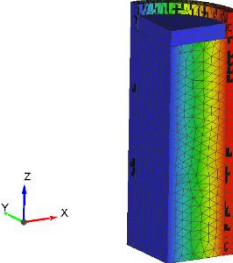
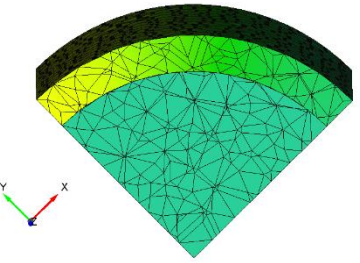
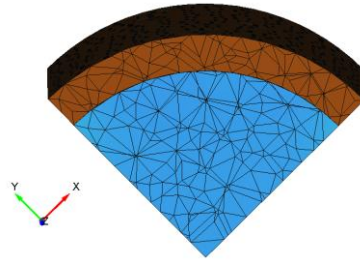
Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.00310962	0.0001489	1.10292E-05
0.0062138	0.00029775	2.21385E-05
0.00923076	0.0004467	3.52769E-05
0.01215592	0.0005955	5.01385E-05
0.01500772	0.0007445	6.56462E-05
0.01779484	0.0008935	8.15846E-05
0.02052232	0.0010425	9.78923E-05
0.02319468	0.0011915	0.000114508
0.02581396	0.0013405	0.000131446
0.0283822	0.0014895	0.000148677
0.030895	0.001639	0.000166615
0.03333664	0.001788	0.000185846
0.03568716	0.001937	0.000206769
0.03793656	0.002086	0.000229692
0.04007844	0.0022355	0.000254308
0.0421102	0.0023845	0.000281077
0.04402664	0.002534	0.000309385
0.04581588	0.0026835	0.000339385
0.04745608	0.0028325	0.000370923
0.04891236	0.002982	0.000404308
0.0468258	0.003132	0.000798308

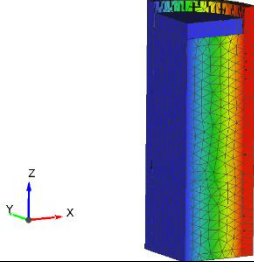
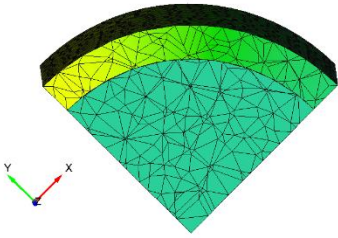
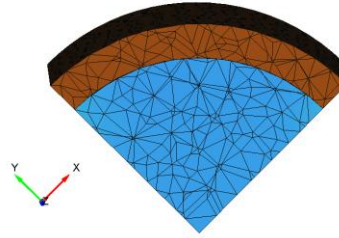
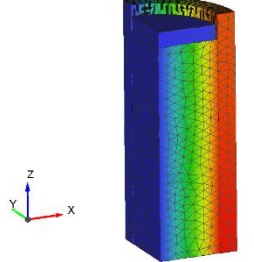
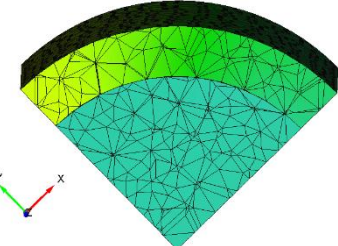
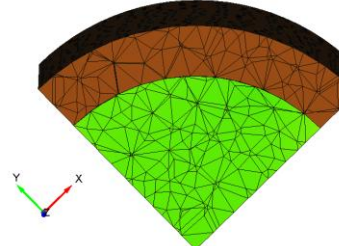
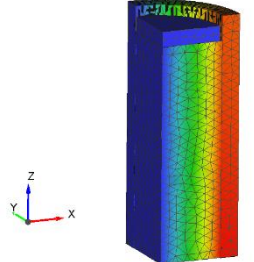
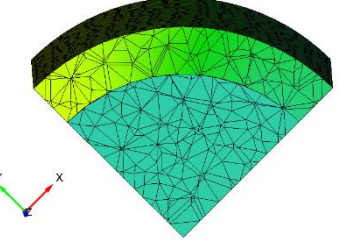
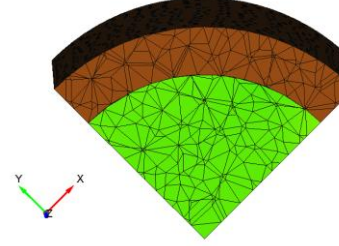
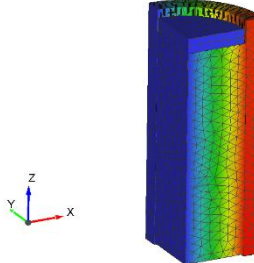
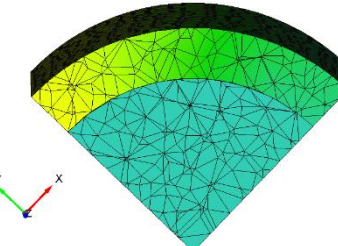
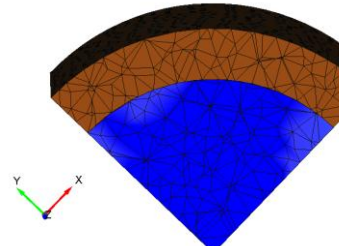
Apéndice 26. Esfuerzo y deformación axiales y lateral para CR12.

Axial stress	Axial strain	Transverse strain
MPa	MPa	-
0	0	0
0.003109616	0.0001489	1.30527E-05
0.006213796	0.00029775	2.62182E-05
0.00923076	0.0004467	4.17818E-05
0.01215592	0.0005955	5.93636E-05
0.01500772	0.0007445	7.76364E-05
0.01779484	0.0008935	9.63636E-05
0.02052232	0.0010425	0.000115564
0.02319468	0.0011915	0.000135145
0.02581396	0.0013405	0.000155036
0.0283822	MPa	0.000175236
0.030895	0.001639	0.000196182
0.03333664	0.001788	0.000219091
0.03568716	0.001937	0.000243636
0.03793656	0.002086	0.000271091
0.04007844	0.0022355	0.000300909
0.0421102	0.0023845	0.000332909
0.04402664	0.002534	0.000366545
0.04581588	0.0026835	0.000402
0.04745608	0.0028325	0.000439273
0.04891236	0.002982	0.000478909
0.046505	0.003133	0.000873455

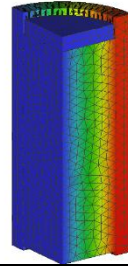
Apéndice 27. Desplazamientos y esfuerzos laterales y axiales para las columnas de sección transversal circular.

t/d	Column	Displacement in X direction	Stress σ_{xx} in the jacket and core	Stress σ_{zz} in the core
N/A	Without jacket	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000304 0.000266 0.000228 0.000190 0.000152 0.000114 0.000076 0.000038 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.166667139 Time: 65.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 46.041667 Time: 20.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 46.041667 Time: 20.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>
0,05	CC1	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000156 0.000135 0.000116 0.000097 0.000077 0.000058 0.000039 0.000019 0.000000</p> <p>Deformation scale: 16.3632139677 Time: 55.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 41.250389 Time: 22.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 41.250389 Time: 22.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CC2	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000157 0.000137 0.000118 0.000098 0.000078 0.000059 0.000039 0.000020 0.000000</p> <p>Deformation scale: 16.7424242982 Time: 55.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 41.896061 Time: 22.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 41.250389 Time: 22.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CC3	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000171 0.000150 0.000128 0.000107 0.000086 0.000064 0.000043 0.000021 0.000000</p> <p>Deformation scale: 15.029167227 Time: 61.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 33.433483 Time: 27.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.22 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 33.433483 Time: 27.0000 ATENA x84 V. 6.0.0.23 License 631</p>

	CC4	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000168 0.000145 0.000124 0.000103 0.000083 0.000062 0.000041 0.000021 0.000000</p> <p>Deformation scale: 15.3472222734 Time: 60.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 33.93003 Time: 27.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 33.93003 Time: 27.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
0,10	CC5	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000170 0.000148 0.000127 0.000106 0.000085 0.000064 0.000042 0.000021 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.1113995223 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 40.036232 Time: 23.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 40.036232 Time: 23.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CC6	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000170 0.000148 0.000127 0.000106 0.000085 0.000064 0.000042 0.000021 0.000000</p> <p>Deformation scale: 13.7861631449 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 36.280296 Time: 23.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 36.280296 Time: 23.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CC7	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000160 0.000140 0.000120 0.000100 0.000080 0.000060 0.000040 0.000020 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.1666967139 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 32.53655 Time: 28.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 32.53655 Time: 28.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>

	CC8	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000160 0.000140 0.000120 0.000100 0.000080 0.000060 0.000040 0.000020 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.047576002 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 32.638131 Time: 28.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 32.638131 Time: 28.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>
0,15	CC9	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000169 0.000148 0.000127 0.000105 0.000084 0.000063 0.000042 0.000021 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.166967139 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 36.65849 Time: 25.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 36.65849 Time: 25.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>
	CC10	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000169 0.000148 0.000127 0.000105 0.000084 0.000063 0.000042 0.000021 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.166967139 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 36.833333 Time: 25.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 36.833333 Time: 25.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>
	CC11	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000155 0.000135 0.000116 0.000097 0.000077 0.000058 0.000039 0.000019 0.000000</p> <p>Deformation scale: 14.166967139 Time: 65.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 30.694445 Time: 30.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 30.694445 Time: 30.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>

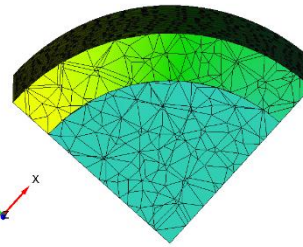
CC12



Displacements
X(1)
[m]

0.000155
0.000135
0.000116
0.000097
0.000077
0.000058
0.000039
0.000019
0.000000

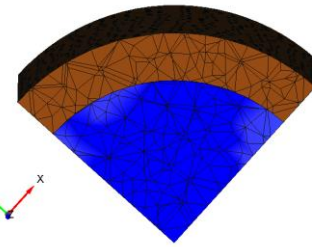
Deformation scale:
14.1668867139
Time: 65.0000
ATENA
x84 V. 6.0.0.23218
License 631



Stress
Sigma XX
[MPa]

15.0
11.9
8.8
5.6
2.5
-0.6
-3.8
-8.9
-10.0

Deformation sc
30.694445
Time: 30.0000
ATENA
x84 V. 6.0.0.23
License 631

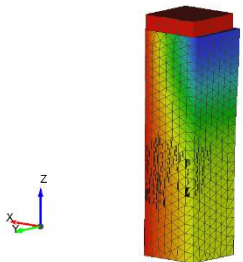
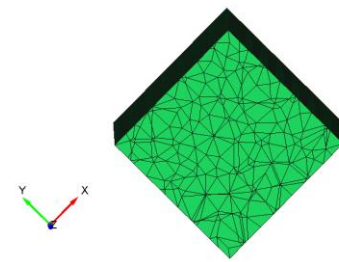
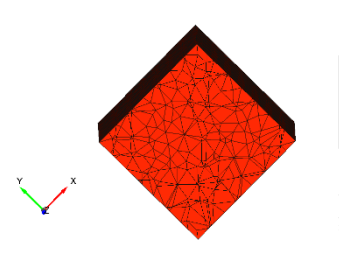
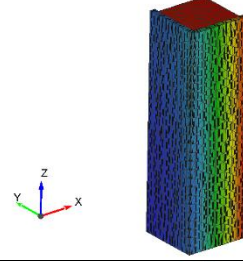
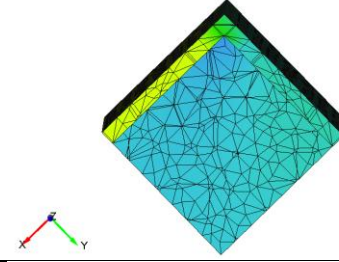
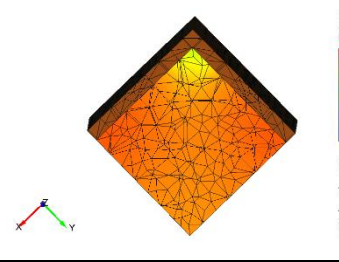
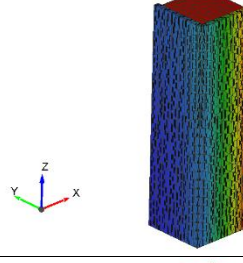
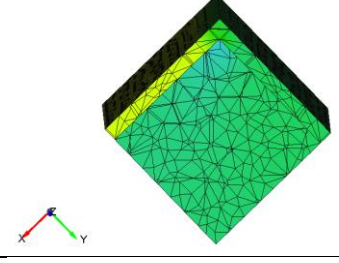
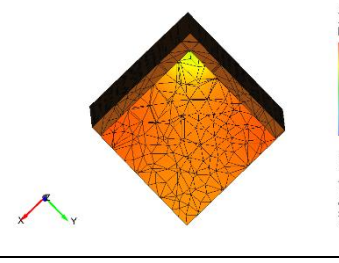
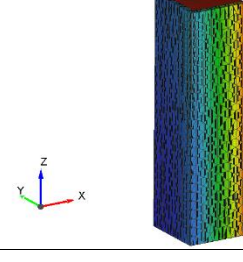
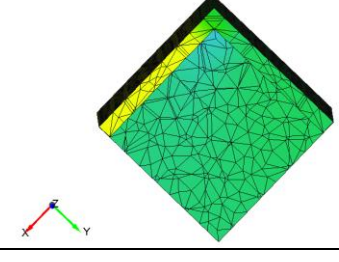
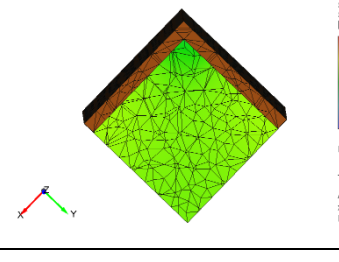


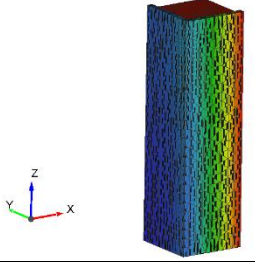
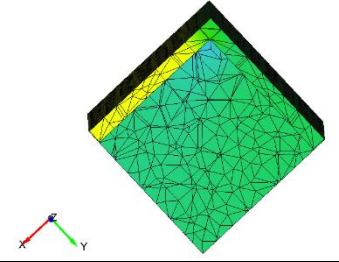
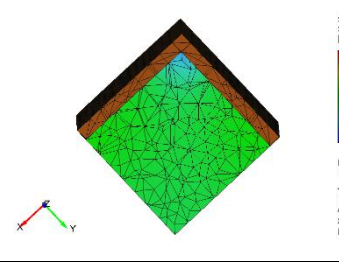
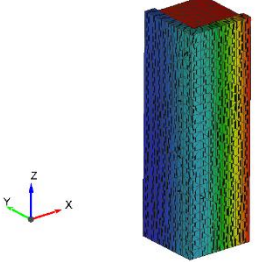
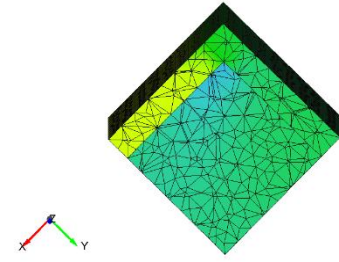
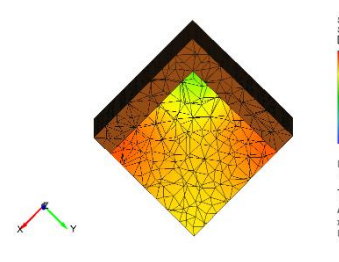
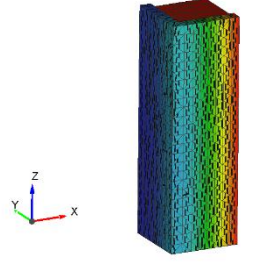
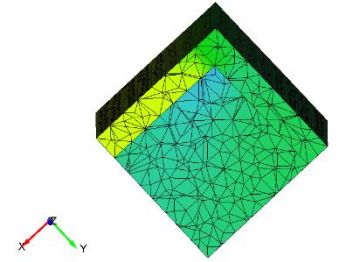
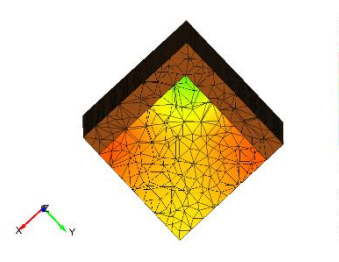
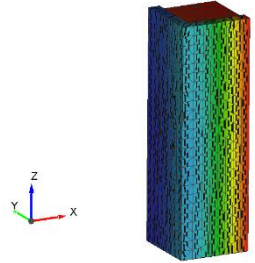
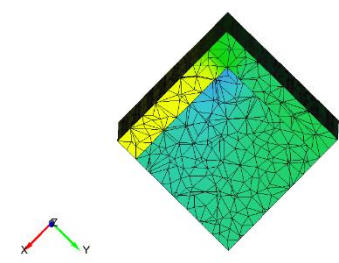
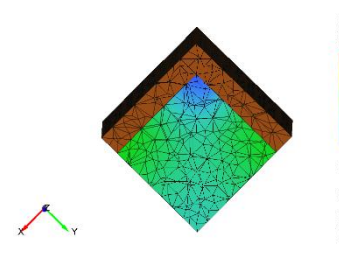
Stress
Sigma ZZ
[MPa]

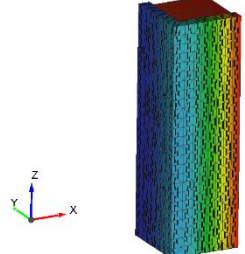
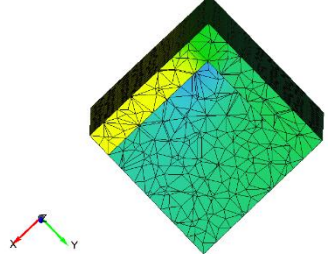
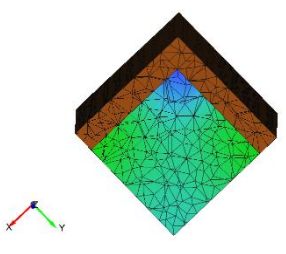
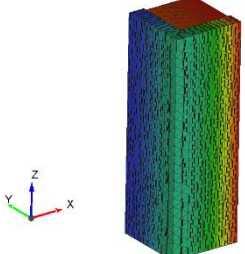
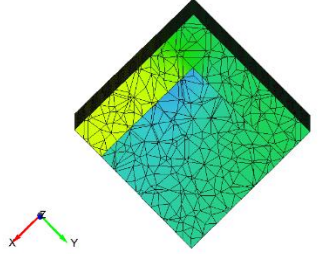
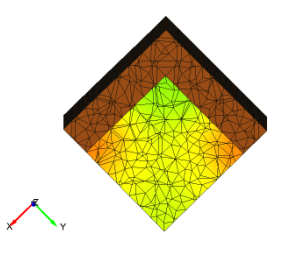
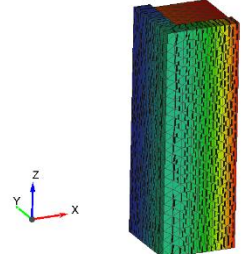
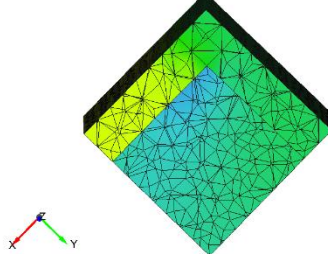
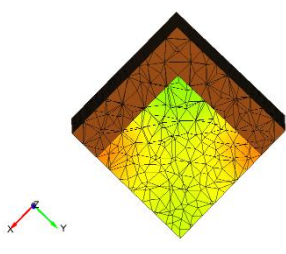
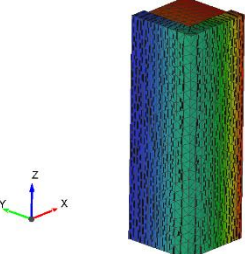
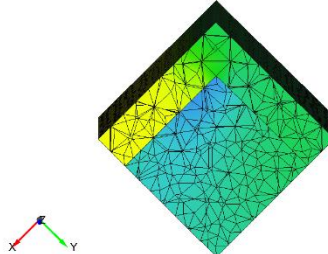
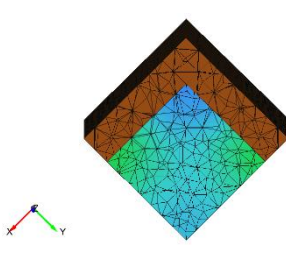
-30.0
-33.1
-36.4
-39.4
-42.5
-45.6
-48.8
-51.9
-55.0

Deformation sc
30.694445
Time: 30.0000
ATENA
x84 V. 6.0.0.23
License 631

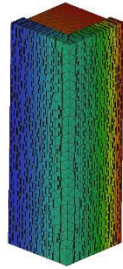
Apéndice 28. Desplazamientos y esfuerzos laterales y axiales para las columnas de sección transversal rectangular.

t/d	Column	Displacement in X direction	Stress σ_{xx} in the core	Stress σ_{zz} in the core
N/A	Without jacket	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000000 -0.000046 -0.000092 -0.000138 -0.000184 -0.000230 -0.000276 -0.000321 -0.000367</p> <p>Deformation scale: 10.455104551 Time: 50.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc: 34.850349 Time: 15.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc: 34.850349 Time: 15.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>
0,05	CR1	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000000 -0.000016 -0.000033 -0.000049 -0.000066 -0.000082 -0.000099 -0.000115 -0.000132</p> <p>Deformation scale: 13.6811453178 Time: 37.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc: 31.965863 Time: 16.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc: 31.965863 Time: 16.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>
	CR2	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000000 -0.000016 -0.000032 -0.000047 -0.000063 -0.000079 -0.000095 -0.000111 -0.000126</p> <p>Deformation scale: 14.4368293055 Time: 36.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc: 31.928287 Time: 16.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc: 31.928287 Time: 16.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>
	CR3	 <p>Displacements X(1) [m] 0.000000 -0.000016 -0.000032 -0.000046 -0.000064 -0.000081 -0.000097 -0.000113 -0.000129</p> <p>Deformation scale: 13.6803161683 Time: 38.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa] 15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc: 32.391213 Time: 16.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa] -30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc: 32.391213 Time: 16.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>

	CR4	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000000 -0.000017 -0.000033 -0.000050 -0.000066 -0.000083 -0.000099 -0.000116 -0.000133</p> <p>Deformation scale: 13.0879347732 Time: 39.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 25.799041 Time: 20.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 25.799041 Time: 20.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
0,10	CR5	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000000 -0.000016 -0.000033 -0.000049 -0.000065 -0.000081 -0.000098 -0.000114 -0.000130</p> <p>Deformation scale: 14.1285196036 Time: 37.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 30.450954 Time: 17.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 30.450954 Time: 17.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CR6	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000000 -0.000015 -0.000030 -0.000045 -0.000060 -0.000075 -0.000090 -0.000105 -0.000120</p> <p>Deformation scale: 14.6841588425 Time: 35.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 30.51173 Time: 17.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 30.51173 Time: 17.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CR7	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>0.000000 -0.000015 -0.000030 -0.000045 -0.000060 -0.000074 -0.000089 -0.000104 -0.000119</p> <p>Deformation scale: 14.1285196036 Time: 37.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>15.0 11.9 8.8 5.6 2.5 -0.6 -3.8 -6.9 -10.0</p> <p>Deformation sc 24.843935 Time: 21.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>-30.0 -33.1 -36.3 -39.4 -42.5 -45.6 -48.8 -51.9 -55.0</p> <p>Deformation sc 24.843935 Time: 21.0000 ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>

	CR8	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>Deformation scale: 15.3751537515</p> <p>Time: 34.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>Deformation sc 24.786867</p> <p>Time: 21.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>Deformation sc 24.786867</p> <p>Time: 21.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
0,15	CR9	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>Deformation scale: 30.75030750307</p> <p>Time: 17.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>Deformation sc 30.750308</p> <p>Time: 17.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>Deformation sc 30.750308</p> <p>Time: 17.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CR10	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>Deformation scale: 30.59206060649</p> <p>Time: 17.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>Deformation sc 30.592061</p> <p>Time: 17.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>Deformation sc 30.592061</p> <p>Time: 17.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>
	CR11	 <p>Displacements X(1) [m]</p> <p>Deformation scale: 25.8536649089</p> <p>Time: 20.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23218 License 631</p>	 <p>Stress Sigma XX [MPa]</p> <p>Deformation sc 25.853665</p> <p>Time: 20.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>	 <p>Stress Sigma ZZ [MPa]</p> <p>Deformation sc 25.853665</p> <p>Time: 20.0000</p> <p>ATENA x64 V. 6.0.0.23 License 631</p>

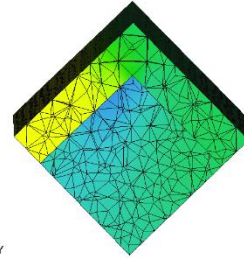
CR12



Displacements
X(1)
[m]

0.0000000
-0.0000050
-0.0000100
-0.0000150
-0.0000199
-0.0000249
-0.0000299
-0.0000349
-0.0000399

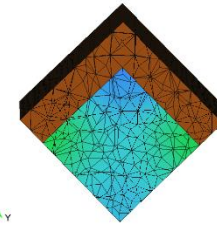
Deformation scale:
26.13776137761
Time: 20.0000
ATENA
x64 V. 6.0.0.23218
License 631



Stress
Sigma XX
[MPa]

15.0
11.9
8.8
5.6
2.5
-0.6
-3.8
-6.9
-10.0

Deformation sc
26.137761
Time: 20.0000
ATENA
x64 V. 6.0.0.23
License 631



Stress
Sigma ZZ
[MPa]

-30.0
-33.1
-36.3
-39.4
-42.5
-45.6
-48.8
-51.9
-55.0

Deformation sc
26.137761
Time: 20.0000
ATENA
x64 V. 6.0.0.23
License 631

Apéndice 30. Hoja de cálculo para obtener gráfico Momento vs. Curvatura en la pila 3 del Río Lagarto.

SECTIONAL ANALYSIS
FOR 45° JACKETS DESIGN

DESIGN PARAMETERS		MATERIAL PROPERTIES	
Design of Transverse Reinforcement	0.25/100	Steel Yield Stress	510 MPa
Concrete Compressive Strength	30 MPa	Concrete Modulus of Elasticity	25000 MPa
Concrete Tensile Strength	0 MPa	Concrete Poisson's Ratio	0.2
Concrete Modulus of Elasticity	25000 MPa	Concrete Unit Weight	24 kN/m³
Concrete Density	2400 kg/m³	Concrete Thermal Expansion Coefficient	10 x 10⁻⁶ /°C
Concrete Unit Weight	24 kN/m³	Concrete Thermal Expansion Coefficient	10 x 10⁻⁶ /°C
Concrete Density	2400 kg/m³	Concrete Thermal Expansion Coefficient	10 x 10⁻⁶ /°C



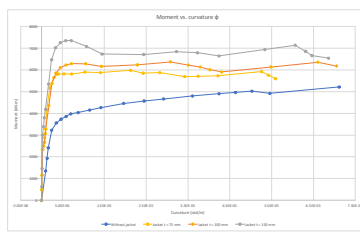
DESIGN PARAMETERS	
Design of Transverse Reinforcement	0.25/100
Concrete Compressive Strength	30 MPa
Concrete Tensile Strength	0 MPa
Concrete Modulus of Elasticity	25000 MPa
Concrete Density	2400 kg/m³
Concrete Unit Weight	24 kN/m³
Concrete Thermal Expansion Coefficient	10 x 10⁻⁶ /°C

DESIGN PARAMETERS	
Design of Transverse Reinforcement	0.25/100
Concrete Compressive Strength	30 MPa
Concrete Tensile Strength	0 MPa
Concrete Modulus of Elasticity	25000 MPa
Concrete Density	2400 kg/m³
Concrete Unit Weight	24 kN/m³
Concrete Thermal Expansion Coefficient	10 x 10⁻⁶ /°C

Node No.	Node X	Node Y	Displacement		Rotation	
			U	V	W	X
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Element No.	Element X1	Element Y1	Element X2	Element Y2	Displacement		Rotation	
					U	V	W	X
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	

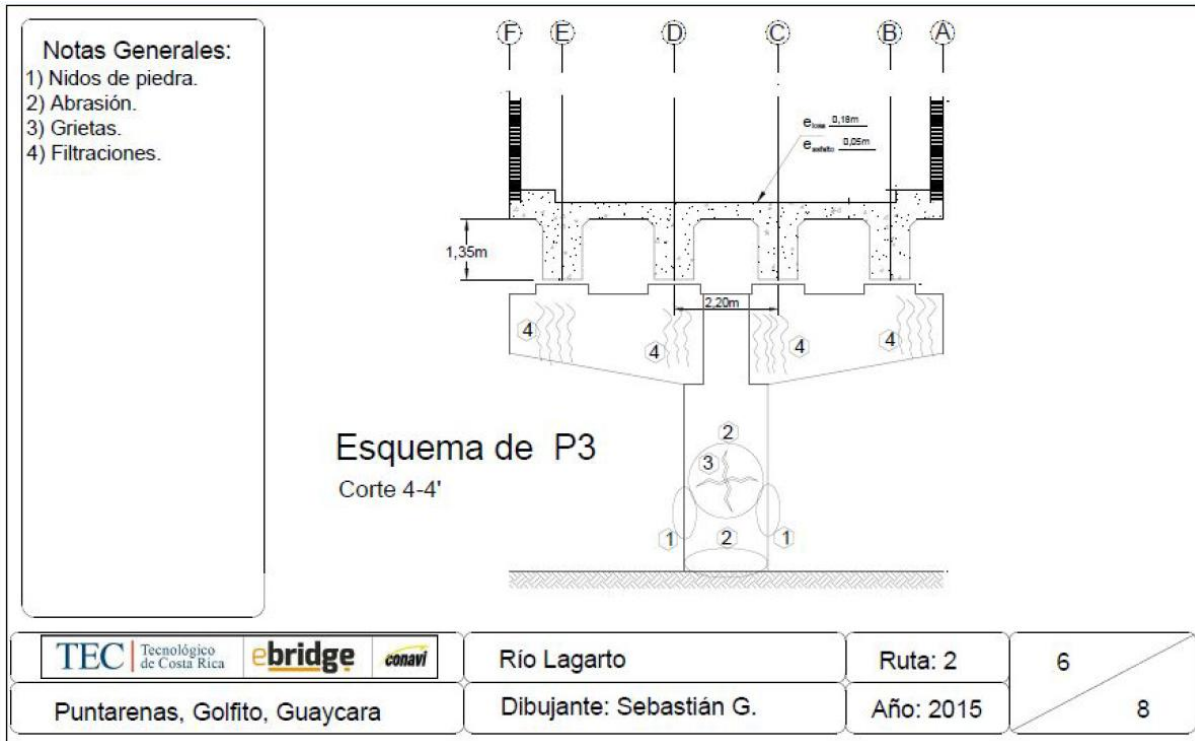
Element No.	Element X1	Element Y1	Element X2	Element Y2	Displacement U	Displacement V	Displacement W	Rotation X
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000



$$\begin{aligned}
 & \delta = \frac{1}{185} \frac{R \sqrt{R^2 - \Delta^2}}{\sqrt{R^2 - \Delta^2}} + 0.75 \left(\frac{\Delta}{R} \right) + \frac{\Delta}{R} \\
 & A_1 = R_1 + \Delta \delta \\
 & r_1 = R - (1 - \Delta \delta) \\
 & b_{12} = 2 + \sqrt{R^2 - r_1^2} \\
 & R_1 = R - \text{cover} - \frac{d}{2} - d_{\text{stirrup}} \\
 & S_{c1} = \frac{2 \pi R_1}{R_{\text{stirrup}}}
 \end{aligned}$$

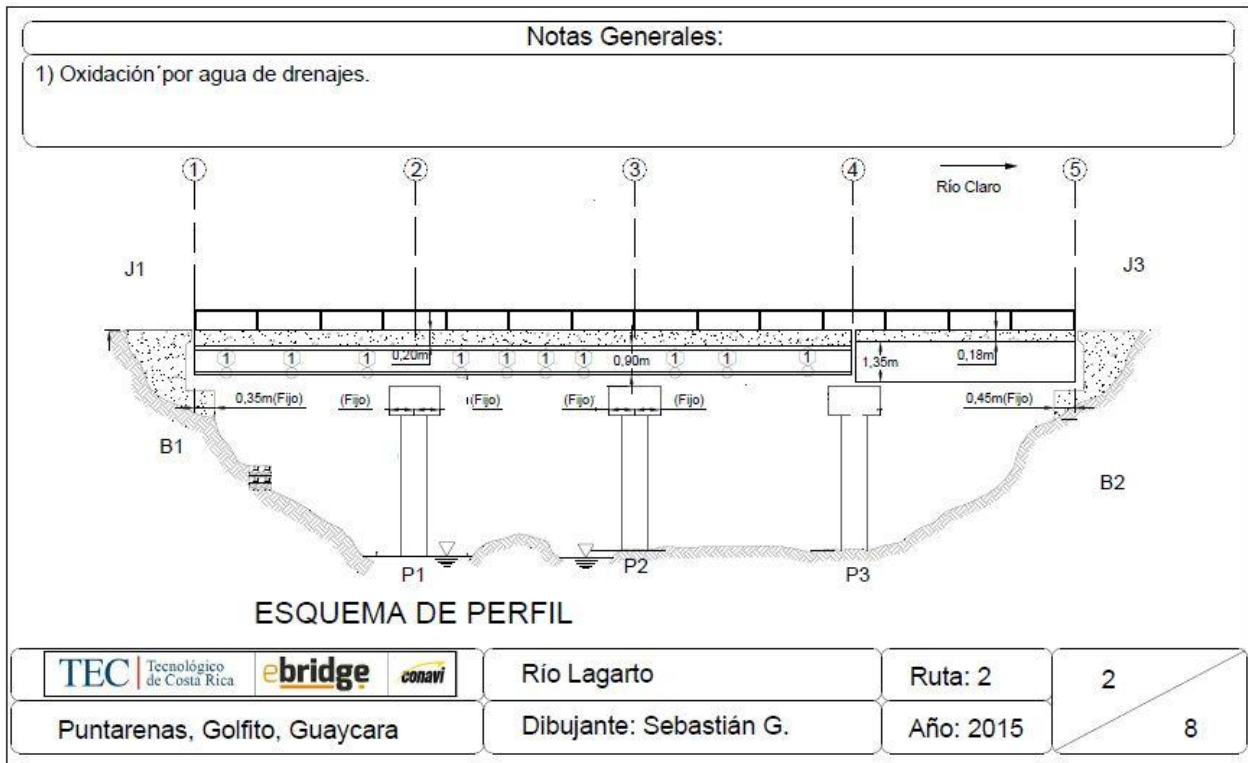
Anexos

Anexo 1. Esquema de daños en la pila 3 del puente Río Lagarto (corte 4-4').



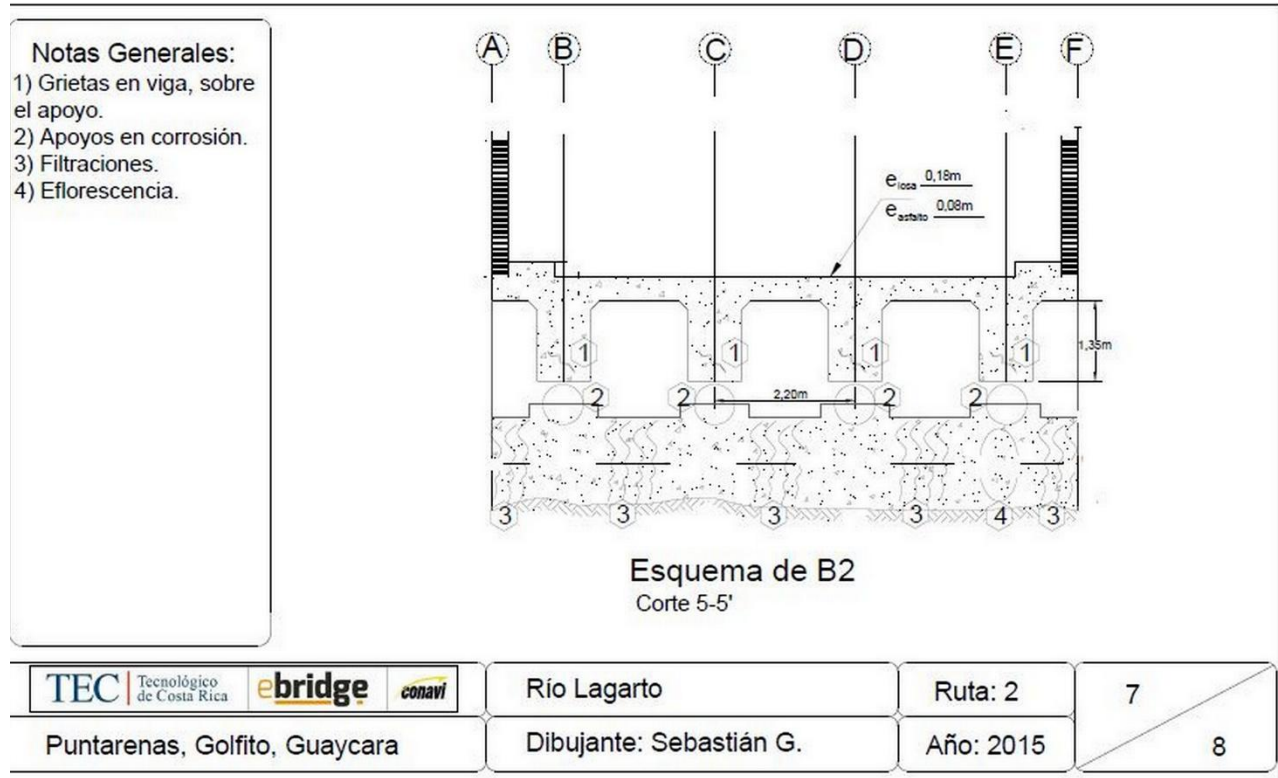
Fuente: Informe de Inspección de Inventario y Visual de Daños en puentes (Puente Sobre Río Lagarto), TEC (2015).

Anexo 2. Vista lateral y esquema de daños del puente Río Lagarto.



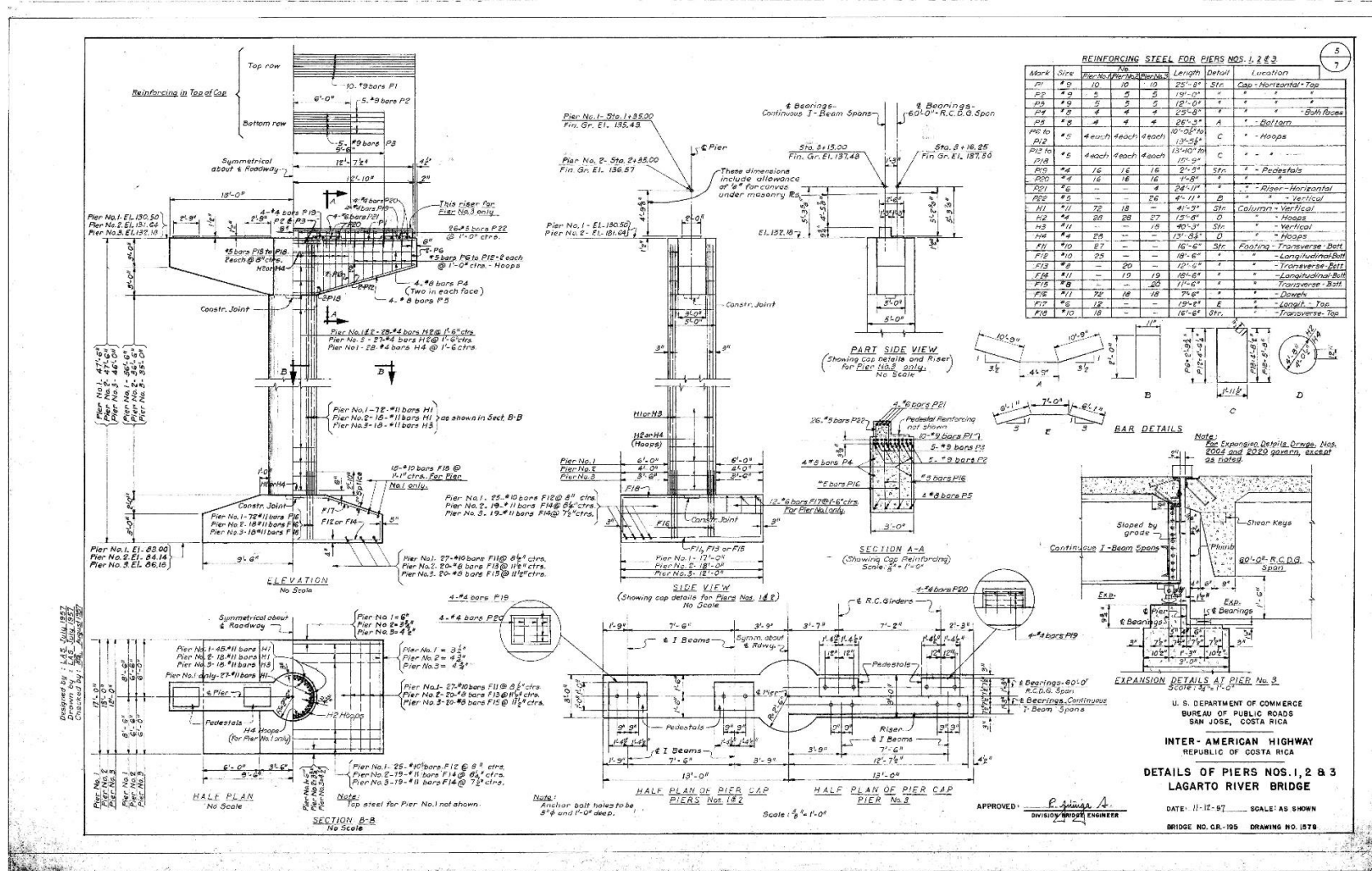
Fuente: Informe de Inspección de Inventario y Visual de Daños en puentes (Puente Sobre Río Lagarto), TEC (2015).

Anexo 3. Esquema de daños en la pila 3 del puente Río Lagarto (corte 5-5').



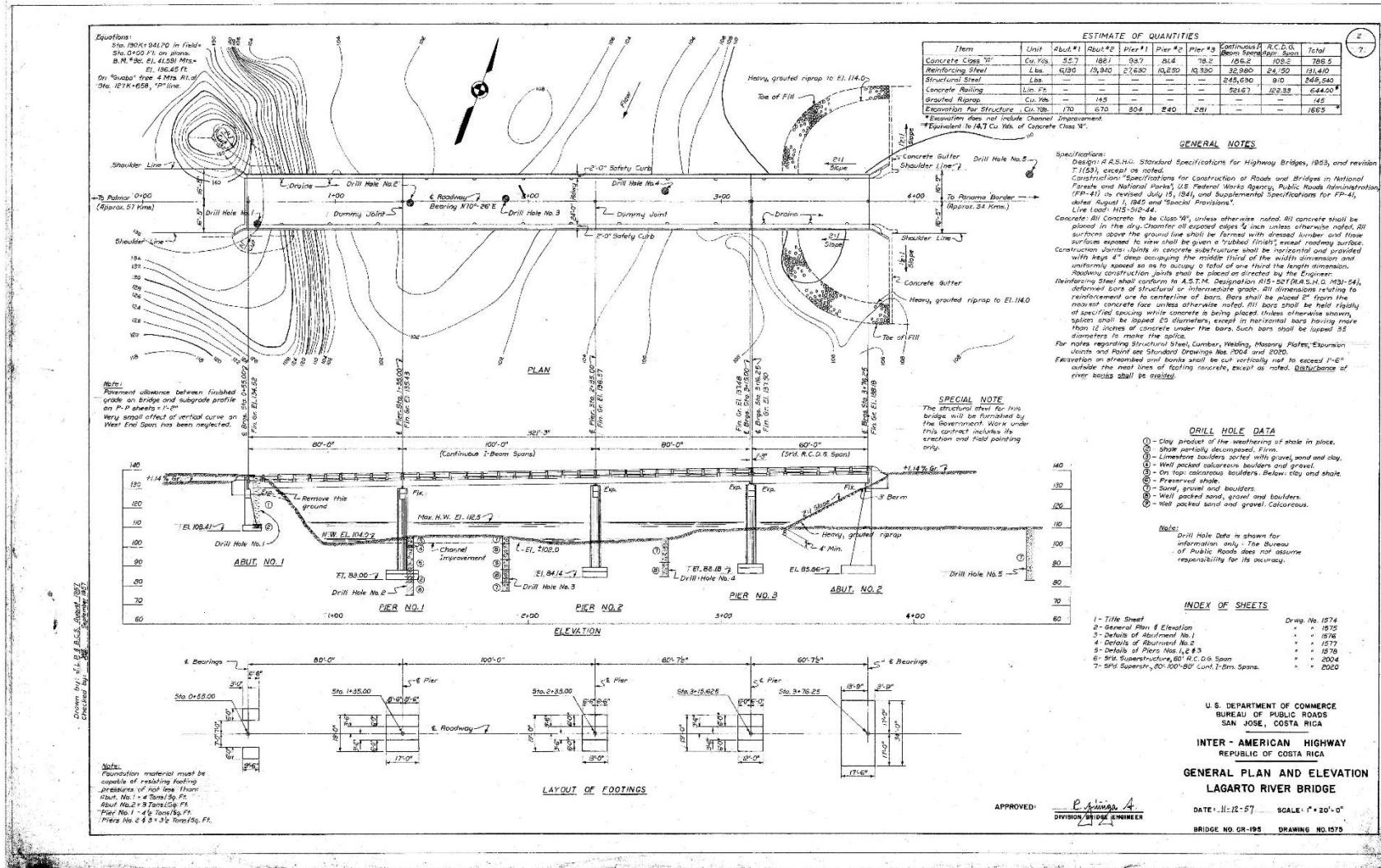
Fuente: Informe de Inspección de Inventario y Visual de Daños en puentes (Puente Sobre Río Lagarto), TEC (2015).

Anexo 4. Plano estructural de las pilas.



Fuente: Informe de Inspección de Inventario y Visual de Daños en puentes (Puente Sobre Río Lagarto), TEC (2015).

Anexo 5. Plano general y elevación del puente Río Lagarto.



Fuente: Informe de Inspección de Inventario y Visual de Daños en puentes (Puente Sobre Río Lagarto), TEC (2015).