

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.**

**MODELACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL QUE PERMITA
COMPRENDER LA VARIACIÓN DE ACERO MÍNIMO EN DOVELAS
PREFABRICADAS DE TÚNELES CONFORME LA RESISTENCIA
DEL HORMIGÓN AUMENTA.**

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

AUTOR: MOROCHO COLLAGUAZO, WASHINGTON DANIEL

DIRECTOR: PhD. ÁVILA VEGA, CARLOS FABIÁN

Quito, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, WASHINGTON DANIEL MOROCHO COLLAGUAZO 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.

WASHINGTON DANIEL MOROCHO COLLAGUAZO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Washington Daniel Morocho Collaguazo, bajo mi supervisión.

PhD. ÁVILA VEGA, CARLOS FABIÁN
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.

Washington Daniel Morocho Collaguazo

PhD. Ávila Vega, Carlos Fabián

DEDICATORIA

A todas las personas que han hecho de la ingeniería la mejor herramienta de discernimiento y desarrollo de la humanidad.

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia, en especial a mi madre Pilar.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.4.1 Generalidades	4
1.4.2 Revestimiento de túneles	4
1.4.2.1 Dovelas	4
1.4.3 Juntas de segmentos.....	5
1.4.4 Fuerzas en un túnel segmentado	5
1.4.4.1 Túnel hidráulico	5
1.4.5 Método del elemento finito.....	6
1.4.5.1 Preprocesamiento	6
1.4.5.1.1 Geometría del modelo.....	6
1.4.5.1.2 Discretización o mallado.....	8
1.4.5.1.3 Idealización de la matriz de hormigón	8
1.4.5.1.4 Idealización del acero de refuerzo.....	8
1.4.5.1.5 Idealización de los apoyos.	9
1.4.5.1.6 Modelos constitutivos.	9
1.4.5.1.7 Condiciones de frontera.	15
1.4.5.2 PROCESAMIENTO.....	15
1.4.5.2.1 Cantidades primarias desconocidas.....	16

1.4.5.2.2	Ensamble	16
1.4.5.2.3	Solución global	16
1.4.5.3	POS PROCESAMIENTO	17
2	METODOLOGÍA	18
2.1.1	Descripción general de las disposiciones del acero mínimo a flexión 19	
2.1.2	Acero mínimo ACI 318-19	19
2.1.3	Acero mínimo Eurocode 2	20
2.1.4	Acero mínimo según Hesham Marzouk (2009).....	20
2.2.1	Descripción geométrica	21
2.2.2	Hormigón de alta resistencia	22
2.2.3	Creación de grupos computacionales.....	23
2.2.4	Discretización	26
2.2.4.1	Matriz de hormigón.....	26
2.2.4.2	Acero de refuerzo	26
2.2.4.3	Placa de carga y apoyos	27
2.2.5	Condiciones de frontera.....	28
2.2.5.1	Carga.....	28
2.2.5.2	Apoyos	29
2.2.6	Leyes constitutivas	31
2.2.6.1	Hormigón.....	31
2.2.6.1.1	Parámetros del modelo	31
2.2.6.1.2	Interpretación de los parámetros de daño	32
2.2.6.1.3	Validación de los parámetros de daño	34
2.2.6.2	Acero	36
2.2.7	Características mecánicas de los materiales.....	37
2.2.8	Calidad del mallado	37

2.2.9	Codificación APDL.....	38
3	PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	40
3.2.1	Caracterización numérico computacional de dovelas de hormigón armado.....	40
3.2.1.1	Dovela Serie-A	41
3.2.1.2	Dovela Serie-B	43
3.2.1.3	Dovela Serie-C	45
3.2.1.4	Dovela Serie-D	47
3.2.1.5	Dovela Serie-E	49
3.2.2	Comparación entre ecuaciones propuestas de acero mínimo con resultados computacionales	51
3.2.2.1	Representaciones graficas de la carga de agrietamiento vs esfuerzo a la compresión con diferentes cuantías	51
3.2.2.2	Representaciones graficas de esfuerzo máximo a tensión vs esfuerzo a la compresión con diferentes cuantías.....	53
3.2.3	Propuesta de cuantía mínima para dovelas	54
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un túnel segmentado.....	4
Figura 2. Junta plana (izquierda) Junta convexa (derecha).....	5
Figura 3. Diagrama de carga interna en un túnel que conduce agua a presión. ..	6
Figura 4. Vista superior (a), trasversal (b) y frontal (c) del refuerzo de una dovela de hormigón armado.	7
Figura 5. Configuración del ensayo de dovelas.....	7
Figura 6. Geometría del elemento CPT215.....	8
Figura 7. Geometría del elemento REINF264.	9
Figura 8. Geometría del elemento SOLID45.	9
Figura 9. Función de rendimiento de capa de micro plano de tres superficies lisas (izquierda). Representación de diferentes estados de tensión como puntos en la superficie de fluencia (derecha).	10
Figura 10. Parámetro S.	12
Figura 11. Características del modelo de acero Dodd-Restreppo: Curva esfuerzo – deformación.....	15
Figura 12. Sistema Lineal.....	17
Figura 13. Sistema no Lineal.....	17
Figura 14. Modos de fallo a flexión en función de As.	19
Figura 15. Curva esfuerzo deformación concreto de peso normal.	22
Figura 16. Ilustración de las dimensiones.	23
Figura 17. Porcentaje de acero mínimo frente a la altura (h), con un $F_y=4200[\text{kg}/\text{cm}^2]$	24
Figura 18. Discretización de la matriz de hormigón.....	26
Figura 19. Discretización del acero de refuerzo del acero longitudinal.....	27
Figura 20. Discretización de apoyos y placa de carga.	28
Figura 21. Placa de apoyo a) vista frontal b) vista superior.....	29
Figura 22. Representación de restricciones del ensayo a) restricción x-z b) base empotrada.	30
Figura 23. Representación de superficies de contacto a) placa de carga b) apoyos.....	31
Figura 24. Constante de endurecimiento.....	32

Figura 25. Evolución de daño por compresión.	33
Figura 26. Umbral de daño por compresión.	33
Figura 27. Configuración del ensayo de cilindro.....	34
Figura 28. Resultados del ensayo de cilindro a compresión: curva esfuerzo - deformación.....	35
Figura 29. Resultados del ensayo de cilindro a tensión: curva esfuerzo - deformación.....	35
Figura 30. Curva esfuerzo -deformación.	36
Figura 31. Curva esfuerzo deformación del modelo constitutivo del acero.	36
Figura 32. Comparación de los diferentes tamaños del mallado.	38
Figura 33. Dovela $h=20$ [cm], $f_c'=50$ [MPa].....	41
Figura 34. Dovela $h=30$ [cm], $f_c'=50$ [MPa].....	41
Figura 35. Dovela $h=40$ [cm], $f_c'=50$ [MPa].....	42
Figura 36. Dovela $h=20$ [cm], $f_c'=60$ [MPa].....	43
Figura 37. Dovela $h=30$ [cm], $f_c'=60$ [MPa].....	43
Figura 38. Dovela $h=40$ [cm], $f_c'=60$ [MPa].....	44
Figura 39. Dovela $h=20$ [cm], $f_c'=70$ [MPa].....	45
Figura 40. Dovela $h=30$ [cm], $f_c'=70$ [MPa].....	45
Figura 41. Dovela $h=40$ [cm], $f_c'=70$ [MPa].....	46
Figura 42. Dovela $h=20$ [cm], $f_c'=80$ [MPa].....	47
Figura 43. Dovela $h=30$ [cm], $f_c'=80$ [MPa].....	47
Figura 44. Dovela $h=40$ [cm], $f_c'=80$ [MPa].....	48
Figura 45. Dovela $h=20$ [cm], $f_c'=90$ [MPa].....	49
Figura 46. Dovela $h=30$ [cm], $f_c'=90$ [MPa].....	49
Figura 47. Dovela $h=40$ [cm], $f_c'=90$ [MPa].....	50
Figura 48. Comparación de cargas de agrietamiento vs esfuerzo a la compresión.....	52
Figura 49. Comparación de esfuerzos máximo a tensión vs esfuerzo a la compresión.....	54
Figura 50. Cuantía mínima para dovelas de alta resistencia	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los parámetros de daño obtenidos de valores de ensayos realizados.....	13
Tabla 2. Parámetros para el modelo de micro plano de daño- plasticidad	14
Tabla 3. Parámetros de la curva esfuerzo - deformación.	15
Tabla 4. Información relevante de cada túnel.	21
Tabla 5. Detalles de los especímenes para modelos computacionales.....	23
Tabla 6. Cuantía y acero de los especímenes.	25
Tabla 7. Armado de los especímenes.....	25
Tabla 8. Discretización de la matriz de hormigón.	26
Tabla 9. Discretización del acero de refuerzo.	27
Tabla 10. Discretización de apoyos y placa de carga.	28
Tabla 11. Parámetros del hormigón para el ensayo a compresión del cilindro. ...	34
Tabla 12. Propiedades del hormigón usadas para el modelo computacional.	37
Tabla 13. Detalle de los diferentes tamaños de la malla.....	37
Tabla 14. Tabla de la descripción del código APDL de la matriz de acero.	38
Tabla 15. Tabla de la descripción del código APDL de la matriz de hormigón. ...	39
Tabla 16. Tabla de la descripción del código APDL de la interfaz entre materiales.	39
Tabla 17. Resultados Dovela-A	42
Tabla 18. Resultados Dovela-B	44
Tabla 19. Resultados Dovela-C	46
Tabla 20. Resultados Dovela-D	48
Tabla 21. Resultatdos Dovela-E	50

RESUMEN

En este trabajo se estudió la variación del acero mínimo en dovelas prefabricadas de túneles conforme aumenta la resistencia del hormigón mediante simulación numérica en ANSYS Workbench 2022 R2 versión estudiantil. Se consideró un modelo de micro plano de daño y plasticidad para describir un comportamiento no lineal del hormigón, mientras que para el acero se utilizó el modelo de Dodd-Restreppo. El análisis de elementos finitos se llevó a cabo en 60 dovelas con resistencia a la compresión de 50, 60, 70, 80 y 90 MPa y espesores de 20, 30 y 40 cm. Utilizando las ecuaciones de Eurocódigo, ACI-318 y Hesham Marzouk se calculó la cantidad mínima de acero a flexión. Se propuso un criterio de análisis dimensional, para la validación, basado en curvas esfuerzo-deformación, que muestra que la transición de esfuerzos del hormigón hacia el acero es suave. Los resultados evidencian que la cantidad de acero mínimo es directamente proporcional a la resistencia a la compresión, pero inversamente proporcional a la altura de la dovela. El ACI-318 sobreestima la relación de refuerzo mínimo, mientras que el Eurocódigo subestima el acero mínimo. Los criterios de Hesham Marzouk son apropiados y aplicables para calcular el acero mínimo en dovelas.

Finalmente, en base a las conclusiones obtenidas, se propone un ábaco para obtener la cuantía mínima de acero en dovelas a flexión.

PALABRAS CLAVE: hormigón de alta resistencia, acero mínimo, segmento de revestimiento de túneles, presión interna, modelación numérico computacional, análisis no lineal.

ABSTRACT

The present work studies the variation of the minimum steel reinforcement in precast tunnel segments as the compressive strength of the concrete increases. The study is realized through numerical simulation with the software ANSYS Workbench 2022 R2 student version. A micro plane damage and plasticity model was used to describe nonlinear behavior of the concrete, while the Dodd-Restrepo model was used for the steel reinforcement. Finite element analysis was carried out on 60 segments with compressive strengths of 50, 60, 70, 80, and 90 MPa and thicknesses of 20, 30, and 40 cm. The minimum amount of flexural reinforcement was calculated using the equations of Eurocode, ACI-318, and Hesham Marzouk. A dimensional analysis criterion was proposed for validation based on stress-strain curves, which shows that the transition of stresses from concrete to steel is smooth. The results show that the minimum steel amount is directly proportional to compressive strength, but inversely proportional to height of the element. ACI-318 overestimates the minimum reinforcement ratio, while Eurocode underestimates the minimum steel. The criteria of Hesham Marzouk are appropriate and applicable to calculate the minimum steel in segments.

Finally, based on the conclusions obtained, a chart is proposed to obtain the minimum steel quantity in flexural segments.

KEYWORDS: high performance concrete, minimum reinforcement, tunnel lining segment, internal pressure, computational numerical modelling, nonlinear analysis.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los túneles son estructuras subterráneas construidas con diversos fines, por ejemplo, para sistemas de transporte o para conducción de agua. Debido a que la ingeniería está en constante desarrollo, se han optimizado técnicas y procesos para construir túneles como: la tuneladora accionada por escudo (TBM) [1], [2]. Sin embargo, estas estructuras muestran fallas en su funcionamiento después de un periodo de tiempo, en ciertos casos, incluso al principio de su vida útil [3]. El refuerzo estructural es una manera esencial de garantizar la seguridad estructural y prolongar la vida útil. Con el fin de lograr esto, se han desarrollado mejoras en métodos de refuerzo en China [4] y Japón [5].

En el caso de los túneles de hormigón armado que transportan agua a presión, estos presentan problemas de filtraciones debido al agrietamiento prematuro del hormigón que produce la corrosión temprana del acero de refuerzo [6]. Como resultado, se han implementado mejoras en los materiales a base de cemento para que tengan una mayor resistencia a los productos químicos agresivos, como el Ion-Cloruro presente en el agua subterránea, como el hormigón de alta resistencia (HPC) [6]. Además, las dimensiones del hormigón pueden ser menores debido a las mejoras de su resistencia a la tracción y compresión en comparación del hormigón convencional. Como consecuencia directa, las estructuras utilizan menos cantidad de hormigón, lo que implica que la industria de la construcción se convierta en un sector más sostenible [7].

El uso de hormigón de alta resistencia para la construcción de dovelas de túneles es una práctica en aumento que demuestra un rendimiento mecánico, de durabilidad y sostenibilidad superior [8]. Sin embargo, el acero mínimo que se coloca es el mismo que en estructuras conformadas con hormigones convencionales. Los métodos disponibles en la literatura técnica o códigos de diseño como la ACI [9] y el Eurocode [10] para calcular el acero mínimo son presentados de manera general para cualquier tipo de estructura o con geometría simple, lo que presenta deficiencias relacionados con la aplicabilidad y la precisión para dichas estructuras en específico.

Se han realizado investigaciones para mejorar la estimación del acero mínimo de refuerzo en concreto. Hesham Marzouk [11] en su investigación titulada “A New Formula to Calculate Minimum Flexure Reinforcement for Thick High-Strength Concrete Plates” en 2009, desarrolló una nueva ecuación para calcular la cuantía mínima de refuerzo a flexión para placas gruesas con hormigones de alta resistencia. Sin embargo, la investigación preliminar y los códigos de diseño mencionados, se refiere a placas, losas, columnas rectas, no es aplicable o no se ha comprobado eficaz para reforzar segmentos de túneles, ya que son elementos curvos. Debido a las curvas, su comportamiento

estructural es diferente de los elementos rectos [12]. Esto da validez a este trabajo de investigación en segmentos prefabricados de túneles.

En dicho contexto, se están llevando a cabo investigaciones sobre técnicas nuevas para reforzar las dovelas de túneles. Se han realizado pruebas a escala real de las dovelas de concreto reforzado, se demostró que el comportamiento estructural se rige por el comportamiento no lineal, esto se debe a la compleja naturaleza heterogénea del hormigón-acero y de la interacción entre los componentes de las dovelas reforzadas [13]. Con los avances tecnológicos, los métodos de análisis numérico-computacionales se han convertido en una forma de resolver ecuaciones que aproximan los fenómenos físicos. El método de los elementos finitos (FEM) es uno de los métodos más conocidos en ingeniería civil debido a sus ventajas: trabajar con geometrías irregulares, sistemas con materiales de diferente comportamiento, análisis no lineales, así como también el número de parámetros que se puede controlar en el análisis [14].

Para lograr un análisis numérico preciso y eficiente de la dovela, es esencial llevar a cabo una discretización minuciosa de todas las interfaces que interactúan con ella. La investigación titulada "Numerical analysis of tunnel segments strengthened by steel-concrete composites" del año 2022, resalta la importancia de una discreción detallada en etapas cruciales, como la modelización geométrica, los modelos constitutivos de los materiales, los elementos y la malla, las interfaces de contacto, las cargas y los límites del estado [15].

El objetivo de este estudio es realizar un análisis computacional del refuerzo mínimo de las dovelas en túneles tomando en cuenta su comportamiento no lineal. La falta de información acerca del acero mínimo en dovelas en la normativa ecuatoriana (NEC) ha llevado a la necesidad de realizar este tipo de análisis para comprender mejor el comportamiento de las estructuras de túneles en el país. Además, los resultados obtenidos pueden proporcionar información valiosa para mejorar los estándares de construcción y diseño de túneles en Ecuador. Para llevar a cabo el análisis del refuerzo mínimo de dovelas en túneles, se utilizarán modelos de elementos finitos (FEM) y simulaciones computacionales con el software ANSYS.

1.1 Objetivo general

Realizar modelos de simulación numérico computacional utilizando el software ANSYS, que permita comprender la variación del acero mínimo de refuerzo conforme aumente la resistencia a la compresión del hormigón en dovelas prefabricadas empleando el elemento finito.

1.2 Objetivos específicos

1. Analizar mediante modelación numérica la respuesta estructural del acero mínimo en dovelas prefabricadas de túneles diseñados con hormigón de alta resistencia.
2. Desarrollar modelos computacionales de una dovela de túnel con condiciones de fronteras adecuadas para presión interna, acero mínimo de refuerzo y de alta resistencia del hormigón.
3. Evaluar como varía la cuantía de acero mínimo a medida que la resistencia a la compresión del hormigón aumente.
4. Proponer una implementación de normativa o de ser el caso reformulación, en el área de análisis, con base en las conclusiones obtenidas.

1.3 Alcance

El presente trabajo propuesto está limitado a:

1. Dovelas prefabricadas de túneles sometidos a presión interior.
2. Estudiar la relación entre acero mínimo de refuerzo y resistencia del hormigón.
3. Generar modelos computacionales que recoja las características de una dovela prefabricada y permita generar comparaciones en base con los estudios revisados.
4. Comparar resultados con normativa ecuatoriana vigente para emitir conclusiones y recomendaciones.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Generalidades

Esta sección presenta el proceso necesario para realizar un análisis de elementos finitos para analizar el acero mínimo en dovelas de hormigón armado de alta resistencia. Además, se detalla toda la información necesaria, para la creación de las geometrías, apoyos, condiciones de frontera y modelos constitutivos para la creación del modelo computacional.

1.4.2 Revestimiento de túneles

Los túneles necesitan revestimiento para soportar las presiones del suelo y del agua. Uno de los métodos más utilizados en los últimos años es el método de la tuneladora accionada por escudo (TBM) [1], [2]. Estos túneles construidos con la tuneladora están segmentados y son la mayoría de hormigón armado. Entre segmentos de un anillo se sitúan las juntas entre cada segmento y entre dos anillos se sitúan las juntas de anillo. Por esta razón, los túneles segmentados no pueden considerarse como un anillo continuo [16].

1.4.2.1 Dovelas

Forman parte de la estructura de hormigón armado, colocadas a medida que se realiza la excavación del túnel. Las definiciones en túneles más utilizadas se representan gráficamente en la Figura 1. Los segmentos de hormigón son prefabricados y reforzados para 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 [8].

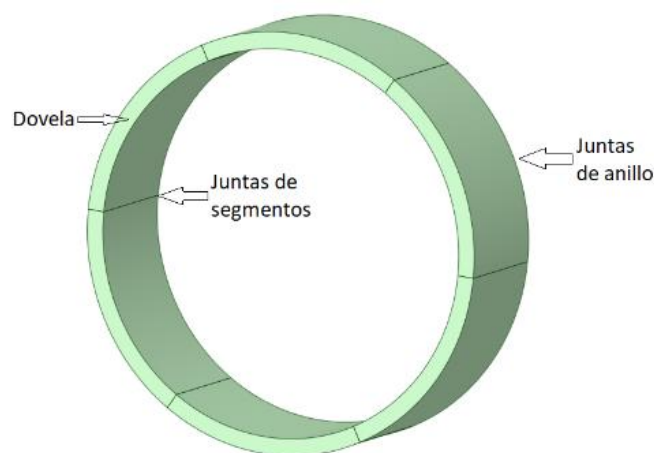


Figura 1. Estructura de un túnel segmentado.

Elaborado por: Washington Morocho

1.4.3 Juntas de segmentos

La línea que interactúan entre segmentos continuos en un solo anillo se conoce como junta de segmento. De hecho, se utilizan dos tipos diferentes de juntas de segmento como se muestra en la Figura 2. La junta convexa no puede transmitir momentos a flexión hacia los segmentos. En el caso de la junta plana puede transmitir momentos de flexión, inducido por las fuerzas normales, que intentan cerrar el espacio entre los segmentos. [17].

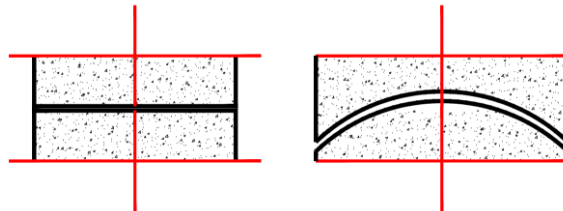


Figura 2. Junta plana (izquierda) Junta convexa (derecha).

Elaborado por: Washington Morocho

La aplicación para los dos tipos de juntas está en función de las rotaciones admisibles de las juntas y las fuerzas que actúan en los segmentos. Con grandes rotaciones, es preferible juntas convexas, para que no haya la probabilidad de desprendimiento del hormigón, ya que existe una zona de alta compresión, dependiendo de la dirección de la rotación la junta se comprimirá o descomprimirá [17]. Para los túneles para el metro de Quito - Ecuador se realizaron con juntas planas.

1.4.4 Fuerzas en un túnel segmentado

1.4.4.1 Túnel hidráulico

Al transportar agua dentro de un túnel, el interior del revestimiento está lleno de líquido, lo que genera presión interna. Además, las características dinámicas del agua en el túnel y filtración del agua, genera que las fuerzas internas que se genera en el revestimiento varíen en orden no lineal. Actualmente, no existe una fórmula general para calcular la fuerza interna del revestimiento en diferentes condiciones transporte de agua [18]. La manera de calcular la fuerza interna del revestimiento se aproxima considerando la altura parcial del nivel del agua y diferentes presiones de transporte de agua.

El suelo produce una fuerza vertical en la parte inferior del túnel para contrarrestar la gravedad del agua. Como las dos fuerzas interactúan mutuamente sobre el revestimiento inferior, se puede ignorar la influencia del peso del agua sobre la fuerza interna del túnel en la dirección vertical [18]. Tomando en cuenta un túnel que conduce agua a presión, se establece el modelo de las fuerzas internas que aplican, como se

muestra en la Figura 3, r es el radio interior del revestimiento; H_w es la altura del nivel del agua; P es la presión de conducción del agua; q es el peso del agua en el fondo del túnel, $q = H_w \cdot \gamma_w$; γ_w es el peso específico del agua. Las fuerzas y la estructura en ambos lados del túnel son simétricas.

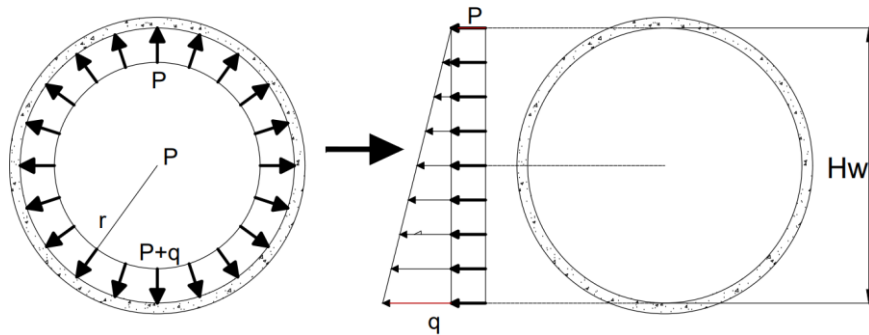


Figura 3. Diagrama de carga interna en un túnel que conduce agua a presión.

Fuente: Adaptado de (Zhu & Liu, 2022) [18]

1.4.5 Método del elemento finito

Impulsado por el desarrollo computacional, surgió el campo de la ingeniería asistida por computadora. Las aplicaciones en la ingeniería civil en áreas de estudio donde la demanda de experimentos a escala real es costosa, las herramientas de simulación numérica computacional es una opción viable. El modelado de problemas de ingeniería conduce en muchos casos a ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales que a menudo son de naturaleza no lineal [19]. Los modelos numéricos de elementos finitos tienen millones de grados de libertad (GDL). Por lo tanto, además de la formulación correcta de la naturaleza del problema, es necesario proporcionar métodos eficientes y aproximada para la solución [19].

1.4.5.1 Preprocesamiento

El preprocesamiento del método elemento finito consiste en recopilar datos de entrada, manipulación y organización de los datos relacionados con nudos y elementos, características materiales, generación de malla, desplazamientos y tensiones, construcción de las matrices globales invocando diferentes elementos subrutinas [19].

1.4.5.1.1 Geometría del modelo

Los modelos computacionales representan un ensayo a flexión de 4 puntos. En la investigación realizada por (Zhang et al., 2019) [5], para estudiar los defectos del reforzamiento en los túneles segmentados, empleó ensayos reales y modelos

computacionales para casos de carga a compresión y tensión, empleando ensayos de 4 puntos para estudiar dichos casos. Los modelos computacionales fueron generados dentro del entorno del “SpaceClaim 2022 R2” que incorpora el módulo Workbench de ANSYS, ya que tiene capacidad de modelar en 3D estructuras con geometrías irregulares y compuestos de varios materiales.

En la Figura 4 se muestra la geometría de cada elemento y la ubicación del refuerzo para cada elemento estructural. En la Figura 5 se muestra la configuración del ensayo a flexión de 4 puntos.

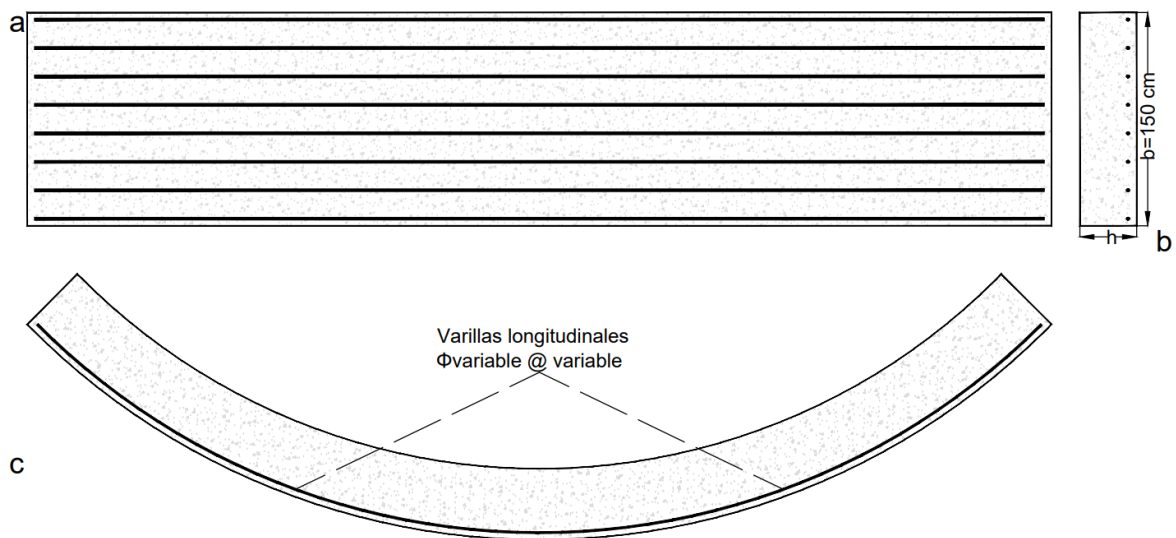


Figura 4. Vista superior (a), transversal (b) y frontal (c) del refuerzo de una dovela de hormigón armado.

Elaborado por: Washington Morocho

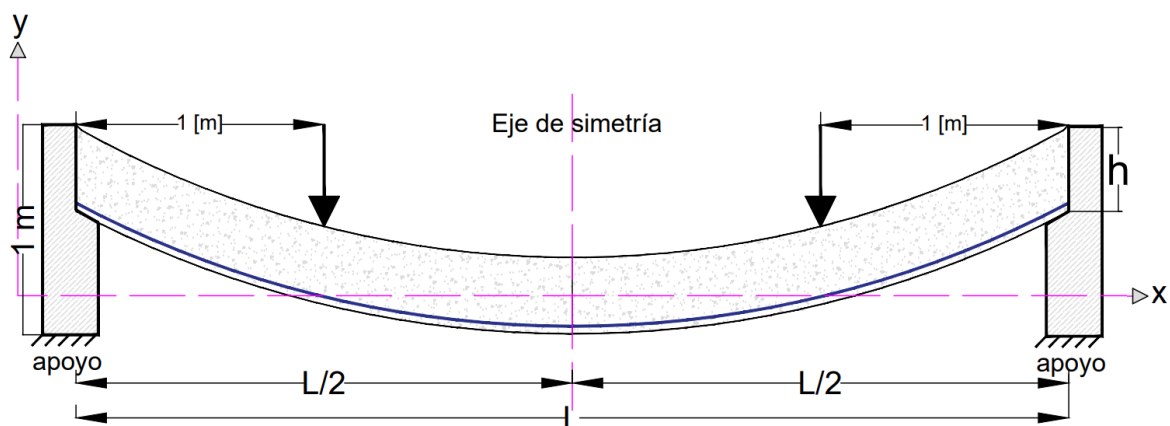


Figura 5. Configuración del ensayo de dovelas.

Elaborado por: Washington Morocho

1.4.5.1.2 Discretización o mallado

Un procesamiento básico del método de los elementos finitos es dividir el cuerpo en muchas formas geométricas más simples y pequeñas como los elementos. Los elementos están conectados por nodos. La malla define la posición del elemento finito en relación con los ejes local y global.

En ANSYS existen varios tipos de formas de elementos. ANSYS Workbench elige de manera automática los tipos de elementos apropiados para realizar el mallado. Para este caso de estudio, se escogió cuerpos sólidos en 3D, las formas más comunes son la hexaédrica, prismas, pirámides, se elige según los tipos de cuerpos estructurales. La versión educativa limita el tamaño de los análisis a realizar limitando el número de nodos y el número de elementos de los modelos a un valor máximo de 32000.

1.4.5.1.3 Idealización de la matriz de hormigón

Un comportamiento no lineal del hormigón se debe a los atributos físicos propios del material como la fisuración, estados de tensión, compresión y plasticidad [20]. Este material puede ser asignado en ANSYS al elemento CPT215. Es un elemento sólido de física acoplada de ocho nodos en 3D hexaédrico capaz de modelar fenómenos físicos. Posee elasticidad, rigidez de tensión, gran deflexión y capacidad de deformación. El elemento está determinado por ocho nodos y 8 grados de libertad UX, UY, UZ, PRES, TEMPERATURA, GFV1, GFV2, GFV3 [21].

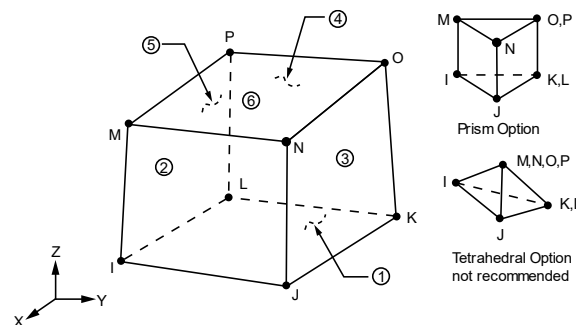


Figura 6. Geometría del elemento CPT215.

Extraído de: Ansyshelp [22]

1.4.5.1.4 Idealización del acero de refuerzo

El elemento REINF264 en ANSYS sirve para un análisis de refuerzo estructural, relacionado con cuerpos sólidos en 3D para proporcionar refuerzo adicional y es compatible con el elemento CPT215. El elemento está definido por 2 nodos y 3 grados

de libertad UX, UY, UZ. Este elemento tiene capacidades de plasticidad, rigidez por tensión, fluencia, gran deflexión y deformación [22].

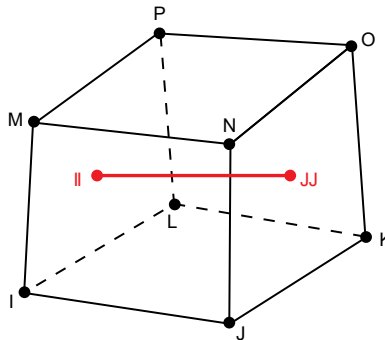


Figura 7. Geometría del elemento REINF264.

Extraído de: Ansyshelp [22]

1.4.5.1.5 Idealización de los apoyos.

Se eligió el elemento SOLID45 para representar el apoyo. El elemento está compuesto de ocho nodos con tres grados de libertad en la traslación de cada nodo. Se asignaron propiedades mecánicas a este elemento para representar el comportamiento de un sólido indeformable.

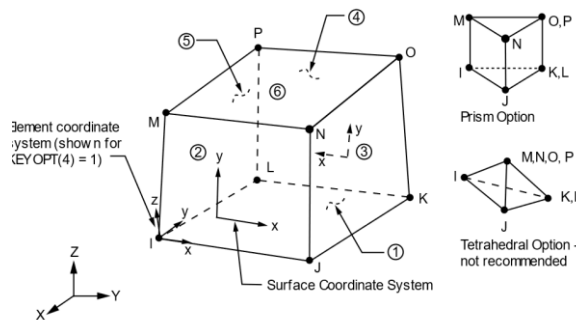


Figura 8. Geometría del elemento SOLID45.

Extraído de: Ansyshelp [22]

1.4.5.1.6 Modelos constitutivos.

1.4.5.1.6.1 Matriz de hormigón

El hormigón es conocido como un material cuasi - frágil y se ha demostrado que el modelo de micro plano es un método eficaz para describir sus características constitutivas [20]. Para desarrollar un modelo de hormigón, que sea físicamente preciso como computacionalmente eficiente. Se empleó el modelo propuesto por (Zreid & Kaliske, 2018) [20] que combina aspectos claves en el comportamiento del hormigón

para realizar un análisis no lineal y aplicables al software ANSYS. Aspectos acoplados de plasticidad - daño para proporcionar la capacidad de simular la fluencia plástica que relaciona las deformaciones permanentes y el daño que genera la degradación de la rigidez en cada estado de carga, lo cual simula una respuesta del hormigón bajo cargas cíclicas.

La plasticidad y el daño se formulan a nivel de micro plano, lo que logra captar la anisotropía por la evolución del daño y la plasticidad en varias direcciones. Cuando se combina el daño y la plasticidad, se evalúa primero la plasticidad utilizando tensiones efectivas volumétricas, es decir el área no dañada, después se utiliza la deformación plástica para provocar el daño seguido de un umbral de estado de esfuerzos. El umbral varía entre compresión, tensión y la región de fluencia como se muestra en la Figura 9. La función de fluencia abarca el comportamiento del hormigón bajo estado de triaxiales de tensión, la función de Drucker-Prager se ha implementado para las regiones de compresión y tensión [20].

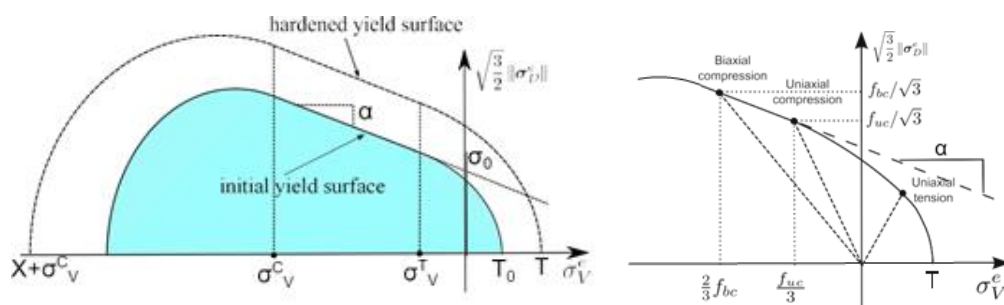


Figura 9. Función de rendimiento de capa de micro plano de tres superficies lisas (izquierda). Representación de diferentes estados de tensión como puntos en la superficie de fluencia (derecha).

Extraído de: (Zreid & Kaliske, 2018) [20]

1.4.5.1.6.2 Parámetros del modelo

Para describir el comportamiento del hormigón bajo distintos estados de carga se necesita formular leyes constitutivas que tengan aspectos como deformaciones permanentes y degradación de la rigidez según su historial de carga, para implementar el modelo de micro plano de daño y plasticidad en ANSYS, se requiere la creación de bloques APDL lo cual se necesitan los siguientes parámetros.

- **Elástico**

Las constantes elásticas del modelo planteado son el módulo de Young (E) y relación de Poisson $\nu = 0.2$, se pueden identificarse a partir de la región elástica de las curvas

de tensión y deformación del hormigón, o utilizando fórmulas empíricas disponibles en la literatura técnica.

$$E = 3875 * \sqrt{f_c} [MPa]$$

Ecuación 1. Módulo de elasticidad fuente: (Alejandro Cabrera,2014) [23]

- **Plástico**

Para los parámetros para construir la superficie de fluencia se necesita identificar para cada tipo de hormigón las resistencias a la compresión y tracción en ensayos uniaxiales como biaxiales. Si se conoce la resistencia a la compresión uniaxial f_c , se puede estimar la resistencia a la compresión biaxial y la resistencia uniaxial a la tracción de la siguiente manera [20].

$$f_b = 1.15 * f_c [MPa]$$

Ecuación 2. Esfuerzo biaxial a la compresión del hormigón.

$$f_t = 1.4 * \left(\frac{f_c}{10}\right)^{\frac{2}{3}} [MPa]$$

Ecuación 3. Esfuerzo a tensión del hormigón.

Los parámetros coeficiente de fricción $\alpha = 0.2$ y el límite elástico del material σ_o se evalúan sabiendo que los estados de tensión biaxial y uniaxial se encuentran en la porción lineal de Druker-Prager de la superficie de fluencia. Simplificando estos dos parámetros se obtiene [20].

$$\sigma_o = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\alpha}{3}\right) * f_c [MPa]$$

Ecuación 4. Límite elástico del material.

En tensión, no es viable resolver los parámetros del límite de tensión de manera similar, pero se tiene un buen ajuste al establecerlos de la siguiente manera [20].

$$\sigma_v^T = -\frac{f_c}{3} [MPa]$$

Ecuación 5. Esfuerzo del punto de intersección de la superficie de tensión y la función de fluencia de D-P.

$$T_o = \frac{f_t}{3} [MPa]$$

Ecuación 6. Esfuerzo que representa el punto de intersección del eje volumétrico.

El parámetro S, es la relación de los ejes mayor (volumétrico) y menor (desviador) de la superficie de compresión, en ausencia de datos de prueba de compresión triaxial, S también se puede estimar a partir de la prueba de compresión uniaxial. Se puede estimar de la gráfica propuesta por (Jiang & Zhao, 2015) [24].

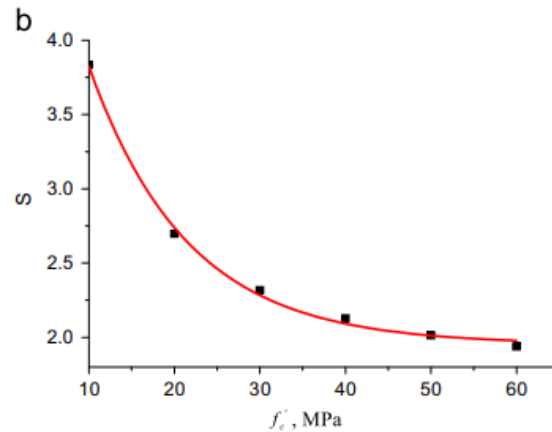


Figura 10. Parámetro S.

Fuente: Extraído de (Jiang & Zhao, 2015) [24]

Por último, se requieren datos de prueba triaxial para los parámetros de la superficie de compresión. El punto inicial de intersección entre la borde de compresión y el eje hidrostático $X_o + \sigma_V^c$ se encuentra aplicando una presión hidrostática hasta que comienza la fluencia. El punto de intersección entre la superficie y la función de D-P σ_V^c , se puede estimar de la siguiente manera si no se dispone de datos de ensayos triaxiales [20].

$$\sigma_V^c = -\frac{2}{3} f_{bc} [MPa]$$

Ecuación 7. Esfuerzo del punto de intersección de la superficie de compresión y la función de fluencia de D-P.

- **Daño**

Los parámetros de daño y endurecimiento actúan mutuamente, ya que la interacción entre ambos controla el ablandamiento y la descarga. Por lo tanto, se requieren pruebas cíclicas para identificar esos parámetros para identificar los parámetros de daño, D , γ_{co} , β_c . Debido a la falta de información de los parámetros de daño, los coeficientes se escogen de ensayos reales ya probados como se muestran en la Tabla 1 donde se ensayan varios tipos de hormigón con resistencia a la compresión variable.

Tabla 1. Valores de los parámetros de daño obtenidos de valores de ensayos realizados.

Parámetro	Fuente: [25]		Fuente: [20]	Fuente:[26]
$f_c [Mpa]$	70	95	70	54
$D [Mpa^1]$	7×10^4	7×10^4	8×10^4	5×10^4
$\gamma_{co} [-]$	8×10^{-5}	8×10^{-5}	8×10^{-5}	2×10^{-5}
$\beta_c [-]$	2×10^3	2×10^3	2×10^3	2×10^3

Fuente: (Zeid&Kaliske,2018) [20], (Indriyantho et al.,2020) [25], (Alhusban & Parvin,2022) [26]

Finalmente, los parámetros evolución de daño por tensión β_t y endurecimiento por tracción R_t se identifican ajustando ensayos de tensión cíclica uniaxial. Si no se dispone ensayos de tensión cíclica uniaxial, se podría usar $R_t = 1$ y $\beta_t \cong 1.5 * \beta_c$. El umbral de daño por tensión se mantiene $\gamma_{to} = 0$, ya que el ablandamiento en tensión comienza casi inmediatamente después del límite elástico [20].

- **No local**

Al usar el método de elementos finitos, existe una gran dependencia en la malla de los resultados en zonas con deformaciones plásticas. Una solución para dicha dependencia patológica en la malla son las leyes constitutivas no locales, para los cuales los esfuerzos en un punto dependen del historial de deformaciones no solo en ese punto sino también en su entorno o incluso en todo el elemento. Mientras que, las leyes constitutivas locales, los esfuerzos en un punto dependen exclusivamente del historial de deformaciones en ese punto únicamente [24].

El parámetro m puede considerarse como una constante, donde los valores mayores que 1 regularizan la solución y el parámetro c controla la zona de interacción no local [20]. La identificación del parámetro $c = l^2$ es bastante incierta, pero se han propuesto varios enfoques para determinar el valor, donde l es la longitud característica no local. El primer enfoque, fue en (Bazant & Pijaudier, 1989) [27], donde se compara entre los resultados de ensayos de tracción homogéneos y no homogéneos del hormigón para calcular el parámetro l de forma directa. Donde se puede calcular a partir de 2.7 veces el tamaño máximo del agregado.

En la Tabla 2 se detalla los parámetros del material necesarios para describir el modelo micro plano de daño-plasticidad. Los dos primeros parámetros se relacionan con el comportamiento en el rango lineal. Los demás parámetros son para el rango no lineal.

Tabla 2. Parámetros para el modelo de micro plano de daño- plasticidad

Parámetros	Categoría	Símbolo	Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	Elástico	E	[MPa]	$3875 * \sqrt{f_c}$
Relación de Poisson	Elástico	μ	[-]	0.2
Esfuerzo uniaxial compresión	Superficie de fluencia	f_c	[MPa]	f_c
Esfuerzo biaxial	Superficie de fluencia	f_b	[MPa]	$1.15 * f_c$
Esfuerzo uniaxial tensión	Superficie de fluencia	f_t	[MPa]	$1.4 * \left(\frac{f_c}{10}\right)^{\frac{2}{3}}$
Fluencia/Compresión intersección	Capa de compresión	σ^c_v	[MPa]	$-\frac{2}{3} f_{bc}$
Relación de capa de compresión	Capa de compresión	S	[-]	Ilustracion 10
Constante de endurecimiento	Endurecimiento	D	[MPa]	Tabla 1
Endurecimiento de la zona de tracción	Endurecimiento	R_T	[MPa]	1
Umbral de daño por tensión	Daño	γ_{to}	[-]	0
Umbral de daño por compresión	Daño	γ_{co}	[-]	Tabla 1
Evolución del daño por tensión	Daño	β_t	[-]	$1.5 * \beta_c$
Evolución del daño por compresión	Daño	β_c	[-]	Tabla 1
Parámetro de rango no local	No local	c	[mm ²]	l^2
Parámetro no local	No local	m	[-]	1 – 3

Todos los parámetros descritos para el modelo de daño plasticidad se han reportado para investigaciones en (Zeid&Kaliske,2018) [20], (Indriyantho et al.,2020) [25], (Alhusban & Parvin,2022) [26], donde emplean dicho modelo con hormigones de distintas resistencias a la compresión que van desde 20 [MPa] hasta 95 [MPa].

1.4.5.1.6.3 Acero de refuerzo

Para la modelación de las varillas de acero de refuerzo se empleó el modelo constitutivo de Dodd - Restreppo para un esfuerzo de fluencia de 440 [MPa]. Los parámetros del

modelo utilizado se determinaron a partir de la investigación por (Panchano,2018) [28] analizando las curvas de ensayo de tracción de las barras de refuerzo.

Tabla 3. Parámetros de la curva esfuerzo - deformación.

Módulo de elasticidad (E_s)	206 [GPa]
Esfuerzo de fluencia del acero (f_y)	440 [MPa]
Esfuerzo máximo (f_u)	610 [MPa]
Esfuerzo intermedio curva endurecimiento (f_{sh1})	550 [MPa]
Deformación unitaria en el endurecimiento (E_{sh})	0,0165 [mm/mm]
Deformación unitaria en f_u (E_u)	0,2259 [mm/mm]
Deformación unitaria en f_{sh1} (E_{sh1})	0,1003 [mm/mm]

Adaptado de: (Panchano,2018) [28]

Con la información descrita, se creó la curva mostrada en la Figura 11 para representar el comportamiento constitutivo del acero.

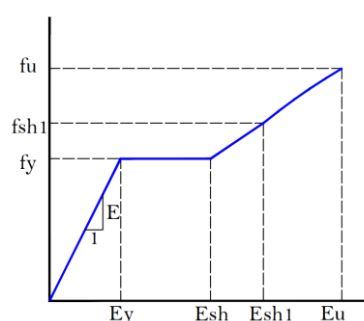


Figura 11. Características del modelo de acero Dodd-Restreppo: Curva esfuerzo – deformación.

Elaborado por: Washington Morocho

1.4.5.1.7 Condiciones de frontera.

Para simular las cargas internas impuestas sobre la estructura, se determinan dos cargas monotónicas colocadas a 1[m] de cada soporte (véase Figura 5). Los soportes de los extremos del segmento se consideran como una forma de determinar una condición de frontera de desplazamiento, de modo que se evitan los desplazamientos, en la dirección del eje X y Z para que estos desplazamientos sean iguales a cero.

1.4.5.2 PROCESAMIENTO

En este paso, se da solución a modelos matemáticos que reproducen el fenómeno físico. Para la solución, se tiene en cuenta la información generada en el preprocesamiento y se vinculan estas variables con las ecuaciones constitutivas que

representan el modelo matemático, de modo que puedan aplicarse las relaciones mecánicas para derivar las magnitudes de primer orden desconocidas [14].

1.4.5.2.1 Cantidades primarias desconocidas.

La identificación de las cantidades primarias desconocidas consiste en identificar los resultados que se pueden obtener de los elementos finitos, donde estos valores se calculan en los nodos como: desplazamientos. [14].

1.4.5.2.2 Ensamble

El ensamble de ecuaciones de cada elemento sirve para obtener las ecuaciones matriciales de toda la estructura.

- **Matriz de rigidez local**

Para cada elemento finito se genera una matriz de rigidez, teniendo en cuenta los ejes locales de cada elemento. El significado físico de la matriz de rigidez hace una analogía a la constante de rigidez de un resorte donde $\{f\}$ es la matriz de fuerzas externas y $\{u\}$ como la matriz de deformación de un resorte.

$$[K^e] \cdot \{u\} = \{f\}$$

Ecuación 8. Matriz de rigidez local.

- **Matriz de rigidez global.**

Para obtener la matriz en el sistema global es necesario pasar a coordenadas globales y ensamblar todas las matrices de cada elemento. La unión de todas las matrices representa el comportamiento global de la estructura.

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\}$$

Ecuación 9. Matriz de rigidez global.

- **Ensamble de condiciones de frontera**

Son vectores que dan información sobre las componentes de fuerzas y desplazamientos que son conocidas.

1.4.5.2.3 Solución global

Para determinar los valores de las incógnitas primarias desconocidas, es necesario resolver el sistema de ecuaciones de equilibrio que gobiernan el comportamiento global

de toda la estructura. La forma en que genera solución depende del tipo de análisis que se realice puede ser análisis lineal y no lineal.

- **Análisis lineal**

Cuando se habla de linealidad trata se trata de que las fuerzas son directamente proporcionales a los desplazamientos y la rigidez de cada elemento es constante.

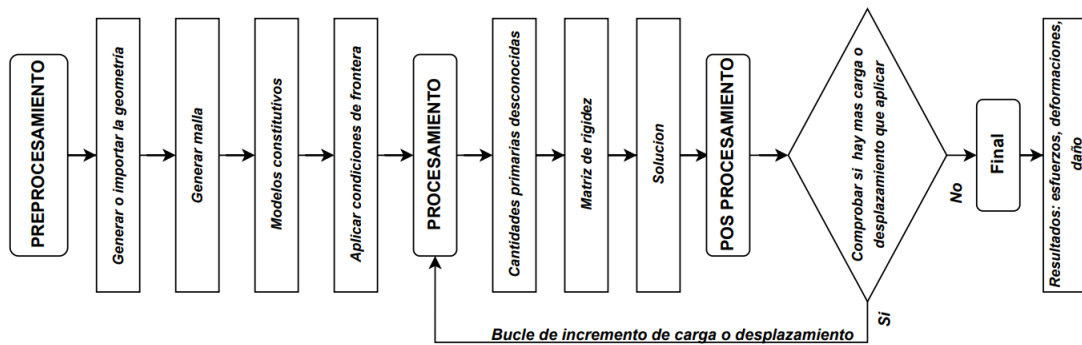


Figura 12. Sistema Lineal.

Elaborado por: Washington Morocho

- **Análisis no lineal**

Para problemas de carácter no lineal, ANSYS realiza un proceso iterativo de Newton - Raphson para resolver los sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales.

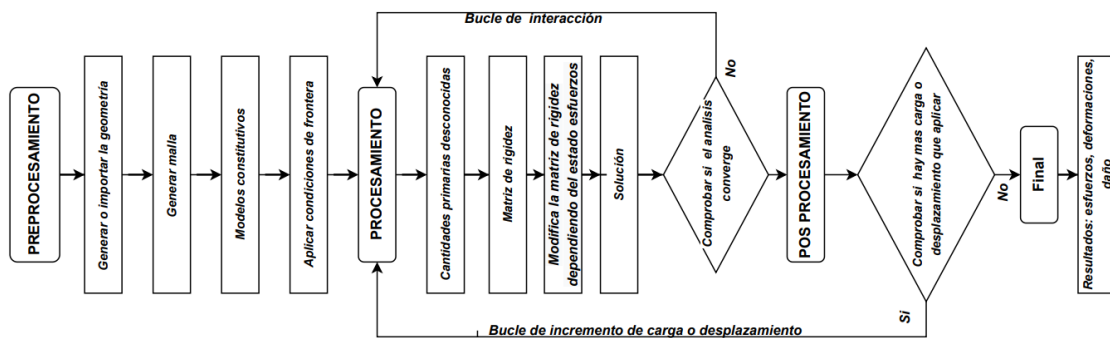


Figura 13. Sistema no Lineal.

Elaborado por: Washington Morocho

1.4.5.3 POS PROCESAMIENTO

Los métodos de elemento finito dan una solución a un conjunto de ecuaciones simultáneas. En esta fase, las incógnitas secundarias (desplazamientos, estados de tensiones, deformaciones) se calculan a partir de los valores obtenidos de las incógnitas primarias.

2 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados para este trabajo se desarrollarán las siguientes actividades.

ACTIVIDAD 1: INVESTIGACIONES PRELIMINARES.

Realizar investigaciones de trabajos, artículos científicos y literatura técnica donde se implemente la modelación numérica computacional de dovelas prefabricadas o similares. Así también, investigaciones relacionadas al acero mínimo para hormigones de alta resistencia, condiciones de frontera para túneles sometidos a presión interior y leyes constitutivas, que se puedan implementar en el software ANSYS, de manera que representen el comportamiento no lineal de los materiales (RC) cuando interactúan en elementos de hormigón armado sometidos a diferentes estados de carga.

ACTIVIDAD 2: CREACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES.

La etapa de la creación de los modelos computacionales radica en caracterizar numéricamente las propiedades físicas y mecánicas del hormigón y acero, así como la interacción entre hormigón y acero. (RC). Las leyes constitutivas del hormigón se describen en base al modelo de micro - plano de daño y plasticidad de (Zreid & Kaliske, 2018). Se utilizó para la modelación del refuerzo el modelo constitutivo de Dodd – Restrepo. De manera que, se modele la presión interna en un túnel construido por dovelas. Finalmente, se calibra todos los materiales que intervienen en el análisis lineal y no lineal.

La creación de los modelos computacionales se realiza en la versión estudiantil de ANSYS Workbench 20.22 R2.

ACTIVIDAD 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El análisis de resultados presenta observaciones de datos numéricos en base a:

1. Cuantía de acero.
2. Curvas de Fuerza - desplazamiento.
3. Esfuerzos.

Los resultados recolectados son de esfuerzos, deformaciones, historial de carga y daño de cada dovela. A partir de estos parámetros se obtiene curvas que permitan comprender como varía cuantía mínima de acero respecto con resistencia a la compresión del hormigón. Finalmente, en base a los modelos computacionales se propone un ábaco para calcular el acero mínimo en dovelas.

2.1 Antecedentes de los requisitos mínimos de refuerzo para flexión

La filosofía de diseño del acero de refuerzo en hormigón se coloca para enfrentar principalmente esfuerzos de flexión [29]. 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 grietas inestables del hormigón, y así evitar el fallo frágil [30]. Este tipo de respuesta se garantiza solo si dispone una cuantía de refuerzo mínima $A_{s\ min}$. En otras palabras, $A_{s\ min}$ es la cantidad mínima de refuerzo que garantiza que el momento último de la sección M_u y el momento de agrietamiento M_{cre} coincidan. Es decir que los esfuerzos de la sección del concreto se transfieran y sean resistidos por el acero.

En la Figura 14 se presenta los diagramas de momento (M) – curvatura (X) cualitativos para una sección de hormigón considerando distintos armados de refuerzo para apreciar los modos de fallo.

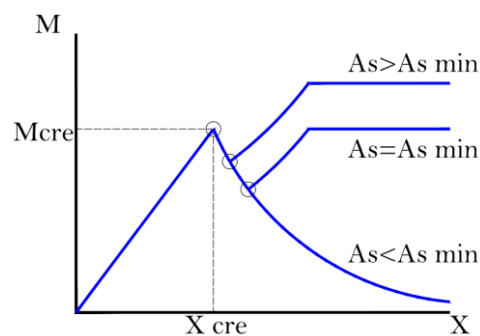


Figura 14. Modos de fallo a flexión en función de A_s .

Adaptado de: (de la Fuente et al.,2014) [29]

2.1.1 Descripción general de las disposiciones del acero mínimo a flexión

Se analiza los requisitos de acero mínimo en los códigos prácticos actuales y la investigación más reciente que toma en cuenta hormigones de alta resistencia.

2.1.2 Acero mínimo ACI 318-19

El requerimiento de acero mínimo por flexión dado en la normativa ACI (American Concrete Institute), donde se utiliza ecuaciones que toma en cuenta el área bruta de la sección y la fluencia del acero. Desde el año 95 la ACI 318-95 se expuso en la sección 10, que la cantidad de acero mínimo también depende de la resistencia a la compresión del hormigón.

$$A_{s_{min}} = \max \left(\frac{0.25 \cdot \sqrt{f_{c'}(Pa)}}{f_y} \cdot b_w \cdot d ; \frac{1.4}{f_y} \cdot b_w \cdot d \right)$$

Ecuación 10. Acero mínimo ACI-318-19.

$f_{c'}$ = Resistencia a la compresión

f_y = Límite de fluencia del acero

b_w = Ancho de la zona en tensión

d = Peralte efectivo

2.1.3 Acero mínimo Eurocode 2

En el Eurocódigo para el control de grietas, se requiere una cantidad de acero mínimo adherido en las zonas donde se espera esfuerzos de flexión. La cantidad se puede evaluar a partir del equilibrio entre la fuerza de tracción en el hormigón antes de que ocurra la fisuración y la fuerza de tracción en el acero en el momento de fluencia. Estas ecuaciones toman en cuenta el área de hormigón, la tensión máxima del acero después de la fisura, espaciamiento máximo entre las barras, la resistencia a tracción del hormigón y un coeficiente que toma en cuenta la distribución de tensiones antes de la fisuración.

$$A_{s_{min}} = \frac{0.26 \cdot f_{ctm}}{f_y} \cdot b_w \cdot d$$

Ecuación 11. Acero mínimo Eurocode 2.

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{c'}^{0.33} \quad \rightarrow f_{c'} \leq 50(MPa)$$

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot \ln(1.8 + 0.1 \cdot f_{c'}) \quad \rightarrow f_{c'} > 50(MPa)$$

Donde:

f_{ctm} = resistencia media a la tracción axial del hormigón

2.1.4 Acero mínimo según Hesham Marzouk (2009)

Hesham Marzouk en su investigación titulada "A New Formula to Calculate Minimum Flexure Reinforcement for Thick High-Strength Concrete Plates" en 2009, desarrollo una ecuación para calcular el refuerzo mínimo a flexión para concreto de alta resistencia que tenga un gran peralte.

$\frac{0.415 \cdot f_r}{f_y} \cdot \left(\frac{I_{ch}}{2 \cdot h_{ef}} \right)^{0.33}$	$10 < e < 20$
$\frac{0.358 \cdot f_t}{f_y} \cdot \left(\frac{I_{ch}}{2 \cdot h_{ef}} \right)^{0.33}$	$20 < e < 40$

Ecuación 12. Acero mínimo Hesham Marzouk.

$$I_{ch} = \frac{E \cdot G_f}{f_r^2}$$

$$f_r = 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)}$$

$$h_{ef} \approx 2 \cdot h$$

Donde:

f_t = Módulo de ruptura del concreto

f_t = Resistencia a la tracción

I_{ch} = Longitud característica

G_f = Energía de fractura (Hormigones de alta resistencia 160 N/m)

E = Módulo de elasticidad

λ = coeficiente de peso del hormigón (peso normal = 1)

2.2 Modelo computacional

2.2.1 Descripción geométrica

Con el fin de generar la geometría de túneles de hormigón prefabricado en dovelas de anillos de revestimiento, se presenta a continuación 11 túneles en que se evidencia sus dimensiones.

Tabla 4. Información relevante de cada túnel.

Nombre	Año	País	N dovelas	D interno (m)	h altura (m)	Ancho (m)
Túnel de Nápoles	1995	Italia	-	6.1	0.3	-
Línea 1 del Metro de Valencia	2007	Venezuela	6 +1 clave	8.4	0.4	1.5
Túnel de Font Santa Trinitat	2010	España	6 +1 clave	5.4	0.2	1.5
Extensión de los FGC en Terrassa	2010	España	6 +1 clave	6.3	0.3	1.5
Línea 9 de metro de Barcelona	2016	España	6 +1 clave	11.3	0.35	1.5
Túnel de Brenner Base	E.C	Italia	6 +1 clave	5.8	0.2	1.5
FGC Sabadell	E.C	España	5 +1 clave	6.5	0.25	1.4
FGC Prat	E.C	España	6 +1 clave	10.2	0.32	1.6
Túnel desalinozadora de Victoria	2011	Australia	6 +1 clave	4.2	0.23	1.5
Túnel de Monte de Lirio	2012	Panamá	6 +1 clave	3.5	0.25	1.5
Túnel the wehrhahn line	2016	Alemania	6 +1 clave	8.7	0.45	1.5

A partir de los datos presentados en la Tabla 4 se van a construir los grupos para los modelos computacionales, de manera que, los resultados de este trabajo puedan ser aplicables a las configuraciones más comunes en túneles segmentados.

2.2.2 Hormigón de alta resistencia

El código de diseño de hormigón norteamericano (ACI) estipuló que el hormigón de alta resistencia (HPC) es aquel que cumple con requisitos especiales de rendimiento, durabilidad para ser más duradero y, si es necesario, más resistente que el hormigón convencional, distinguiéndose por su alta resistencia a la compresión desde 55 MPa o mayor.

Cuando se refiere a la resistencia del concreto, generalmente es a la resistencia a la compresión. La manera de cómo se determina el esfuerzo último es a partir de un ensayo normado por la ASTM. Con el ensayo se puede obtener una gráfica de esfuerzo deformación unitaria, lo que muestra información sobre el comportamiento del hormigón. La Figura 15 muestra varias curvas correspondientes para concretos de peso normal, obtenidos a partir de ensayos uniaxiales.

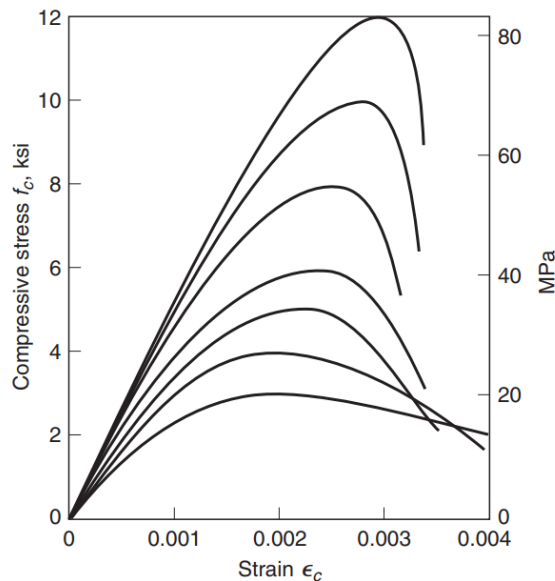


Figura 15. Curva esfuerzo deformación concreto de peso normal.

Extraído de: (Nilson A, 2004) [31]

Este gráfico muestra que todas las curvas tienen características similares. Cada curva tiene un tramo relativamente elástico y lineal, después comienza a inclinarse horizontalmente y alcanza el esfuerzo máximo, es decir, llega a la resistencia a la compresión. La degradación de la rigidez es más notable mientras mayor es la

resistencia a la compresión, es decir, que un hormigón más resistente es mucho más frágil.

2.2.3 Creación de grupos computacionales

Para la creación de las geometrías de los modelos computacionales se prepararon diferentes dovelas con 3 espesores, incluidos 20, 30, 40 cm. Cada espécimen tiene una longitud de 3, 3.5, 4 m respectivamente, se apoya simplemente en dos tramos exteriores y una fuerza puntal al medio (véase Figura. 5). Se crearon sesenta dovelas con resistencias a compresión en el rango de 50 MPa a 90 MPa, con 4 distintos armados para cada dovela. Los especímenes se dividen en 5 series A-E. La Tabla 5 muestra los detalles de los especímenes, resistencia a la compresión y la geometría.

Tabla 5. Detalles de los especímenes para modelos computacionales.

Serie	Especímen	Resistencia a la compresión f_c ,	Altura h ,	Longitud L ,	Diámetro ext Φ ,
		Mpa	cm	m	m
A	A1	50	20	3	6
	A2		30	3.5	7
	A3		40	4	8
B	B1	60	20	3	6
	B2		30	3.5	7
	B3		40	4	8
C	C1	70	20	3	6
	C2		30	3.5	7
	C3		40	4	8
D	D1	80	20	3	6
	D2		30	3.5	7
	D3		40	4	8
E	E1	90	20	3	6
	E2		30	3.5	7
	E3		40	4	8

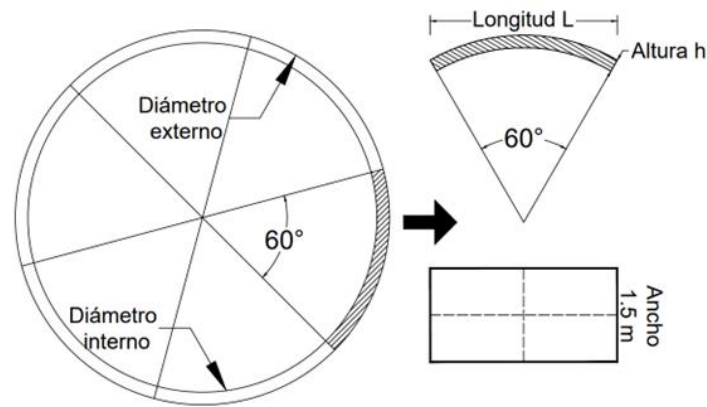


Figura 16. Ilustración de las dimensiones.

Elaborado por: Washington Morocho

Con el fin de comprender la variación del acero mínimo de refuerzo conforme aumente la resistencia a la compresión del hormigón. Se escogió las fórmulas de los códigos internacionales ACI, Eurocode y la investigación de Marzouk para reforzar las dovelas. En la Figura 17, se reportan los valores límites del ACI, Eurocode y la investigación de Hesham Marzouk. Las dos primeras son constantes y la última varía lineal mente dependiendo de la altura.

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} \times 100$$

Ecuación 13. Cuantía de acero.

Donde:

ρ = Cuantía de acero

A_c = Área transversal de hormigón = $b \cdot h$

A_s = Área de refuerzo longitudinal

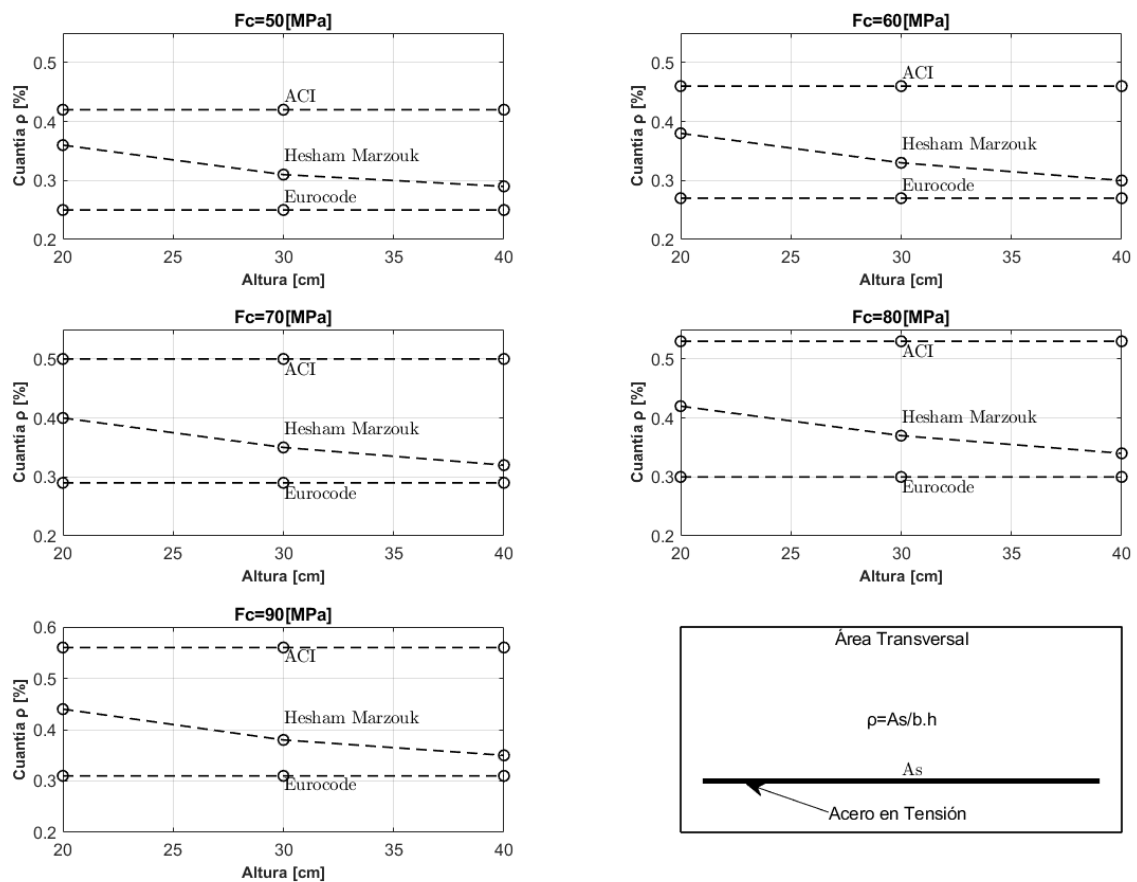


Figura 17. Porcentaje de acero mínimo frente a la altura (h), con un $F_y=4200[\text{kg}/\text{cm}^2]$

Elaborado por: Washington Morocho

En la Tabla 6, se muestra la cantidad de acero mínimo requerida calculado con las Ecuaciones 10, 11 y 12. La Tabla 7, son el acero mínimo en varillas comerciales.

Tabla 6. Cuantía y acero de los especímenes.

Serie	Especímen	ACI 318-19 (1)		Hesham Marzouk (2)		Eurocode 2 (3)	
		p %	As cm2	p %	As cm2	p %	As cm2
A	A1	0.42%	12.63	0.36%	10.80	0.25%	7.57
	A2	0.42%	18.94	0.31%	14.17	0.25%	11.36
	A3	0.42%	25.25	0.29%	17.18	0.25%	15.14
B	B1	0.46%	13.83	0.38%	11.48	0.27%	8.09
	B2	0.46%	20.75	0.33%	15.06	0.27%	12.13
	B3	0.46%	27.66	0.30%	18.26	0.27%	16.17
C	C1	0.50%	14.94	0.40%	12.09	0.29%	8.56
	C2	0.50%	22.41	0.35%	15.86	0.29%	12.84
	C3	0.50%	29.88	0.32%	19.23	0.29%	17.12
D	D1	0.53%	15.97	0.42%	12.64	0.30%	8.99
	D2	0.53%	23.96	0.37%	16.58	0.30%	13.48
	D3	0.53%	31.94	0.34%	20.11	0.30%	17.97
E	E1	0.56%	16.94	0.44%	13.15	0.31%	9.37
	E2	0.56%	25.41	0.38%	17.25	0.31%	14.05
	E3	0.56%	33.88	0.35%	20.92	0.31%	18.74

Tabla 7. Armado de los especímenes.

# Varillas	ACI 318-19 (1)		# Varillas	Hesham Marzouk (2)		# Varillas	Eurocode 2 (3)	
	Diámetro Φ	Cuantía Real $\rho\%$		Diámetro Φ	Cuantía Real $\rho\%$		Diámetro Φ	Cuantía Real $\rho\%$
Serie A								
6	16	0.40%	6	14	0.31%	6	12	0.23%
7	18	0.40%	7	16	0.31%	7	14	0.24%
7	20	0.37%	7	18	0.30%	7	16	0.23%
Serie B								
7	16	0.47%	7	14	0.36%	7	12	0.26%
8	18	0.45%	8	16	0.36%	8	14	0.27%
8	20	0.42%	8	18	0.34%	8	16	0.27%
Serie C								
8	16	0.54%	8	14	0.41%	8	12	0.30%
9	18	0.51%	9	16	0.40%	9	14	0.31%
10	20	0.52%	9	18	0.38%	10	16	0.34%
Serie D								
7	18	0.59%	7	16	0.47%	7	14	0.36%
8	20	0.56%	8	16	0.36%	8	14	0.27%
9	22	0.57%	8	18	0.34%	9	16	0.30%
Serie E								
7	18	0.59%	7	16	0.47%	7	14	0.36%
8	20	0.56%	8	16	0.36%	8	14	0.27%
9	22	0.57%	8	18	0.34%	9	16	0.30%

2.2.4 Discretización

2.2.4.1 Matriz de hormigón

Para discretizar la matriz de hormigón, se generó una malla hexaédrica de tamaño variable (véase sección 2.2.8) aplicando el método de multi - zona que se ajustan a la geometría curva. Las dimensiones de los elementos finitos en los que se divido la matriz de hormigón se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Discretización de la matriz de hormigón.

Número Serie	Dirección	Dovela [cm]	N elementos [U]	Tamaño del elemento [mm]
#1	x	300	26607	35
	y	20		
	z	150		
#2	x	350	27968	40
	y	30		
	z	1500		
#3	x	400	28764	45
	y	40		
	z	1500		

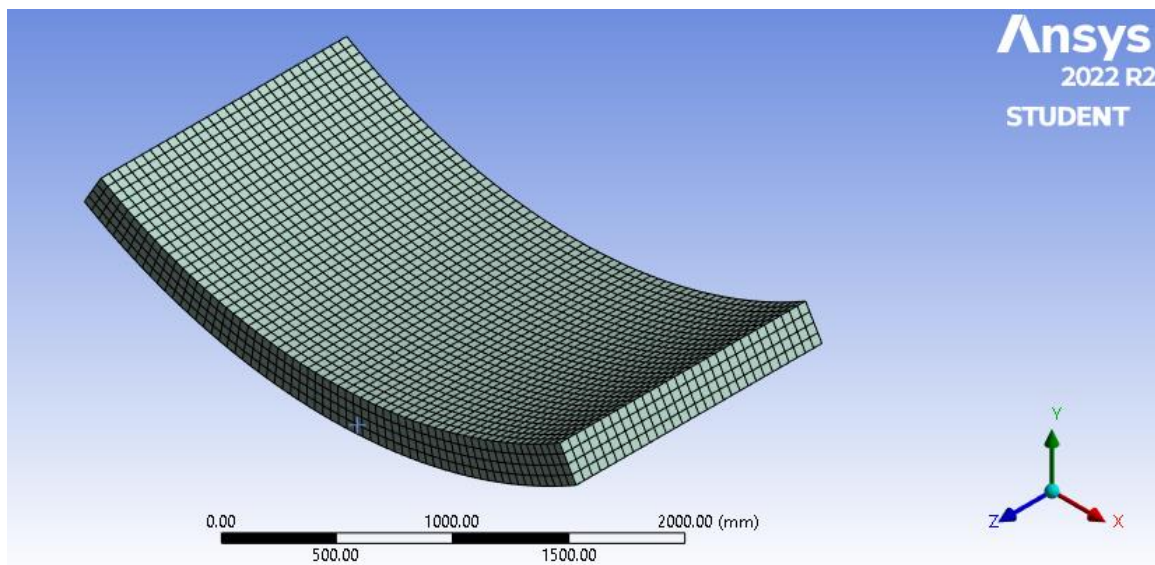


Figura 18. Discretización de la matriz de hormigón.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.4.2 Acero de refuerzo

Para la discretización del acero de refuerzo consistió en dividir las barras en su eje predominante. En la Tabla 9 se muestra las dimensiones de los elementos finitos del

acero de refuerzo. En la Figura 19 se muestra el mallado del refuerzo longitudinal y transversal.

Tabla 9. Discretización del acero de refuerzo.

Serie	Espécimen	# Barras Longitudinales	Espaciamiento [cm]	N elementos [U]
A	A1	6	28	360
	A2	7	23	420
	A3	7	20	420
B	B1	7	23	420
	B2	8	20	480
	B3	8	18	480
C	C1	8	20	480
	C2	9	18	540
	C3	10	15	600
D	D1	7	23	420
	D2	8	20	480
	D3	9	18	540
E	E1	7	23	420
	E2	8	20	480
	E3	9	18	540

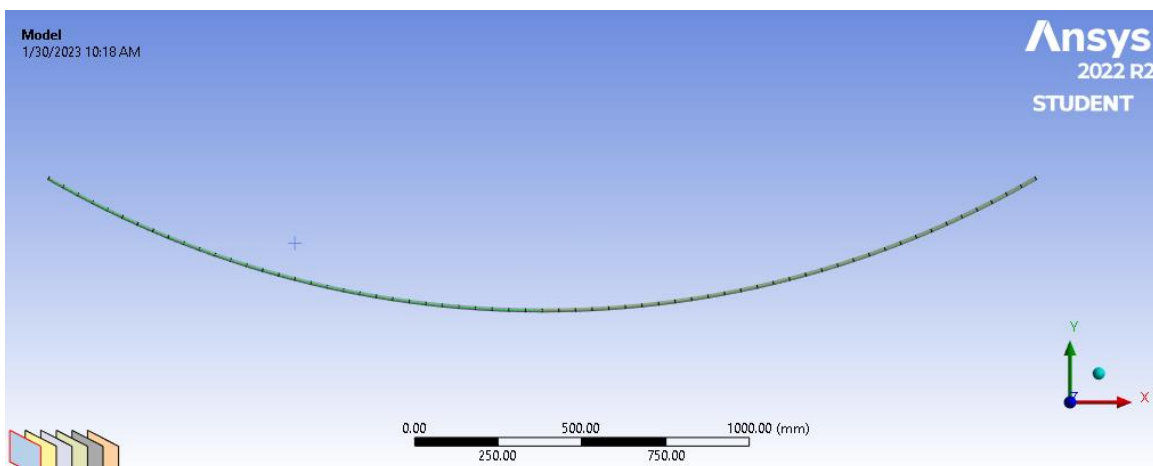


Figura 19. Discretización del acero de refuerzo del acero longitudinal

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.4.3 Placa de carga y apoyos

Para representar los cuerpos indeformables se generó una malla hexaédrica con diferentes dimensiones debido a su geometría irregular. En la Tabla 10 y Figura 20 se presenta información del mallado de la placa de apoyo y de los apoyos.

Tabla 10. Discretización de apoyos y placa de carga.

Tipo	Dirección	Dovela [cm]	N elementos [U]
Apoyos	x	Variable	780
	y	100	
	z	150	
Placas	x	10	120
	y	5	
	z	150	

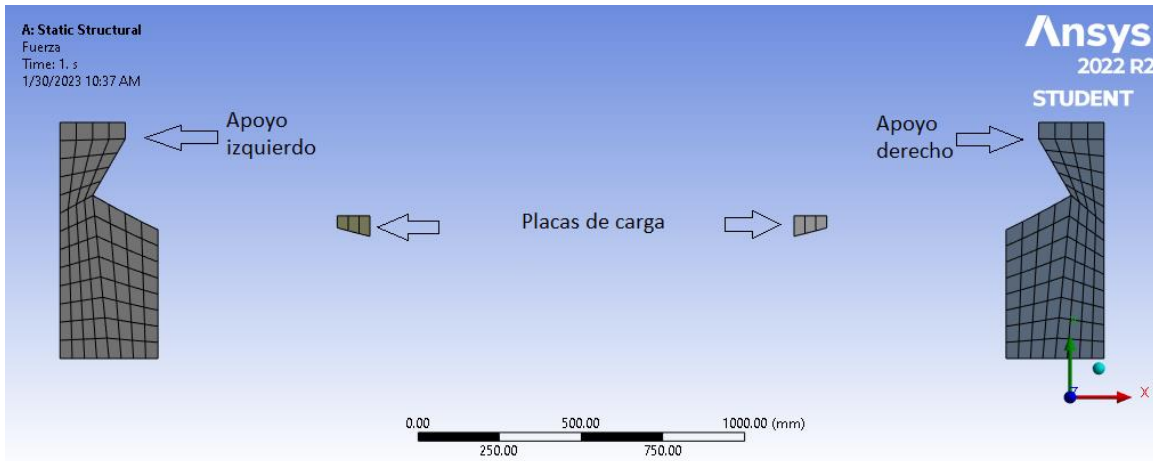


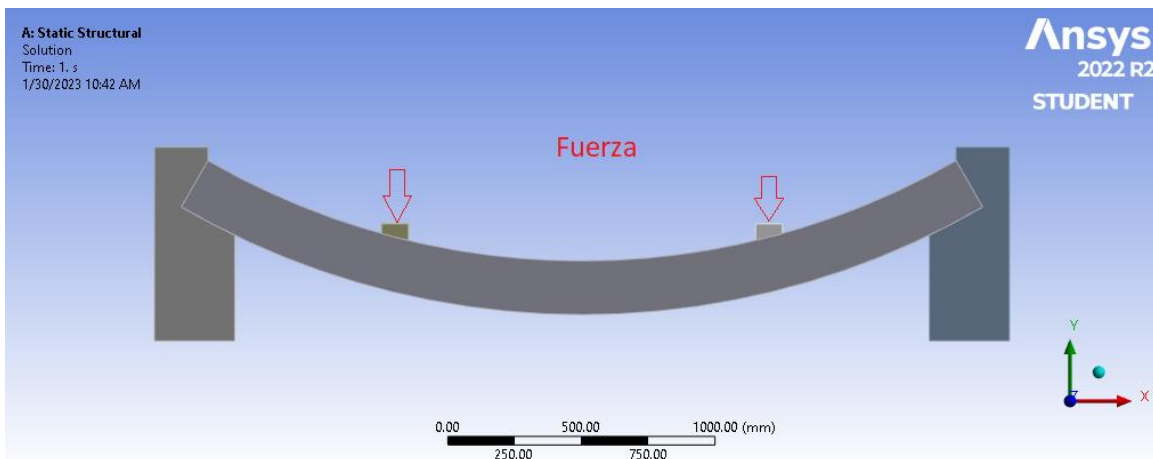
Figura 20. Discretización de apoyos y placa de carga.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.5 Condiciones de frontera

2.2.5.1 Carga

Para simular las cargas internas impuestas sobre la estructura, se determinan una carga monotónica colocada en el centro del vano. Se incrementan monótonamente mediante una placa rígida hasta que se alcanza fallo en el segmento del túnel. En la Figura 21 se muestra las condiciones de frontera.



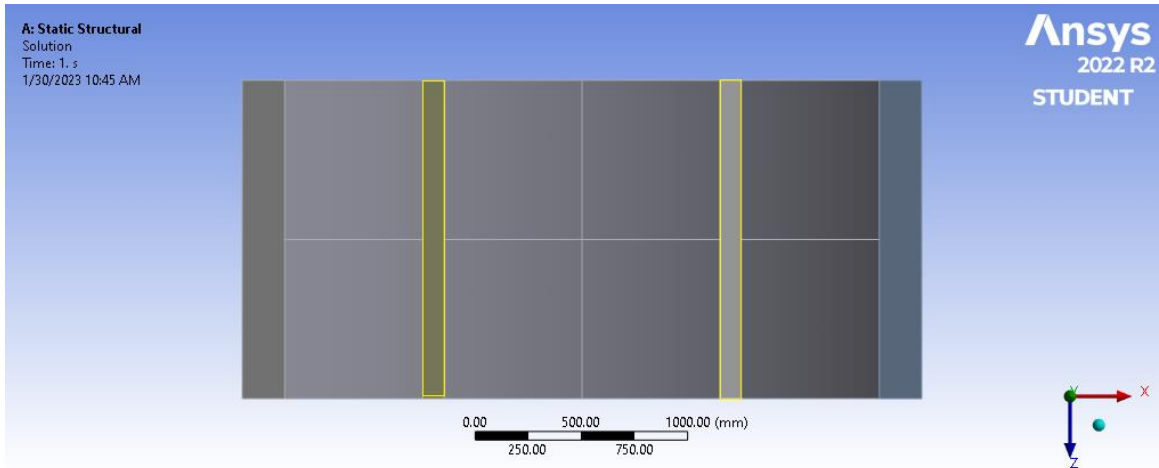
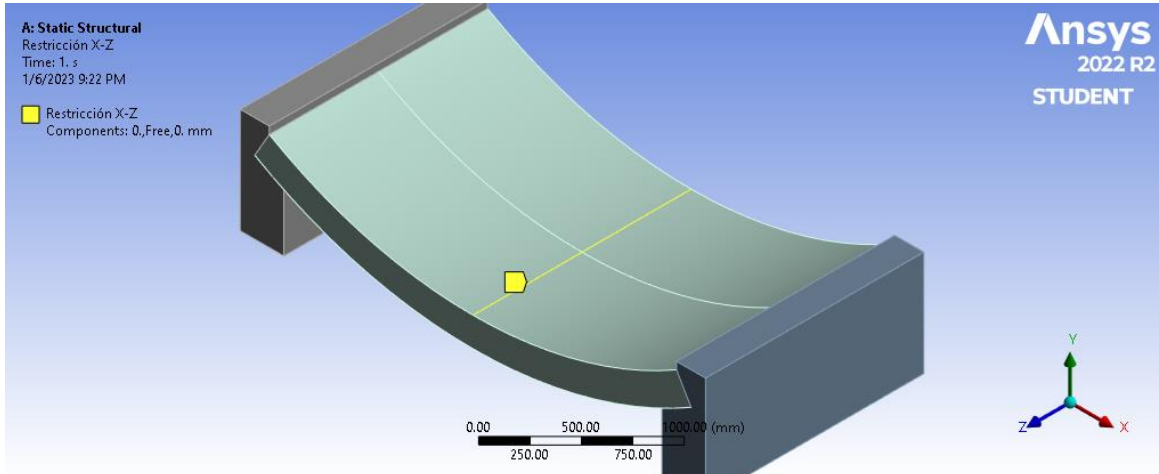


Figura 21. Placa de apoyo a) vista frontal b) vista superior.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.5.2 Apoyos

Para representar un ensayo a flexión de 4 puntos se consideraron los soportes extremos del segmento empotrados en su base con el fin de evitar rotaciones o desplazamientos. Además, se incluyó una restricción adicional en la dirección del eje X y Z en la mitad del tramo para para asegurar la flexión de la dovela.



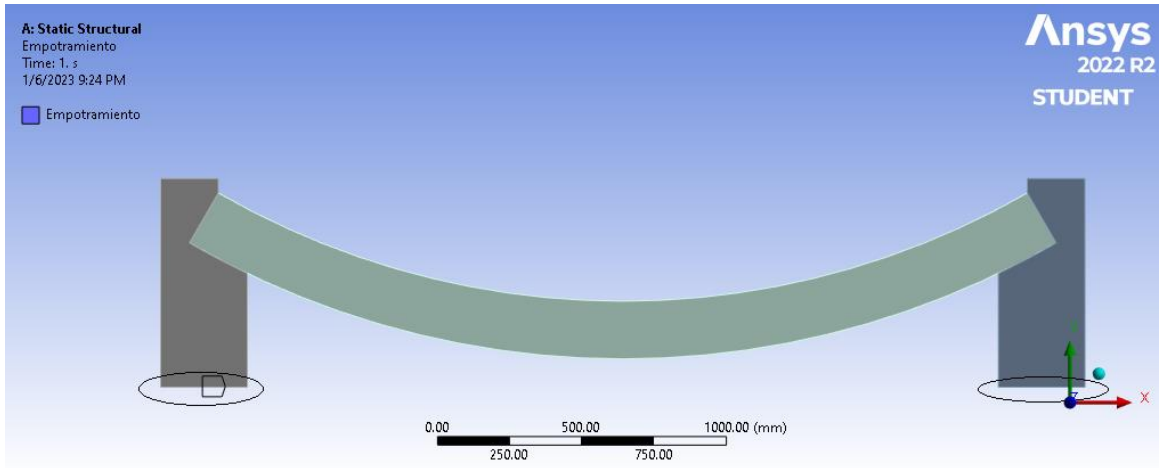
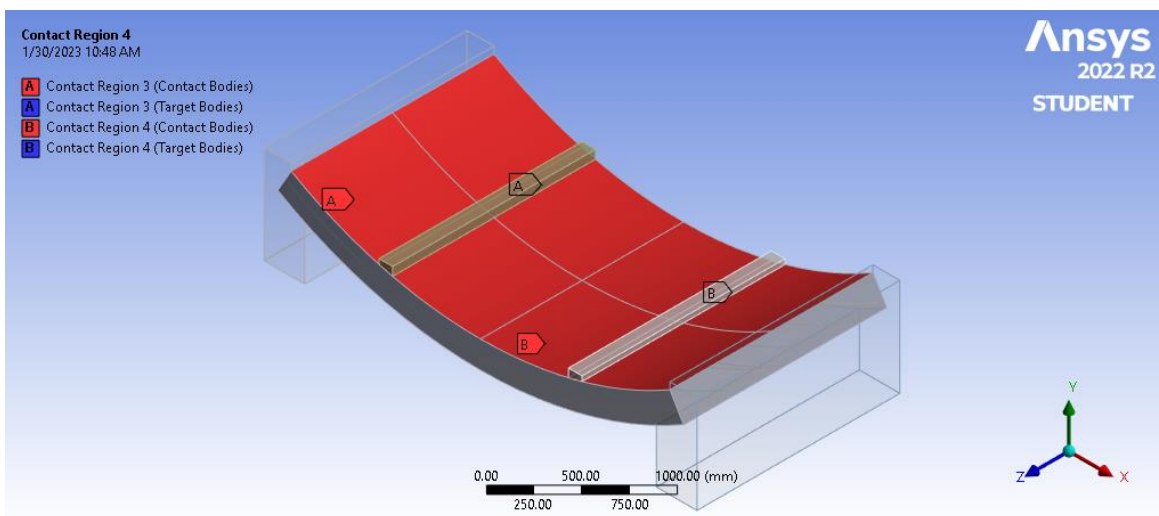


Figura 22. Representación de restricciones del ensayo a) restricción x-z b) base empotrada.

Elaborado por: Washington Morocho

Las superficies de contacto entre los apoyos y placa con la dovela se le representó de manera que las condiciones de frontera representen un ensayo a flexión. La placa de apoyo esta adherida a la dovela, mientras que, la superficie entre apoyos de manera que se considere la influencia de la fricción entre los apoyos y la placa de carga.



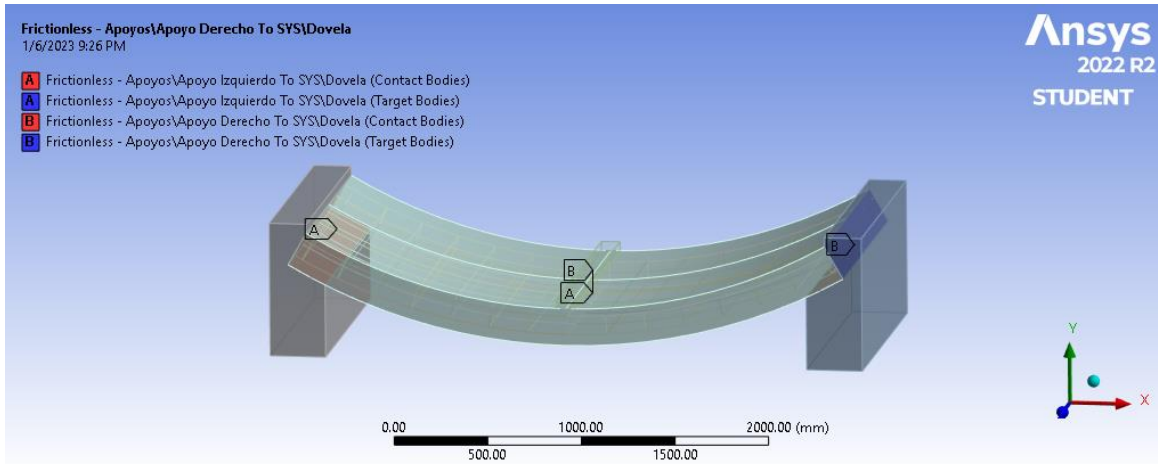


Figura 23. Representación de superficies de contacto a) placa de carga b) apoyos.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.6 Leyes constitutivas

2.2.6.1 Hormigón

El comportamiento no lineal del hormigón se modela en base a un modelo de microplano de daño plasticidad. Este modelo se ilustra en la Figura 9. Las relaciones matemáticas y leyes entre las tensiones y deformaciones están disponibles en (Zreid & Kaliske, 2018). Los parámetros que intervienen en estas relaciones se enumeran en la Tabla 2. Los valores de la Tabla 2 dependen de las propiedades del hormigón. Para seleccionar los valores adecuados para cada modelo se hizo un análisis del cual se eligió los que mejor representen a valores experimentales.

2.2.6.1.1 Parámetros del modelo

Varios parámetros del modelo intervienen en el modelo computacional como: parámetros de elasticidad, plasticidad, daño y no locales. El módulo de Young y la relación de Poisson se toman de datos experimentales hechos para hormigones de Ecuador. Los parámetros de plasticidad son valores que se obtienen a partir de ensayos a compresión y tensión uniaxial y biaxial. La resistencia a la compresión f_c es el valor que varía de acuerdo con este trabajo, los demás se calculan con las ecuaciones $Ec(2)f_b$, $Ec(3)f_t$, $\sigma^c_v Ec(7)$, mientras que S se obtiene de la Figura 10. Los parámetros de daño por tensión se identifican ajustando ensayos de tensión cíclica uniaxial, se calcula con $R_t = 1$ y $\beta_t \cong 1.5 * \beta_c$, además, $\gamma_{to} = 0$. Los parámetros de daño por compresión D , γ_{co} , β_c , se obtienen a partir de ensayos cíclicos, como no se dispone de información de ensayos, tampoco existe en la literatura técnica fórmulas para obtener

estos parámetros. El parámetro no local c se puede calcular como $c = l^2$. El parámetro m puede ser 1, si el método no converge, es necesario cambiar por valores mayores que 1, de esta manera se regularizan la solución.

2.2.6.1.2 Interpretación de los parámetros de daño

El parámetro de endurecimiento D es que tanto se incrementa el esfuerzo posterior al alcanzar el esfuerzo último, se observa que el valor $1E^06$ es muy irreal, ya que, ningún hormigón tiene ese comportamiento. Los valores de la Tabla 1 oscilan entre $1E^04 - 10E^04$.

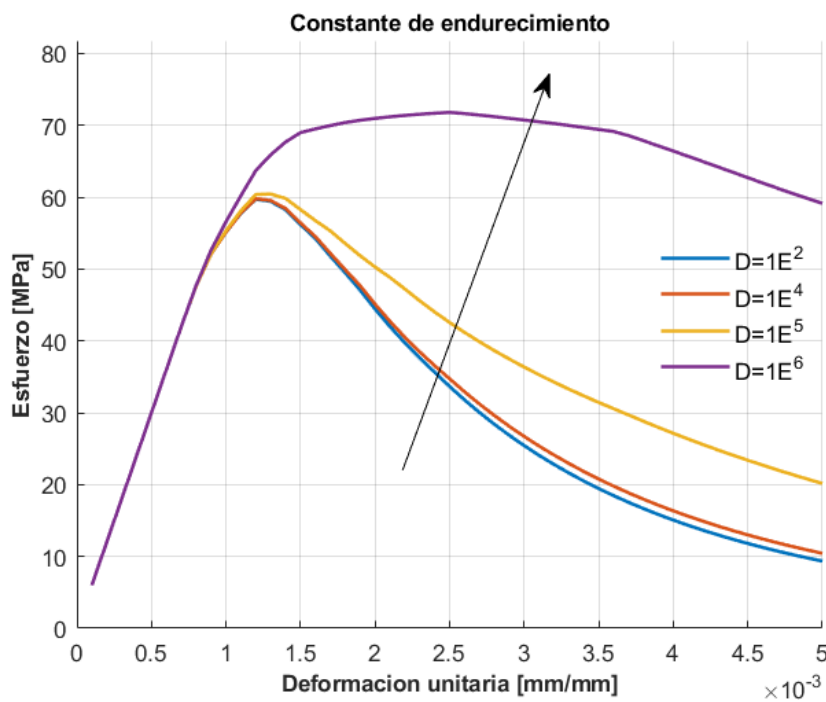


Figura 24. Constante de endurecimiento.

Elaborado por: Washington Morocho

El parámetro β_c se interpreta como que tan rápido disminuye la rigidez una vez acumulada el daño. Mientras mayor sea el valor β_c rigidez disminuye mucho más como se observa en la Figura 24. Valores altos como se observa en la Tabla 1 se debe a que los hormigones de ata resistencia son altamente frágiles (véase figura 15).

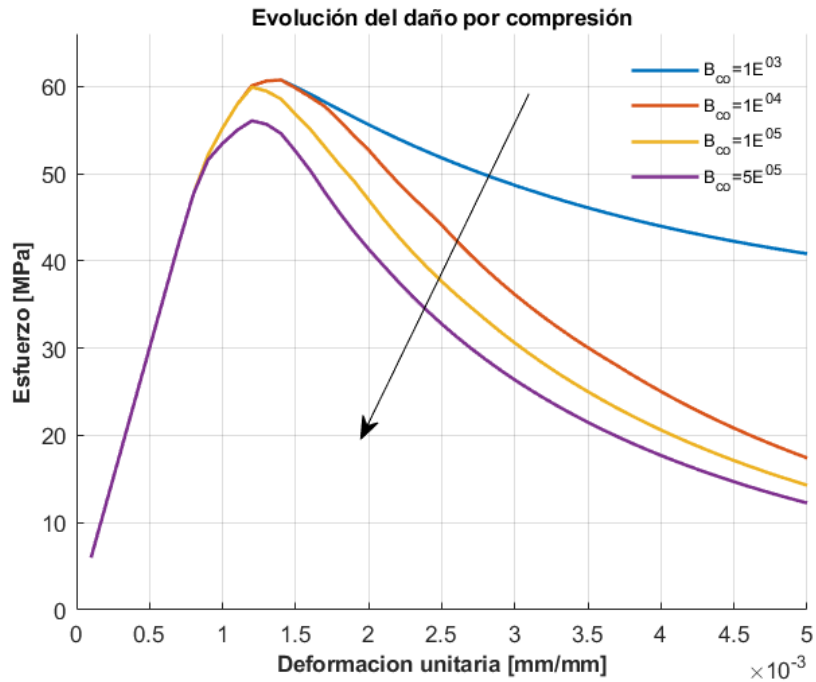


Figura 25. Evolución de daño por compresión.

Elaborado por: Washington Morocho

El parámetro γ_{co} , es que cantidad de daño puede acumular la meseta después de alcanzar esfuerzo ultimo. Valores bajos como se observa en la Tabla 1 se debe a que los hormigones de alta resistencia es poca o nula la acumulación de daño (Figura 15).

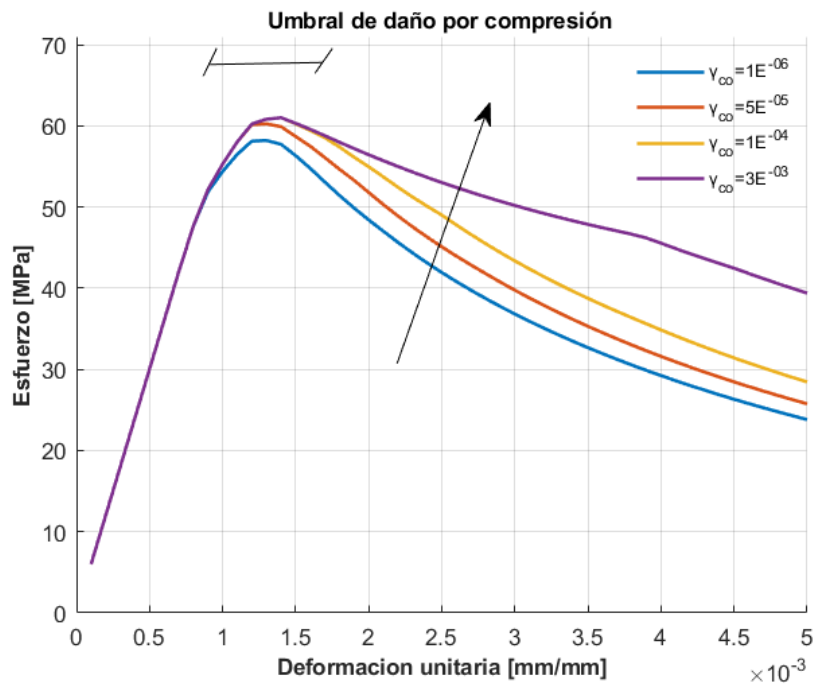


Figura 26. Umbral de daño por compresión.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.6.1.3 Validación de los parámetros de daño

Debido a la falta de información de ensayos de dovelas a flexión, para poder validar los parámetros del modelo, se utilizará ensayos uniaxiales a compresión para cada serie de hormigón. La idea es la identificación de los parámetros de daño. Como punto de partida se usará los valores que se ilustran en la Tabla 1, donde se comparará con la curva esfuerzo deformación hormigón (véase figura 15) y como último paso se ajustará si es necesario para que el hormigón tenga una tendencia similar.

La Figura 27 muestra la geometría y las condiciones de frontera utilizadas para simular las pruebas. Las propiedades del hormigón se presentan en la Tabla 11.

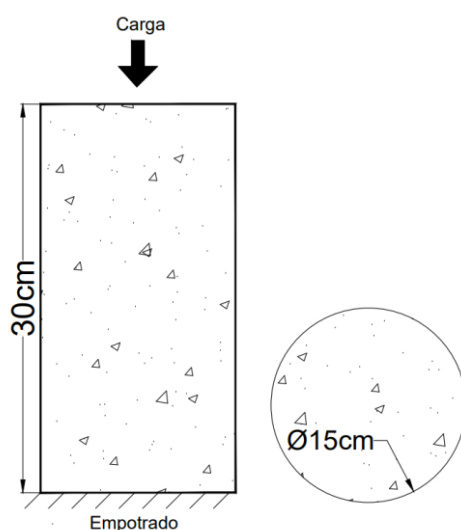


Figura 27. Configuración del ensayo de cilindro.

Elaborado por: Washington Morocho

Tabla 11. Parámetros del hormigón para el ensayo a compresión del cilindro.

f_c	E	μ	f_b	f_t	σ_v^c	S	D	R_T	γ_{to}	γ_{co}	β_t	β_c	c	m
[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[mm ²]	[-]
50	27400	0.2	57.5	4.4	-33.3	2	5e4	2	0	2e-5	3e3	2e3	400	2.5
60	30015	0.2	69	5	-40	2	6e4	2	0	5e-5	3e3	2e3	400	2.5
70	32420	0.2	80.5	5.5	-46.6	2	7e4	2	0	8e-5	3e3	2e3	400	2.5
80	34659	0.2	92	6	-53.3	2	7e4	2	0	8e-5	3e3	2e3	400	2.5
90	36761	0.2	103.5	6.5	-60	2	7e4	2	0	8e-5	3e3	2e3	400	2.5

En la Figura 27 y 28, se muestran los resultados del ensayo computacional del cilindro con las curvas de esfuerzo deformación para los diferentes hormigones.

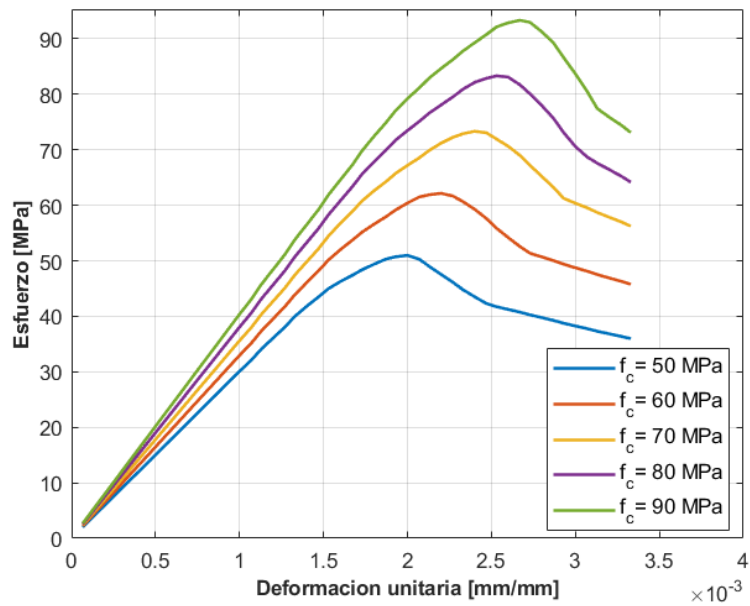


Figura 28. Resultados del ensayo de cilindro a compresión: curva esfuerzo - deformación.

Elaborado por: Washington Morocho

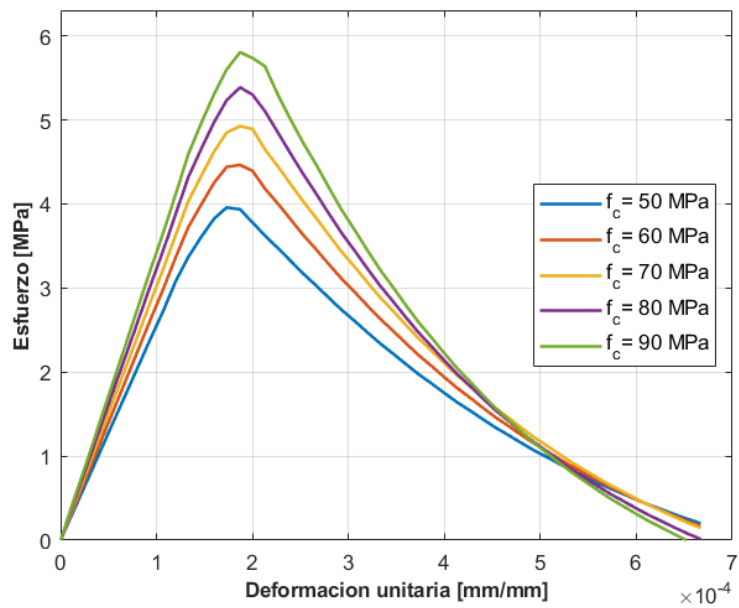


Figura 29. Resultados del ensayo de cilindro a tensión: curva esfuerzo -deformación.

Elaborado por: Washington Morocho

Estas curvas se compararon con las soluciones analíticas existentes (Collins et al,1993) [32]. Se consiguió una buena calibración como se muestra en la Figura 30. Todos los valores de los parámetros se muestran en la Tabla 11.

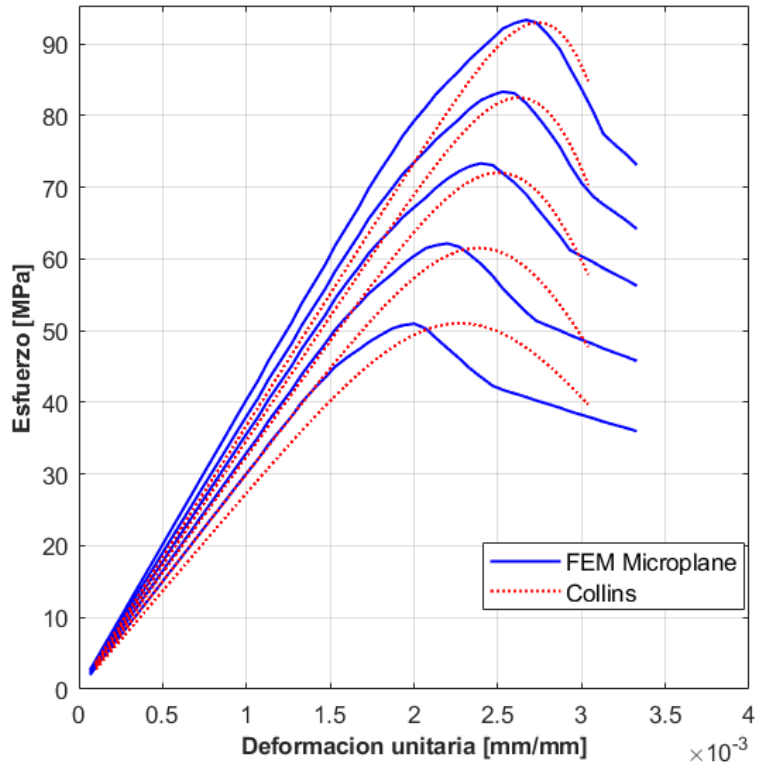


Figura 30. Curva esfuerzo -deformación.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.6.2 Acero

Se utilizó el modelo de Dodd-Restreppo para describir el comportamiento del material del acero (véase la Figura 11 y Tabla 3).

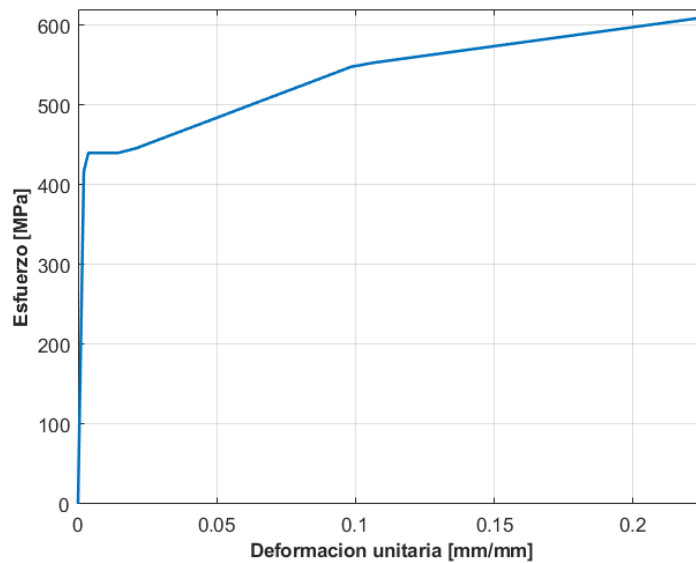


Figura 31. Curva esfuerzo deformación del modelo constitutivo del acero.

Elaborado por: Washington Morocho

2.2.7 Características mecánicas de los materiales

Parámetros finales que se usarán para los modelos computacionales.

Tabla 12. Propiedades del hormigón usadas para el modelo computacional.

f_c	E	μ	f_b	f_t	σ_v^c	S	D	R_T	γ_{to}	γ_{co}	β_t	β_c	c	m
[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[mm ²]	[-]
50	27400	0.2	57.5	4.4	-33.3	2	5e4	2	0	2e-5	3e3	2e3	400	2.5
60	30015	0.2	69	5	-40	2	6e4	2	0	5e-5	3e3	2e3	400	2.5
70	32420	0.2	80.5	5.5	-46.6	2	7e4	2	0	8e-5	3e3	2e3	400	2.5
80	34659	0.2	92	6	-53.3	2	7e4	2	0	8e-5	3e3	2e3	400	2.5
90	36761	0.2	103.5	6.5	-60	2	7e4	2	0	8e-5	3e3	2e3	400	2.5

2.2.8 Calidad del mallado

El mallado depende en gran medida en que tan aproximada es la solución de las ecuaciones del problema que está simulando, con los resultados reales. En esta sección se incluye el análisis de convergencia de malla. Cuando se realiza una simulación un paso sustancial es crear la malla de acuerdo con la geometría del elemento. Sin embargo, existe una incertidumbre del tamaño y la forma es la correcta.

La forma de la malla son elementos hexaédricos que se acoplan a la geometría del elemento CPT215. Mientras que, para determinar un tamaño adecuado de tal manera que, los resultados no tengan relación con el tamaño de cada hexaedro. Primero, se realiza la simulación con un tamaño aleatorio. Segundo, se realiza un proceso iterativo hasta que los resultados arrojados por la simulación tengan una tolerancia aceptable con los resultados anteriores.

En la Figura 32 se plotea los resultados esfuerzo – deformación del espécimen A1, donde se muestra los resultados de cada iteración con cada tamaño de malla.

Tabla 13. Detalle de los diferentes tamaños de la malla.

Número de nodos [U]	Tamaño del elemento [mm]	Fuerza máxima [KN]
N1	1565	600.80
N2	2110	565.86
N3	3839	458.89
N4	9595	349.31
N5	12138	331.17
N6	17010	312.70
N7	26607	304.98

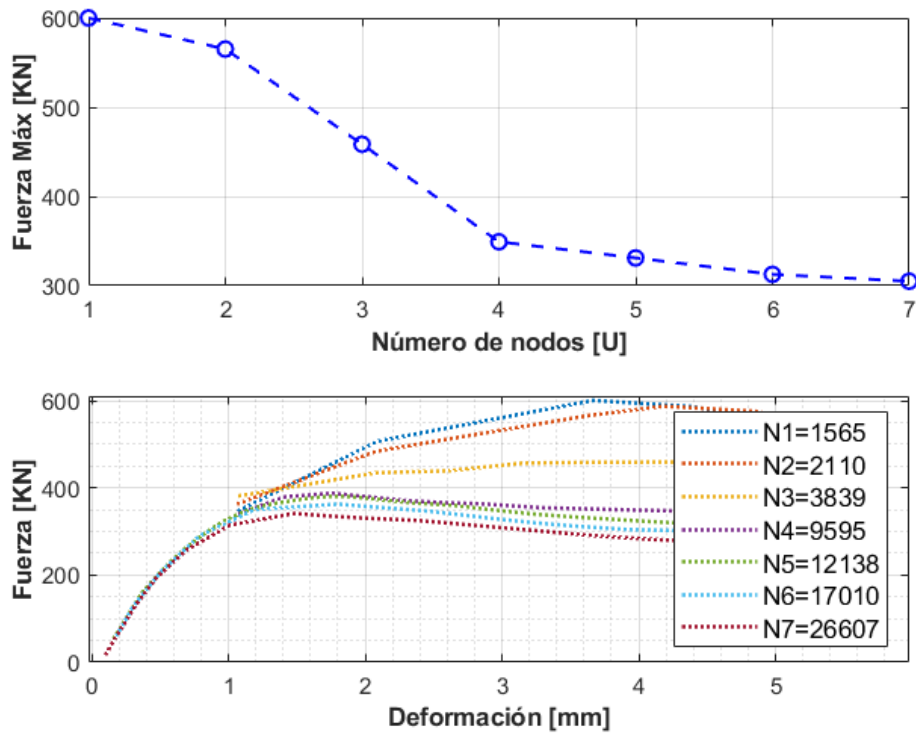


Figura 32. Comparación de los diferentes tamaños del mallado.

Elaborado por: Washington Morocho

Como se observa en la Figura 32, mientras más nodos se tiene los resultados difieren de menor manera. Los tamaños de 35, 40, 45 y 50 [mm] tienen una aproximación buena y los resultados no difieren significativamente. Por lo tanto, se optó usar el tamaño de 35, 40, 45 [mm] para las dovelas N1, N2 y N3 respectivamente, de manera que, no exceda los 32000 elementos que limita la licencia estudiantil de ANSYS.

2.2.9 Codificación APDL

La entrada de información que describe el comportamiento de los materiales en los que se basa el modelo de cálculo se realiza mediante bloques de código en el Lenguaje de Diseño Paramétrico de ANSYS (APDL). Estos códigos se insertan en los atributos de cada material (hormigón o refuerzo), especifican sus propiedades mecánicas. A continuación, se presenta el formato de los códigos implementados en este trabajo, dando una explicación de cada comando que se usa.

Tabla 14. Tabla de la descripción del código APDL de la matriz de acero.

Elemento REINF264, Matriz de acero	
Código	Comentario
Reinforcement	Especifica el comportamiento de refuerzo de tensión y compresión de una barra.

Tabla 15. Tabla de la descripción del código APDL de la matriz de hormigón.

Elemento CPT215, Matriz de hormigón	
Código	Comentario
MP,EX,conc,E	Define una propiedad material lineal (MP), Modulo de Young (EX) en MPa,Propiedades del hormigón (conc),Asignacion de variable a "EX".
MP,NUXY,conc,nu	Define una propiedad material lineal (MP), Relacion de Poisson (NUXY) ,Asignacion de variable a "NUXY" (nu).
TB,MPLANE,conc,DPC	Define propiedades del material no lineal (TB), Asignación de propiedades de microplano para plasticidad daño(MPLANE-DPC) .
TBDATA,1,fc,fb,ft,Rt,D,sigma_cv	Constantes para representar el comportamiento del hormigón (TB), tabla2, el campo 1 aplica a la primera constante de la tabla.
TBDATA,7,Rc,gamma_t,gamma_c,k	Constantes para representar el comportamiento del hormigón, tabla2.
TB,MPLANE,conc,NLOCAL	Asignación de propiedades no locales de microplano(NLOCAL).
TBDATA,1,c,m	Asignación de las variables "c","m".

Tabla 16. Tabla de la descripción del código APDL de la interfaz entre materiales.

Interfaz entre materiales	
Código	Comentario
/PREP7	Para que los comandos se lleven a cabo durante el preprocesamiento (/PREP7).
itype = conc	Define los elementos acoplados del material (itype).
et,itype,element	Selecciona un tipo de elemento de la biblioteca de elementos (et) y lo establece para el modelo.
keyopt,itype,18,2	Es un método alternativo para ingresar valores de opción de clave de elemento (keyopt),
esel,s,mat,,conc	Cambia el tipo de elemento de los que previamente fue asignado al hormigón.
emodif,all,type,itype	Modifica un elemento previamente definido(emodif), establece los atributos del tipo de elemento (type) .
allsel	Selecciona todas las entidades con un solo comando (allsel).
etlist,all	Enumera los tipos de elementos definidos en cada iteración (etlist),selecciona todos los elementos predeterminados (all).
/SOLU	Variación de las cargas y de las condiciones de apoyo durante la transición de un elemento a otro (SOLU).
outres,all,all	Controla los datos de resultados de la solución escritos en la base de datos (Outres).

Toda la información presentada en esta sección fue obtenida de los manuales de ANSYS, información disponible y foros.

3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Pruebas

Las pruebas realizadas se detallan en la Tabla 5 y 7.

3.2 Resultados

3.2.1 Caracterización numérico computacional de dovelas de hormigón armado.

En las figuras siguientes se muestran las curvas de carga-deflexión para cada tamaño y cantidad de refuerzo establecidos. Además, se presentan tablas correspondientes a los resultados del análisis computacional que muestran los valores máximos de esfuerzos y la carga que produce la fisuración del hormigón para cada modelo. La carga de agrietamiento ocurre cuando el hormigón en la fibra de tensión alcanza su esfuerzo máximo.

En todas las dovelas de 20, 30 y 40 cm con la cantidad mínima de refuerzo propuesta por Hesham Marzouk, se observa que el pico de carga es inferior a la carga cedente del acero. En otras palabras, se observa una condición de transición en las curvas del colapso del hormigón a tracción y la cedencia de los esfuerzos hacia el acero, lo que implica que dicha condición define la cantidad mínima de acero requerida.

La cuantía mínima de acero tiene a ser inversamente proporcional a la altura de la dovela, en donde los códigos de diseño como el ACI y Eurocode proponen valores independientes de la altura de la viga. Por lo tanto, las fórmulas planteadas en contexto de dovelas de túneles de alta resistencia son inadecuadas.

En las Figuras 41,44 y 47, se observa un notable salto negativo de carga, esto se debe a que se tiene una menor cantidad de varillas, pero con más área de refuerzo.

3.2.1.1 Dovela Serie-A

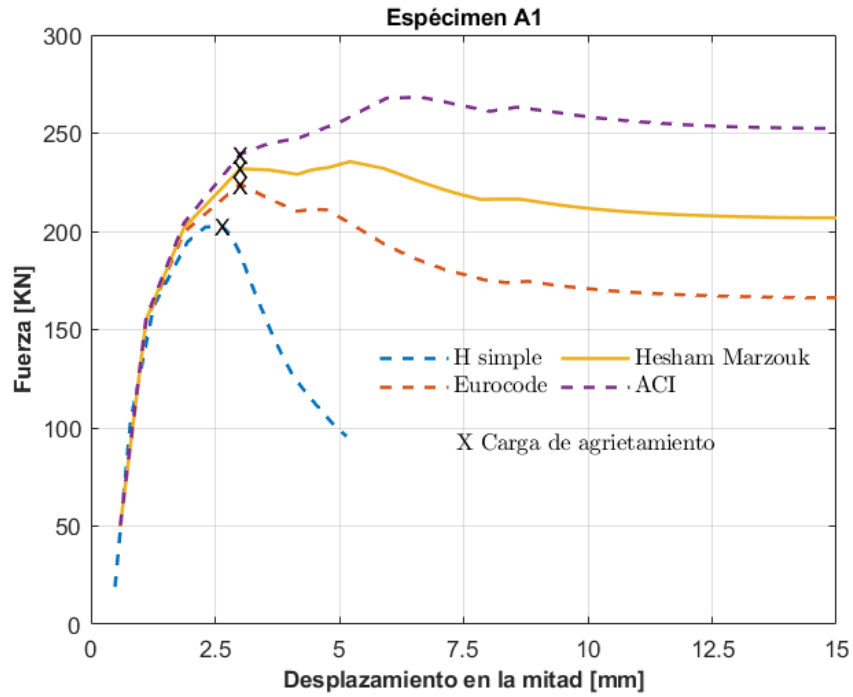


Figura 33. Dovela $h=20$ [cm], $f'c=50$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

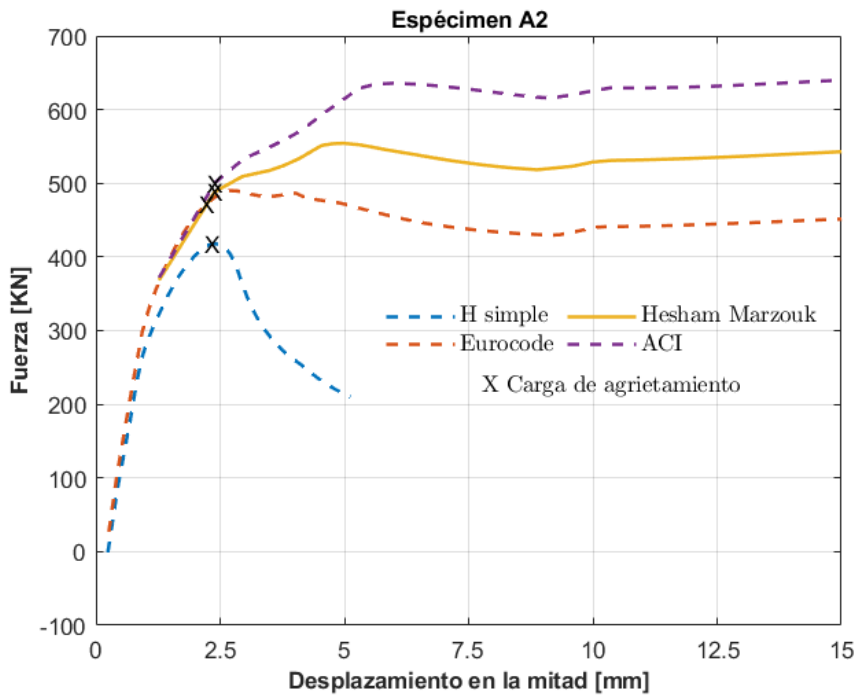


Figura 34. Dovela $h=30$ [cm], $f'c=50$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

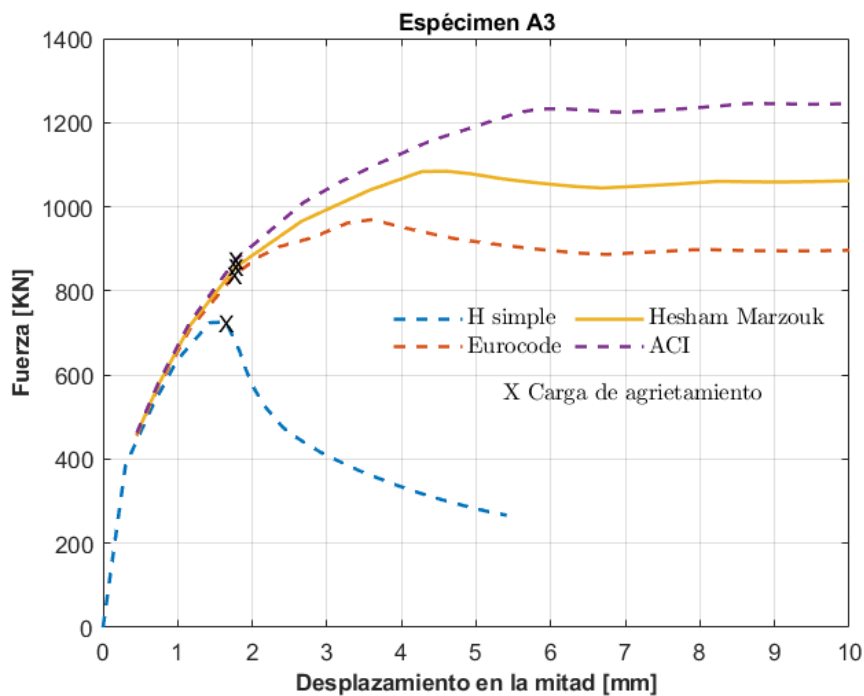


Figura 35. Dovela $h=40$ [cm], $f'c=50$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

Tabla 17. Resultados Dovela-A

Especimen	Tamaño h x b [cm]	Acero	Acero [cm ²]	Autor	Cuantía [ρ%]	Esfuerzo máx zona Tensión [Mpa]	Carga de Agrietamiento [KN]
Serie A							
A1	20 x 1500	6 Φ 12	6.79	Eurocode 2	0.23%	6.57	224.02
		6 Φ 14	9.24	Hesham M	0.31%	6.55	231.87
		6 Φ 16	12.06	ACI 318-19	0.40%	6.61	248.31
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	6.6	202.2
A2	30 x 1500	7 Φ14	10.78	Eurocode 2	0.24%	6.33	471.93
		7 Φ16	14.07	Hesham M	0.36%	6.33	509.37
		7 Φ18	17.81	ACI 318-19	0.40%	6.32	533.48
		0 Φ 0	0.00	[-]	0.00%	6.25	417.2
A3	40 x 1500	7 Φ16	14.07	Eurocode 2	0.23%	5.94	839.25
		7 Φ16	17.81	Hesham M	0.30%	5.91	856.99
		7 Φ20	21.99	ACI 318-19	0.37%	5.93	874.74
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	5.81	725.63

3.2.1.2 Dovela Serie-B

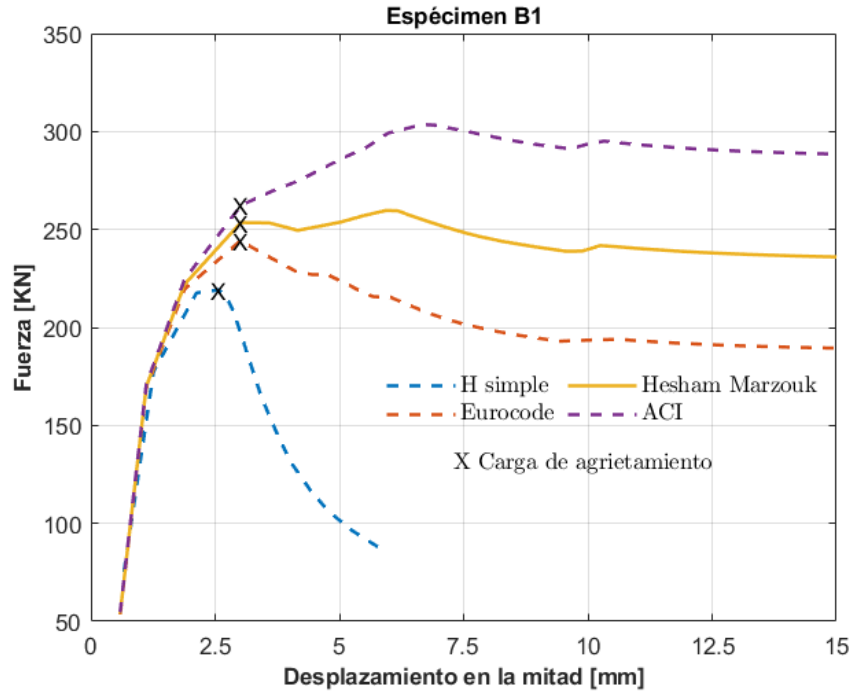


Figura 36. Dovela h=20[cm], $f'c=60$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

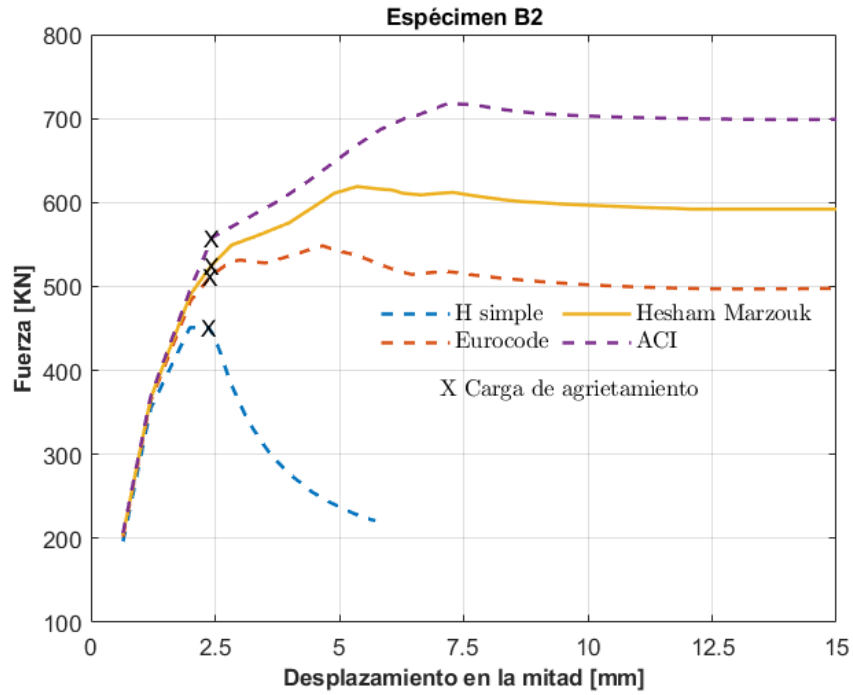


Figura 37. Dovela h=30[cm], $f'c=60$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

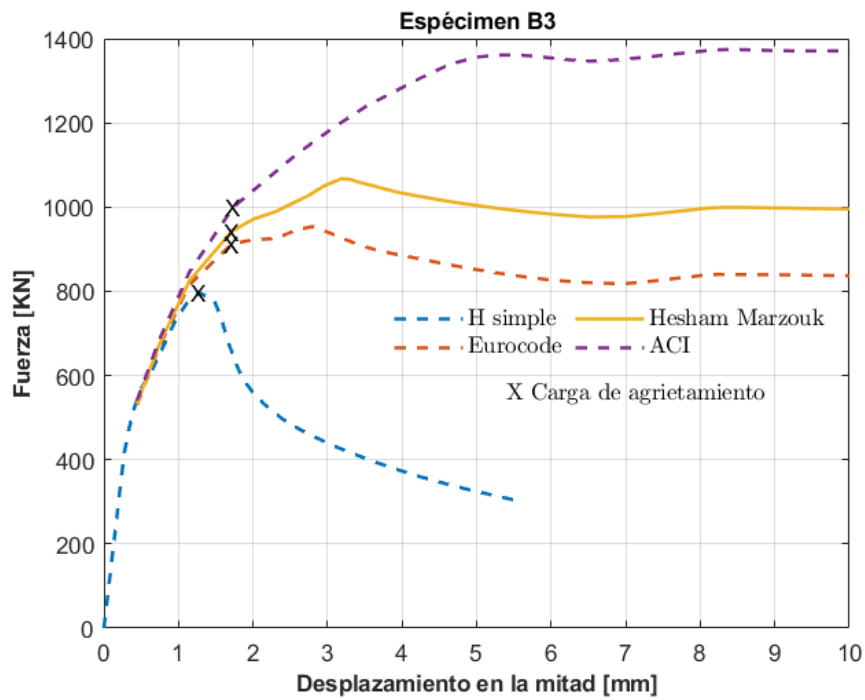


Figura 38. Dovela h=40[cm], $f'c=60$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

Tabla 18. Resultados Dovela-B

Espécimen	Tamaño h x b [cm]	Acero	Acero [cm ²]	Autor	Cuantía [ρ%]	Esfuerzo máx zona Tensión [Mpa]	Carga de Agrietamiento [KN]
Serie B							
B1	20 x 1500	7 Ø12	7.92	Eurocode 2	0.26%	7.23	244.19
		7 Ø14	10.78	Hesham M	0.36%	7.21	253.52
		7 Ø16	14.07	ACI 318-19	0.47%	7.34	262.39
		0 Ø 0	0	[-]	0.00%	7.23	219.17
B2	30 x 1500	8 Ø14	12.32	Eurocode 2	0.27%	7.17	529.74
		8 Ø14	16.08	Hesham M	0.36%	7.18	549.25
		8 Ø18	20.36	ACI 318-19	0.45%	7.24	582.66
		0 Ø 0	0	[-]	0.00%	7.16	451
B3	40 x 1500	8 Ø16	16.08	Eurocode 2	0.27%	7.05	911.96
		8 Ø18	20.36	Hesham M	0.34%	7.06	943.17
		8 Ø20	25.13	ACI 318-19	0.42%	7.06	1000.4
		0 Ø 0	0	[-]	0.00%	7.1	796.57

3.2.1.3 Dovela Serie-C

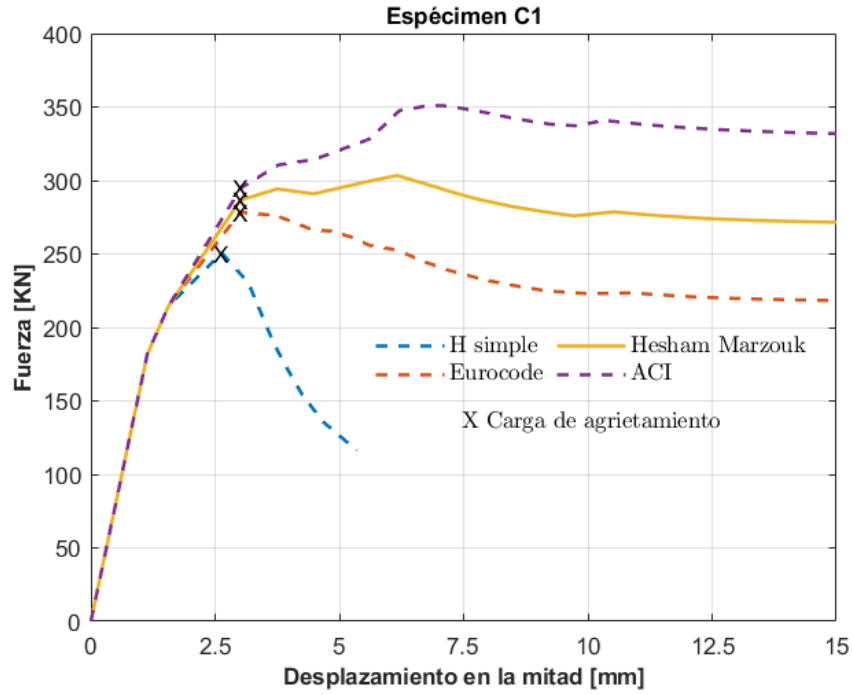


Figura 39. Dovela $h=20$ [cm], $f'c=70$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

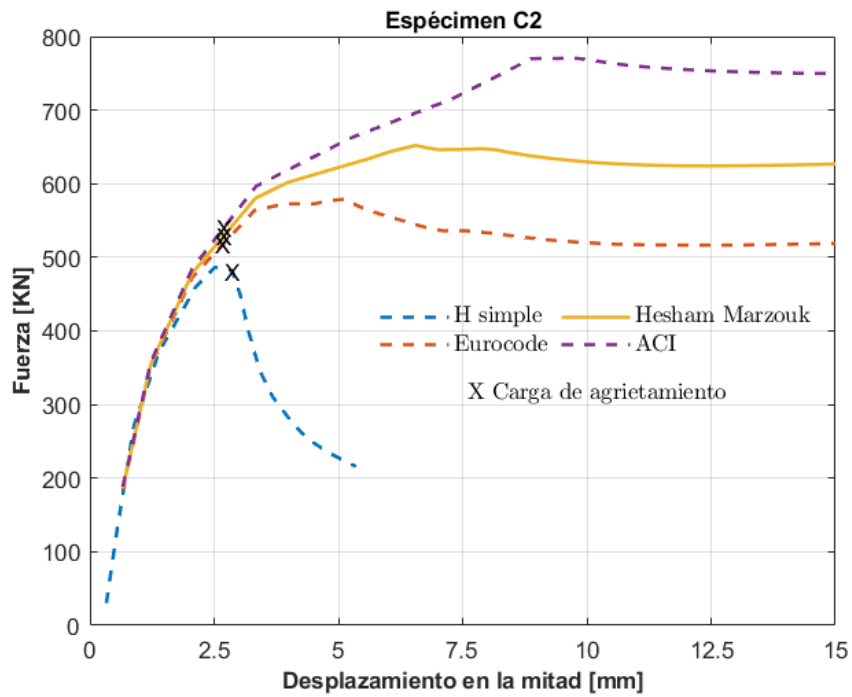


Figura 40. Dovela $h=30$ [cm], $f'c=70$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

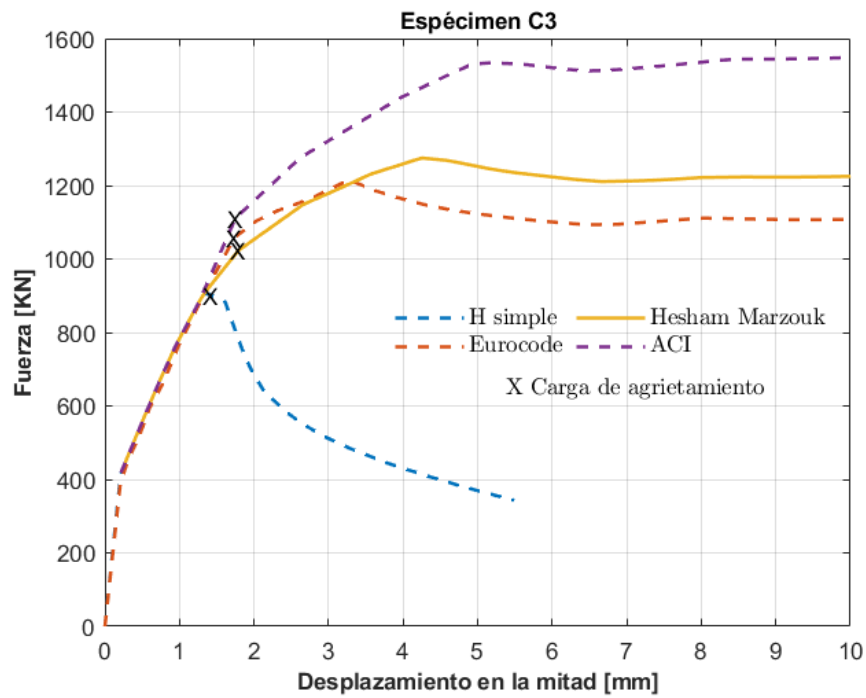


Figura 41. Dovela h=40[cm], $f'c=70$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

Tabla 19. Resultados Dovela-C

Espécimen	Tamaño h x b [cm]	Acero	Acero [cm ²]	Autor	Cuantía [ρ%]	Esfuerzo máx zona Tensión [Mpa]	Carga de Agrietamiento [KN]
Serie C							
C1	20 x 1500	8 Φ12	9.05	Eurocode 2	0.30%	8.23	278.42
		8 Φ14	12.32	Hesham M	0.41%	8.33	286.74
		8 Φ16	16.08	ACI 318-19	0.54%	8.41	294.9
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	8.2	250.73
C2	30 x 1500	9 Φ12	13.85	Eurocode 2	0.31%	7.99	563.96
		9 Φ14	18.10	Hesham M	0.40%	8.04	580.4
		9 Φ16	22.90	ACI 318-19	0.51%	8.04	596.65
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	8.13	486.54
C3	40 x 1500	10 Φ16	20.11	Eurocode 2	0.34%	8.04	1058.2
		9 Φ18	22.90	Hesham M	0.38%	8.09	1022.6
		10 Φ20	31.42	ACI 318-19	0.52%	8.02	1111.4
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	8.08	902.58

3.2.1.4 Dovela Serie-D

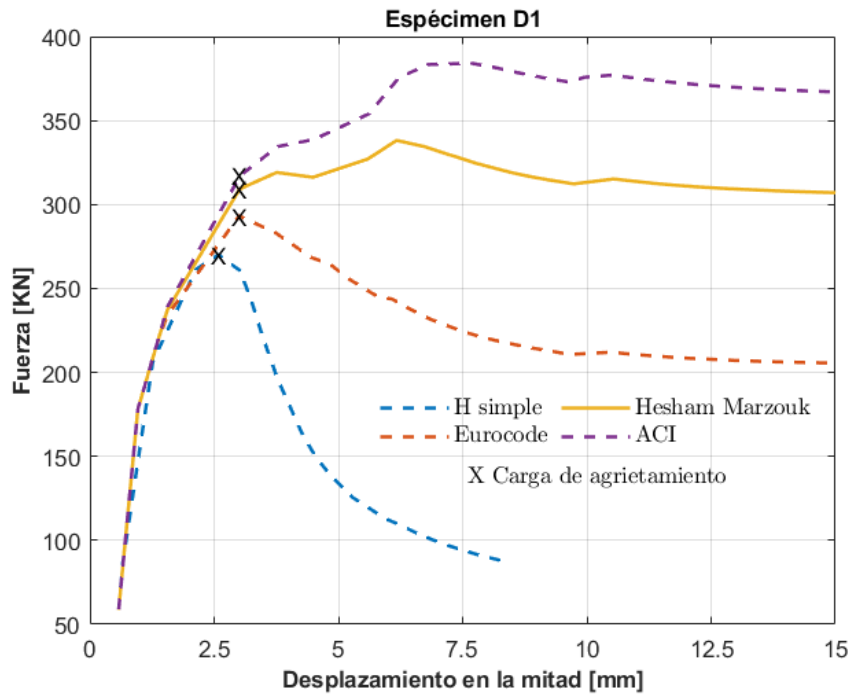


Figura 42. Dovela $h=20$ [cm], $f'c=80$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

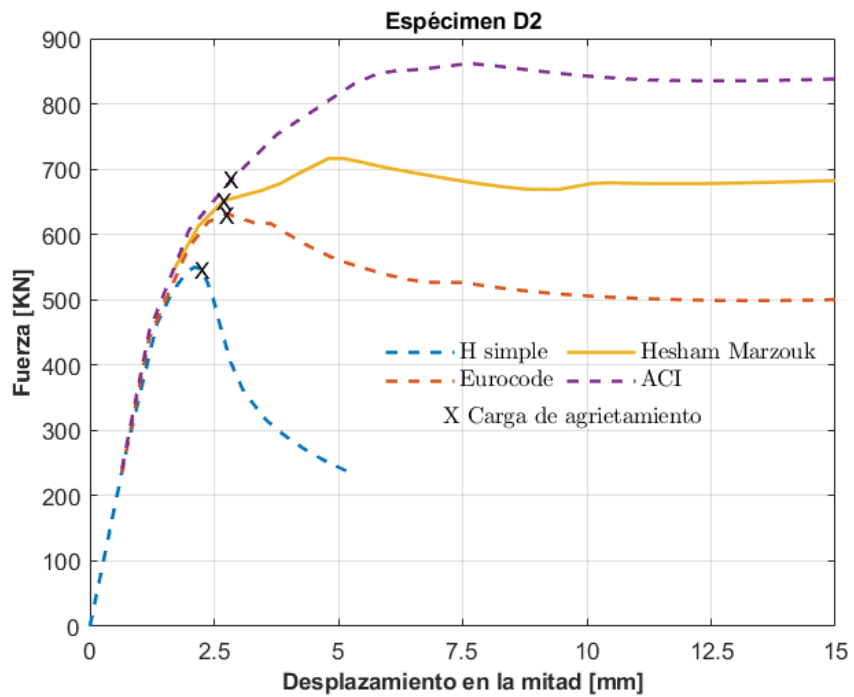


Figura 43. Dovela $h=30$ [cm], $f'c=80$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

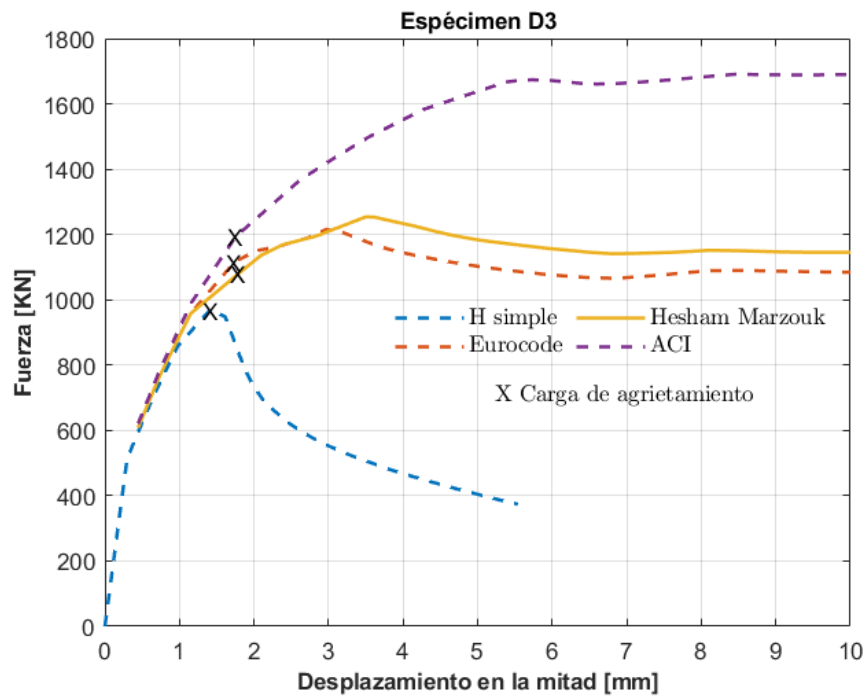


Figura 44. Dovela h=40[cm], $f_c' = 80$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

Tabla 20. Resultados Dovela-D

Espécimen	Tamaño h x b [cm]	Acero	Acero [cm ²]	Autor	Cuantía [ρ%]	Esfuerzo máx zona Tensión [Mpa]	Carga de Agrietamiento [KN]
Serie D							
D1	20 x 1500	7 Ø14	10.78	Eurocode 2	0.30%	8.83	293.22
		7 Ø16	14.07	Hesham M	0.34%	9.03	309.28
		7 Ø18	17.81	ACI 318-19	0.57%	9.1	317.13
		0 Ø 0	0	[-]	0.00%	9.07	270.11
D2	30 x 1500	8 Ø14	12.32	Eurocode 2	0.27%	8.61	631.56
		8 Ø16	16.08	Hesham M	0.36%	8.67	651.76
		8 Ø20	25.13	ACI 318-19	0.56%	8.69	684.58
		0 Ø 0	0	[-]	0.00%	8.56	546.5
D3	40 x 1500	9 Ø16	18.10	Eurocode 2	0.30%	8.64	1114.9
		8 Ø18	20.36	Hesham M	0.34%	8.66	1079.3
		9 Ø22	34.21	ACI 318-19	0.57%	8.69	1193.2
		0 Ø 0	0	[-]	0.00%	8.67	969.16

3.2.1.5 Dovela Serie-E

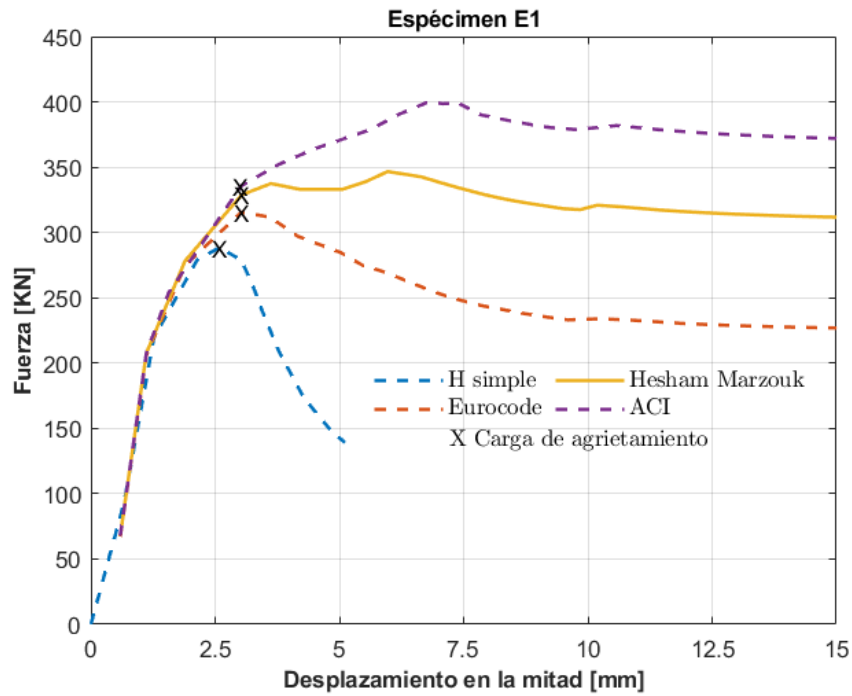


Figura 45. Dovela h=20[cm], $f'c=90$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

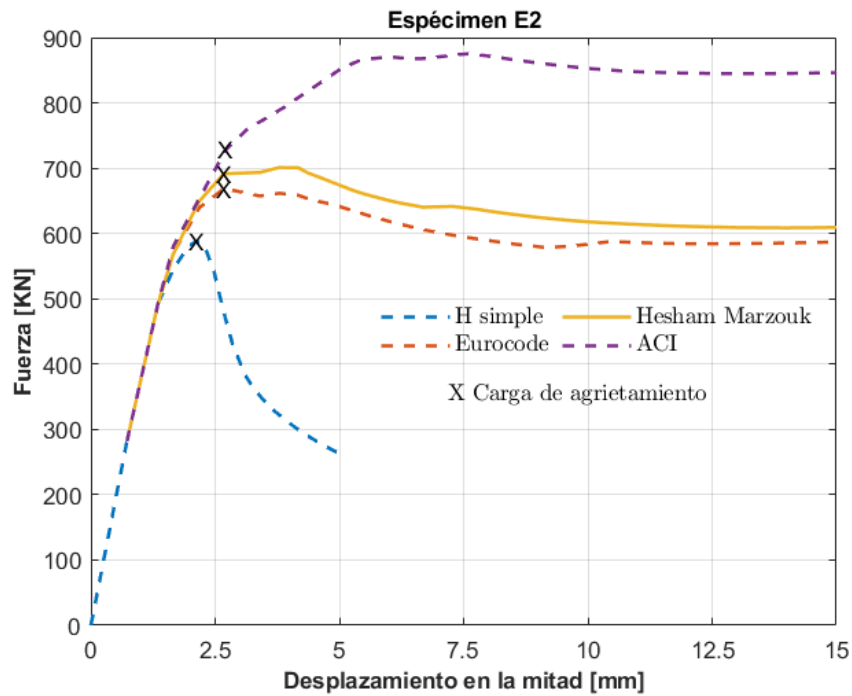


Figura 46. Dovela h=30[cm], $f'c=90$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

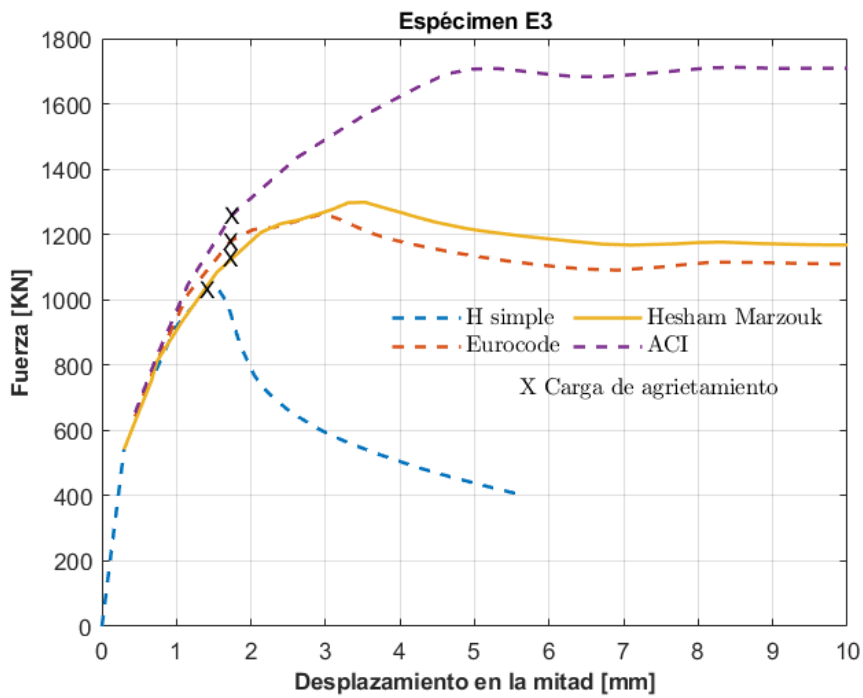


Figura 47. Dovela h=40[cm], $f'c=90$ [MPa].

Elaborado por: Washington Morocho

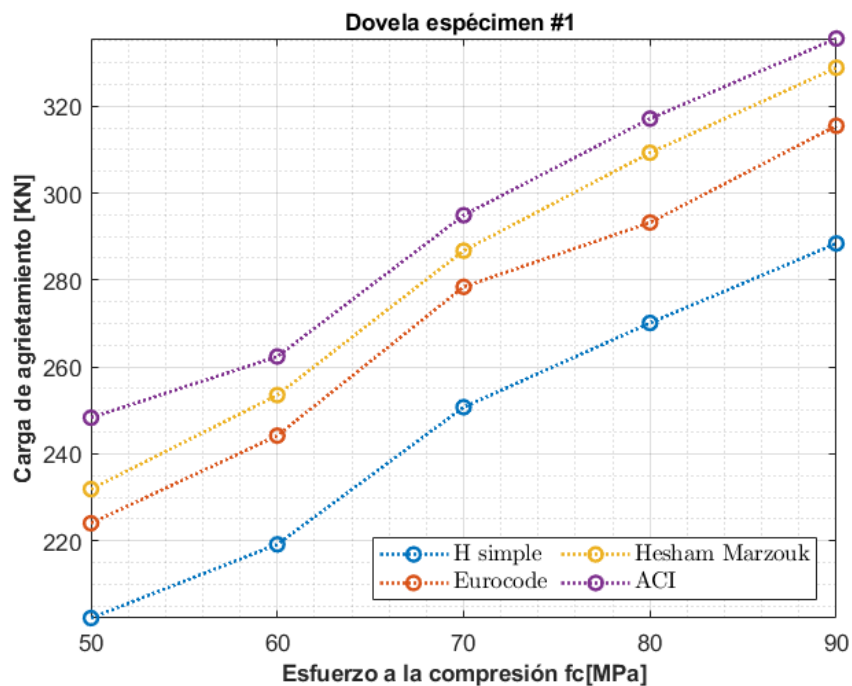
Tabla 21. Resultados Dovela-E

Espécimen	Tamaño h x b [cm]	Acero	Acero [cm ²]	Autor	Cuantía [ρ%]	Esfuerzo máx zona Tensión [Mpa]	Carga de Agrietamiento [KN]
Serie E							
E1	20 x 1500	7 Φ14	10.78	Eurocode 2	0.36%	9.65	315.49
		7 Φ16	14.07	Hesham M	0.47%	9.8	328.85
		7 Φ18	17.81	ACI 318-19	0.59%	9.76	335.56
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	9.66	288.4
E2	30 x 1500	8 Φ14	12.32	Eurocode 2	0.27%	9.49	668.9
		8 Φ16	16.08	Hesham M	0.36%	9.48	691.45
		8 Φ20	25.13	ACI 318-19	0.56%	9.42	728.83
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	9.43	587.99
E3	40 x 1500	9 Φ16	18.10	Eurocode 2	0.30%	9.52	1181.9
		8 Φ18	20.36	Hesham M	0.34%	9.47	1083.6
		9 Φ22	34.21	ACI 318-19	0.57%	9.46	1262
		0 Φ 0	0	[-]	0.00%	9.65	1035.8

3.2.2 Comparación entre ecuaciones propuestas de acero mínimo con resultados computacionales

3.2.2.1 Representaciones graficas de la carga de agrietamiento vs esfuerzo a la compresión con diferentes cuantías

En las Figura 48 se trazan las curvas carga de agrietamiento– esfuerzo a la compresión para cada cuantía establecida y tamaño. Todos los resultados de las pruebas muestran que la carga de agrietamiento aumento a medida que su resistencia a la compresión aumenta. El Espécimen #3 (Hesham M) existe un salto negativo en 70 y 80 [MPa], esto se debe a que se tiene menos número de varillas.



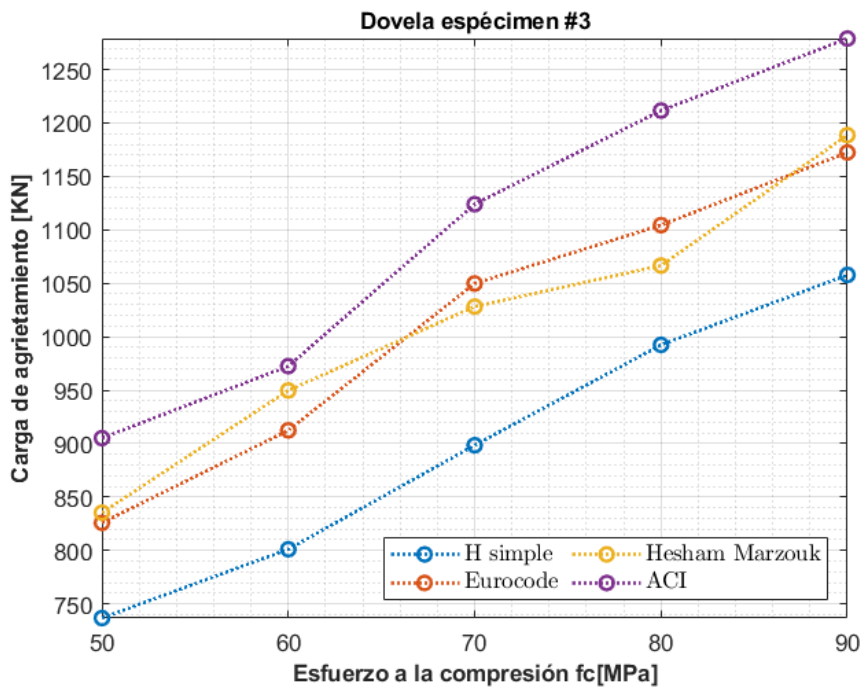
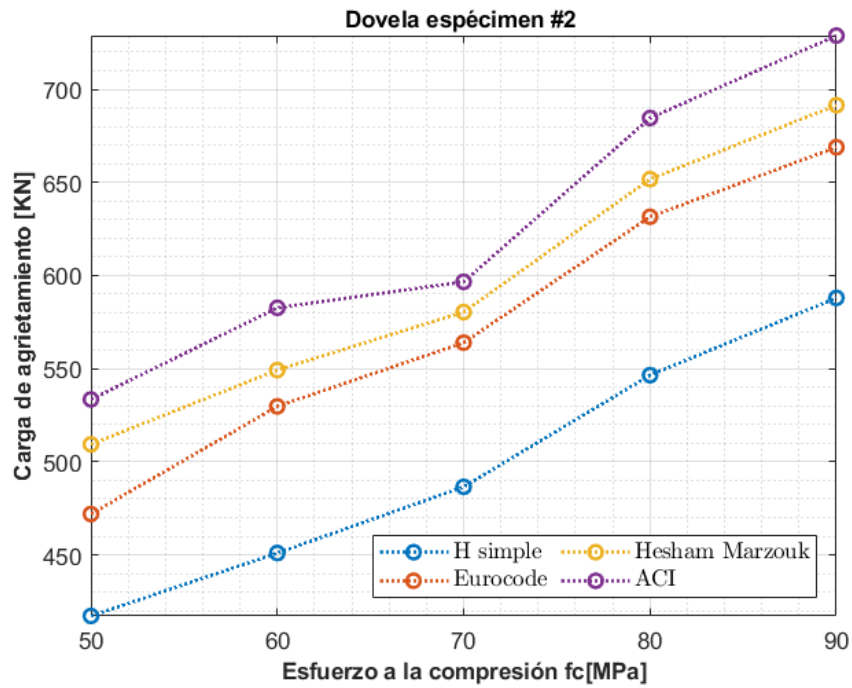
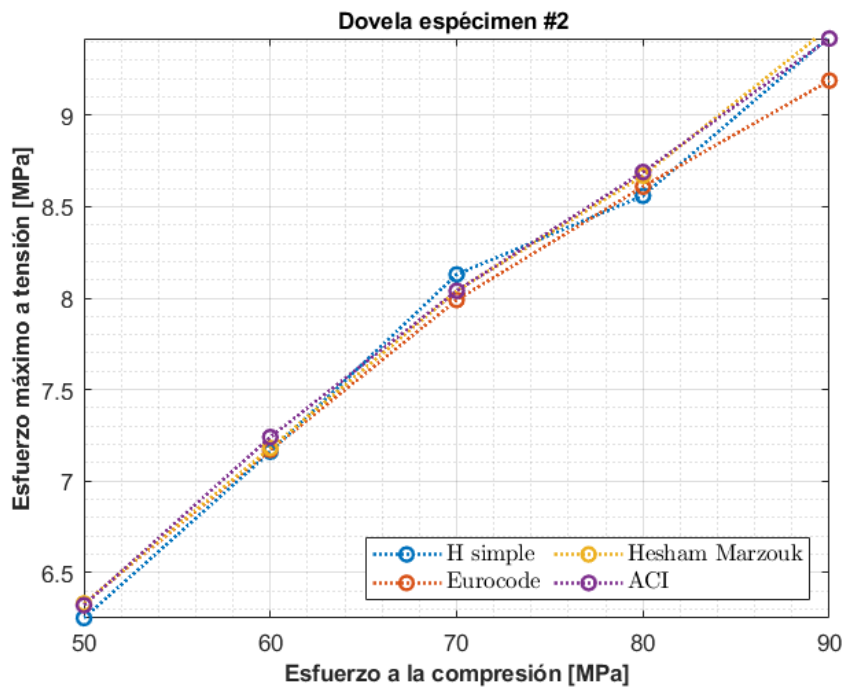
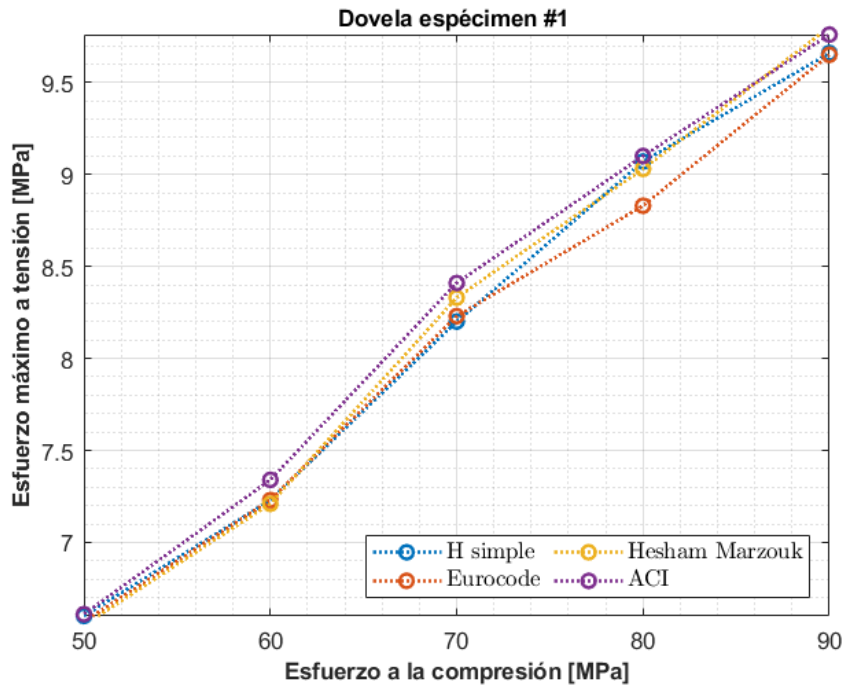


Figura 48. Comparación de cargas de agrietamiento vs esfuerzo a la compresión.

Elaborado por: Washington Morocho

3.2.2.2 Representaciones graficas de esfuerzo máximo a tensión vs esfuerzo a la compresión con diferentes cuantías

Los resultados de la Figura 49, evidencian una gran similitud entre el comportamiento a la tracción de las probetas entre cada serie. Es decir, la influencia de colocar acero no tiene una mejora significativa en el esfuerzo a tracción del hormigón.



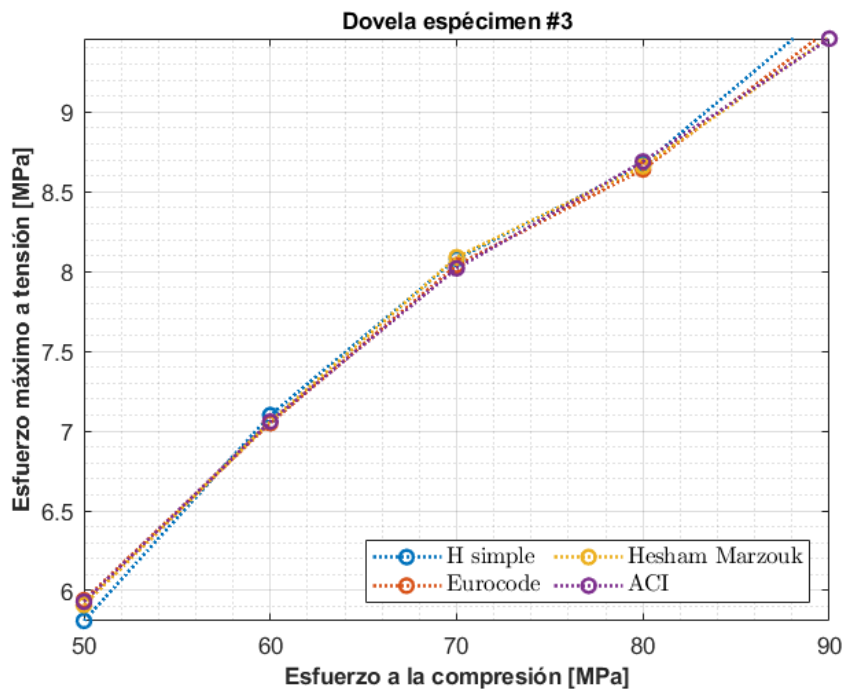


Figura 49. Comparación de esfuerzos máximo a tensión vs esfuerzo a la compresión.

Elaborado por: Washington Morocho

3.2.3 Propuesta de cuantía mínima para dovelas

Es importante que la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) incluya una sección específica de diseño de estructuras especiales debido a que estas estructuras presentan requisitos únicos como el acero mínimo. Las estructuras especiales, como túneles, tienen características específicas que deben ser consideradas durante la fase de diseño y construcción para garantizar su seguridad, funcionalidad en toda su vida útil y control de grietas.

Al incluir una sección dedicada al acero mínimo a flexión estructuras como las dovelas de hormigón armado, se puede proporcionar una guía para calcular dicho parámetro. En base a los resultados de los modelos computacionales, parámetros descritos en este documento y geometrías, se propone la ecuación de Hesham Marzouk, ya que se evidencia que existe una transición cercana de los esfuerzos del concreto hacia el acero como lo muestran las Figuras 33-47.

La Figura 50 es un ábaco que se implementó para simplificar el cálculo la cuantía mínima de acero a flexión en estructuras de concreto armado. Sin embargo, el cálculo de la cuantía mínima de acero puede ser complejo y requiere una serie de ecuaciones, implicaciones y factores que pueden variar de un proyecto a otro. El uso del ábaco simplifica este proceso

al proporcionar una herramienta visual que permite determinar rápidamente la cuantía mínima de acero requerida en función de los parámetros de esfuerzo a la compresión y altura. Donde se garantiza que la cuantía de acero sea adecuada para la estructura sin tener que recurrir a cálculos más complejos, ni experimentación a escala real.

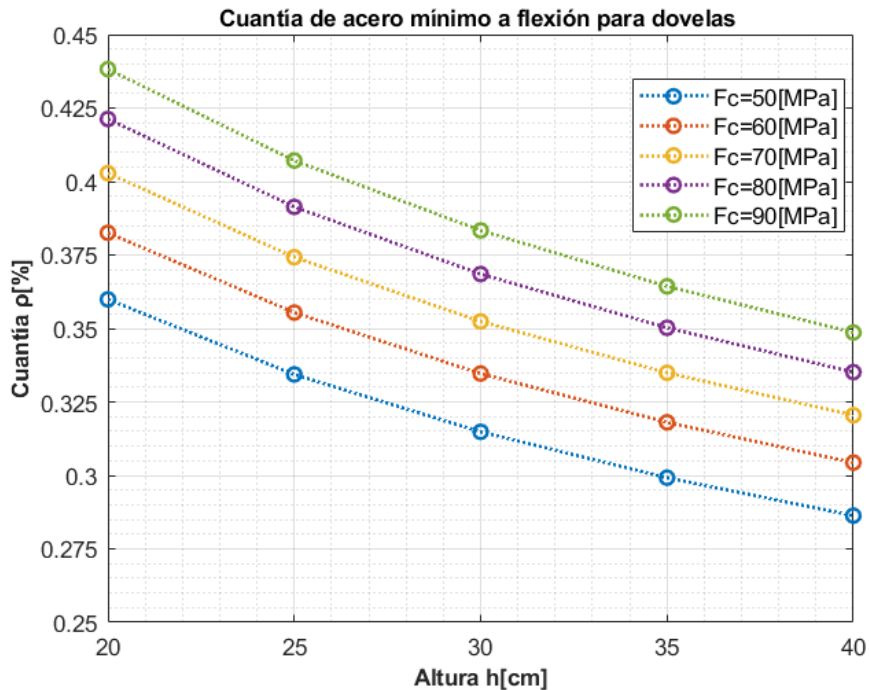


Figura 50. Cuantía mínima para dovelas de alta resistencia

Elaborado por: Washington Morocho

3.3 Conclusiones

En esta investigación se estudió la relación del acero mínimo en dovelas prefabricadas para túneles hidráulicos con hormigón armado de alta resistencia, mediante la simulación numérica utilizando el software ANSYS. Los aspectos más importantes en base a los modelos computacionales de esta investigación son:

- En el contexto de dovelas prefabricadas con hormigón de alta resistencia, el código de diseño americano ACI, sobreestima la relación de cuantía mínima de acero requerida en las dovelas. Mientras que el código europeo Eurocode subestima la cuantía mínima lo que resulta en una cuantía insegura. La cuantía propuesta por Hesham Marzouk es óptima para calcular acero mínimo en dovelas de hormigón reforzado de 20, 30 y 40 [cm].

- Se puede evaluar la cuantía mínima de acero en dovelas de hormigón reforzado utilizando el procedimiento ilustrado en la Figura 50 de esta investigación, como una alternativa a las fórmulas propuestas en los códigos de diseño extranjeros.
- A medida que aumenta el esfuerzo a la compresión, se requiere una mayor cuantía de acero, debido a que los esfuerzos de tracción son mayores antes del agrietamiento por flexión. No obstante, la altura es un parámetro significativo que también debe considerarse al estimar la cuantía mínima.
- La cuantía mínima de acero tiende a ser inversamente proporcional a la profundidad del elemento estructural y directamente proporcional a la resistencia a la compresión del hormigón, esto se debe al efecto lo cual está en total correspondencia con lo planteado por (Hesham Marzouk,2009).
- Las fórmulas seleccionadas en esta investigación, especialmente los códigos de diseño extranjeros tienden a ser erróneas debido a que su enfoque se centra en elementos sin curvas.
- El modelo constitutivo usado para el hormigón de las dovelas define el modelo de microplano de daño y plasticidad planteado por de (Zreid & Kaliske,2018), lo cual es capaz de captar la respuesta estructural bajo diferentes estados de carga como: tensión, compresión, impacto, cargas cíclicas, etc.
- El acero de refuerzo se implementó el modelo constitutivo de Dodd – Restreppo que corresponde a un modelo isotrópico multi lineal con un comportamiento de endurecimiento.
- Para las dovelas sin refuerzo, era evidente pronosticar el fallo frágil ocurra por el agrietamiento producto de la flexión. Donde se resalta la influencia significativa de la rigidez a flexión de acero, donde se observa un aporte de alrededor de 15% más de la capacidad al agrietamiento de la dovela.
- Los resultados obtenidos de las dovelas resaltan que a mayor altura y esfuerzo a la compresión la fragilidad aumentaba. Es decir, la deformación en la mitad era menor al agrietarse, lo cual, son confirmados por (Hesham Marzouk,2009).
- Los modelos computacionales pueden generar información complementaria a los datos obtenidos en ensayos de laboratorio. Por ejemplo, datos de esfuerzos del hormigón, del acero y daño.

- El modelamiento numérico mediante el FEM es una técnica difícil y requiere un alto grado de sutileza para obtener un resultado significativo. No obstante, si se realiza correctamente los análisis tomando en cuenta leyes constitutivas que se aproximen al comportamiento real de cada elemento nos puede arrojar información precisa sobre el comportamiento estructural.

3.4 Recomendaciones

- Realizar ensayos de laboratorio como: compresión uniaxial y biaxial, tensión axial, cíclicos del concreto de alta resistencia, a fin de obtener los parámetros necesarios para definir la ley constitutiva empelada más precisa y cercana a los hormigones en Ecuador, para ser empleada en futuras investigaciones numérico-computacionales.
- Ampliar el estudio de sistemas más complejos (juntas de segmentos y anillos) que incorporen hormigón de alta resistencia, para entender la influencia en la respuesta estructural del sistema con respecto al acero mínimo.
- Incluir en estudios posteriores un análisis comparativo de la adherencia del concreto acero en la respuesta estructural.
- Definir claramente los objetivos del estudio. Por ejemplo, se podría buscar el diseño de la dovela o evaluar la seguridad estructural. En este caso, fue únicamente el análisis post – agrietamiento.
- Es importante elegir el modelo constitutivo adecuado y el software para el estudio, y verificar su capacidad para representar el comportamiento no lineal del material.
- Los parámetros de entrada en el modelo deben ser cuidadosamente seleccionados y validados, ya sea por investigaciones previas, datos experimentales o soluciones analíticas. Se recomienda utilizar datos experimentales previos para calibrar el modelo.
- Se recomienda documentar adecuadamente todas las etapas del proceso de simulación numérica, incluyendo la selección de geometrías, condiciones de fronteras, parámetros, modelos constitutivos, los resultados obtenidos, discusiones y las conclusiones del estudio.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Eshraghi and S. Zare, "Face Stability Evaluation of a TBM-Driven Tunnel in Heterogeneous Soil Using a Probabilistic Approach," *International Journal of Geomechanics*, vol. 15, p. 4014095, Nov. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000452.
- [2] A. Galván, F. Peña, and J. Moreno, "Effect of TBM Advance in the Structural Response of Segmental Tunnel Lining," *International Journal of Geomechanics*, vol. 17, Nov. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000941.
- [3] F. Peña, A. Galván Chávez, and R. Meli, "Comportamiento estructural de juntas entre dovelas de concreto prefabricado para túneles," *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, vol. 3, pp. 2–18, 2012.
- [4] J. Zhang, X. Liu, T.-Y. Ren, Y. Yuan, and H. Mang, "Structural behavior of reinforced concrete segments of tunnel linings strengthened by a steel-concrete composite," *Compos B Eng*, vol. 178, p. 107444, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107444.
- [5] T. Asakura and Y. Kojima, "Tunnel maintenance in Japan," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 161–169, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00024-5).
- [6] S. Abbas and M. L. Nehdi, "Mechanical Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Tunnel Lining Segments," *Materials*, vol. 14, no. 9, 2021, doi: 10.3390/ma14092378.
- [7] I. Beuckeleer, T. Molken, A. Gysel, and E. Gruyaert, "FEM modelling of FRP reinforced concrete with a shell element approach," 2022, pp. 236–245. doi: 10.1201/9781003316404-29.
- [8] S. Abbas, M. L. Nehdi, and M. A. Saleem, "Ultra-High-Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges," *Int J Concr Struct Mater*, vol. 10, no. 3, pp. 271–295, 2016, doi: 10.1007/s40069-016-0157-4.
- [9] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*, 2019th ed. Farmington Hills, 2019.
- [10] Eurocode 2, *Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. 2004.
- [11] E. R. and H. Marzouk, "New Formula to Calculate Minimum Flexure Reinforcement for Thick High-Strength Concrete Plates," *ACI Struct J*, vol. 106, no. 5, Oct. 2009, doi: 10.14359/51663106.
- [12] J. L. Zhang, C. Vida, Y. Yuan, C. Hellmich, H. A. Mang, and B. Pichler, "A hybrid analysis method for displacement-monitored segmented circular tunnel rings," *Eng Struct*, vol. 148, pp. 839–856, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.049.
- [13] X. Liu, Y. Bai, Y. Yuan, and H. A. Mang, "Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of continuously jointed segmental tunnel linings," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 12, no. 10, pp. 1364–1379, Oct. 2016, doi: 10.1080/15732479.2015.1117115.

- [14] I. QUILLUPANGUI, "Modelamiento discreto no lineal de la respuesta estructural de elementos de hormigón armado reforzados con acero de alta resistencia utilizando tecnología de elemento finito y elasto-plasticidad.," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, Ecuador, 2020. Accessed: Sep. 09, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21291>
- [15] J.-L. Zhang, X. Liu, T.-Y. Ren, Y.-M. Shi, and Y. Yuan, "Numerical analysis of tunnel segments strengthened by steel–concrete composites," *Underground Space*, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.UNDSP.2022.02.004.
- [16] A. Galván and F. Peña, "Structural behaviour of segmented tunnels taking into account the interaction between rings," Nov. 2013. doi: 10.13140/2.1.1665.3763.
- [17] A. Luttkiholt, "Ultimate limit state analysis of a segmented tunnel lining—Results of full-scale tests compared to finite element analyses," Master's thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2007.
- [18] Y. Zhu and C. Liu, "Study on the Influence of Internal Water Pressure on the Internal Force of Circular Hydraulic Tunnel Lining," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/app122111271.
- [19] P. Wriggers, *Nonlinear Finite Element Methods*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] I. Zreid and M. Kaliske, "A gradient enhanced plasticity–damage microplane model for concrete," *Comput Mech*, vol. 62, Dec. 2018, doi: 10.1007/s00466-018-1561-1.
- [21] ANSYS, "ansyshelp." 1AD. [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/ans_elem/Hlp_E_CPT215.html?q=cpt215
- [22] ANSYS, "ansyshelp." 1AD. [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/ans_elem/Hlp_E_REINF264.html?q=REINF
- [23] H. X. Alejandro Cabrera, "Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador f_c : 21, 24, 28, 35 MPa.," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, Ecuador, 2014. Accessed: Dec. 09, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8627>
- [24] H. Jiang and J. Zhao, "Calibration of the continuous surface cap model for concrete," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 97, pp. 1–19, May 2015, doi: 10.1016/J.FINEL.2014.12.002.
- [25] B. R. Indriyantho, I. Zreid, R. Fleischhauer, and M. Kaliske, "Modelling of High Velocity Impact on Concrete Structures Using a Rate-Dependent Plastic-Damage Microplane Approach at Finite Strains," *Materials 2020, Vol. 13, Page 5165*, vol. 13, no. 22, p. 5165, Nov. 2020, doi: 10.3390/MA13225165.
- [26] M. Alhusban and A. Parvin, "Finite Element Analysis of Axially Loaded RC Walls with Openings Strengthened Using Textile Reinforced Mortar for Sustainable Structures," *Buildings*, vol. 12, p. 1993, Jan. 2022, doi: 10.3390/buildings12111993.

- [27] Z. Bazant and G. Pijaudier-Cabot, "Measurement of Characteristic Length of Nonlocal Continuum," *Journal of Engineering Mechanics-asce - J ENG MECH-ASCE*, vol. 115, Dec. 1989, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:4(755).
- [28] F. A. Pachano Álvarez, "Determinación de parámetros mecánicos para modelos no lineales de mampostería de relleno en pórticos de hormigón armado obtenidos de manera experimental," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, Ecuador, 2018. Accessed: Dec. 10, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19734>
- [29] A. de la Fuente, A. Blanco, P. Pujadas, and A. Aguado, "Optimal design of precast fibre reinforced concrete segments for tunnel support," *Hormigón y Acero*, vol. 65, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.hya.2014.11.002.
- [30] B. Chiaia, A. Fantilli, and P. Vallini, "Evaluation of minimum reinforcement ratio in FRC members and application to tunnel linings," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 40, pp. 593–604, Jul. 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9166-0.
- [31] A. Nilson, D. Darwin, and C. Dolan, *Design of concrete structures*, McGraw-Hill Higher., vol. 13. Boston, 2004.
- [32] D. M. Michael P. Collins and James G. Macgregor, "Structural Design Considerations for High-Strength Concrete," *Concrete International*, vol. 15, no. 5, 1993.