

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO DEL REQUERIMIENTO DE ARMADURA MÍNIMA EN  
TÚNELES DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A PRESIÓN  
INTERIOR Y QUE UTILIZAN HORMIGONES DE ALTA  
RESISTENCIA**

**CONSIDERACIONES PARA DETERMINAR EL ACERO MÍNIMO DE  
REFUERZO EN TÚNELES DISEÑADOS CON HORMIGÓN DE ALTA  
RESISTENCIA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL,  
MENCIÓN ESTRUCTURAS**

**GERMAN DANIEL LARA CEVALLOS**

**german.lara@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: PhD. ING. CARLOS FABIÁN ÁVILA VEGA**

**carlos.avila@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero 2023**

## CERTIFICACIONES

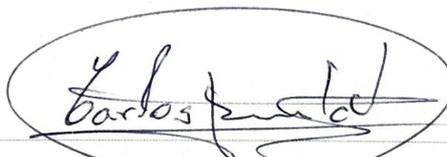
Yo, GERMAN DANIEL LARA CEVALLOS declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**GERMAN DANIEL LARA CEVALLOS**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por GERMAN DANIEL LARA CEVALLOS, bajo mi supervisión.



---

**PhD. ING. CARLOS FABIÁN ÁVILA VEGA**  
**DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**NOMBRE\_REVISOR1**  
**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**NOMBRE\_REVISOR2**  
**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

**Autor:** German Daniel Lara Cevallos

**Director:** PhD. ING. Carlos Fabián Ávila vega

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a las futuras generaciones de profesionales en este ámbito que muestren interés en el diseño y construcción de túneles, espero que mis esfuerzos a través de este trabajo de tesis sean una fuente de inspiración y guía para cada uno de ellos. A través de mi trabajo, espero haber demostrado que es posible lograr nuestros objetivos con la dedicación y unión de conocimientos científicos y tecnológicos. Espero que mi trabajo sea un recordatorio para todos los futuros ingenieros civiles de que hay que iniciarse en los proyectos soñados para así ir logrando los resultados esperados.

Mi trabajo de tesis también es una invitación para todos los colegas a que busquen nuevas formas de mejorar la calidad de vida de la humanidad. Los ingenieros civiles de hoy tenemos un gran potencial para mejorar la infraestructura del mundo, construir mejores edificios, reducir el impacto ambiental y desarrollar soluciones innovadoras para los problemas de la sociedad.

A los futuros profesionales, que sigan trabajando con entusiasmo y dedicación, para que logren sus metas y sigan construyendo obras de gran alcance que catapulten a la humanidad al siguiente nivel evolutivo.

¡Suerte y que todos nuestros sueños se hagan realidad!

## **AGRADECIMIENTO**

Con este trabajo de tesis, me gustaría agradecer a todos los que me han animado a avanzar en mi carrera como ingeniero civil. A mis padres y familiares, a mis profesores y amigos, a mis compañeros de clase y trabajo, y a aquellos que me han acompañado y guiado a lo largo de este camino.

Como futuro ingeniero civil, me siento muy orgulloso y agradecido de aportar a una profesión tan noble como ésta. Desde la antigüedad, los ingenieros civiles han contribuido enormemente con la construcción de obras de gran alcance que han mejorado el bienestar de la humanidad.

Agradezco de antemano a todos los futuros ingenieros civiles por su dedicación y trabajo duro. Que en su camino no falten los desafíos y que sus esfuerzos sean recompensados con el éxito.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
<b>1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance .....	3
1.4 Marco teórico.....	3
Hormigón de alta resistencia usado en túneles.....	3
Introducción al revestimiento de túneles con segmentos de hormigón prefabricado o dovelas .....	4
Refuerzo a flexión colocado en dovelas de túneles.....	7
Modelo de elementos finitos (FEM).....	8
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>9</b>
2.1 Acero mínimo utilizado en estructuras conformadas con hormigones de alta resistencia .....	9
2.2 Consideraciones normativas respecto al armado mínimo requerido en túneles diseñados con hormigones de alta resistencia .....	11
2.3 Estudios teórico-experimentales acerca del armado mínimo requerido en túneles...	19
2.4 Disposición de acero de refuerzo mínimo en dovelas de túnel de hormigón armado utilizando hormigón de alta resistencia .....	23
<b>3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>24</b>
3.1 Pruebas.....	24
3.2 Resultados.....	26
3.3 Conclusiones.....	38
3.4 Recomendaciones .....	41
<b>4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

## RESUMEN

El presente documento tiene por objetivo, determinar la cuantía mínima y disposición de acero de refuerzo a flexión optimas, para la fabricación de dovelas de túneles que utilizan hormigones de alta resistencia.

Para lograr este fin se realizó un compendio de tesis, papers, normativas y buenas prácticas. Además, se realizaron ochenta y cuatro pruebas con un modelo de elementos finitos representativo de una dovela utilizando el software Ansys, donde, se varió la cantidad de barras de acero colocadas, desde 1 hasta 9 barras, para diferentes especímenes de un mismo ancho (150 cm) caracterizados por; su altura, cuantía de acero y resistencia a compresión del hormigón.

Los resultados de esta tesis permiten reducir la cuantía mínima de acero colocada en dovelas de túneles propuesta por el manual de túneles de la **FHWA**, que a su vez es la misma propuesta por el **ACI**, por la cuantía mínima propuesta por la norma japonesa **JSCE-07**, que, al ser diseñada para el uso con hormigones de alta resistencia, es más acertada para este estudio, además, considera la altura del espécimen como una variable importante en su ecuación de cálculo.

Finalmente, se pudo concluir que las disposiciones de acero mínimo que se pueden usar para la construcción de dovelas de túnel, para obtener un comportamiento adecuado, son de 5 varillas en adelante, teniendo en cuenta que a partir de 7 varillas la diferencia no será relevante. Hay que tener presente la geometría de la sección para otorgar la disposición más adecuada y obtener buenos resultados, ya que, si el ancho logra superar los límites de este estudio (1,5 m) las disposiciones más adecuadas pueden ser con una mayor cantidad de varillas. Es decir, para obtener un funcionamiento óptimo, la separación entre varillas debería estar entre los 25 centímetros o menor.

**PALABRAS CLAVE:** dovelas, hormigón de alta resistencia, acero mínimo de refuerzo.

## ABSTRACT

The objective of this document is to determine the minimum amount and provision of optimal flexural reinforcement steel for the manufacture of tunnel segments that use high-resistance concrete.

To achieve this end, a compendium of theses, papers, regulations, and best practices was made. In addition, eighty-four tests were carried out with a representative finite element model of a segment using the Ansys software, where the number of steel bars placed was varied, from 1 to 9 bars, for different specimens of the same width (150 cm) characterized by; its height, amount of steel and compressive strength of concrete.

The results of this thesis allow us to reduce the minimum amount of steel placed in tunnel segments proposed by the **FHWA** tunnel manual, which in turn is the same proposed by the **ACI**, by the minimum amount proposed by the Japanese standard **JSCE- 07**, which, being designed for use with high-strength concrete, is more accurate for this study; moreover, it considers the height of the specimen as an important variable in its calculation equation.

Finally, it was possible to conclude that the minimum steel provisions that can be used for the construction of tunnel segments, to obtain an adequate behavior, are from 5 rods onwards, taking into account that from 7 rods the difference will not be relevant. The geometry of the section must be considered to grant the most appropriate arrangement and obtain good results, since, if the width manages to exceed the limits of this study (1.5 m), the most appropriate arrangements may be with a greater number of rods. To obtain optimal operation, the separation between rods should be between 25 centimeters or less.

**KEYWORDS:** tunnel segments, high-strength concrete, minimum reinforcing steel.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los túneles son estructuras construidas con diversos fines, para el desarrollo de este trabajo el enfoque está dirigido para aquellos que conducen agua. Como se sabe, la ingeniería está en constante desarrollo, con lo cual, se han optimizado técnicas y procesos para construir túneles de mayor tamaño y profundidad en conformidad a las crecientes necesidades poblacionales. Sin embargo, estas grandes estructuras muestran fallas en su funcionamiento después de un periodo de tiempo, e incluso al principio de su vida útil [1].

En el caso de estudio (túneles de hormigón armado sometidos a presión interior), estos presentan problemas de filtración debido al agrietamiento prematuro del hormigón, lo que produce una corrosión temprana en el acero de refuerzo. [1]. Gracias a la constante investigación, se han implementado mejoras en los materiales a base de cemento logrando una mayor resistencia a los productos químicos agresivos, como el Ion-Cloruro presente en el agua subterránea, además de una mayor resistencia a la compresión. [2]

El hormigón de alta resistencia es utilizado en obras con relevancia estructural como tanques de almacenamiento, estructuras marítimas, estructuras en contacto con aguas residuales y por supuesto en la construcción de obras subterráneas como túneles. Este hormigón ha sido diseñado para ser más duradero y resistente que el hormigón convencional, distinguiéndose por su alta resistencia a la compresión. [3]

La funcionalidad de los túneles depende del desempeño estructural y de la durabilidad de su sistema de revestimiento [4]. El revestimiento generalmente consiste en dovelas, que forman parte de la estructura de hormigón armado, colocadas a medida que se realiza la excavación del túnel. Las dovelas prefabricadas se utilizan cada vez más porque su instalación es más eficaz y económica que las técnicas convencionales de revestimiento in situ [4]. Están sujetas a condiciones de carga temporales y permanentes; durante la instalación se inducen fuerzas de empuje, una vez instaladas, el suelo y el peso propio son los que provocan esfuerzos de flexión y corte [2].

El acero de refuerzo en las dovelas se coloca en ambas direcciones y está presente para enfrentar principalmente esfuerzos de flexión. [5]. La estrategia de colocar refuerzo de acero responde a la necesidad de proporcionar una cuantía mínima suficiente para garantizar la ductilidad frente a la formación de grietas inestables del hormigón, y así evitar el fallo frágil [6].

Una forma de evaluar los requisitos mínimos de refuerzo a flexión es un análisis post-agrietamiento y evaluar el momento de agrietamiento relacionado con la resistencia a la

fractura del hormigón. Es importante garantizar que, si se supera el momento de fisuración del hormigón debido a cualquier evento de carga, las tensiones soportadas por el hormigón no fisurado se transfieran al acero [7]. De acuerdo con resultados de investigación, la cuantía mínima de refuerzo varía conforme al esfuerzo de fluencia del acero, el área de la sección y, además, ya que los materiales frágiles fallan por la formación de grietas, hay que tener en cuenta el efecto del tamaño en la resistencia a compresión por flexión. [7]-[8]. Además, desde el año 95 el ACI 318-95 expuso en la sección 10, que la cantidad de acero mínimo también depende de la resistencia a compresión del hormigón. [9]. Sin embargo, a pesar de que la mayoría de las dovelas son fabricadas con hormigón de alta resistencia, el acero mínimo de refuerzo es el mismo que en estructuras de hormigón convencional.

En el ámbito normativo no se tiene en cuenta las características del hormigón, entre ellas su resistencia, para determinar la mínima cuantía de acero de refuerzo requerida, por este hecho, el presente trabajo busca determinar en base a; revisión bibliográfica, software de diseño estructural y experimentación disponible, la cuantía de acero de refuerzo mínima requerida conforme la resistencia del hormigón aumenta.

A más de que este estudio contribuye a llenar los vacíos existentes en la actual norma ecuatoriana, tiene la capacidad de generar un gran impacto. Ya que, en cierto punto, disminuir la cantidad de acero colocado como refuerzo en la estructura del túnel conlleva un impacto económico, disminuyendo los costes actuales de construcción.

## **1.1 Objetivo general**

Determinar el acero mínimo de refuerzo en dovelas prefabricadas de túneles diseñados con hormigón de alta resistencia.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar en fuentes bibliográficas toda la información disponible sobre el acero mínimo utilizado en estructuras conformadas con hormigones de alta resistencia, y su aplicación en el diseño de dovelas prefabricadas de concreto armado para revestimiento de túneles.
2. Realizar un reporte de consideraciones normativas actuales con respecto al armado mínimo requerido en túneles diseñados con hormigones de alta resistencia.
3. Realizar un reporte de estudios teórico-experimentales en los que se refleje el armado mínimo requerido en estructuras de hormigón armado, conforme la resistencia del hormigón aumente.

4. Realizar un reporte comparativo entre resultados teóricos, experimentales y normativa existente sobre armadura mínima en estructuras de hormigón armado, para hormigones de alta resistencia.
5. Proponer una disposición de acero de refuerzo mínimo en dovelas de túnel de hormigón armado que utilizan hormigones de alta resistencia.

### **1.3 Alcance**

El presente trabajo está limitado a:

1. Túneles sometidos a presión interior.
2. Compilar resultados de estudios experimentales existentes y en desarrollo.
3. Estudiar la relación entre acero mínimo de refuerzo y resistencia del hormigón.
4. Comparar resultados con normativa vigente para emitir conclusiones y recomendaciones.

### **1.4 Marco teórico**

#### **Hormigón de alta resistencia usado en túneles**

Este tipo de hormigón tiene una mayor resistencia que el hormigón tradicional, es comúnmente usado cuando las solicitaciones demandan de mejores características del material en una obra, como es el caso de los túneles, los cuales, una vez construidos estarán sometidos a un esfuerzo axial, netamente de compresión durante toda su vida útil.  
[10]

Para lograr su resistencia característica los áridos utilizados, deben proceder de la trituración de piedras de alta resistencia, que son similares a las que poseerá el hormigón. Además, tienen que estar libres de desechos. [11]

Adicionalmente, a este tipo de mezclas se le añaden aditivos y materiales diversos. Los aditivos más comunes son los superplastificantes, imprescindibles en la composición del hormigón de alta resistencia; sin embargo, no podrán ser superiores al 1,5% con relación al peso del cemento. El objetivo principal es dar una trabajabilidad adecuada al hormigón.  
[12]

En la composición de estos hormigones también están las adiciones, estas pueden ser de dos tipos, primeramente, el humo de sílice, que es un subproducto resultante de la producción de silicio con 2,2 kg/dm<sup>3</sup> de densidad y una finura que ronda los 0,01 y unas

pocas micras de diámetro. La otra adición común son las cenizas volantes, que se obtienen del carbón pulverizado utilizado en centrales. Se trata de partículas redondas que poseen un diámetro aproximado de 1 a 150 micras, con un área superficial de 500 cm<sup>2</sup>/g. [12]

La principal propiedad de los hormigones de alta resistencia es su resistencia y durabilidad, ya que pueden estar en contacto con componentes químicos. Además, superan resistencias mayores a los 70 MPA. [11]

Es un material que brinda una protección completa contra el desgaste de las barras de refuerzo, lo cual es posible debido al alto contenido de cemento y al bajo nivel de agua en la mezcla, lo que asegura que la porosidad sea baja, estas características hacen que este material sea el más idóneo para la construcción de túneles. [12]

### **Introducción al revestimiento de túneles con segmentos de hormigón prefabricado o dovelas**

El revestimiento de túneles que ha sido realizado con segmentos prefabricados se debe analizar como un sistema físico formado por elementos individuales conocidos como dovelas. Estos segmentos se unen entre sí formando un anillo y, posteriormente, el grupo de anillos formará la sección del túnel, que finalmente será inyectada en sus extremos con lo que se proporciona continuidad con el terreno adyacente. Este sistema integrado finalmente garantiza el soporte adecuado ante todas las condiciones subterráneas. [13]

El elemento básico de este sistema viene a ser cada segmento individual. Un nivel superior del sistema son los anillos, que se forman por la integración de varios segmentos. La sección es el conjunto de anillos consecutivos no inyectados, que se encuentran en el interior del revestimiento de la cola del escudo. Inmediatamente como el segmento sale del escudo, se produce la inyección y sellado por medio del endurecimiento de los productos, lo que transforma al túnel en un elemento integrado. [14]

Teniendo en cuenta este diseño continuo, existen diferencias importantes entre la dovela prefabricada (objeto de estudio) y la vaciada in situ. Principalmente, debido al efecto de juntas, diferente interacción suelo-estructura y la distribución verdadera de carga entre los anillos adyacentes. [13]

La construcción de todo el revestimiento del túnel mediante el uso de elementos individuales es posible gracias a la capacidad de las dovelas para fabricarse externamente en una planta de prefabricados, para luego ser montadas por el TBM. Cuando se compara con el revestimiento colado in situ, el comportamiento del sistema de segmentos difiere ya que el número de juntas es mayor y la transmisión de carga es peor. [13]

## **Segmentos prefabricados o dovelas**

Las dovelas prefabricadas son losas curvas de hormigón armado que, una vez instaladas, forman un anillo del diámetro interior deseado. El ensamblaje secuencial de nuevos segmentos junto con los anillos antiguos da como resultado un elemento cilíndrico a partir del cual se forman las capas. [15]

Desde la década de 1960, se han utilizado revestimientos de hormigón en muchos túneles de pequeño diámetro en Europa. El revestimiento era diseñado para ser construido a mano por lo que el ancho de la dovela estaba limitado por su peso y era de aproximadamente 60 cm. Estas dovelas formaban una capa primaria a medida que se construía la capa secundaria, generalmente compuesta por paneles de hormigón o rellenos en obra. [15]

El avance de las tuneladoras (TBMs), introdujo los erectores de vínculo mecánicos, que eliminó las restricciones de grosor relacionados con el balancín de la dovela. Este desarrollo permitió la creación de un vínculo único (no por capas), suficiente para su uso como envoltorio final, pudiéndose construir de una sola pasada. El ancho de estos anillos además se pudo agigantar. Por ende, se pudieron usar anillos de hasta 1 m de ancho. [14]

Los anillos mediante segmentos prefabricados se realizaban hasta entonces mediante conexiones atornilladas. Sin embargo, para algunos casos adonde el suelo era estable, se empezó a usar un distinto método. Esta forma introducía la última de estas dovelas con una forma de cuña (dovela llave), lo que hacía que las dovelas restantes se expandan contra el suelo haciendo comprimir el anillo y de esta forma no era necesario el uso de tornillos. [14]

Mientras tanto, sigue pendiente el problema de la impermeabilización del túnel, debido a que, es difícil lograr un sellado eficaz entre segmentos. En los anillos principales se procedía con una cuerda impregnada de alquitrán entre cada dovela, que permitía sellar la junta de manera temporal evitando que la lechada del relleno anular salga. Una vez terminado el túnel las juntas entre dovelas eran selladas mediante mortero o masillas similares, este proceso alargaba demasiado el tiempo total de construcción del proyecto. [15]

Con el paso de los años la cuerda se remplazó con un sello hidrofílico permanente instalado en una ranura interna, previamente realizada en las dovelas para llevar a cabo este fin. Este nuevo método es bastante exitoso. Sin embargo, todavía son muchos los clientes que utilizan el sellado con mortero. [15]

En este tiempo la geometría de los anillos consistía básicamente en cierto número de dovelas paralelas entre sí, con dos contras llaves y un segmento llave. En sus inicios, estas dovelas llaves estaban alineadas, tenían forma rectangular y medidas alrededor de 150mm, pero evolucionaron a formas trapezoidales, lo que les permitió ser instaladas de manera automatizada. [15]

### **Anillo trapezoidal**

A inicios de la década de 1980, los contratistas y diseñadores empezaron a trabajar con segmentos trapezoidales. Este cambio era necesario por el hecho de mejorar la estanqueidad del sistema de capas, además se remplazó los sellos hidrofílicos usados anteriormente con sellos de goma. [14]

Estas nuevas juntas requerían deslizamiento y ajuste de cada dovela en su última posición antes de que dichas juntas entraran en contacto entre sí. Esto no puede hacerse con una dovela paralela, ya que se debe comprimir la junta radial hasta alinear los orificios de los pernos. Mediante las dovelas trapezoidales, las juntas no están en contacto mientras los orificios para pernos de la dovela no estén alineados. [15]

En sus inicios, el anillo trapezoidal se conformaba por 6 segmentos trapezoidales idénticos, que básicamente se puede considerar como tres llaves y tres contra llaves. La mayor desventaja de este tipo de segmentación fue la formación del anillo. Si se inicia con un segmento contra llave, la secuencia de construcción necesita la posición de un segmento llave a los dos extremos de la primera dovela colocada, antes de que sea posible colocar los otros dos segmentos contra llave. Esto hace que sea difícil comprimir todas las uniones y, por lo tanto, se hace más difícil el sello del revestimiento. [14]

Otro problema se presentó en el atornillado de los anillos, ya que los anteriores anillos debían ser atornillados en las juntas radiales y también en las circunferenciales. Para poder llevar a cabo este proceso de atornillado, se idearon agujeros curvos para pernos diseñados con una geometría también curva (banana bolts), lo que finalmente permitió conectar estas dovelas. [13]

Esta resultó ser una eficaz solución, sin embargo, para otorgar el espacio suficiente a la sección roscada, se debía sobredimensionar el orificio. Esta acción, inevitablemente, no controlaba los pequeños movimientos de las dovelas (deslizamiento de juntas), y como resultado se afectaba directamente a la calidad del revestimiento. [14]

Este sistema evoluciono rápidamente solucionando estos inconvenientes y culminó en lo que se conoce como anillo universal utilizado actualmente.

## **Anillo universal**

El anillo universal es la evolución del anillo trapezoidal y consiste en un anillo de dovelas cónico, el cual consigue disminuir muchos de los problemas presentes en su modelo anterior. Generalmente, este anillo universal está formado por dos segmentos llave trapezoidales (llave y contra llave) además de un número de dovelas laterales de geometría romboide (comúnmente entre 4 y 6) logrando que el anillo esté completo. [16]

Lo más común es que la llave y contra llave se apliquen enfrentadas en el anillo, dicho de otro modo, separadas 180 grados. La construcción del anillo inicia con la colocación del segmento contra llave, luego viene la colocación de dos (o tres, si el diseño lo requiere) segmentos romboides a cada lado, finalizando con la colocación del segmento llave. [17]

La gran ventaja del anillo universal es que el proceso constructivo inicia siempre con el mismo segmento (la contra llave) en todos los anillos. Conforme la orientación de la forma cónica del anillo sea requerida, este segmento se puede colocar en cualquier lugar de la circunferencia. De este modo se hace posible disminuir el tamaño del segmento llave, lo que resulta en una mayor facilidad constructiva, además de reducir la distancia requerida por retroceso y, consecuentemente la longitud de su escudo de cola se reduce. [15]

De esta forma los nuevos anillos aquí descritos, sustituyen los antiguos pernos curvos por rectos atornillados en tacos plásticos insertados en el segmento, y se introduce como opción el uso de conectores para las juntas circunferenciales. Estas modificaciones facilitan y mejoran la calidad del proceso constructivo del revestimiento. [16]

Mas avances, como las juntas hidrófilas para uso en áreas con gran presencia de aguas subterráneas y los sistemas con juntas dobles, contribuyen también a mejorar la calidad final del túnel. [17]

### **Refuerzo a flexión colocado en dovelas de túneles**

Como se ha mencionado en la sección anterior, una vez colocados todos los segmentos del túnel (dovelas), estas generan un esfuerzo axial entre sí, principalmente de compresión, esto les permite tomar las cargas provenientes del suelo, además, de las producidas por los líquidos interiores. [10]

Como resultado de este proceso, una vez concluido el túnel y mientras esté en funcionamiento, las dovelas no tienen solicitaciones a flexión. Por lo tanto, el acero colocado a flexión está relacionado a otros escenarios. [10]

Al ser segmentos prefabricados, las dovelas no son construidas in situ. Por ende, estas se encuentran sometidas a esfuerzos debido a su almacenamiento, manipulación y transporte. Estos esfuerzos son los responsables del acero a flexión colocado en una dovela. Teniendo en cuenta estas solicitaciones y un caso excepcional que puede o no darse, que es la inyección de grout. El manual de túneles desarrollado por la **FHWA** recomienda proveer a estos segmentos del acero mínimo de refuerzo establecido por el ACI. [10]

### **Modelo de elementos finitos (FEM)**

El Finite Element Method (FEM) es un proceso algorítmico computacional que nos da la posibilidad de simular la respuesta de un objeto físico al flujo, el calor, la vibración, y un sinnúmero de interacciones posibles en el planeta. [18]

Este método permite simular el funcionamiento de un producto o espécimen en su etapa de diseño, para así prever fallas, velocidad de desgaste y otras consecuencias posibles en el espécimen. A pesar de ser conocido como método, el FEM se representa mejor como una herramienta extremadamente útil, para entender el comportamiento de un espécimen en condiciones críticas que se pueden presentar en el futuro. [18]

Este análisis consiste en dividir un objeto en un determinado número de elementos finitos, conectados entre sí por puntos adyacentes conocidos como nodos. La predicción del comportamiento de cada elemento que compone el objeto físico es posible gracias a las operaciones matriciales. [19]

Al realizar una combinación con todas las respuestas pertenecientes a los elementos individuales, el software computacional es capaz de proporcionar una respuesta de todo el objeto físico; dicha respuesta estará muy ligada a las condiciones de borde:

- Solicitaciones actuantes sobre el elemento.
- Características del material
- Restricciones

Para llevar a cabo este trabajo en la realización del modelo de elementos finitos se supuso una carga en el hormigón que represente al peso propio de la dovela cuando esta se encuentre apilada. El modelo constitutivo utilizado para el hormigón es el modelo de micro plano de daño y plasticidad, y para la representación del acero de refuerzo se utilizó el modelo constitutivo de Dood Restrepo. Las imágenes y características correspondientes a la geometría de las dovelas se presentarán en la siguiente sección.

## **2 METODOLOGÍA**

En la presente tesis se sigue un enfoque mixto que combina enfoques cualitativos y cuantitativos referentes al tema, este es un trabajo exploratorio ya que su principal objetivo es determinar la disposición y el acero mínimo requerido en el diseño de dovelas de túneles que utilizan hormigones de alta resistencia, basado en la información existente (normativa, best practice, tesis, experimentos, etc).

Para llevar a cabo este objetivo general, se plantean ciertos objetivos específicos que nos ayudan a clasificar y contrastar la información recopilada de manera ordenada y crítica para obtener resultados claros y precisos. Siguiendo este camino como primer paso en esta sección se muestra la información recopilada sobre el acero mínimo utilizado en estructuras conformadas con hormigones de alta resistencia y su aplicación en el diseño de dovelas prefabricadas de concreto armado para revestimiento de túneles.

### **2.1 Acero mínimo utilizado en estructuras conformadas con hormigones de alta resistencia**

El hormigón de alta resistencia presenta una resistencia a la flexión significativamente mayor que la del hormigón normal, aproximadamente de 3 a 4 veces mayor. La resistencia a la flexión es la capacidad de un material para doblarse o flexionarse sin romperse. [20]

El hormigón de alta resistencia también se destaca por su rigidez mejorada. La rigidez mejorada del hormigón de alta resistencia crea un mejor recubrimiento y presenta una mayor fuerza de unión en comparación con el hormigón normal. Sin embargo, esta rigidez puede provocar un aumento en el número de grietas formadas debido a una pérdida de flexibilidad. [20]

El hormigón de alta resistencia proporciona una serie de ventajas en la construcción. Reduce el peso de las estructuras, proporciona mejores propiedades térmicas y tiene un mayor nivel de resistencia a las cargas externas. Sin embargo, el uso de concreto de alta resistencia en estructuras está controlado por regulaciones gubernamentales, debido a su sensibilidad a los ataques químicos, mayor retracción y pérdida de flexibilidad. [20]

Todos los códigos de práctica proporcionan límites de relación de refuerzo mínimo para elementos estructurales como columnas, vigas, muros de corte, zapatas y losas, que controlan los límites de refuerzo superior e inferior. [12]

Por lo general, cada miembro estructural tiene límites de refuerzo para diferentes solicitaciones, como el límite de refuerzo de flexión, el límite de refuerzo de cortante o el

límite de refuerzo de torsión. [12] El área mínima de refuerzo de un miembro a flexión está especificada por códigos y normas para garantizar la seguridad y ductilidad de los miembros, algunos de los códigos utilizados para el desarrollo de este trabajo se muestran en la **Tabla 1**.

Aunque existe una diferencia significativa entre los códigos de diseño, la mayoría especifican ecuaciones prácticas para la relación mínima de refuerzo del área de flexión, en base a ecuaciones experimentales desarrolladas a partir de investigaciones donde varían algunos de los parámetros utilizados. Por lo tanto, dichas ecuaciones y valores mínimos de relación de refuerzo difieren entre sí, aunque cabe recalcar que no en gran medida. [21]

Además, cabe señalar que en la mayoría de estos códigos las ecuaciones propuestas son las mismas que para concreto de resistencia normal, a excepción del código japonés que caracteriza a su ecuación para hormigones de alta resistencia. [22]

**Tabla 1.** Ecuaciones disponibles para el cálculo de la cuantía mínima en los diferentes códigos de diseño. Obtenido de: [22]

Código	Ecuación
ACI 318-19	$A_{s, \min} = 0.25 \sqrt{f'_c} / f_y b_w d \geq 1.4 / f_y b_w d$
CSA A23.3-04	$A_{s, \min} = 0.2 \sqrt{f'_c} / f_y b_t h$
Eurocode 2-04	$A_{s, \min} = 0.26 f_{ctm} / f_{yk} b d \geq 0.0013 b d$
JSCE-07	$\rho_{\min} = 0.058 (h/d)^2 f_c^{1/3} / f_y$
IS 456-2000	$A_{s, \min} = 0.85 / f_y b_w d$
NS 3473 E-03	$A_{s, \min} = 0.35 k_w f_{ctk,0.05} / f_{yk} A_c$ Donde $k_w = 1.5 - h/h_1 > 1.0$

Para analizar la disposición del refuerzo mínimo colocado en dovelas, se utilizaron los códigos japonés y canadiense, con los que se realizó el cálculo de la cuantía mínima para los diferentes especímenes, para luego, variar la disposición y cantidad de varillas de acero, analizando, así como estos factores influyen en el comportamiento de las dovelas. Todo este proceso de experimentación será detallado en la sección **2.3** del presente documento.

## **2.2 Consideraciones normativas respecto al armado mínimo requerido en túneles diseñados con hormigones de alta resistencia**

En esta sección se encuentra una recopilación de los códigos más conocidos y utilizados a nivel mundial, que poseen manuales específicos para el diseño, construcción y mantenimiento de túneles. Además, se presta un enfoque importante a los países que conforman el continente americano, detallando cual es el conocimiento adquirido por parte de cada país en el desarrollo de este tema.

Los principales manuales para el diseño y desarrollo de túneles analizados son:

- **FHWA-NHI-10-034** Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels.
- **NFPA 502.**
- **RABT 2006.**
- **2004/54/CE** del Parlamento Europeo.
- Manual de túneles de Colombia.
- Normativa francesa de túneles **CETU.**
- Manual de túneles de Perú.
- Normativa española de túneles **IOS'98.**
- **PIARC.**
- **SIA 197/2-2003.**
- **IS 4880; 5878.**
- **AFTES:** Recommendations for the design, sizing and construction the design, sizing and construction of precast concrete segments.

A continuación, se presentan los países de américa latina con sus antecedentes históricos, normativa presente y entidades encargadas de controlar y regular todo lo que concierne a túneles.

### **Argentina**

En el país todo lo relacionado al punto de vista técnico es administrado y controlado por la Asociación Argentina de Carreteras. A partir del año 2011, donde fue conformado este ente

regulador y descentralizado, se vienen realizando varios programas que garantizan comportamiento adecuado por parte de los participantes del sector. No obstante, el país carece de una guía para la construcción de túneles. [23]

Los entes reguladores presentes en este país que guardan relación directa con la infraestructura vial, túneles y obras subterráneas son:

- Asociación Argentina de túneles y espacios subterráneos (AAETES).
- Gobierno nacional de Buenos Aires, Ministerio del desarrollo urbano.

## **Bolivia**

Este país cuenta con un manual general para la construcción de vías (Administradora Boliviana de Carreteras, 2012) donde se mencionan de manera rápida tres aspectos generales para el proceso constructivo de túneles: aspectos generales, geometría de los túneles y diseño de seguridad y electromecánico. [23] El único túnel en funcionamiento en este país andino es el túnel del Abra con 460 m de longitud, y fue reinaugurado en 2017. Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles:

- Ministerio de obras públicas, servicios y viviendas.
- Empresa Bolivia de la construcción (EBC)
- Vías Bolivia.
- Viceministerio de Transporte.
- Administradora boliviana de carreteras (ABC)

## **Brasil**

En América Latina, es el país con más túneles urbanos. Debido a su alta densidad poblacional, los túneles forman parte de cincuenta y dos de las soluciones viales presentes en Brasil. [23]

El país no tiene un manual exclusivo para la construcción de túneles, a pesar de tener la mayor cantidad de túneles en la región. En el manual de construcción de carreteras se incluyen consideraciones generales para la construcción de túneles, como los tipos de túneles, los tipos de sección transversal y recomendaciones generales sobre su funcionamiento. Los entes reguladores para esta infraestructura presentes en el país son:

- Comité Brasileño de túneles (CBT)

- Asociación Brasileña de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica (ABMS).

## **Chile**

El país no cuenta con manual de construcción de túneles. Estas estructuras están fiscalizadas y vigiladas por la Dirección Nacional de Vialidad, regida a su vez por el Gobierno Nacional. La distribución de túneles en Chile incluye un total de 23 proyectos con una longitud equivalente de veinte y tres kilómetros. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio de obras públicas, dirección de vialidad – coordinación de concesiones.
- Comité de túneles y espacios subterráneos de Chile (CTES).
- Corporación de desarrollo tecnológico de la cámara chilena de la construcción.

## **Colombia**

El país cafetero cuenta con el manual para la construcción de túneles citado anteriormente, además, al tener una muy accidentada geografía, atravesada por la Cordillera de los Andes creando una barrera entre las playas del caribe y los centros de consumo como la capital Bogotá, Bucaramanga, Cali y Medellín, el país en los últimos años ha sido un referente en el desarrollo y construcción de túneles. En estos 15 años transcurridos este tipo de proyectos han resucitado drásticamente al paso de los gobiernos de Álvaro Uribe y Juan Manuel Santos en los que se han entregado finalizados y en marcha ocho túneles con distancias lineales entre los mil y los diez mil metros. [24]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Asociación de túneles y obras subterráneas (ACTOS)
- Instituto nacional de vías (INVIAS)
- Agencia nacional de infraestructura (ANI).
- Asociación colombiana de ingenieros

## **Costa Rica**

En este país existe un único túnel en funcionamiento el Túnel Zurquí, que fue inaugurado en 1984, y se ubica en la ruta 32 del país. Su función es atravesar el cerro Hondura y tiene una longitud de 562 m. Este país no cuenta con un manual de construcción de túneles. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Dirección general de educación vial
- Concejo nacional de vialidad (CONAVI)
- Ministerio de obras públicas y transporte.
- Asociación de carreteras y caminos de Costa Rica (ACCCR)
- Concejo nacional de concesiones.
- Asociación Costarricense de obras subterráneas (ACROS)

### **Cuba**

Existe un único túnel en esta isla y es el Túnel de La Habana. Esta estructura pasa por debajo de la bahía, de la capital cubana, la distancia total es de 733 m. Fue terminado en 1958, y es una de las más importantes conexiones de la Habana. Este país no cuenta con manuales de construcción para túneles. [23]

### **Ecuador**

Este país no cuenta con un manual para la construcción de túneles. Existen algunos documentos emitidos por el Ministerio de Obras Públicas del Ecuador donde se mencionan sesenta aspectos directos sobre la operación de túneles, estos incluyen esquemas de , iluminación, señalización, seguridad y la interacción de estas estructuras con otro tipo de vías. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio de transporte y obras públicas (MTOB).

### **Guatemala**

El país centroamericano no posee un manual de construcción para túneles. Existe un único túnel en funcionamiento, el túnel de Santa María de Jesús, este posee una longitud de 227 m. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Dirección general de caminos.
- Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda.
- Unidad ejecutora de conservación vial (COVIAL)
- Alianza público-privada (ANADIE).

### **Haití**

Este país del caribe no cuenta con túneles en funcionamiento actualmente y tampoco posee un manual de construcción de túneles. [23]

### **Honduras**

El país centroamericano no cuenta con túneles en funcionamiento actualmente y tampoco posee un manual de construcción de túneles. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Secretaria de obras públicas, transporte y vivienda de Honduras.

### **México**

Este país cuenta con el Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (2016). Cuenta con varios túneles repartidos en el casco urbano y rural, los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Dirección general de vialidad.
- Asociación Mexicana de ingeniería de vías terrestres (AC).
- La sociedad mexicana de ingeniería geotécnica
- Secretaria de comunicaciones y transporte (SECOM)
- Unión mexicana de asociaciones de ingenieros.
- Asociación Mexicana de ingeniería de túneles y obras subterráneas (AMITOS).
- Junta de caminos del estado de México. [25]

### **Nicaragua**

El país centroamericano no cuenta con túneles en funcionamiento actualmente y tampoco posee un manual de construcción de túneles. [23]

### **Panamá**

Este país de Centroamérica cuenta con 2 túneles pequeños que sirven como derivación, el primer túnel, está ubicado en la capital y posee una longitud de 150 metros. El segundo tiene pasa por debajo de la pista del aeropuerto Rio Hato con una longitud de 300 m. Panamá no posee un manual para la construcción de túneles. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio de obras públicas.
- Empresa nacional de autopistas

### **Paraguay**

Este país posee un único túnel en funcionamiento y está ubicado en la ciudad de Asunción, capital del país. Posee una longitud de 380 m y empezó a funcionar en 2014. El ministerio de obras públicas paraguayano consta de manuales y varios documentos acerca de la operación y construcción de vías y carreteras, pero, en ningún apartado se mencionada de forma precisa datos sobre la construcción de túneles. Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio de obras públicas y comunicaciones. [23]

### **Perú**

El caso de este país vecino es similar al caso colombiano, ya que el país se ve atravesado de sur a norte por la cordillera de los andes, además, sus tres más importantes centros de consumo; Lima; Arequipa y Trujillo están ubicados en las costas sobre el Océano Pacífico, he ahí la necesidad de conectar los centros productivos con el resto del país. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Asociación peruana de túneles y obras subterráneas (APTOS)
- Asociación peruana de carreteras.
- Provias nacional.

- Organismo supervisor de la inversión en infraestructura de transporte de uso público.

### **República Dominicana**

El único túnel que funciona en este país es el Túnel Ortega y Gasset. Dicho túnel atraviesa la Universidad Autónoma de Santo Domingo y posee una longitud de 1200 m. En este país no está dotado de un manual para construcción de túneles viales. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio de obras públicas y transporte.
- Asociación dominicana de carreteras y transporte.

### **Uruguay**

Este país no posee túneles en funcionamiento y tampoco un manual para la construcción de túneles viales. Pero, tiene un proyecto de túnel para descongestionar el tráfico de una de las más transitadas avenidas de su capital Montevideo, en etapa de diseño. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio de transporte y obras públicas – director nacional de vialidad.
- Asociación uruguaya de caminos.

### **Venezuela**

Este país no posee un manual para la construcción de túneles viales. [23]

Los entes reguladores presentes en este país, relacionadas al tema de obras subterráneas y túneles son:

- Ministerio del poder popular de obras públicas (FUNDANALAVIAL).

Finalmente, en el manual para el diseño de túneles de Perú no se expresa una cuantía mínima de acero en dovelas de túneles, por el contrario, indica:

- Considerando a las dovelas como elementos de gran esbeltez, sometidos a esfuerzos considerables debido a manipulación y transporte, además, de las cargas aplicadas.

- Se colocarán las armaduras de acuerdo con las necesidades siguientes:
  - **Armaduras por flexión**, será dispuesta en sentido circunferencial y estará destinada a resistir las tracciones originadas en el proceso de almacenamiento y manipulación, además, se debe disponer de armadura de reparto para la dirección longitudinal.
  - **Acero de refuerzo en juntas radiales**, esta es una de las más importantes ya que tomara los elevados esfuerzos de compresión, además, son imprescindibles en túneles profundos ya que el anillo estará siempre trabajando a compresión.
  - **Acero de refuerzo en juntas circunferenciales**, estas son también importantes ya que permiten absorber el empuje de los gatos al colocar las dovelas.
  - **Refuerzos al estilo de cercos**, en los tornillos de agarre o fijación. [26]

La poca o nula información acorde al tema en la norma ecuatoriana de la construcción, deja ver la importancia del desarrollo de esta tesis. En carácter normativo el acero mínimo a colocarse en estructuras se determina básicamente en función del área bruta y la fluencia del acero, este acero mínimo sirve principalmente para hacer frente a cargas de transporte, manipulación y la prevención de grietas, además de permitir que el hormigón y el acero puedan agotarse simultáneamente.

Teniendo en cuenta que existe una relación directa entre la capacidad a compresión del hormigón y su capacidad a tracción, es evidente que, al analizar el acero mínimo de refuerzo requerido se debe tener presente este incremento de resistencia al momento de proveer a la estructura de dicho acero de refuerzo.

En el resto de normativa citada no se reflejan consideraciones de armado mínimo requerido para dovelas de túneles, en algunas no se menciona en ningún apartado a las dovelas, por este hecho focalizaremos nuestro estudio a hormigones de alta resistencia colocados en vigas principalmente, de donde se obtiene más información en cuanto al acero mínimo requerido.

Para finalizar este apartado es importante citar al Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels de la **FHWA**, que indica que el acero a flexión colocado en dovelas prefabricadas de túneles cumple la función de tomar las cargas que se presenten en el proceso de manipulación y transporte, además, de en algunos casos donde se realicen inyecciones de grout y este produzca una carga que solicite a flexión a la dovela ya colocada, siendo este el único caso para el cual estos segmentos de túnel se verán

solicitados a flexión una vez colocados, por este hecho, el manual indica que se debe colocar en la dovela un acero a flexión igual al acero mínimo, derivando a la AASHTO que a su vez derivara el análisis al ACI y su cálculo de acero mínimo. Por motivos de estudio en este trabajo se utilizarán las cuantías de acero mínimo propuestas por el código japones y canadiense como ya fue mencionado en la anterior sección. [10]

### **2.3 Estudios teórico-experimentales acerca del armado mínimo requerido en túneles.**

En general, se requiere reforzar a flexión el revestimiento del túnel cuando se deban realizar inyecciones de grout entre el revestimiento y el suelo circundante, a través de unos orificios ubicados en medio de las dovelas. [10]

Además, cuando hablamos de segmentos prefabricados, el refuerzo a colocarse será el acero mínimo a flexión, esto debido a que las dovelas están sometidas a solicitaciones durante su proceso de almacenamiento y transporte. Por este hecho, en este documento se pretende encontrar la mejor propuesta de cuantía mínima de acero a flexión colocada en una dovela prefabricada, cuando se utilizan hormigones de alta resistencia. [10]

En este punto es importante citar al paper realizado por Ameer M. Salih y Azad A. Mohammed para el departamento de ingeniería civil del College of Engineering, de la University of Sulaimani ubicada en Iraq, publicado el 9 de agosto de 2022. [22]

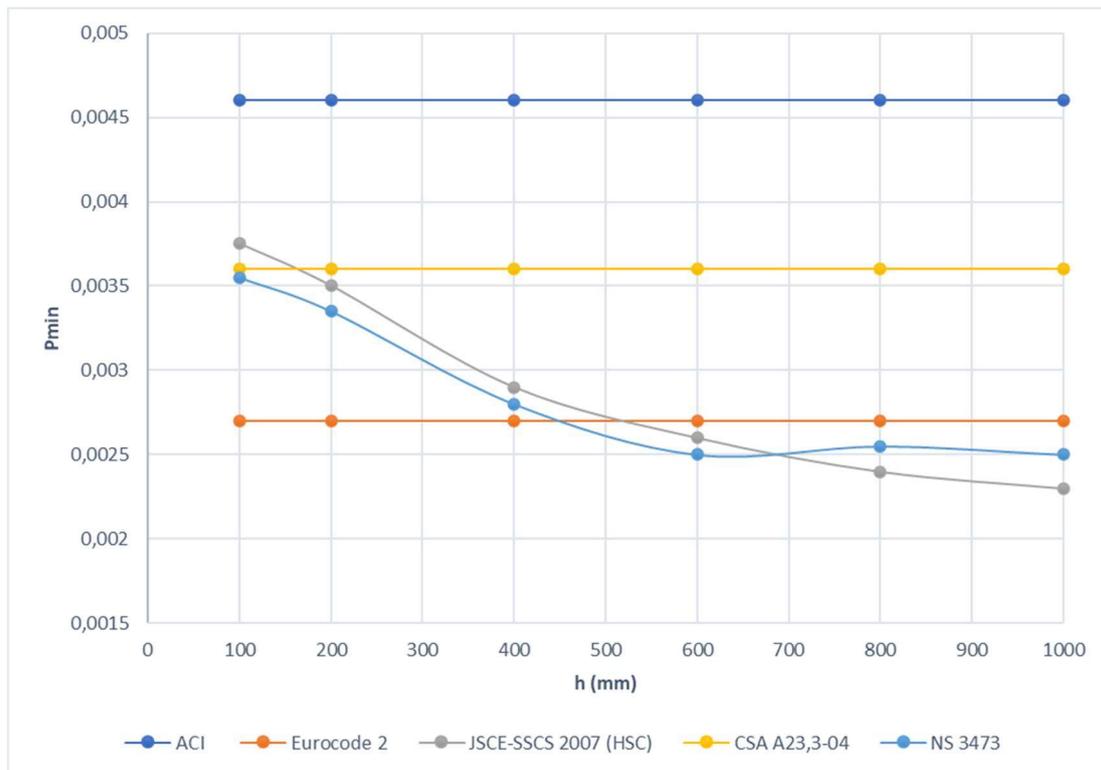
Este paper examina el comportamiento de vigas de hormigón de alta resistencia (HSC) con bajas relaciones de acero de refuerzo para establecer un límite de la relación de refuerzo de flexión más baja que garantizará la ductilidad. Los experimentos fueron realizados en 12 vigas de HSC reforzadas, con una resistencia a la compresión del hormigón de 99 MPa, y se dividieron en tres categorías según su tamaño. [22]

Cada categoría comprendía cuatro relaciones de refuerzo de viga (0%, 0.13%, 0.33% y 0.65%), y se investigaron dos parámetros principales (tamaño de la viga y relación de refuerzo). Los hallazgos sugieren que, además de la resistencia a la fluencia del refuerzo y la resistencia a la compresión del hormigón, también se debe considerar la altura de las vigas al calcular el refuerzo mínimo a flexión de estas. [22]

Este paper fue de gran utilidad para el desarrollo de este documento ya que gracias a esto se logró entender la relación que existe entre la resistencia a compresión del hormigón y la altura de los especímenes propuestos para experimentación, de este modo, se obtuvo un esquema de análisis **Tabla 2** en el cual se basaron los modelos realizados, para proponer

la disposición óptima de acero mínimo de refuerzo colocado en dovelas prefabricadas de túnel.

En la **Figura 1** se presenta una comparación entre los diversos códigos presentados en la **Tabla 1**, que muestra la variación de la cuantía de acero según la altura del espécimen cambia.



**Figura 1.** Comparación de la cuantía mínima de refuerzo en vigas conforme su altura varía ( $f'c=60$  MPa,  $f_y=420$  MPa). Obtenido de: [22]

Una vez entendidas todas las secciones tratadas anteriormente, se puede definir los modelos que se van a realizar para llevar a cabo el objetivo de este trabajo.

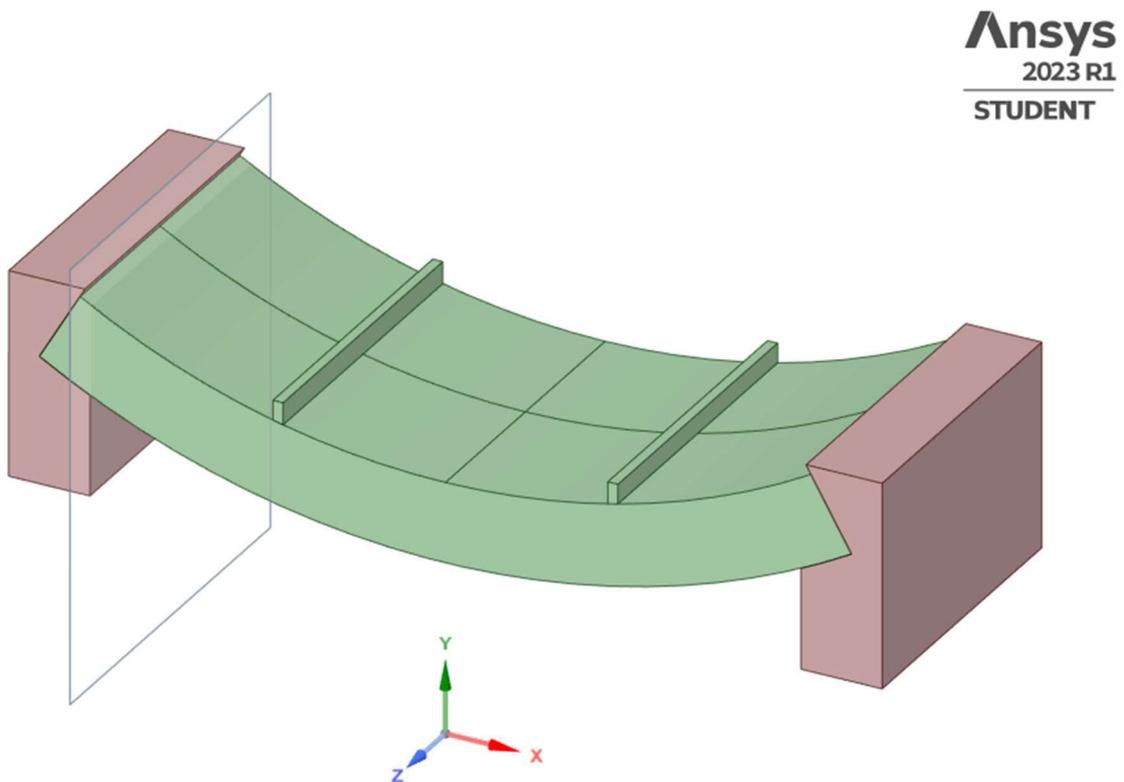
Para la realización de los modelos se usó el software de análisis de elementos finitos Ansys en el que se modeló una dovela de 150 cm de ancho, misma que se varió la cantidad de acero conforme la norma utilizada (japonesa y canadiense), y también la altura de está teniendo dos opciones 20 cm y 40 cm, además se colocó desde 1 varilla de acero hasta 9 varillas para así determinar cuál es la mejor disposición para estos segmentos, este análisis fue realizado para hormigones con resistencias de 50, 70 y 90 MPa. Como primer paso se debe saber cuántos modelos se van a realizar y cuáles serán las características de estos para esto se construye la **Tabla 2**

**Tabla 2.** Esquema de análisis para la modelación de especímenes.

F <sub>c</sub> [Mpa]	Espesor h [mm]	Codigo	As.min [mm2]	ρ.min [%]	As.min [cm2]	# Modelo	# varillas	Area.varilla [mm2]	r.va [mm]	Φ [mm]
50	200	Japones	999.595	0.333	9.996	1	1	999.595	17.838	36
						2	2	499.798	12.613	25
						3	3	333.198	10.299	21
						4	4	249.899	8.919	18
						5	5	199.919	7.977	16
						6	7	142.799	6.742	13
						7	9	111.066	5.946	12
		8	1	1010.153	17.932	36				
		9	2	505.076	12.680	25				
		10	3	336.718	10.353	21				
		11	4	252.538	8.966	18				
		12	5	202.031	8.019	16				
		13	7	144.308	6.777	14				
		14	9	112.239	5.977	12				
	15	1	1468.793	21.622	43					
	16	2	734.396	15.289	31					
	17	3	489.598	12.484	25					
	18	4	367.198	10.811	22					
	19	5	293.759	9.670	19					
	20	7	209.828	8.173	16					
	21	9	163.199	7.207	14					
	22	1	2020.305	25.359	51					
	23	2	1010.153	17.932	36					
	24	3	673.435	14.641	29					
	25	4	505.076	12.680	25					
	26	5	404.061	11.341	23					
	27	7	288.615	9.585	19					
	28	9	224.478	8.453	17					
70	200	Japones	1250.958	0.417	12.510	29	1	1250.958	19.955	40
						30	2	625.479	14.110	28
						31	3	416.986	11.521	23
						32	4	312.740	9.977	20
						33	5	250.192	8.924	18
						34	7	178.708	7.542	15
						35	9	138.995	6.652	13
		36	1	1195.229	19.505	39				
		37	2	597.614	13.792	28				
		38	3	398.410	11.261	23				
		39	4	298.807	9.753	20				
		40	5	239.046	8.723	17				
		41	7	170.747	7.372	15				
		42	9	132.803	6.502	13				
	43	1	1838.143	24.189	48					
	44	2	919.071	17.104	34					
	45	3	612.714	13.965	28					
	46	4	459.536	12.094	24					
	47	5	367.629	10.818	22					
	48	7	262.592	9.143	18					
	49	9	204.238	8.063	16					
	50	1	2390.457	27.585	55					
	51	2	1195.229	19.505	39					
	52	3	796.819	15.926	32					
	53	4	597.614	13.792	28					
	54	5	478.091	12.336	25					
	55	7	341.494	10.426	21					
	56	9	265.606	9.195	18					

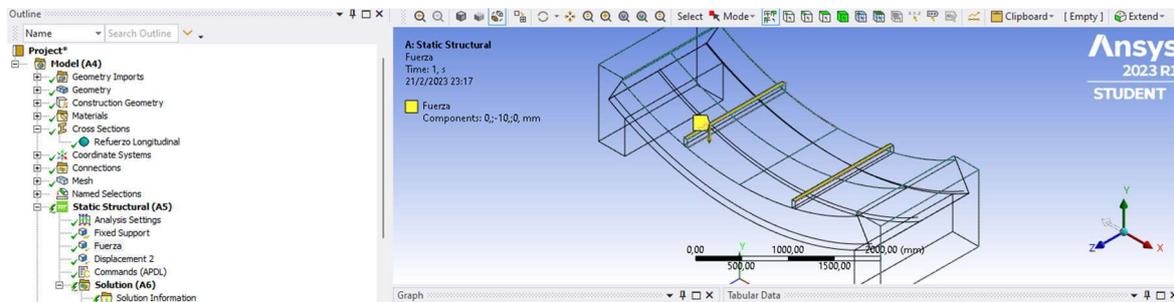
90	200	Japones	1479.128	0.493	14.791	57	1	1479.128	21.698	43
						58	2	739.564	15.343	31
						59	3	493.043	12.528	25
						60	4	369.782	10.849	22
						61	5	295.826	9.704	19
						62	7	211.304	8.201	16
		63	9	164.348	7.233	14				
		64	1	1355.262	20.770	42				
		65	2	677.631	14.687	29				
		66	3	451.754	11.992	24				
		67	4	338.815	10.385	21				
		68	5	271.052	9.289	19				
	69	7	193.609	7.850	16					
	70	9	150.585	6.923	14					
	71	1	2173.413	26.302	53					
	72	2	1086.706	18.599	37					
	73	3	724.471	15.186	30					
	74	4	543.353	13.151	26					
	75	5	434.683	11.763	24					
	76	7	310.488	9.941	20					
	77	9	241.490	8.767	18					
	78	1	2710.524	29.373	59					
	79	2	1355.262	20.770	42					
	80	3	903.508	16.959	34					
	81	4	677.631	14.687	29					
	82	5	542.105	13.136	26					
	83	7	387.218	11.102	22					
	84	9	301.169	9.791	20					

Una vez comprendida la cantidad de modelos a realizarse y las diferencias entre cada uno, se inicia la modelación de la geometría en el SpaceClaim de ANSYS Workbench. Se debe obtener una geometría similar a la mostrada en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Geometría de la dovela en SpaceClaim de ANSYS.

Con la geometría de la dovela lista y los aceros colocados en su posición el siguiente paso es ir al Mechanical Enterprise de Ansys donde se colocará el modelo constitutivo del hormigón, el acero, y demás características necesarias para el correcto funcionamiento del programa.



**Figura 3.** Interfaz de Ansys Mechanical Enterprise.

Estos procesos se deben realizar para todos los especímenes propuestos, teniendo en cuenta las características propias de cada uno.

Una vez realizado todo este procedimiento se debe correr los modelos y realizar un procesamiento de datos para obtener los resultados que nos sirvan para comparar estos especímenes y así determinar cuál disposición de acero es la que nos proporciona mejor funcionalidad. Los resultados procesados obtenidos se muestran en el capítulo siguiente.

## **2.4 Disposición de acero de refuerzo mínimo en dovelas de túnel de hormigón armado utilizando hormigón de alta resistencia**

Una vez realizados y corridos los modelos, se procede a procesar la información de las curvas carga-desplazamiento, para elaborar los gráficos presentados en la sección de resultados.

Utilizando estos gráficos se puede concluir que cuando se coloca una mayor cantidad de varillas de acero de menor diámetro en la sección, la dovela se comporta de mejor manera, ya que, se deforma menos conforme la carga aumenta y provee una ductilidad aceptable a la sección.

Hay que destacar que el comportamiento de la dovela es similar a partir de 5 varillas, es decir la mejora no es muy marcada en los especímenes de 5, 7 y 9 varillas, siendo casi idénticas en algunos casos para 7 y 9 varillas. De este modo se puede concluir que las disposiciones de acero mínimo óptimas para colocar en una dovela de 150 cm de ancho, son a partir de 5 varillas, se debe tener en cuenta la geometría de la sección para otorgar

la disposición más adecuada y obtener buenos resultados. En general se propone un espaciamiento menor o igual a 25 cm entre cada varilla, para obtener el mejor comportamiento estructural.

### 3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Pruebas

Para el desarrollo de este componente se realizaron varias pruebas, concretamente 84 ensayos usando el software Ansys, donde se caracterizó una dovela con refuerzo mínimo a flexión para diversas disposiciones, utilizando segmentos de 20 y 40 cm de altura, además de hormigones con resistencia a la compresión de 50, 70 y 90 MPa. La tabla resumen que detalla el refuerzo y la geometría de la dovela se presenta a continuación:

**Tabla 3.** Esquema de análisis para la modelación de especímenes.

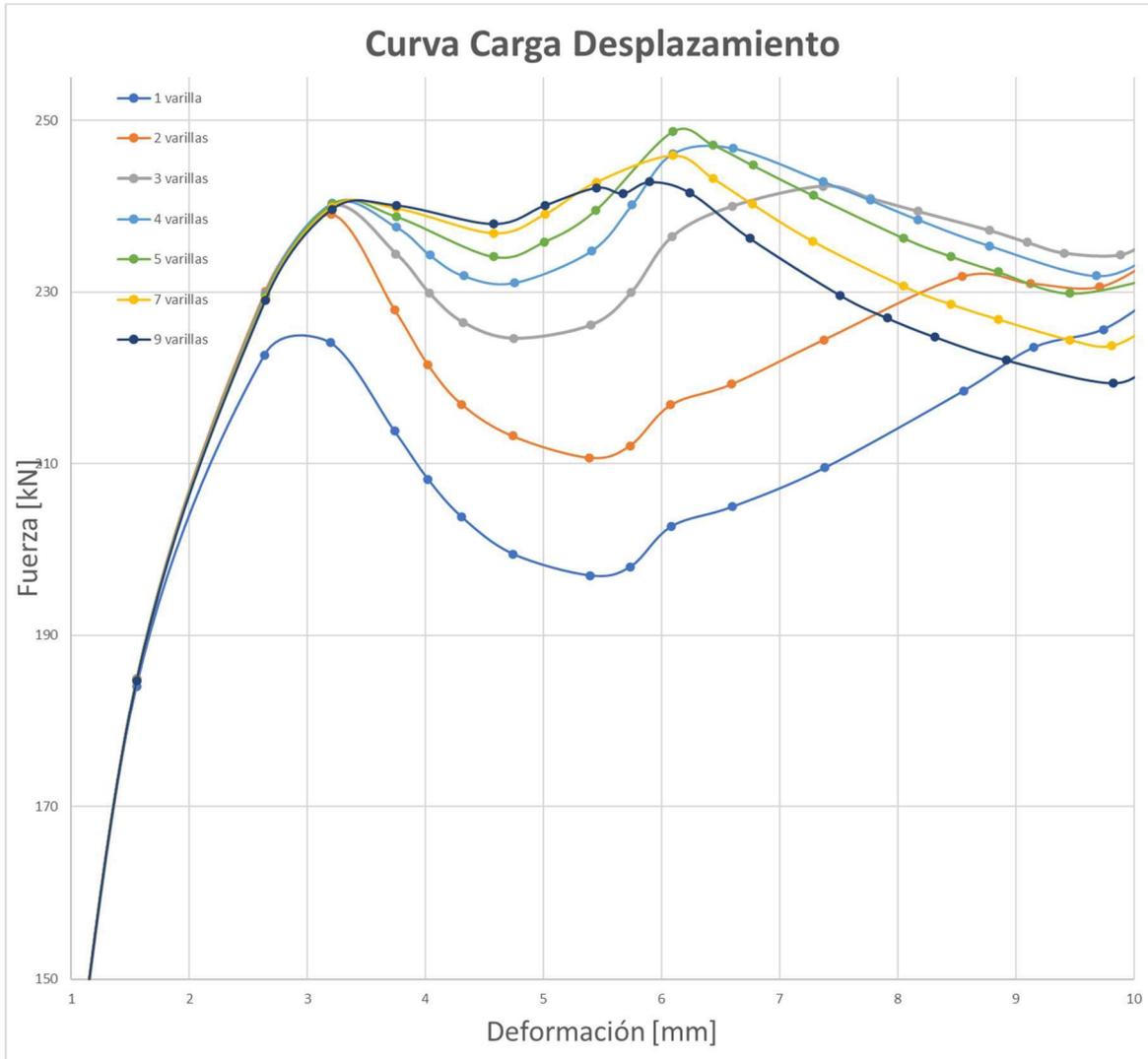
F <sub>c</sub> [Mpa]	Espesor h [mm]	Codigo	As.min [mm <sup>2</sup> ]	ρ.min [%]	As.min [cm <sup>2</sup> ]	# Modelo	# varillas	Area.varilla [mm <sup>2</sup> ]	r.va [mm]	Ø [mm]
50	200	Japones	999.595	0.333	9.996	1	1	999.595	17.838	36
						2	2	499.798	12.613	25
						3	3	333.198	10.299	21
						4	4	249.899	8.919	18
						5	5	199.919	7.977	16
						6	7	142.799	6.742	13
						7	9	111.066	5.946	12
		Canadiense	1010.153	0.337	10.102	8	1	1010.153	17.932	36
						9	2	505.076	12.680	25
						10	3	336.718	10.353	21
						11	4	252.538	8.966	18
						12	5	202.031	8.019	16
						13	7	144.308	6.777	14
						14	9	112.239	5.977	12
	400	Japones	1468.793	0.245	14.688	15	1	1468.793	21.622	43
						16	2	734.396	15.289	31
						17	3	489.598	12.484	25
						18	4	367.198	10.811	22
						19	5	293.759	9.670	19
						20	7	209.828	8.173	16
						21	9	163.199	7.207	14
		Canadiense	2020.305	0.337	20.203	22	1	2020.305	25.359	51
						23	2	1010.153	17.932	36
						24	3	673.435	14.641	29
						25	4	505.076	12.680	25
						26	5	404.061	11.341	23
						27	7	288.615	9.585	19
						28	9	224.478	8.453	17

70	200	Japones	1250.958	0.417	12.510	29	1	1250.958	19.955	40
						30	2	625.479	14.110	28
						31	3	416.986	11.521	23
						32	4	312.740	9.977	20
		33	5	250.192	8.924	18				
		34	7	178.708	7.542	15				
		35	9	138.995	6.652	13				
		36	1	1195.229	19.505	39				
	Canadiense	1195.229	0.398	11.952	37	2	597.614	13.792	28	
					38	3	398.410	11.261	23	
					39	4	298.807	9.753	20	
					40	5	239.046	8.723	17	
					41	7	170.747	7.372	15	
					42	9	132.803	6.502	13	
					43	1	1838.143	24.189	48	
					44	2	919.071	17.104	34	
400	Japones	1838.143	0.306	18.381	45	3	612.714	13.965	28	
					46	4	459.536	12.094	24	
					47	5	367.629	10.818	22	
					48	7	262.592	9.143	18	
	49	9	204.238	8.063	16					
	Canadiense	2390.457	0.398	23.905	50	1	2390.457	27.585	55	
					51	2	1195.229	19.505	39	
					52	3	796.819	15.926	32	
53					4	597.614	13.792	28		
54	5	478.091	12.336	25						
55	7	341.494	10.426	21						
56	9	265.606	9.195	18						
90	200	Japones	1479.128	0.493	14.791	57	1	1479.128	21.698	43
						58	2	739.564	15.343	31
						59	3	493.043	12.528	25
						60	4	369.782	10.849	22
		61	5	295.826	9.704	19				
		62	7	211.304	8.201	16				
		63	9	164.348	7.233	14				
		64	1	1355.262	20.770	42				
	Canadiense	1355.262	0.452	13.553	65	2	677.631	14.687	29	
					66	3	451.754	11.992	24	
					67	4	338.815	10.385	21	
					68	5	271.052	9.289	19	
					69	7	193.609	7.850	16	
					70	9	150.585	6.923	14	
					71	1	2173.413	26.302	53	
					72	2	1086.706	18.599	37	
400	Japones	2173.413	0.362	21.734	73	3	724.471	15.186	30	
					74	4	543.353	13.151	26	
					75	5	434.683	11.763	24	
					76	7	310.488	9.941	20	
	77	9	241.490	8.767	18					
	Canadiense	2710.524	0.452	27.105	78	1	2710.524	29.373	59	
					79	2	1355.262	20.770	42	
					80	3	903.508	16.959	34	
81					4	677.631	14.687	29		
82	5	542.105	13.136	26						
83	7	387.218	11.102	22						
84	9	301.169	9.791	20						

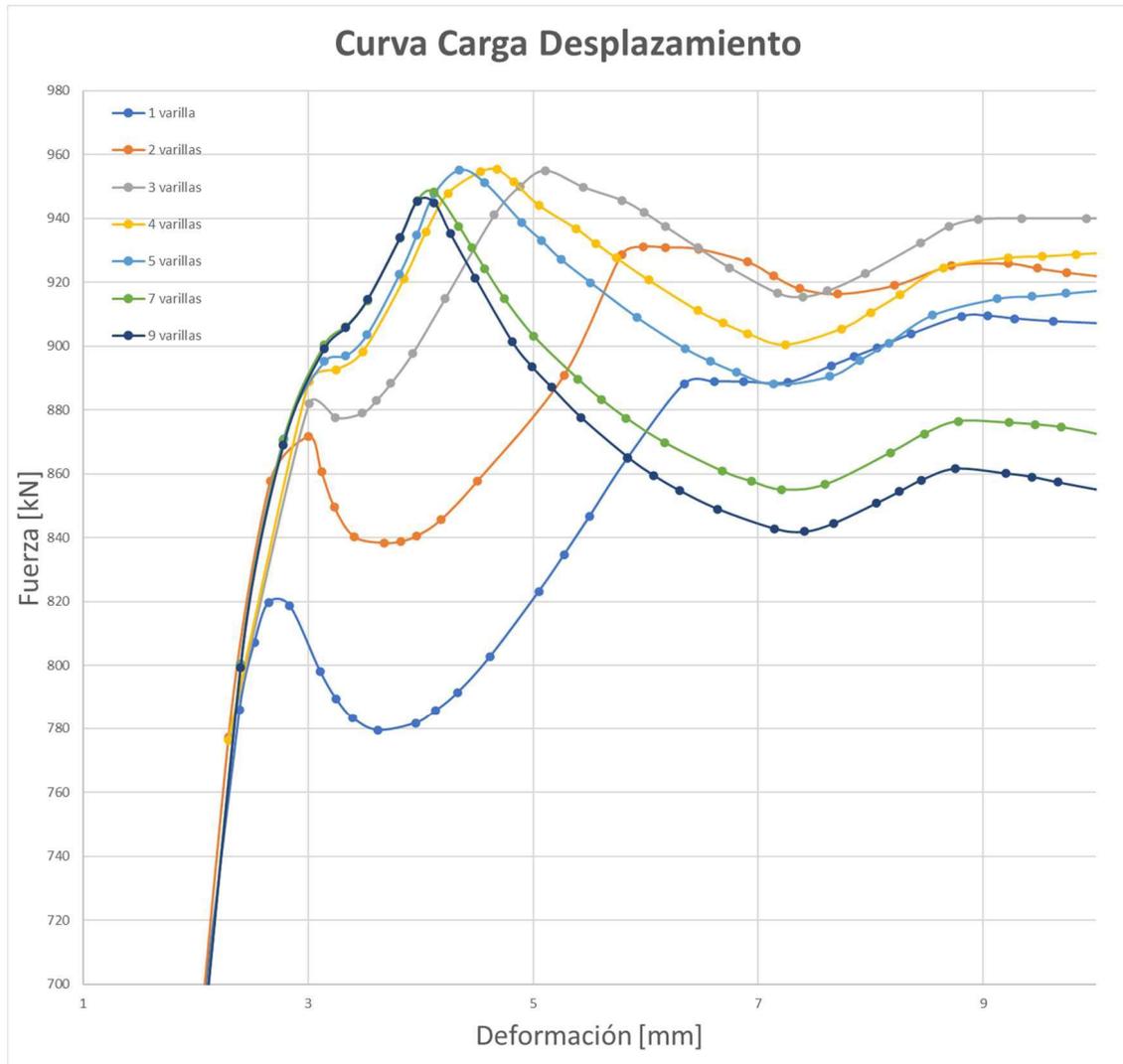
Una vez realizadas las 84 pruebas se agruparon los resultados procesados para obtener las gráficas que nos permiten comparar que disposición de acero funciona de mejor manera para cada tipo de dovela. En total se produjeron 12 gráficos carga desplazamiento donde se aprecia el comportamiento de las dovelas al ser sometidas a estos esfuerzos. Los gráficos obtenidos se muestran en la sección siguiente.

### 3.2 Resultados

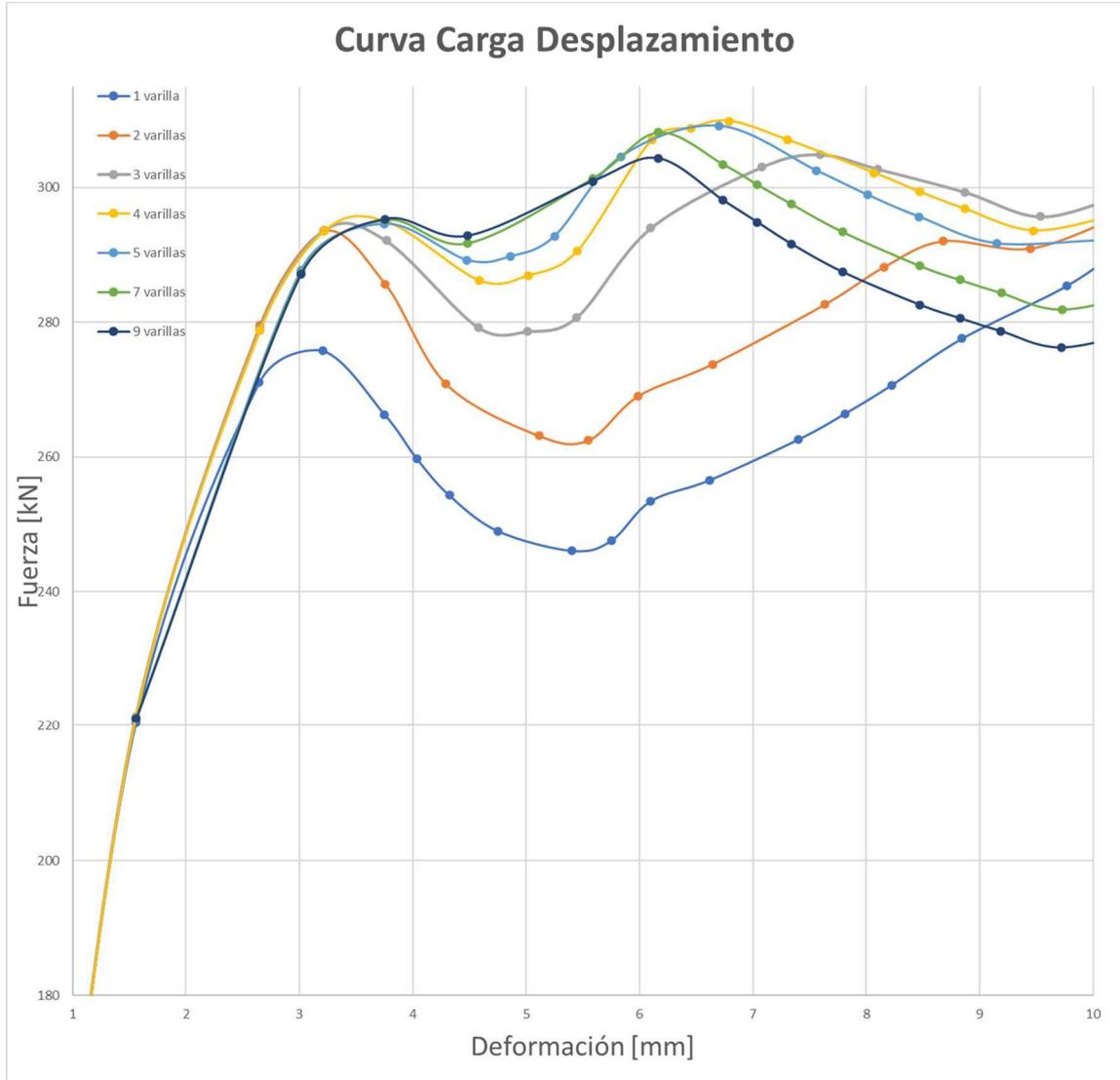
Con los 84 modelos corridos, procesados y agrupados para una misma cuantía de acero en los diferentes especímenes, se obtuvieron las 12 curvas carga desplazamiento presentadas a continuación:



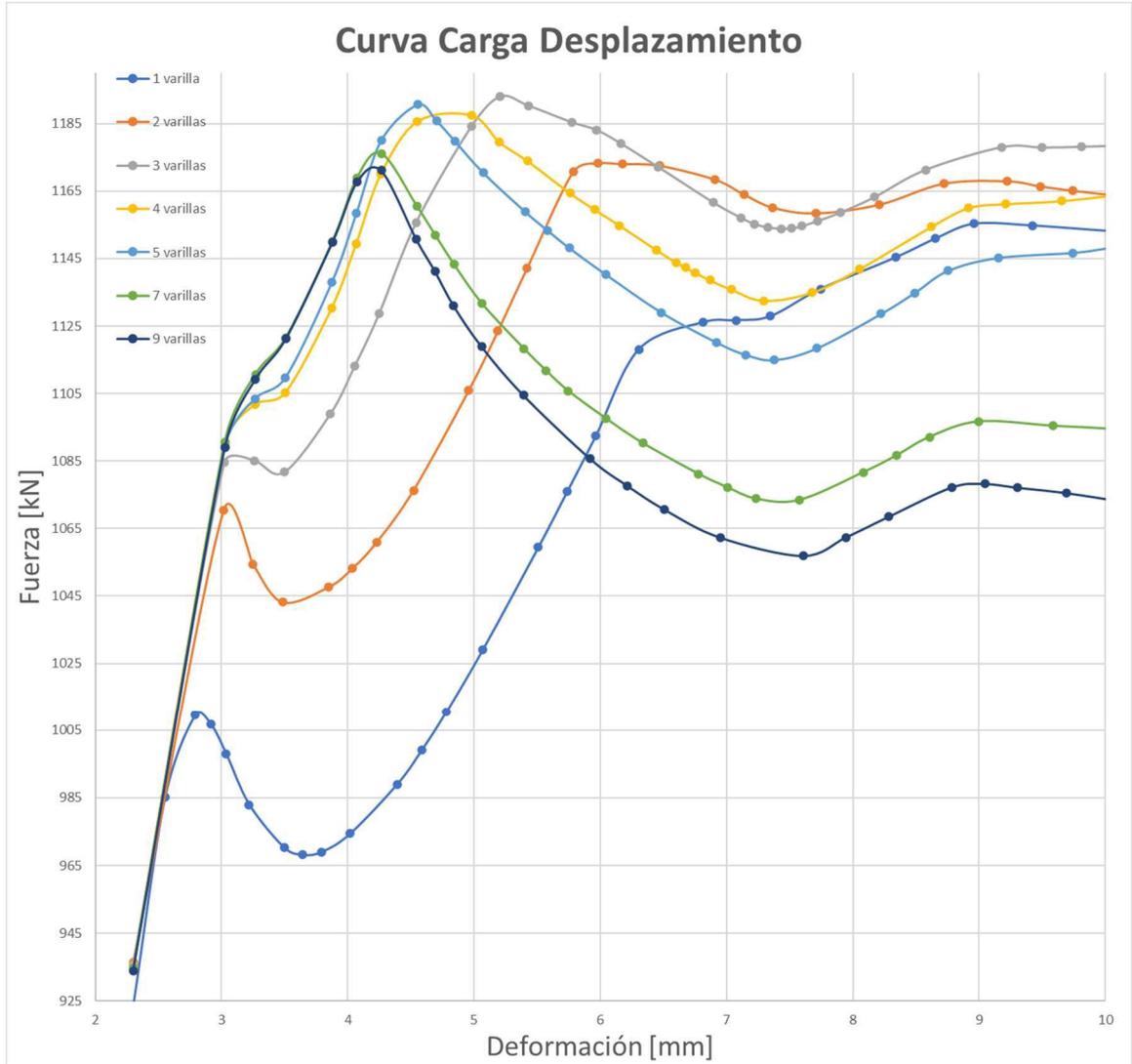
**Figura 4.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma japonesa, h=20 cm,  $f'c=50$  MPa.



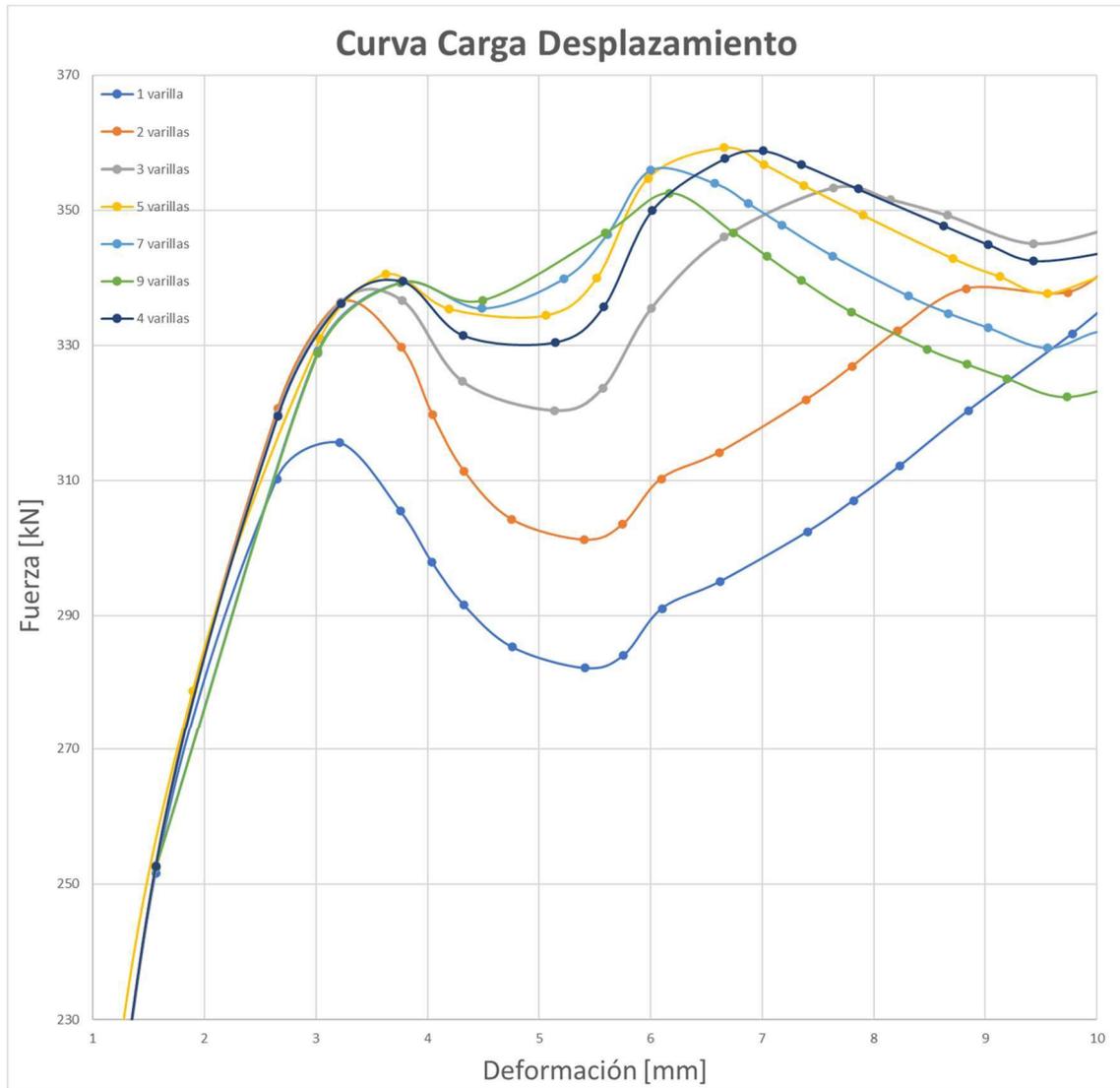
**Figura 5.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma japonesa,  $h=40$  cm,  $f'c=50$  MPa.



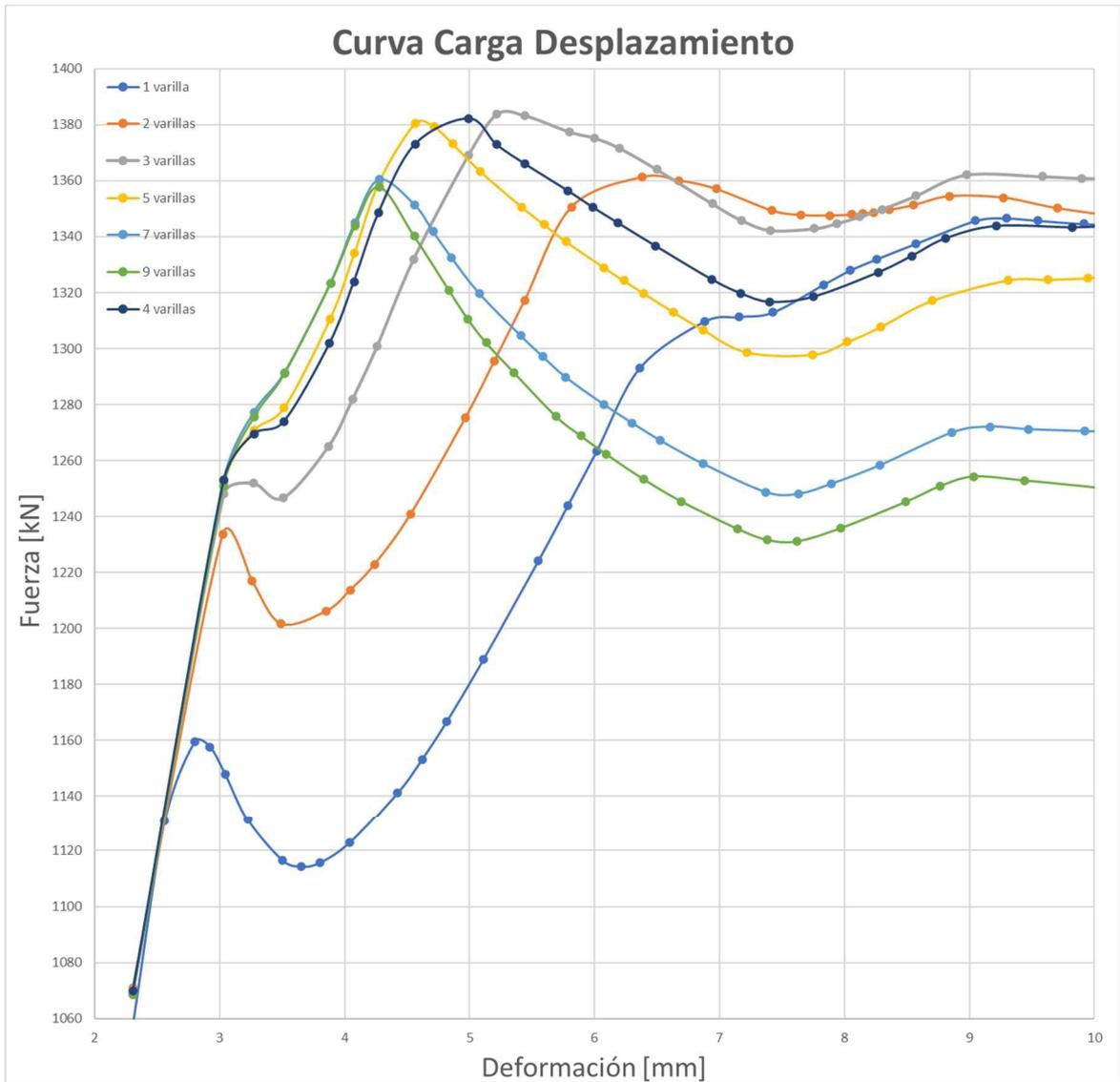
**Figura 6.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma japonesa,  $h=20$  cm,  $f'_c=70$  MPa.



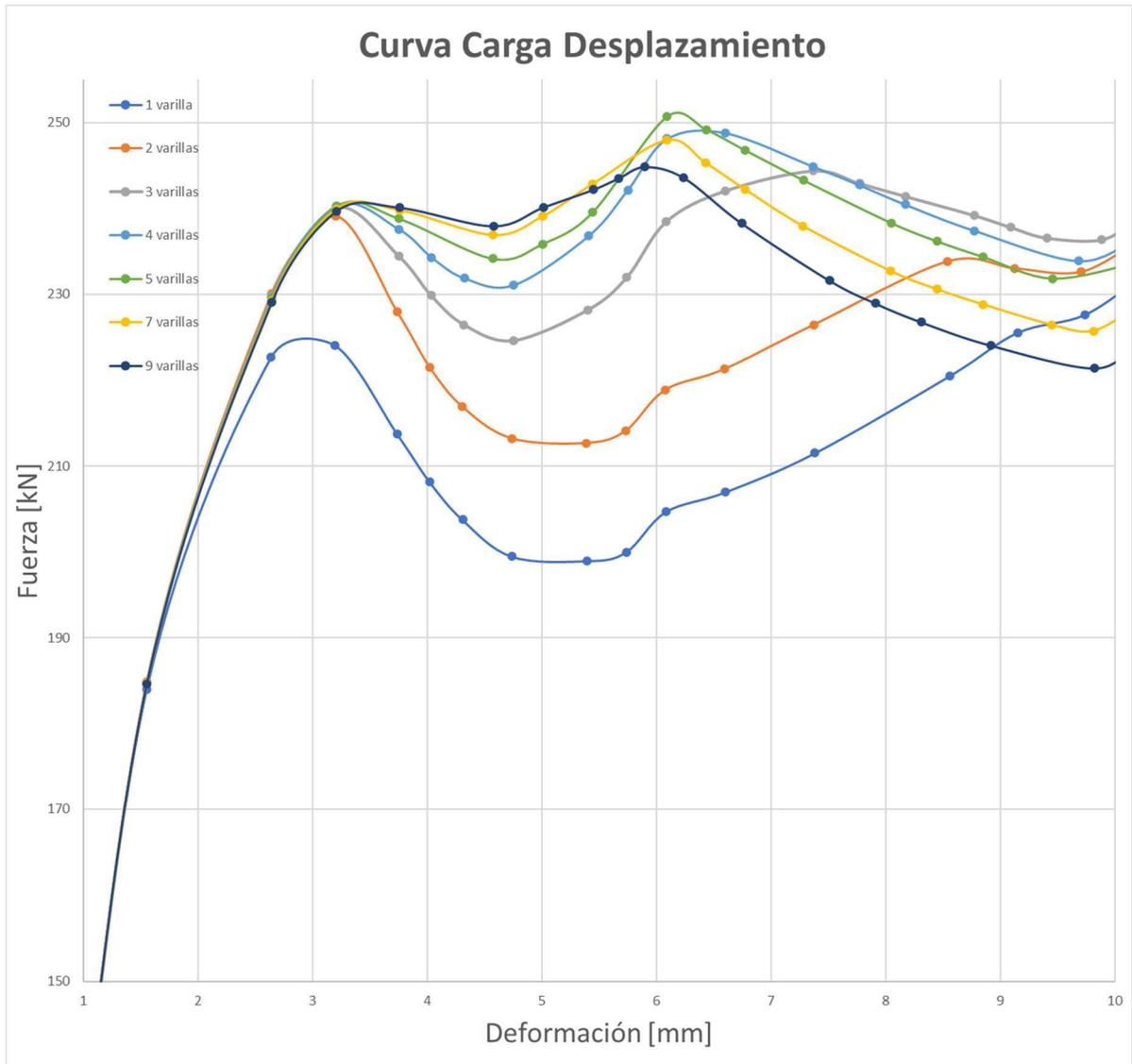
**Figura 7.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma japonesa,  $h=40$  cm,  $f'c=70$  MPa.



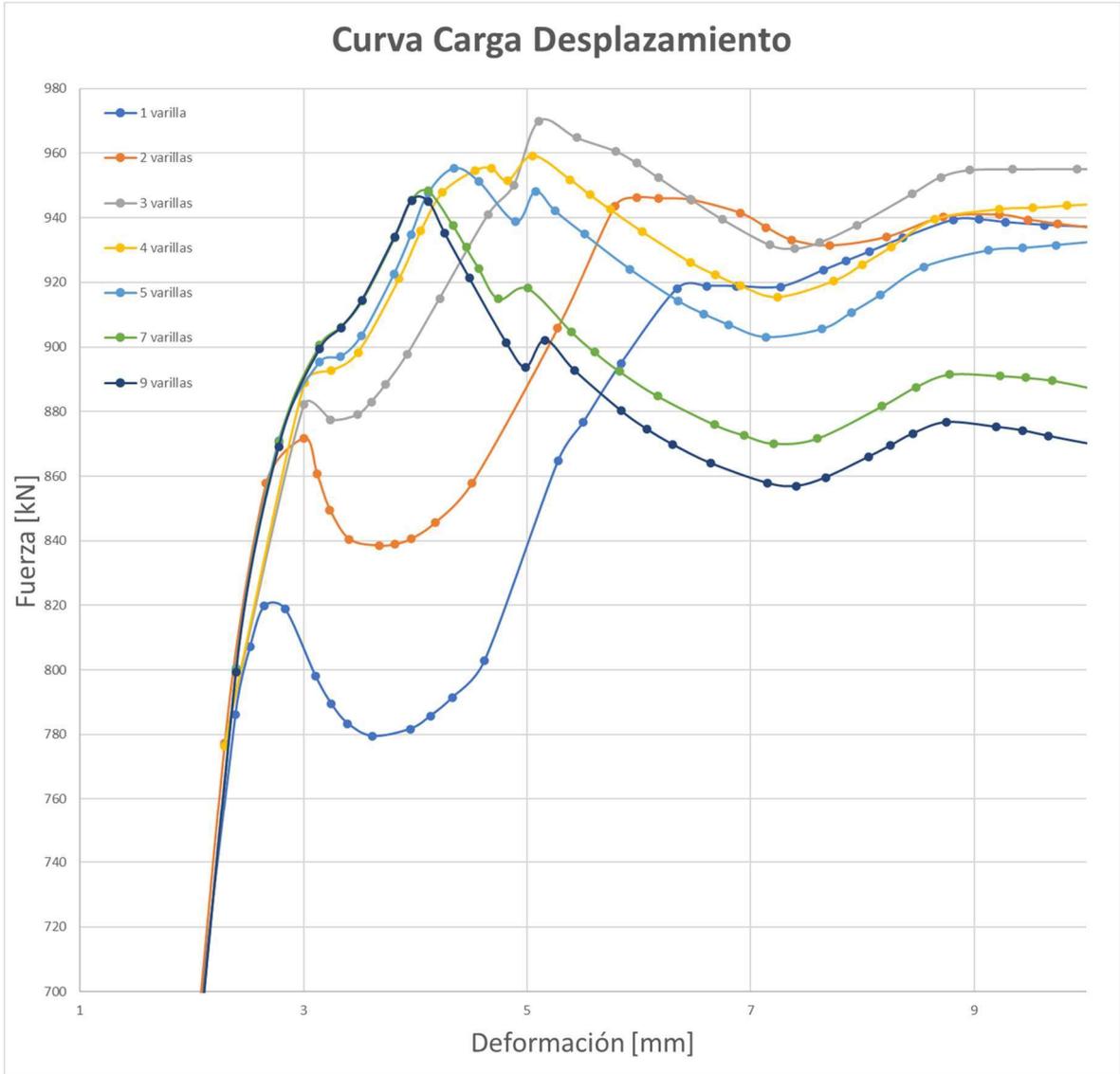
**Figura 8.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma japonesa,  $h=20$  cm,  $f'c=90$  MPa.



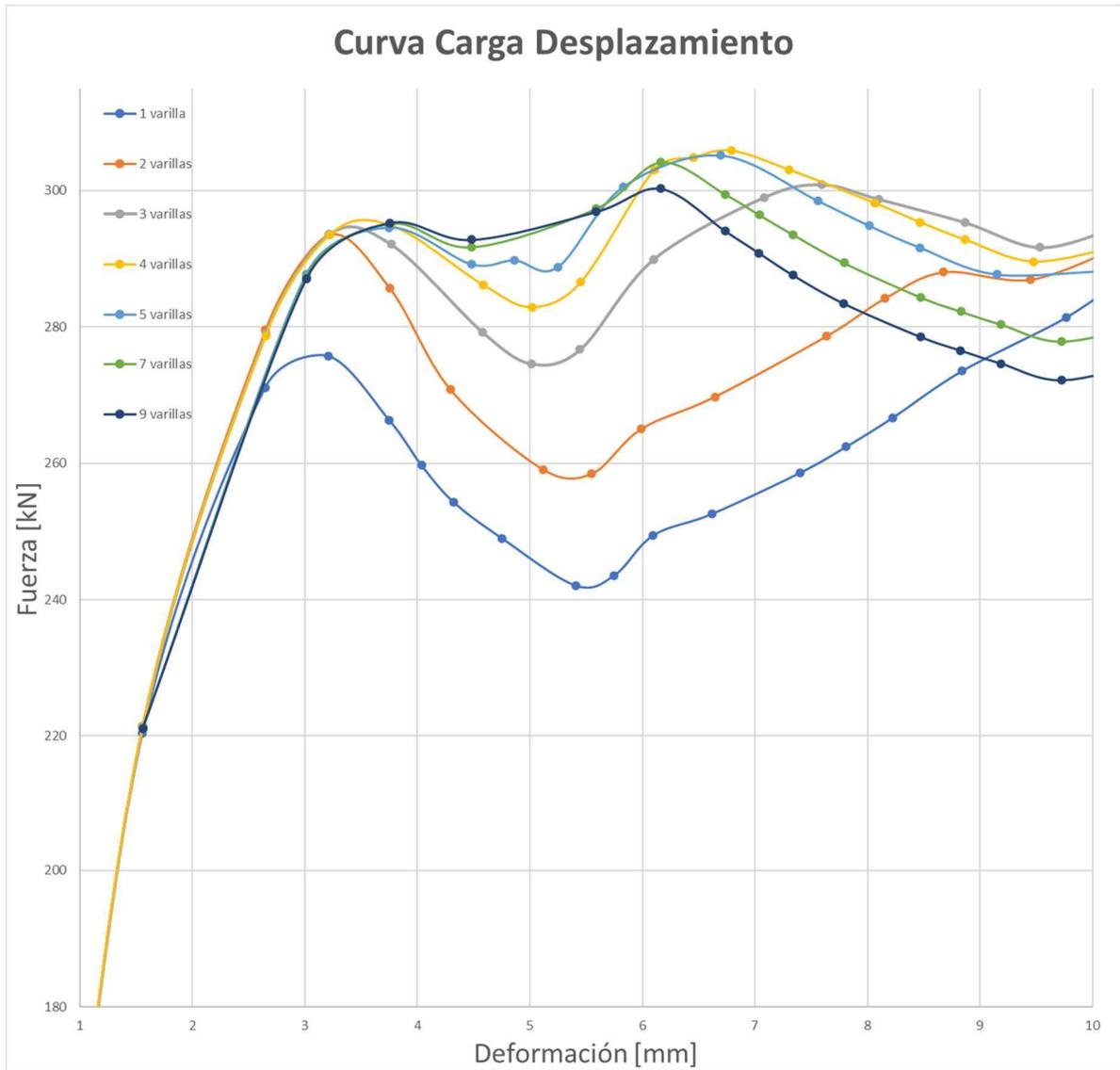
**Figura 9.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma japonesa,  $h=40$  cm,  $f'_c=90$  MPa.



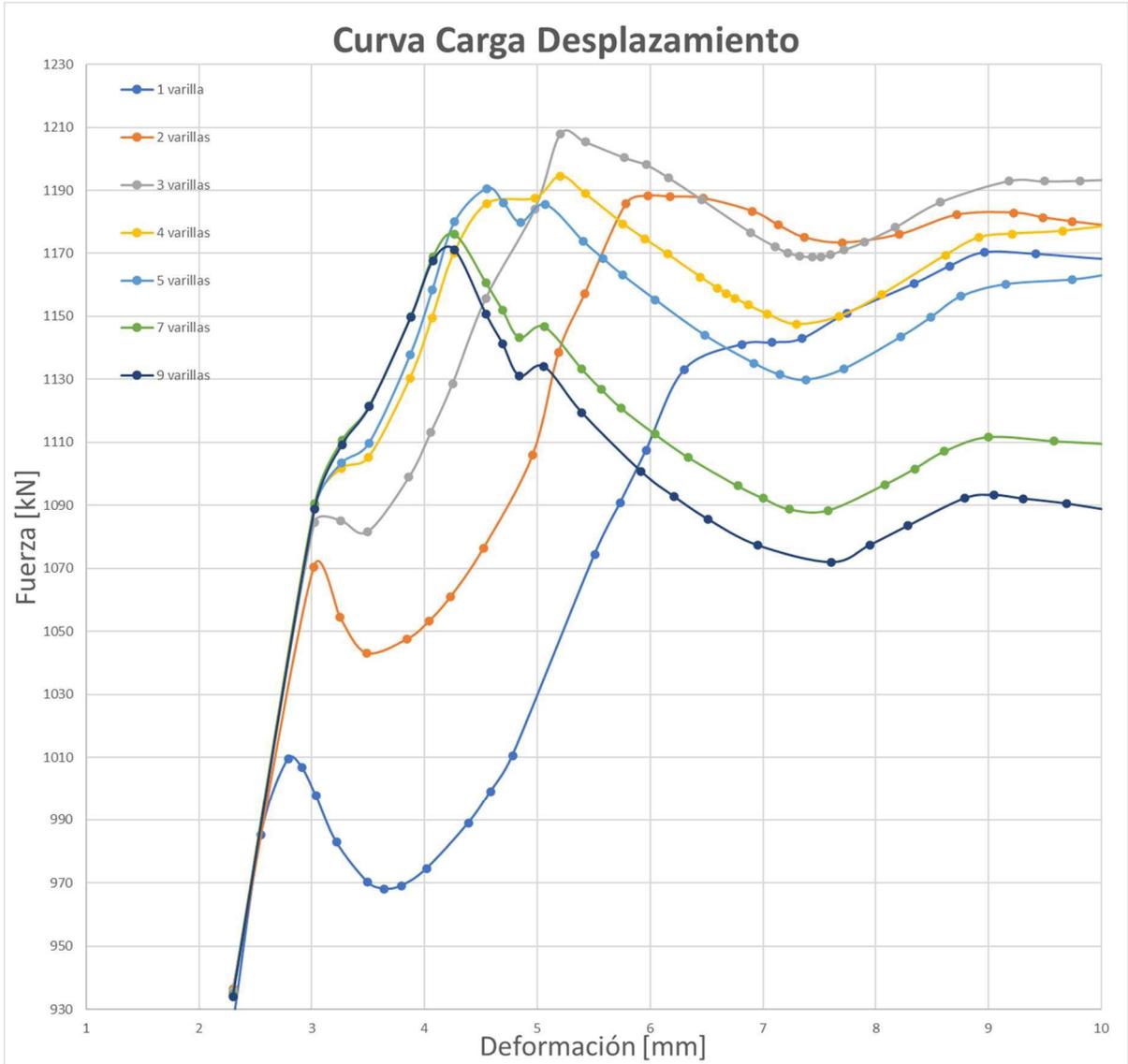
**Figura 10.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma canadiense,  $h=20$  cm,  $f'c=50$  MPa.



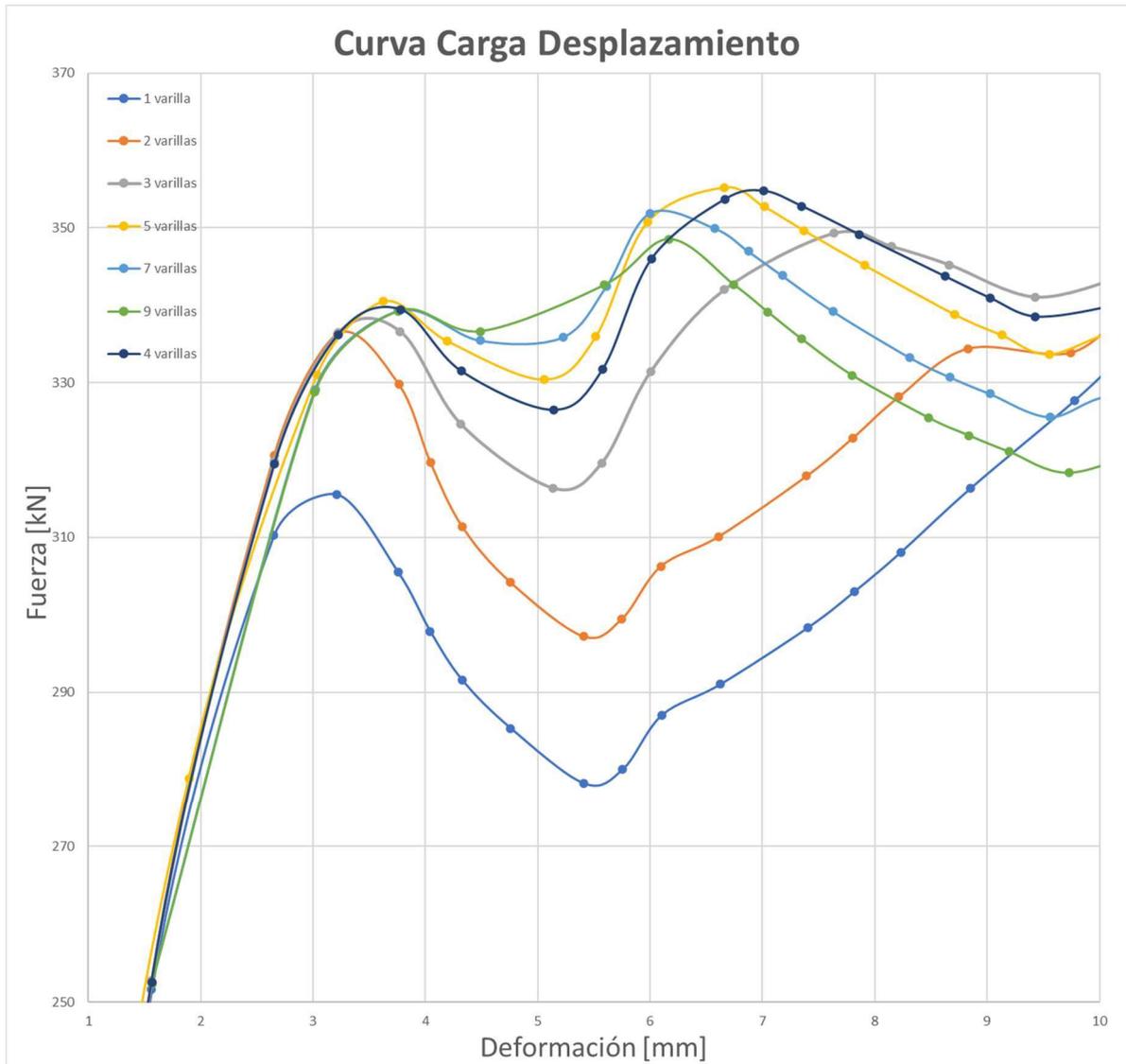
**Figura 11.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma canadiense,  $h=40$  cm,  $f'c=50$  MPa.



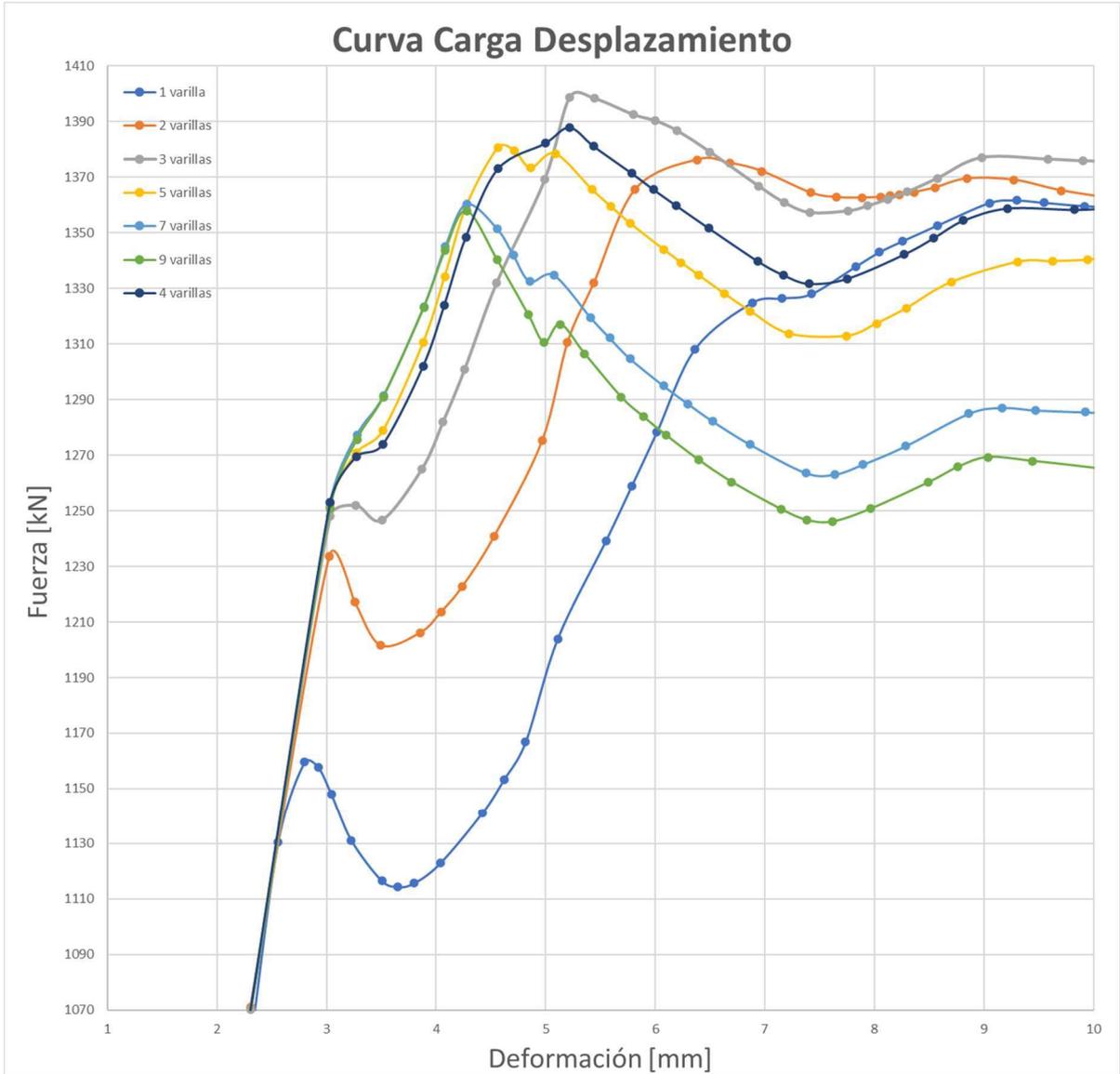
**Figura 12.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma canadiense,  $h=20$  cm,  $f'c=70$  MPa.



**Figura 13.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma canadiense, h=40 cm,  $f'c=70$  MPa.



**Figura 14.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma canadiense,  $h=20$  cm,  $f'_c=90$  MPa.



**Figura 15.** Curva carga desplazamiento acero mínimo utilizando norma canadiense,  $h=40$  cm,  $f'c=90$  MPa.

### 3.3 Conclusiones

- El trabajo realizado permitió determinar la disposición óptima y la cuantía mínima de acero a flexión en dovelas de túnel. Comprendiendo que las dovelas una vez colocadas en su posición final, estarán sometidas a esfuerzos axiales, específicamente de compresión, y el acero a flexión que se debe colocar en las mismas, no puede ser menor al acero mínimo a flexión proporcionado por los códigos, esto para controlar los esfuerzos producidos en la manipulación, almacenamiento y transporte. Además, de casos específicos donde se realicen inyecciones de grout entre la dovela y el suelo natural que producen una pequeña sollicitación a flexión.

Si bien es cierto que cuando se usan hormigones de alta resistencia, la resistencia a tracción del hormigón aumenta, es decir la capacidad del hormigón para resistir tensiones es mayor, también aumenta el acero mínimo que se debe colocar en la sección, ya que, el acero mínimo es directamente proporcional a la resistencia a compresión ( $f'c$ ) del hormigón.

- Mediante una revisión bibliográfica exhaustiva se encontró diferentes cuantías mínimas de acero correspondientes a distintas normas, de las cuales, para llevar a cabo esta tesis se usó el acero mínimo propuesto por la normativa japonesa diseñado específicamente para hormigones de alta resistencia, y el acero mínimo detallado por la norma canadiense que es muy similar al propuesto por el ACI, cabe recalcar, que en este último código la altura de la sección no interviene en el cálculo del acero mínimo por flexión.
- Una vez estudiadas las consideraciones normativas para el diseño y construcción de túneles se puede concluir que a nivel latinoamericano los países que poseen norma referente al tema son Colombia, Perú y México, en estas normas no se especifica directamente una cuantía de acero a flexión, pero, se puede sobreentender una referencia al uso del acero mínimo. Gracias al Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels realizado por la **FHWA**, se entendieron las acciones a las que puede estar sometida una dovela y porque el uso del acero mínimo a flexión en la sección es suficiente para tomar estas sollicitaciones.
- Gracias a la tesis realizada por Ameer M. Salih y Azad A. Mohammed sobre las relaciones mínimas de acero de refuerzo a flexión de vigas que utilizan hormigón

de alta resistencia, se realizó el reporte de estudios teórico-experimentales sobre el armado mínimo requerido en estructuras de hormigón armado conforme la resistencia del hormigón aumenta, donde, se pudo analizar las ecuaciones propuestas por los diferentes códigos para el cálculo del acero mínimo a flexión, y se determinó el uso de la norma Japonesa y Canadiense para el desarrollo de este trabajo.

- Se realizó un reporte comparativo entre los resultados del reporte de estudios teórico-experimentales y toda la normativa citada, de donde se concluyó que el acero a flexión a colocarse en una dovela corresponde a la cuantía mínima de flexión, y por ende no puede disminuirse, ya que la función de este acero es garantizar la calidad de la dovela durante su proceso de almacenamiento y transporte. Además, se propuso la utilización de la norma japonesa para el cálculo del acero mínimo a flexión, ya que, esta ecuación fue diseñada para el uso con hormigones de alta resistencia y es la más completa, tomando en cuenta parámetros como el peralte de la sección. También, se realizó el cálculo de la cuantía mínima con la ecuación propuesta por el código canadiense que es similar a la utilizada por el ACI, esto para contrastar los resultados obtenidos y moverse en la calidad de estos dos reglamentos.
- La norma japonesa nos otorga una menor cuantía de acero a flexión para los especímenes con una altura mayor, sin comprometer su buen funcionamiento.
- Con el trabajo finalizado se puede concluir que las disposiciones de acero mínimo conformadas por; una, dos y tres barras de refuerzo, colocadas en una dovela de 150 cm de ancho, es decir, un espaciamiento entre barras mayor o igual a 46 centímetros, no otorga el comportamiento más adecuado para los segmentos de túnel, esto debido a que, las primeras fisuras en el hormigón se presentan con una carga y deformación mucho menor, que para disposiciones conformadas por 5 varillas en adelante para este estudio. Es decir, cuando el espaciamiento entre barras es menor o igual a 25 cm.
- Hay que tener presente la geometría de la sección para otorgar la disposición más adecuada y obtener buenos resultados, ya que, si el ancho logra superar los límites de este estudio (1,5 m) las disposiciones más adecuadas pueden ser con una mayor cantidad de varillas que las aquí ensayadas. Es decir, para obtener un funcionamiento óptimo la separación entre varillas debería estar entre los 25 centímetros o menor entre cada varilla.

- En base a los resultados obtenidos se puede concluir que las disposiciones de acero mínimo para la construcción de dovelas de túnel, que presentan mejor comportamiento, son de 5 varillas en adelante, es decir, un espaciamiento entre barras no mayor a 25 centímetros. Sin embargo, no se puede afirmar concretamente, que disposiciones con un mayor número de varillas (menor distancia de espaciamiento entre barras), otorgue un mejor comportamiento de la sección, debido a que los resultados obtenidos para los diversos ensayos, no muestran una tendencia que permita avalar esta afirmación.

### 3.4 Recomendaciones

- Organizar el número de modelos a realizarse, optimizando lo mayor que se pueda la cantidad final, esto debido a que el software tarda aproximadamente una hora para resolver cada modelo, este proceso puede retrasar la investigación si no se tomó en cuenta desde un principio.
- Para estudios relacionados al diseño y construcción de túneles dirigirse a normas extranjeras respaldadas como la FHWA, ya que en estas normas se puede encontrar de forma detallada los procesos a realizarse, las ecuaciones a usarse y el porqué de estas.
- Al momento de modelar la geometría de los especímenes, tener presente que esta no entre en contacto inadecuado con los apoyos propuestos, ya que, esto puede producir errores en los resultados y representar condiciones no esperadas en el modelo.
- Obtener los datos de manera ordenada, es decir recopilar la información de las diferentes disposiciones de acero correspondientes a un mismo caso de estudio en un solo documento, esto facilitara el procesamiento en Excel y mejorara los tiempos en la realización de las gráficas.
- Tener presente que el software Ansys posee una licencia de versión estudiantil que limita su uso a un solo periodo de 1 año, es decir si se usó previamente el programa se debe gestionar la licencia para poder seguir usándose por un periodo más largo.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. M. F. Peña, A. Galván Chávez, *Comportamiento estructural de juntas entre dovelas de concreto prefabricado para túneles*. 2012.
- [2] S. Abbas and M. L. Nehdi, *Mechanical Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Tunnel Lining Segments*, 9th ed. doi: 10.3390/ma14092378, 2021.
- [3] 318-ACI Committee, *ACI CT-21: ACI Concrete Terminology*. American Concrete Institute. 2021.
- [4] M. N. S. Abbas, A. Soliman, "Mechanical performance of RC and SFRC precast tunnel lining segments," *Aci Mater. J. A Case Study*, vol. 11, pp. 501–505, doi: 10.14359/51687101.
- [5] A. B. P. Pujadas, A. Aguado, "Optimal design of precast fibre reinforced concrete segments for tunnel support," *Hormigón y Acero*, vol. 65, 2014, doi: 10.1016/j.hya.2014.11.002.
- [6] P. V. B. Chiaia, A. Fantilli, "Evaluation of minimum reinforcement ratio in FRC members and application to tunnel linings," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, pp. 593–604, doi: 10.1617/s11527-006-9166-0.
- [7] E. R. Marzouk, "New Formula to Calculate Minimum Flexure Reinforcement for Thick High-Strength Concrete Plates," *ACI Struct. J.*, vol. 106, doi: 10.14359/51663106.
- [8] S.-T. Y. J.-K. Kim, "Application of size effect to compressive strength of concrete members," *Sadhana*, vol. 27, pp. 467–484, 2002, doi: 10.1007/BF02706995.
- [9] 318-ACI Committee, *Building code requirements for structural concrete: (ACI 318-95); and commentary (ACI 318R-95)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1995.
- [10] J. Hung, J. Monsees, N. Munfah, and J. Wisniewski, "Technical manual for design and construction of road tunnels-Civil elements," *Natl. Highw. Inst.*, no. December, p. 702, 2009.
- [11] "Hormigones Especiales (III): Hormigón de Alta Resistencia - MÁS QUE INGENIERÍA." <https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-de-alta-resistencia/> (accessed Feb. 28, 2023).
- [12] S. Standard, *Design guide of High Strength Concrete*. 2008.

- [13] C. Arnau, O., Molins, "Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test," *Numer. simulation. Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 26, pp. 778–788, 2011.
- [14] M. Pescara, "Dimensioning the segmental lining. Tunneling and tunnel boring machine.," Turín, Italia, 2010.
- [15] L. Skelhorn, S. y McNally, "A Practical Approach for Precast Concrete Segmental Ring Selection. Rapid Excavation and Tunneling Conference.," 2009.
- [16] J. Bofill de la Cierva, *Necesidades de Innovación en la construcción subterránea. Ejecución de túneles con escudo y dovelas prefabricadas*. Barcelona, España., 2007.
- [17] S. Cavalaro, "Aspectos tecnológicos de túneles construidos con tuneladora y dovelas prefabricadas de hormigón.," Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España., 2009.
- [18] V. Kumar, S. J. Lee, and M. D. German, "Finite element design sensitivity analysis and its integration with numerical optimization techniques for structural design," *Comput. Struct.*, vol. 32, no. 3–4, pp. 883–897, 1989, doi: 10.1016/0045-7949(89)90372-6.
- [19] H. Y. Ramírez and A. Santana, "Two interacting electrons confined in a 3D parabolic cylindrically symmetric potential, in presence of axial magnetic field: A finite element approach," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 183, no. 8, pp. 1654–1657, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.cpc.2012.03.002.
- [20] N. Subramanian, "Limiting reinforcement ratios for RC flexural members," *Indian Concr. J.*, vol. 84, no. 9, pp. 71–80, 2010.
- [21] I. A. E. M. Shehata, L. C. D. Shehata, and S. L. G. Garcia, "Minimum steel ratios in reinforced concrete beams made of concrete with different strengths - Theoretical approach," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 36, no. 255, pp. 3–11, 2003, doi: 10.1617/13825.
- [22] A. M. Salih and A. A. Mohammed, "Minimum Flexural Reinforcement Steel Ratios of High-Strength Concrete Beams," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/5612790.
- [23] P. Andrea, S. Bonilla, L. J. Suárez Gómez, and S. Gómez, "Estado del arte de la normativa latinoamericana en diseño y construcción de túneles viales," 2018,

[Online]. Available: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil).

- [24] “MANUAL DE TÚNELES | Sociedad Colombiana de Ingenieros.” <https://sci.org.co/manual-de-tuneles/> (accessed Feb. 28, 2023).
- [25] “Manual de Túneles de Carretera.” <https://www.piarc.org/es/PIARC-Base-Conocimiento-Carreteras-y-Transporte-Por-Carretera/Infraestructura-Vial-Resiliente/Tuneles-Carretera-Explotacion/manual-de-tuneles> (accessed Feb. 28, 2023).
- [26] J. Brier and lia dwi jayanti, “MANUAL DE CARRETERAS: TÚNELES, MUROS Y OBRAS COMPLEMENTARIA,” vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>.