

Alan Eduardo Martínez Martínez

“Comportamiento de extremos recortados  
de viga postensadas”

2022



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

## “Comportamiento de extremos recortados de viga postensadas”

Tesis

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Alan Eduardo Martínez Martínez

Dirigido por:

Dra. Jatziri Yunuén Moreno Martínez

Co-Director:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Querétaro, Qro. a 31 de mayo del 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Comportamiento de extremos recortados de viga  
postensadas

**por**

Alan Eduardo Martínez Martínez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGMAC-293047



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Estructuras)

“Comportamiento de extremos recortados de viga postensadas”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Alan Eduardo Martínez Martínez

Dirigido por:

Dra. Jatziri Yunuén Moreno Martínez

Co-dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Dra. Jatziri Yunuén Moreno Martínez  
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Vocal

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno  
Suplente

Dr. Mauricio Martínez Alanís  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (mayo, 2023)

México

## RESUMEN

Las conexiones de vigas de concreto prefabricado a través de extremos recortados han probado ser una alternativa segura en la construcción de puentes carreteros debido a sus ventajas como son la reducción de la sección transversal, claros más largos entre columnas y mayor resistencia a fuerza cortante.

En este trabajo se describe el procedimiento para realizar un modelo de elementos finitos en 3D, que permitirá obtener el comportamiento de conexiones de vigas de extremos recortados presforzadas en condición de carga de servicio. El modelo contempla la no linealidad de los materiales. La simulación muestra el agrietamiento en la zona de la esquina re-entrante.

El modelo se calibró con pruebas experimentales obtenidas de la literatura. El espécimen de referencia cuenta con un postensado del 74% de flexión del elemento, fue ensayado bajo carga simétrica de servicio (180 kN). La curva carga-desplazamiento del modelo mostró resultados satisfactorios con respecto a la prueba experimental. El siguiente paso fue proponer distintas configuraciones de acero de refuerzo y porcentaje de postensado con el objetivo de evaluar la propuesta que mejor contribuya a retardar el agrietamiento en la esquina re-entrante. Para esto se realizaron tres modelos con porcentaje de postensado del 29%, 52% y 62% respectivamente.

El modelo con mejor desempeño fue el de 62% de postensado que cuenta con barras en diagonal, permitiendo descongestionar el acero de refuerzo en el extremo recortado tanto a flexión como a cortante. Esta configuración de refuerzo retardó la aparición de la grieta en la esquina re-entrante bajo carga de servicio y un mejor comportamiento en la gráfica carga-desplazamiento ya que no presentó una pérdida de rigidez durante la aplicación total de la carga en comparación de los modelos restantes.

**(Palabras clave:** Viga de extremos recortados, Agrietamiento de concreto, Viga de concreto presforzado, Análisis no-lineal)

## ABSTRACT

Precast concrete beam connections through dapped ends have proven to be a safe alternative in the construction of highway bridges due to its advantages such as reduced cross section, longer spans between columns, and greater resistance to shear force.

This document describes the procedure to carry out a 3D finite element model, which will allow obtaining the behavior of prestressed dapped-end beam connections under service load conditions. The model contemplates the non-linearity of the materials. The simulation shows the cracking in the re-entrant corner zone.

The model was calibrated with experimental tests obtained from the literature. The reference specimen has a post-tensioning of 74% bending of the element, it was tested under symmetrical service load (180 kN). The load-displacement curve of the model showed satisfactory results with respect to the experimental test. The next step was to propose different configurations of reinforcing steel and post-tensioning percentage in order to evaluate the proposal that best contributes to retarding cracking in the re-entrant corner. For this, three models were made with a post-tensioning percentage of 29%, 52% and 62% respectively.

The model with the best performance was the 62% post-tensioning model that has diagonal bars, allowing the reinforcing steel at the dapped end to be relieved both in bending and in shear. This configuration of reinforcement delayed the appearance of the crack in the re-entrant corner under service load and a better behavior in the load-displacement graph since it did not present a loss of stiffness during the total application of the load in comparison with the remaining models.

**(Keywords:** Dapped-end beams, Concrete cracking, Prestressed concrete beam, Nonlinear analysis)

## DEDICATORIAS

*A mis padres, Remigio y Ma. de Jesús.  
Ustedes han sido el pilar de mi vida, gracias por su apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico de la beca para poder continuar con mi preparación como profesional.

Al Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, por su disposición de ayudar en diferentes percances durante mi estancia en la maestría, por haber sido el Director de tesis y por hacer posible la autorización de mi asesora externa para el tema de investigación.

A la Dra. Jatziri Yunuén Moreno Martínez, por su disposición de apoyarme con el desarrollo de un nuevo tema de investigación y darme consejos que me permitieron desarrollar mi tesis de maestría.

A todos mis profesores de la Maestría en Ciencias Estructuras de la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme sus valiosas enseñanzas, en especial, al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, al Dr. Moisés Arroyo Contreras (†) y al Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández (coordinador de la Maestría en Estructuras)

## ÍNDICE

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Objetivo General .....	4
1.2	Metodología .....	4
1.2.1	Investigación preliminar .....	4
1.2.2	Modelo de validación .....	5
1.2.3	Modelos de estudio.....	5
1.2.4	Recomendaciones de análisis y diseño .....	6
1.3	Contenido Capitular.....	6
Capítulo 2	ANTECEDENTES Y GENERALIDADES.....	7
2.1	Evolución de la Conexión de Viga de Extremo Recortado .....	7
2.2	Análisis de Elemento Finito en Estructuras de Concreto Reforzado .....	19
2.3	Método de Diseño del PCI .....	24
2.3.1	Expresiones para el cálculo de refuerzo para cada tipo de falla.....	26
Capítulo 3	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO.....	29
3.1	Modelo de validación.....	29
3.1.1	Estudio experimental .....	29
3.1.2	Fase numérica .....	35
3.2	Detalles geométricos.....	35
3.3	Modelo de elemento finito .....	37
3.3.1	Tipos de elementos .....	38
3.3.2	Elementos de contacto .....	42
3.4	Propiedades mecánicas de los materiales .....	44
3.4.1	Modelo del material Concreto.....	44
3.4.2	Modelo del material Acero .....	47
3.5	Condiciones de Frontera y Protocolo de Carga .....	51



3.5.1	Carga de servicio simétrica .....	52
3.6	Calibración .....	53
3.6.1	Mallado .....	53
3.7	Validación.....	54
Capítulo 4	ANÁLISIS DE MODELOS DE CONEXIONES DE EXTREMO RECORTADO.....	56
4.1	Elección y descripción general de los modelos en estudio .....	56
4.2	Modelos de elemento finito .....	57
4.3	Propiedades de los materiales .....	59
4.4	Protocolo de carga .....	59
4.4.1	Aplicación del postensado .....	59
4.4.2	Aplicación de carga de servicio .....	60
4.5	Respuesta Carga-Desplazamiento nuevos modelos .....	63
4.6	Discusión.....	65
Capítulo 5	CONCLUSIONES .....	67
	REFERENCIAS.....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de conexiones. 1a: Extremos recortado suspendidas;2b: Conexión sobre mensuelas;3c:Conexión Oculta .....	1
Figura 2 Viga extremo recortado.....	2
Figura 3 Grietas potenciales según la falla en una viga con extremos recortados fuente (PCI, 2004) .....	3
Figura 4 Refuerzo Típico del extremo recortado y ubicación potencial de las grietas debido a tensión diagonal. (Mattock & Chan, 1979) .....	8
Figura 5 Detalle del uso de colgantes a 45 ° y geometría de la viga de extremo recortado. (Liem, 1983) .....	8
Figura 6 Configuraciones de acero en especímenes. (Mattock & Theryo, 1986).....	9
Figura 7 Plano del acero dulce de refuerzo. (Nanni & Huang, 2002).....	11
Figura 8 Geometría del espécimen y detalle del refuerzo. (Wang et al., 2005) .....	12
Figura 9 Aplicación del refuerzo de fibra de carbono. (Huang & Nanni, 2006) .....	12
Figura 10 Detalle del armado de los especímenes. (Brinkley, 2013).....	14
Figura 11 Comparación analítico-experimental de la carga de falla esperada contra la obtenida en el ensaye (Aswin et al., 2014).....	15
Figura 12 Geometría y armado del espécimen ensayado. (Lu et al., 2015) .....	17
Figura 13 Mallado de la viga. (Barbosa & Ribeiro, 1998) .....	20
Figura 14 Viga postensada, malla de elementos finitos. (Fanning, 2001).....	21
Figura 15 Mallado del concreto, placa de acero y soporte de acero. (Wolanski, 2004) ...	21
Figura 16 Vigas en estudio. a) Lu et al. (2003); b) Mattock y Chan (1979).....	23
Figura 17 Grietas potenciales de acuerdo al tipo de falla en los extremos recortados (PCI,2004) .....	25
Figura 18 Especimen de laboratorio Instituto de Ingeniería de la UNAM. (Moreno Martínez & Meli, 2014) .....	30
Figura 19 Esquema del espécimen en estudio AutoCAD .....	30
Figura 20 Curvas esfuerzo-deformación del acero.....	31
Figura 21 Habilitado de extensómetros sobre barras de refuerzo. (Moreno Martínez & Meli, 2014) .....	32
Figura 22 Ubicación de Strain gages en el espécimen.....	33
Figura 23 Curva Carga-desplazamiento. (Moreno Martínez & Meli, 2014) .....	34
Figura 24 Relación carga/deformación. (Moreno Martínez & Meli, 2014) .....	34
Figura 25 Acero discreto en el modelo, dimensiones en mm. ....	36

Figura 26 Armado del espécimen, dimensiones en mm.....	36
Figura 27 Elemento SOLID65 Fuente: ANSYS 2009(v.12.0) .....	38
Figura 28 Elemento LINK8 Fuente: ANSYS 2009 (v.12.0) .....	39
Figura 29 Elementos sólidos, SOLID65 .....	40
Figura 30 Orientación del acero disperso dentro del SOLID65 .....	40
Figura 31 Ubicación del acero discreto LINK8 .....	41
Figura 32 Aplicación del postensado, a través del LINK8 .....	41
Figura 33 Geometría CONTA173 Fuente: ANSYS 2009(v.12.0) .....	43
Figura 34 Geometría TARGE170 Fuente: ANSYS 2009(v.12.0) .....	43
Figura 35 Superficie de contacto en el modelo .....	44
Figura 36 Superficie de falla en el espacio de esfuerzo principal $\sigma_{zp}$ ,ANSYS 2009.....	45
Figura 37 Resistencia de la condición agrietada, ANSYS 2009 .....	45
Figura 38 Superficie de Fluencia, Modelo de plasticidad Drucker-Prager, .....	47
Figura 39 Superficie de fluencia de Von Mises, (Wikimedia).....	48
Figura 40 Condiciones de frontera en el modelo.....	51
Figura 41 Elementos para la aplicación de carga.....	52
Figura 42 Dibujo del espécimen, AutoCAD formato .sat .....	54
Figura 43 Mallado del modelo.....	54
Figura 44 Curva Carga-Desplazamiento, prueba experimental vs modelo.....	55
Figura 45 Mallado de modelos.....	58
Figura 46 Acero discreto en modelos.....	58
Figura 47 Forma deformada debido al postensado, P29-PHD .....	60
Figura 48 Primera grieta, modelo P29-PHD.....	60
Figura 49 Agrietamiento final carga de servicio, P29-PHD.....	61
Figura 50 Esfuerzos en el concreto bajo carga de servicio, P29-PHD. ....	61
Figura 51 Esfuerzos en el concreto descarga, P29-PHD. ....	62
Figura 52 Agrietamiento del modelo (Descarga) .....	62
Figura 53 Curva Carga-Desplazamiento, modelos con 74% de postensado.....	63
Figura 54 Curva Carga-Desplazamiento, modelos con postensado y colgantes discretos64	
Figura 55 Curva Carga-Desplazamiento, modelos con parrillas discretas.....	64
Figura 56 Comparación del inicio del Agrietamiento en los modelos.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los materiales .....	32
Tabla 2 Resumen de elementos del modelo P74-PHGD .....	39
Tabla 3 Propiedades del concreto para aplicación al modelo .....	49
Tabla 4 Propiedades del acero para aplicación del modelo .....	50
Tabla 5 Modelos en estudio. ....	57
Tabla 6 Cantidad de elementos y tiempo de solución .....	57
Tabla 7 Propiedades del acero.....	59
Tabla 8 Primer grieta e inicio de agrietamiento en los modelos .....	65

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las estructuras de concreto prefabricado presforzado han tenido un gran auge en la rama de la construcción. Estas estructuras tienen importantes beneficios como lo es la rápida construcción, más resistencia, mayor vida útil, mejor apariencia (Qasim, 2020). Una de las principales formas de unir vigas prefabricadas con otra es a través de la conexión vigas de extremo recortado suspendida (Figura 1a). La ventaja de este tipo de conexión es la reducción de la sección transversal y en consecuencia estructuras más ligeras, claros mayores entre columnas, control de deflexiones y grietas, y una mayor resistencia a la fuerza cortante (Huang P.-C. , 2000).

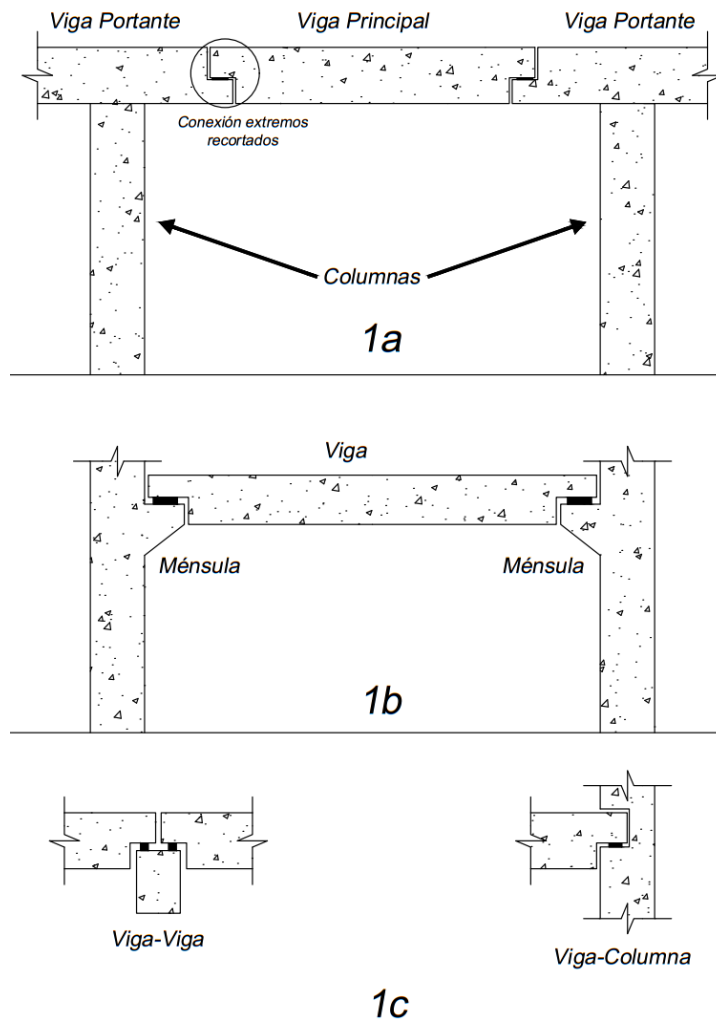


Figura 1 Tipos de conexiones. 1a: Extremos recortado suspendidas; 2b: Conexión sobre mensuelas; 3c: Conexión Oculta

El diseño de la conexión de una viga de extremo recortado es una de las consideraciones más importantes debido a que puede ser considerado como una región del concreto como estáticamente o geoméricamente discontinua (región D) mientras que el resto de la viga pertenece a las regiones B (Bernoulli o Viga). En la región B, el diseño es basado en la teoría de flexión y cortante, y la hipótesis de Bernoulli de que “la sección permanece plana es válida”. En contraste con la región D, debido al cambio de sección, esta hipótesis no es válida y el diseño es basado en un método alternativo como por ejemplo el método de puntal tensor (Desnerck *et al*, 2016).

Es por eso que la forma inusual del extremo recortado concentra considerables esfuerzos en la esquina re-entrante (Figura 2), por lo tanto, ésta es la parte más débil del extremo recortado (Huang P.-C. , 2000). Estos esfuerzos deben ser resistidos en un espacio muy pequeño, por lo que la concentración de acero de refuerzo es considerable. Si el acero de refuerzo no es colocado cerca de la esquina re-entrante, el agrietamiento debido a tensión diagonal se propagará de manera rápida y la falla del elemento será con o sin advertencia alguna. Estas grietas debido a tensión diagonal, aparte de ser visualmente intimidantes pueden además ser factor crucial a la corrosión del acero de refuerzo.

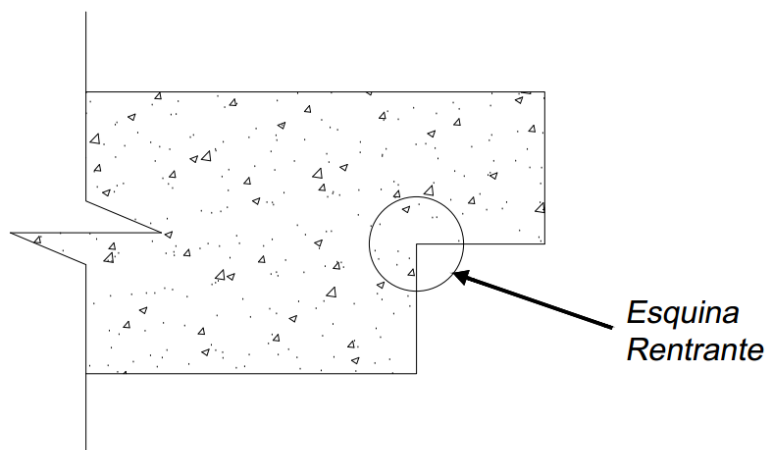


Figura 2 Viga extremo recortado

El análisis y diseño de este tipo de conexiones en México principalmente se recurre al uso de diversas recomendaciones de manuales de diseños internacionales, como el método de diseño del PCI o el Código ACI. Esto conduce al diseño de extremos recortados de manera conservadora.

El diseño del extremo de viga recortada es basado en la teoría de fricción a cortante y requiere el estudio de varios modos de falla potenciales. De acuerdo al libro de diseño Precast/Prestressed Concrete (PCI, por sus siglas en inglés), las vigas con extremos recortados pueden fallar en cualquiera de estos cinco modos (Figura 3):

1. Flexión y tensión axial en el extremo final de la viga
2. Cortante directo en la unión de la zona no recortada y recortada
3. Falla a tensión diagonal en la esquina re-entrante
4. Falla a tensión diagonal en el extremo final de la viga
5. Falla a tensión diagonal en la zona no recortada

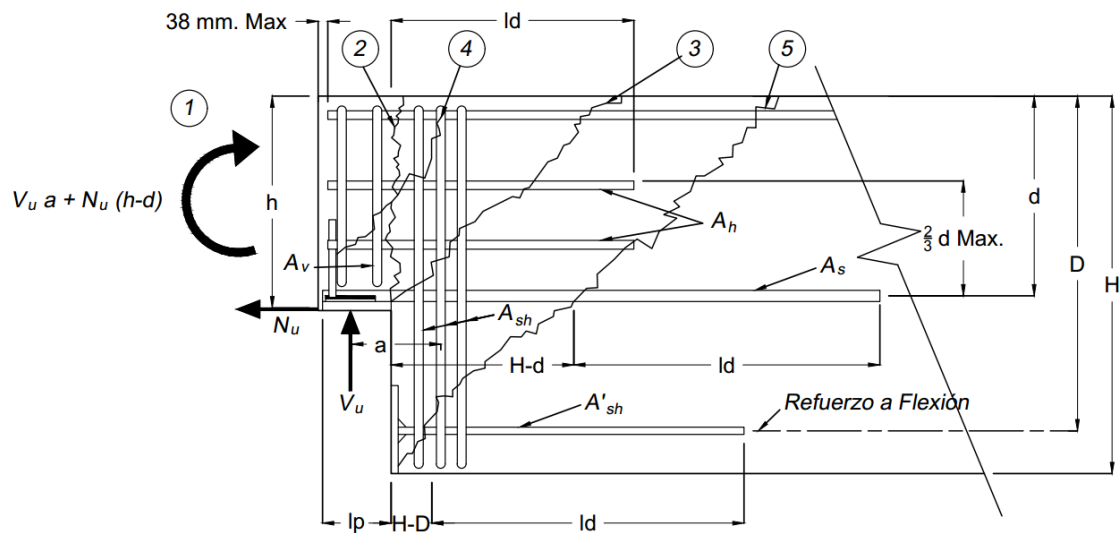


Figura 3 Grietas potenciales según la falla en una viga con extremos recortados fuente (PCI, 2004)

Este trabajo busca proporcionar una alternativa de análisis, que muestre el comportamiento en conjunto del acero de prefuerzo y el concreto reforzado en este tipo de conexión para su comparación en el contexto real. Normalmente la validación de ecuaciones establecidas en la literatura es mediante pruebas experimentales, esta investigación recurre al desarrollo de modelo en 3D en elemento finito para cumplir con esas características.

Gracias al desarrollo computacional, la simulación numérica a través de análisis de elemento finito ha sido más utilizada debido a que es una excelente herramienta de análisis. Aunado a lo anterior esto no sustituye al 100% de las pruebas experimentales, pero con un acertado criterio puede reducirse el número de ensayos evitando posibles errores y ahorrando capital.

La simulación numérica en la práctica profesional es muy limitada ya que se requiere equipo de cómputo con características y capacidades no disponibles en modelos comerciales, además, del tiempo de análisis es considerable. Por lo que se recurren a herramientas de fácil acceso que utilizan modelos simplificados de análisis los cuales pueden estar compuestos desde elementos barra hasta resortes.

Esta investigación se enfoca al estudio del comportamiento de vigas de extremo recortado mediante análisis de elemento finito para derivar recomendaciones.

## **1.1 Objetivo General**

En base a la problemática planteada en la introducción este estudio busca establecer los parámetros para el análisis con modelos de elemento finito para conexiones de extremos recortados de viga mediante el análisis de 4 modelos con distintas configuraciones de acero de refuerzo y porcentaje de presfuerzo bajo la condición de carga vertical simétrica que representa la carga de servicio, específicamente se busca cumplir el siguiente objetivo.

Estudiar el comportamiento del extremo recortado de viga ante carga monótona, mediante análisis de elemento finito.

## **1.2 Metodología**

### ***1.2.1 Investigación preliminar***

En esta parte del estudio se busca dar un panorama general del tema, seleccionar las bases en lo referente a normativa, métodos de análisis y diseño y software de elemento finito. Para lograr lo anterior se cumplirá con los siguientes objetivos:

Realizar una revisión de las normas y reglamentos actuales que rigen el diseño de este tipo de conexiones.



Estudiar las distintas metodologías que utilizan diferentes autores para desarrollar los modelos numéricos, teniendo así un marco de referencia.

Determinar el software más conveniente para el modelo de elemento finito a realizar, contemplando los modelos numéricos aplicables al problema en estudio, el grado de error en comparación a distintos programas y la accesibilidad a la licencia.

### **1.2.2 Modelo de validación**

Un paso crucial de todo estudio numérico es la validación del modelo de elemento finito para poder garantizar su precisión. Este trabajo se sustenta en una prueba experimental (Moreno Martínez & Meli, 2014) para poder validar el conjunto de características del modelo que se desea analizar.

De la prueba experimental elegida, que permitirá validar el modelo, se ajustarán ciertos detalles para poder obtener un modelo de elemento finito fiable, del cual se obtendrán ciertos parámetros para comprobarlo. De la calibración y validación del modelo se determinan los siguientes puntos:

Establecer los elementos, métodos de modelado y algoritmos más adecuados, calibrando el modelo de elemento finito para obtener los resultados más precisos.

Obtener curvas de carga-desplazamiento del modelo de validación y compararlas con los resultados experimentales

### **1.2.3 Modelos de estudio**

Para seleccionar patrones mediante la observación del comportamiento y a través de recomendaciones para el diseño de los modelos y configuraciones a estudiar es necesario cumplir los siguientes objetivos:

Obtener las curvas carga-desplazamiento para su posterior comparación y estudio.

Determinar patrones de comportamiento de la conexión de extremo recortado de viga, basado en los resultados de los modelos ensayados

#### **1.2.4 Recomendaciones de análisis y diseño**

En base a los resultados de la observación de los modelos con la ayuda de los patrones de comportamiento obtenidos se plantea el siguiente punto:

Proponer criterios y recomendaciones sobre la elaboración de modelos numéricos en elemento finito, y sobre el análisis y diseño de las conexiones de extremos recortados.

### **1.3 Contenido Capitular**

En el segundo capítulo se hace una recopilación de la literatura existente, tanto de investigación experimental como numérica, respecto a las vigas de extremos recortados. Asimismo, un resumen de las metodologías de análisis y criterios de diseño para el extremo recortado de viga.

En el tercer capítulo se detalla el proceso de elaboración del primer modelo el cual será validado y calibrado con una prueba experimental (Moreno Martínez & Meli, 2014). Se describe a detalle las características del espécimen ensayado para así comparar el modelo a realizar.

En el cuarto capítulo se muestra el proceso de desarrollo de 4 modelos con distintas configuraciones, se anexan los resultados de la aplicación de la carga simétrica de todos los modelos. Se muestran los principales resultados y patrones de comportamiento de la conexión.

Finalmente, en el quinto capítulo se redactan las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación, debido al efecto que provocan las distintas configuraciones de los modelos del extremo recortado de viga.

## **CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES Y GENERALIDADES**

### **2.1 Evolución de la Conexión de Viga de Extremo Recortado**

Como se mencionó en el capítulo anterior, una alternativa muy utilizada en edificios prefabricados, en estacionamientos y puentes vehiculares es la conexión a través de extremos recortados. Un extremo recortado se crea cuando el de una viga tiene un resaque en la esquina inferior por lo que la ubicación de la placa de soporte se mueve más arriba en la sección transversal (Figura 2).

Una de las primeras investigaciones enfocadas a este tipo de conexión fue la elaborado por Hamoudi et al. (1975), presentaron una investigación para vigas de concreto pretensado con variación de altura en los puntos de apoyo (extremo recortado). El estado crítico de tensión se evaluó en un punto cercano y próximo al cambio de sección del elemento, suponiendo que el agrietamiento por cortante por un problema de esfuerzos. Se realizaron pruebas en 8 vigas tipo T sus principales aportes fueron:

- Vigas con baja cuantía de refuerzo a flexión y un valor alto de presfuerzo fallará en flexión, mientras que si el presfuerzo es bajo fallará por aplastamiento.
- La ultima resistencia a cortante se incrementa con un aumento del presfuerzo y de la relación claro peralte ( $a/d$ ).

Cuatro años más tarde Mattock y Chan (1979) llevaron a cabo una investigación experimental y aplicaron conceptos de diseños de ménsulas a los extremos recortados enfocándose en que la relación  $a/d$  no fuera mayor a la unidad. Típicamente, el reforzamiento para una viga de extremo recortado con relación  $a/d \leq 1$  consta de barras principales, barras colgantes y estribos horizontales (Figura 4). Propusieron pasos básicos para el detallado principal del refuerzo y el detallado a refuerzo a cortante en la esquina re-entrante de la viga. Sus principales aportaciones fueron:

- El extremo recortado debe ser considerado como una ménsula invertida estableciendo que el claro a cortante ( $a$ ) es equivalente a la distancia desde apoyo vertical hasta el centro de los colgantes.
- El agrietamiento comienza en la esquina re-entrante, del extremo recortado, cuando la carga aplicada alcanzaba el 20% de la capacidad máxima.

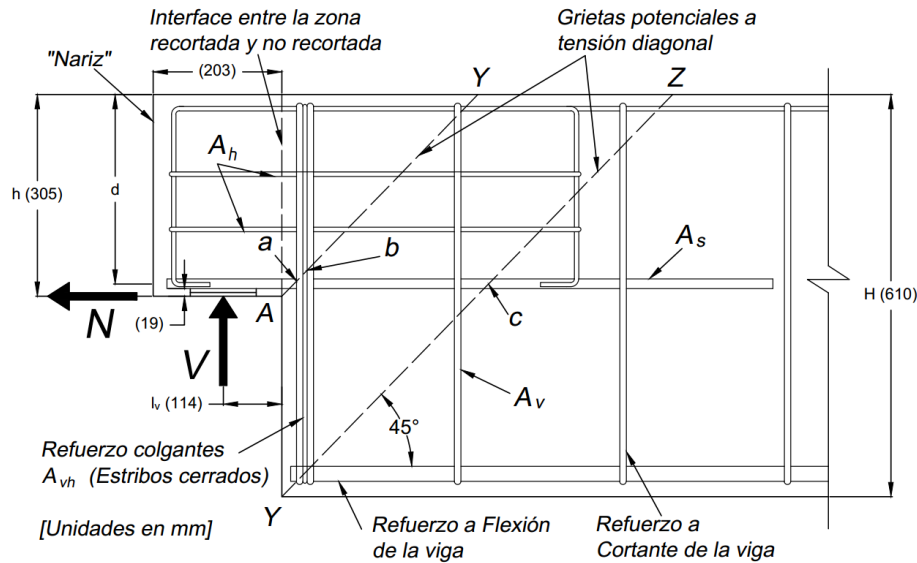


Figura 4 Refuerzo Típico del extremo recortado y ubicación potencial de las grietas debido a tensión diagonal. (Mattock & Chan, 1979)

Tomando en cuenta los resultados para calcular la resistencia alcanzada de las vigas de extremo recortado del trabajo anterior (Mattock & Chan, 1979), Liem (1983) propuso la utilización de colgantes en un ángulo de 45° (Figura 5).

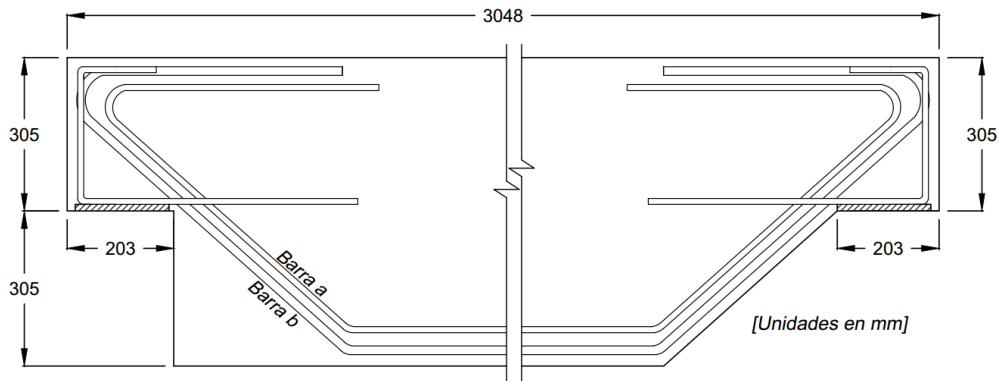


Figura 5 Detalle del uso de colgantes a 45° y geometría de la viga de extremo recortado. (Liem, 1983)

Ocho vigas de extremo recortado a escala real fueron probadas con barras inclinada en lugar de barras horizontales. En esta investigación diferentes cantidades de colgantes y distintas geometrías fueron probadas. Concluyó que los estribos diagonales (colgantes) aumentan la resistencia a cortante hasta  $\sqrt{2}$  veces que el refuerzo horizontal en términos de acero requerido y que la geometría del extremo recortado no tiene efecto en la resistencia última a cortante.

Retomando los resultados de su última investigación Mattock y Theryo (1986), ensayaron 12 vigas presforzadas tipo T pero ahora con especímenes a escala real con diferentes arreglos de refuerzo para los extremos recortados (Figura 6). Se utilizó un dispositivo para introducir una fuerza horizontal del 20% en el soporte de la reacción. Sus principales aportaciones:

- La extensión del colgante tipo U invertido no debe de ser menor a 1.7 veces la longitud de desarrollo del acero. Además, en términos de mejorar el control de las grietas, se recomendó el uso de colgantes en diagonal ya que se obtienen mejores resultados que los colgantes verticales.
- Haciendo que la mitad de los torones de presfuerzo pasen a través del extremo recortado contribuye significativamente al control de grietas.

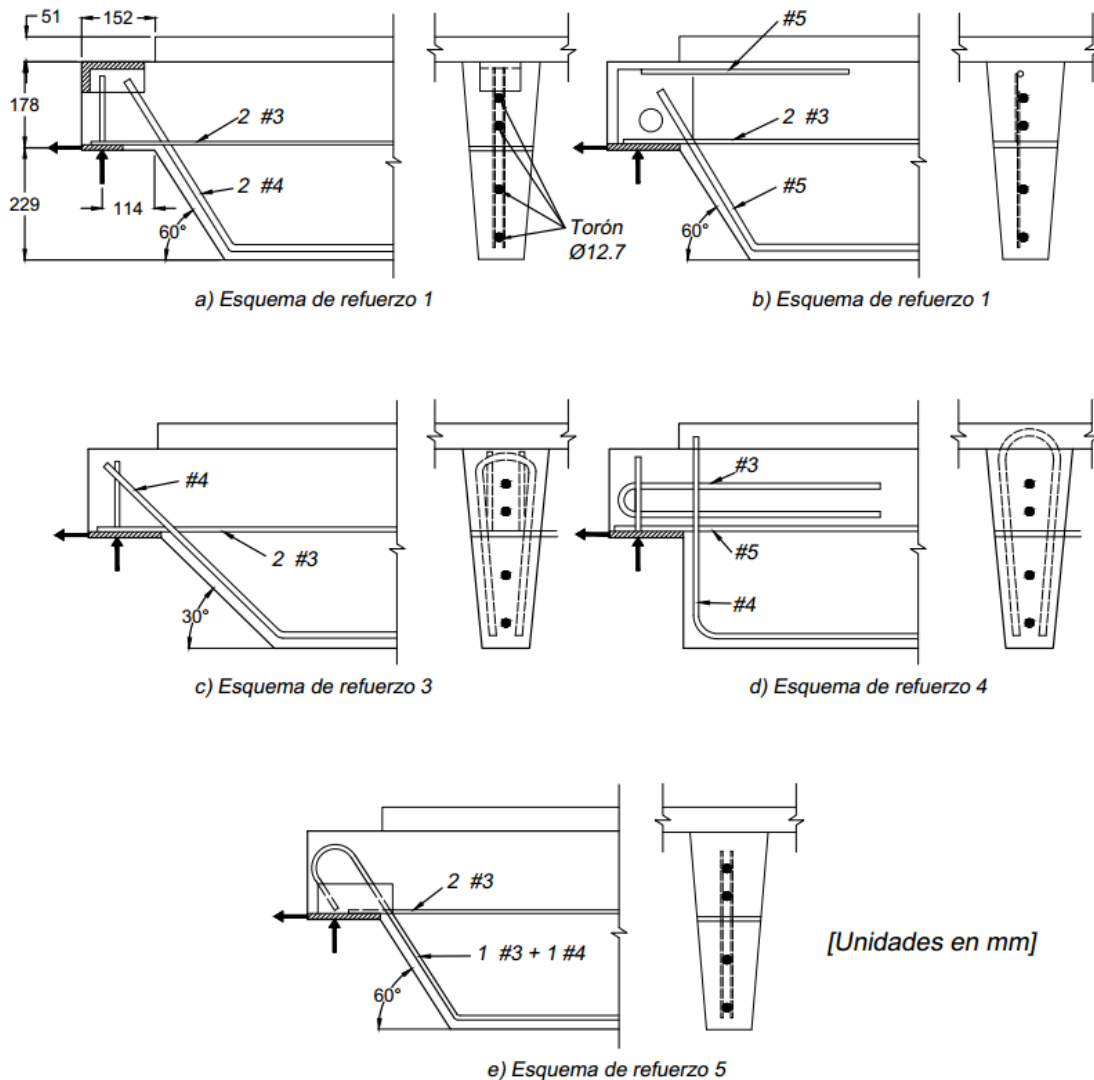


Figura 6 Configuraciones de acero en especímenes. (Mattock & Theryo, 1986).

Hay una gran cantidad de literatura acerca de la aplicación del Método Puntal Tensor (MPT) en elementos discontinuos y no prismáticos pero su aplicación a vigas de extremos recortados es limitada. Los modelos de puntal tensor son una intuitiva y conservativa metodología de diseño para la solución de problemas en regiones de concreto que tiene un cambio brusco en su sección (Ahmad et al., 2013).

Para poder determinar la validez del modelo de Puntal Tensor para simular vigas de extremo recortado, Barton et al. (1991) ensayaron cuatro vigas de extremo recortado dos fueron diseñadas utilizando el Método de Puntal Tensor y los dos restantes, una a través de lo indicado en el PCI y la última por método de diseño de Menon/Furlong (1977). Sus principales atribuciones fueron:

- El modelo del Método Puntal Tensor tuvo mejor resultados a la hora del detallado de la Viga de Extremos Recortados. Sin embargo, todos los métodos subestiman la capacidad de los especímenes probados.
- La falla de los especímenes fue dúctil. Si se utiliza el Método Puntal Tensor se necesitará una pequeña cantidad mayor de acero a cortante en comparación de los métodos restantes.

Un aspecto importante a mencionar en el control del agrietamiento del extremo recortado y que, además, aumenta la resistencia a cortante es la forma de ubicar los colgantes. Debido a lo anterior se propuso una nueva alternativa para el arreglo de los colgantes llamados como Barra Z (Nanni & Huang, 2002), esto cumplía con los requerimientos de extremos recortados basados en las aproximaciones de diseño del PCI. Dos especímenes de vigas de concreto presforzado doble T con extremos recortados fueron ensayados (Figura 7). Tres cables de presfuerzo fueron colocados debajo de la punta y 4 arriba de la punta. Sus conclusiones fueron:

- El anclaje del acero de refuerzo es necesario y las barras soldadas en unas placas parecen tener un comportamiento satisfactorio.
- El patrón de falla para ambas vigas fue a cortante por flexión en la zona de la viga no recortada, debido al bajo valor de  $a/d$  el cual fue de no más de 1.

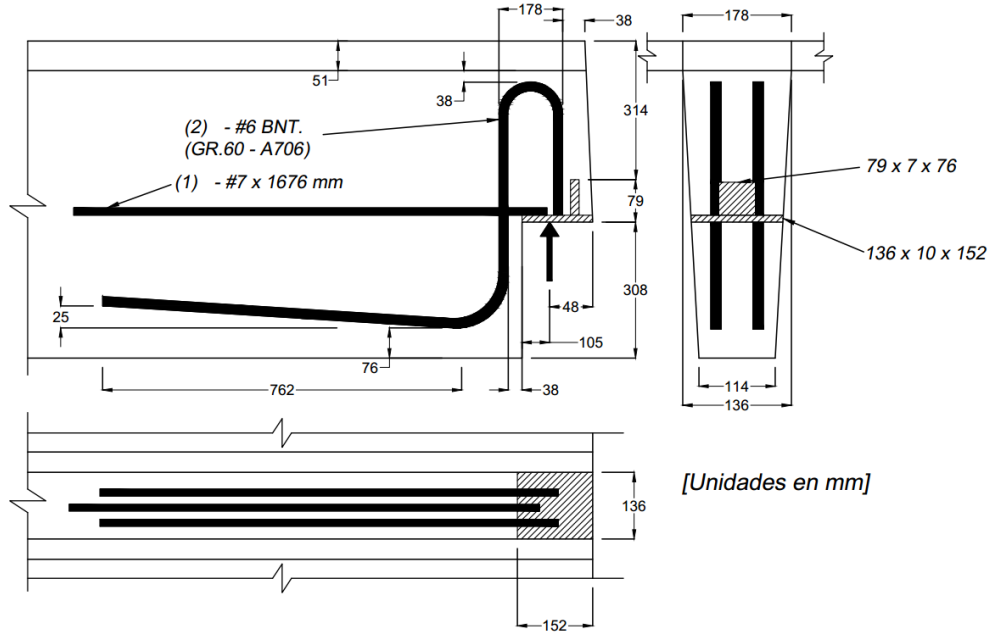


Figura 7 Plano del acero dulce de refuerzo. (Nanni & Huang, 2002).

Un año después y en base a los estudios ya realizados en el área, Lu et al. (2003) detectó que ya se había estudiado el efecto de la relación claro/peralte y la cantidad de refuerzo principal en el extremo recortado por lo que ensayaron 12 especímenes con diferentes grados de resistencia de concreto. Compararon los resultados del modelo propuesto por los autores contra lo indicado en el libro de diseño del PCI y el modelo de Mattock y Chan (1979).

Concluyeron que la resistencia a cortante del extremo recortado mejora con el incremento del refuerzo principal en el extremo recortado y tomando resistencias altas del concreto. Además, la resistencia disminuye si se incrementa la relación  $a/d$ . La aproximación del libro de diseño del PCI subestima, considerablemente, la resistencia a cortante de la viga de extremo recortado.

En 2005, Wang y Guo investigaron el efecto que tendría la altura de la nariz (extremo recortado) y el desempeño de los colgantes tanto verticales como diagonales (Figura 8). Para ello ensayaron 24 especímenes hasta la falla. Establecieron que los estribos diagonales y acero longitudinal mejoran la capacidad a cortante comparado con los estribos verticales en vigas de extremo recortado utilizando la relación  $a/d \leq 1$ . Sin embargo, los estribos verticales tiene un papel importante en la

capacidad a cortante de vigas de extremos recortados con la relación  $a/d > 1$  (Mattock & Chan, 1979).

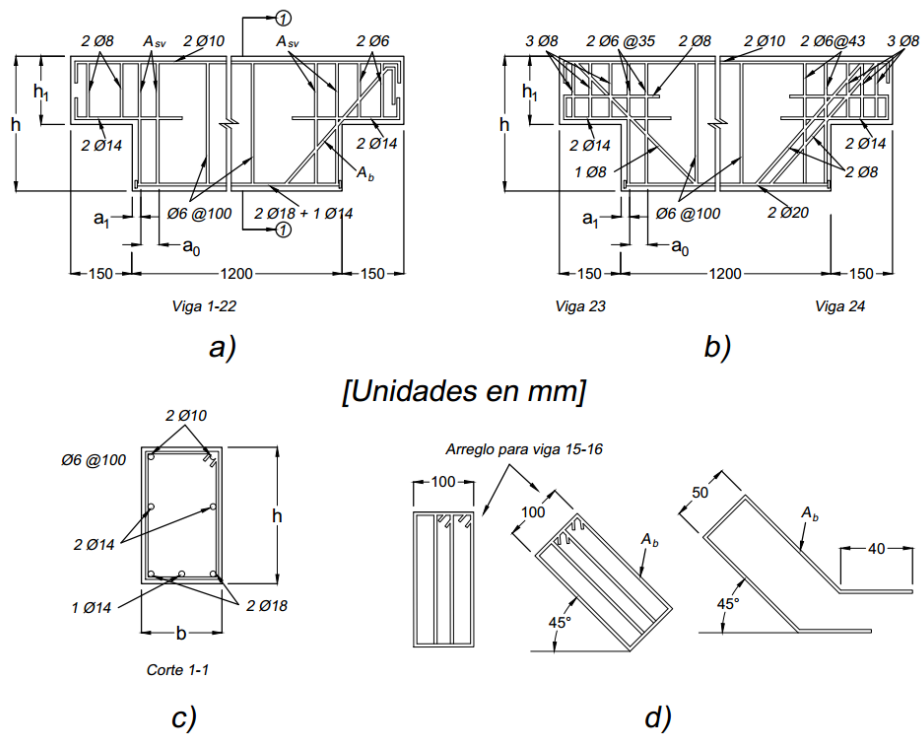


Figura 8 Geometría del espécimen y detalle del refuerzo. (Wang et al., 2005)

Otro estudio que se realizó más tarde (Huang & Nanni, 2006), amplió el margen del estudio de esta conexión al estudiar el efecto que tendría el de láminas de fibra de carbono para reforzar externamente la viga de extremo recortado (Figura 9).

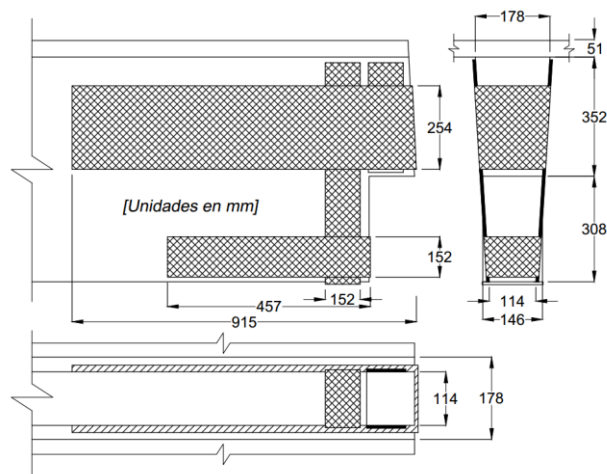


Figura 9 Aplicación del refuerzo de fibra de carbono. (Huang & Nanni, 2006)



Llegaron a la conclusión que el reforzamiento de vigas de extremo recortado a través de láminas de fibra de carbono es una solución viable. Esto debido a que mejora el comportamiento dúctil y la resistencia a elementos donde el concreto ha experimentado agrietamiento.

Yang et al. (2011), propusieron mecanismo de análisis basado en el teorema de límite superior (el principio de energía) para estimar el plano crítico de falla y la resistencia a cortante correspondiente de las vigas con extremos recortados de concreto reforzado. Los resultados obtenidos fueron comparados con la carga de falla de 47 especímenes encontrados en la literatura. Además, se utilizaron dos técnicas para realizar el análisis de las vigas de extremos recortados, a) Método de diseño del PCI y, b) el simplificado modelo de Método de Puntal Tensor del ACI 318-05. Las principales aportaciones son:

- Las dos técnicas sobrestiman de manera importante la resistencia a cortante de las vigas de extremo recortado. El de mejor resultado es fue el mecanismo de falla.
- El Método de Diseño del PCI no toma en cuenta los efectos de la relación  $a/d$ , cantidad de colgantes y el valor de la carga horizontal sobre la resistencia a cortante de la viga de extremos recortados. Estos efectos si son incluidos por el mecanismo de análisis.
- El Método de Puntal Tensor y el mecanismo de análisis determinaron el plano crítico y resultados similares fueron obtenidos.

Sin embargo, el mecanismo de análisis es muy tedioso para un diseño práctico. Es por esto que el modelo de puntal tensor del Código ACI (2008), es el principal documento de diseño para vigas de extremos recortados con la relación  $a/d > 1$ .

Dos años más tarde se examinó la eficiencia de varios arreglos de refuerzo en extremos recortados en cuatro vigas tipo T de concreto presforzado a escala real (Brinkley, 2013). Las configuraciones de carga incluían la aplicación de fuerzas verticales y horizontales en el extremo recortado, con 8 configuraciones de colgantes mostradas en la Figura 10.

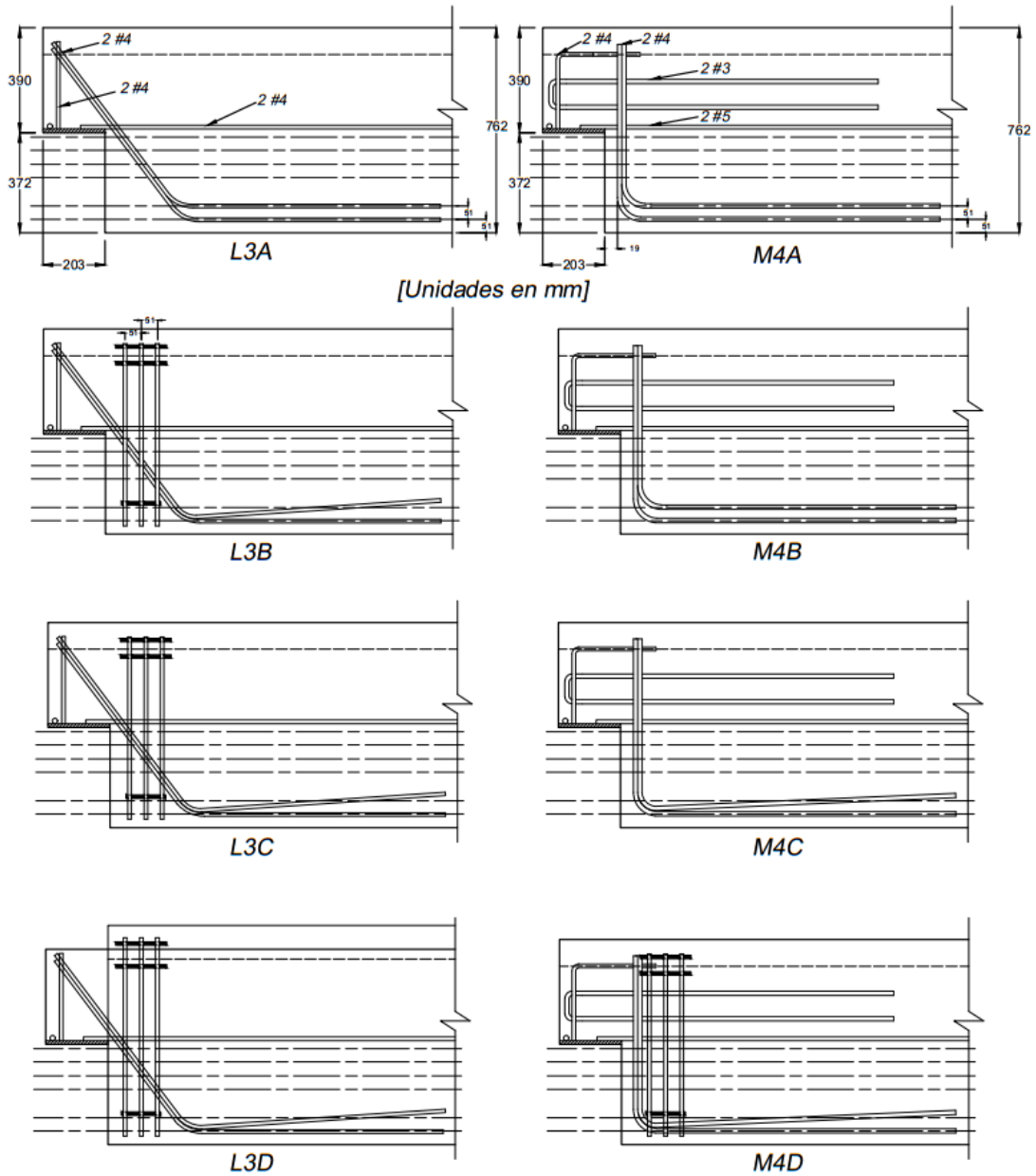


Figura 10 Detalle del armado de los especímenes. (Brinkley, 2013)

El estudio fue enfocado en la curva de colgantes, el uso de un cable pesado U-WWF (Welded Wire Fabric), la extensión de los cables de presfuerzo en las puntas. Éstas fueron sus conclusiones:

- El inicio de la primera grieta ocurre en la esquina re-entrante y se propaga de forma diagonal (cerca de 45° de inclinación) hacia las fibras a compresión. Utilizando colgantes diagonales se restringe el ensanchamiento, velocidad de propagación de las grietas y contribuye en mejorar la capacidad cerca del 30% comparándolo con colgantes convencionales.

- Todas las vigas ensayadas se agrietaron con cargas de servicio y fallaron por cortante diagonal en la zona de la viga no recortada.
- Pasar un cable (torón) dentro de la zona extendida recortada mejora el comportamiento contra el agrietamiento comparándolo con los especímenes con torones debajo del final de la punta.

Aswin et al. (2014), retomaron los resultados de las pruebas del estudio de Wang et al., (2005). En base a lo anterior pusieron en prueba la eficiencia de los diferentes códigos de diseño como el ACI-318-08, Euro Código 2 y BS 8110 basados en el MPT para predecir la carga ultima; si mismo se usó el método empírico del Libro de Diseño del PCI. Se ensayaron 24 especímenes en donde la resistencia del concreto, geometría del extremo recortado, relación a/d, tipos y distribución de los colgantes, la forma curva del acero longitudinal, cantidad del refuerzo en el extremo no recortado y los colgantes fueron considerados como parámetros primordiales. Se encontró que el Euro Code 2 y BS 8110 son menos precisos en comparación al método del PCI y ACI-318-08 (Figura 11).

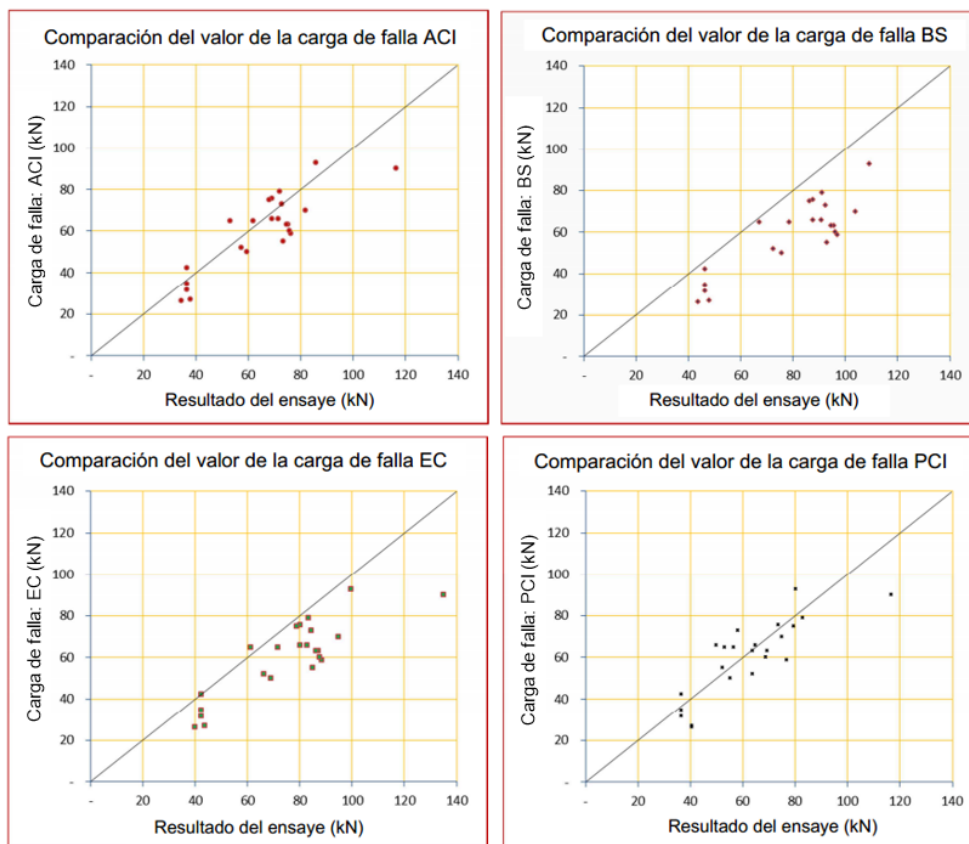


Figura 11 Comparación analítico-experimental de la carga de falla esperada contra la obtenida en el ensaye (Aswin et al., 2014)

En el mismo año, se llevó un estudio para ver el efecto del presforzado que tendría en el comportamiento de vigas de extremo recortado. Para ello se ensayaron cuatro especímenes utilizando las recomendaciones del PCI, dos de ellos contaban con presfuerzo (Moreno Martínez & Meli, 2014). Este estudio fue enfocado en la eficiencia de utilizar refuerzo diagonal en lugar de estribos verticales dentro del extremo recortado con o sin presfuerzo en el elemento, para el control inminente del agrietamiento en la esquina re-entrante. Se concluyó que:

- El presforzado en el extremo recortado es un método adecuado para reducir las grietas en la esquina re-entrante y puede ser usado en casos prácticos cuando se requiere el control estricto de la corrosión.
- Los resultados del método del PCI son conservativos para determinar la capacidad de carga para un modo de falla crítico. El modelo del Método de Puntal Tensor propuesto por Mattock tiene el mejor resultado para evaluar la capacidad de carga. Los cuatro elementos ensayados fallaron por tensión diagonal en la esquina re-entrante.

El mantenimiento en estructuras existentes es un aspecto importante que permite incrementar la vida útil de las estructuras. Por lo que Atta y El-Shafiey (2014) se enfocaron en el estudio del efecto que tiene la reducción del peralte de la nariz en el extremo recortado. Esto conlleva el incremento de los esfuerzos a torsión. Ensayaron tres especímenes con diferentes técnicas de reforzamiento una con la aplicación de polímeros con fibras reforzadas, el segundo con láminas de polímeros con fibras reforzadas y por último la aplicación de presfuerzo externo. Sus principales conclusiones fueron: el uso de presfuerzo externo incrementa la resistencia a agrietamiento, aumenta la carga de falla y la ductilidad comparado con otras técnicas.

La literatura indica que para un mejor comportamiento y resistencia de vigas de extremo recortado se debe utilizar la relación  $a/d < 1$ . Para ver el impacto que tendría usar la relación  $a/d > 1$  Lu et al. (2015) ensayaron 24 vigas de extremo recortado con una relación  $a/d = 1.19-1.51$  (Figura 12). Utilizaron resistencia a compresión del concreto en el rango de 32.5-70 MPa. Los principales parámetros que tomaron en cuenta fueron el valor de la relación  $a/d$ , grado del concreto, refuerzo longitudinal de la punta y los colgantes de la viga de extremo recortado. Principales resultados:

- La resistencia a cortante será mayor cuando se utilice resistencias altas del concreto y la menor relación  $a/d$
- Propusieron un modelo para predecir la capacidad a cortante de las vigas de extremos recortados basado en la teoría lineal a flexión. Dicho modelo fue calibrado con 32 especímenes encontrados en la literatura concluyendo que el modelo propuesto estima adecuadamente la resistencia a cortante del elemento.
- Se detectó que la predicción del MPT del Código ACI es muy conservativa.

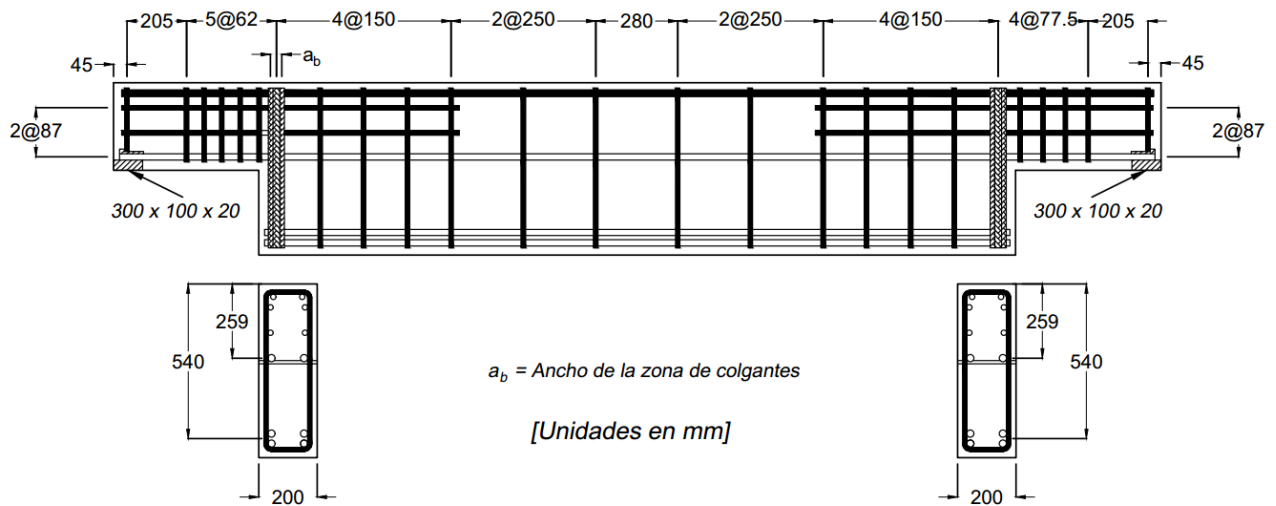


Figura 12 Geometría y armado del espécimen ensayado. (Lu et al., 2015)

Desnerck et al. (2016) estudiaron el efecto de los defectos internos en el detallado del refuerzo dentro de la zona recortada sobre la capacidad de las vigas de extremo recortado. Cuatro especímenes con diferentes armados. El diseño fue con el modelo del Método de "Puntal Tensor, de igual forma otras vigas de extremo recortado incluyeron intencionalmente un defecto ya sea menos barras diagonales, menos acero en las puntas o un número reducido de colgantes. Los resultados fueron los siguientes:

- Modelos de MPT subestiman la carga de falla y deberían proporcionar diseños seguros. En todas las vigas, el agrietamiento se inició en la esquina re-entrante cuando se alcanzó un 20-33% de la carga de diseño en un ángulo entre los 40-45°.
- Eliminación de las barras diagonales conduce a un modo de falla en la punta. Si se omite el refuerzo diagonal la capacidad de carga última se reduce casi al 39%. En contraste si se reduce el número de colgantes resulta en falla frágil a cortante del elemento con una reducción de la capacidad cercas del 10%.

En el mismo año Atta y Taman (2016), ensayaron siete vigas de concreto reforzado con extremos recortados que fueron reforzadas con presfuerzo externo en diferentes direcciones: vertical, horizontal y diagonalmente. Sus contribuciones fueron:

- La forma más efectiva de presfuerzo fue la vertical ya que se incrementó la capacidad de la viga de extremos recortado hasta un 82%
- Reforzar una viga de extremo recortado con presfuerzo vertical externo, es la mejor forma para obtener una falla dúctil. Técnicas de presfuerzo horizontal conduce a fallas en la zona de compresión.
- La mejor técnica para el reforzamiento de las vigas de extremo recortado para obtener la máxima resistencia y falla dúctil es utilizando dos capas de presfuerzo externo verticales, uno en la zona del extremo recortado y la otra en la zona no recortada con dos placas rígidas superiores separadas.

Tres años más tarde Mohammed et al. (2019) ensayaron experimentalmente 27 extremos recortados a escala real con dos diferente ECC (engineered cementitious composites, por sus siglas en inglés), uno con una resistencia de 85 MPa (ECC-85) y el último con resistencia de 105 MPa (ECC-105). El espécimen de control fue diseñado de acuerdo a los requerimientos de código estándar y su utilizó un concreto con resistencia de 28 MPa. Sólo en algunos especímenes, se agregaron los ECC en la zona de extremo recortado. Los resultados mostraron que los especímenes con concreto con ECC tuvieron una resistencia más alta a la falla comparado con los especímenes con concreto sin ECC. Puntos importantes del estudio:

- La primera grieta aparece en la esquina re-entrante en todas las vigas de extremo recortado. Además, utilizando refuerzo diagonal en los extremos recortados mejora la capacidad a un 40.79% y la deflexión de 24.29% comprada con el caso de que se utilizó colgantes.
- No es recomendable sustituir todos los colgantes por refuerzo diagonal, ya que en la esquina del superior de la viga con su máximo peralte experimenta un severo daño debido a la pérdida de confinamiento en la zona no recortada.
- Hay un promedio de mejora en la carga ultima del 59.97% y una deflexión máxima del 46.67% para la viga de extremo recortado con ECC-85 comparándola con la del concreto sin ECC. Mientras, que la viga de extremo recortado con ECC-105 obtuvo un promedio de mejora en la carga ultima del 11.26% y una deflexión ultima del 11.88% comparándola con la viga de extremo recortado con ECC-85.

## **2.2 Análisis de Elemento Finito en Estructuras de Concreto Reforzado**

Los estudios experimentales han sido ampliamente utilizados para estudiar elementos individuales y los efectos de la resistencia del concreto bajo cargas. Aunque este método produce respuestas correctas, toma demasiado tiempo en realizarlas, necesita materiales y por lo tanto puede ser muy costoso. Mientras que el método numérico, a través del Método de Elementos Finitos (MEF) determina todo el comportamiento de la estructura mediante la división de ésta en un número simple de elementos, cada uno de ellos tiene bien definido sus propiedades mecánicas y físicas (Joshuva et al., 2014)

Sin embargo, la modelación de estructuras de concreto reforzado resulta ser muy compleja, principalmente debido al comportamiento no lineal que tiene el concreto y acero al trabajar juntos. El principal obstáculo para el análisis de elemento finito de estructuras de concreto es la dificultad en caracterizar las propiedades del material. Se han hecho esfuerzos en buscar un modelo realístico que prediga el comportamiento de estructuras de concreto reforzado.

Conforme avanzó la tecnología computacional y se implementaron mejores métodos de modelado se fueron reduciendo las simplificaciones logrando resultados más fiables al compararlos con resultados de pruebas de laboratorio. Se mostrará como fue el avance de la modelación numérica de estructuras de concreto reforzado.

Uno de los primeros estudios en donde se aplicaron modelos no lineales en el análisis de estructuras de concreto reforzado fue Barbosa y Rebeiro (1998), para ello utilizaron el código de Elemento Finito del ANSYS, versión 5.3. Simularon una viga simplemente apoyada en 3D con elementos sólidos. Tomaron en cuenta dos alternativas para simular el acero de refuerzo: de manera discreta a través de elementos barra y de manera dispersa dentro del elemento sólido (Figura 13). Se utilizaron dos modelos del material que consideran la no linealidad del concreto Von Mises y Drucker-Prager, ambos modelos tuvieron resultados muy similares en la etapa de carga de servicio. A pesar de la relativa simplicidad de la estructura

analizada y el empleo de los modelos, la predicción de la respuesta de la estructura es satisfactoria.

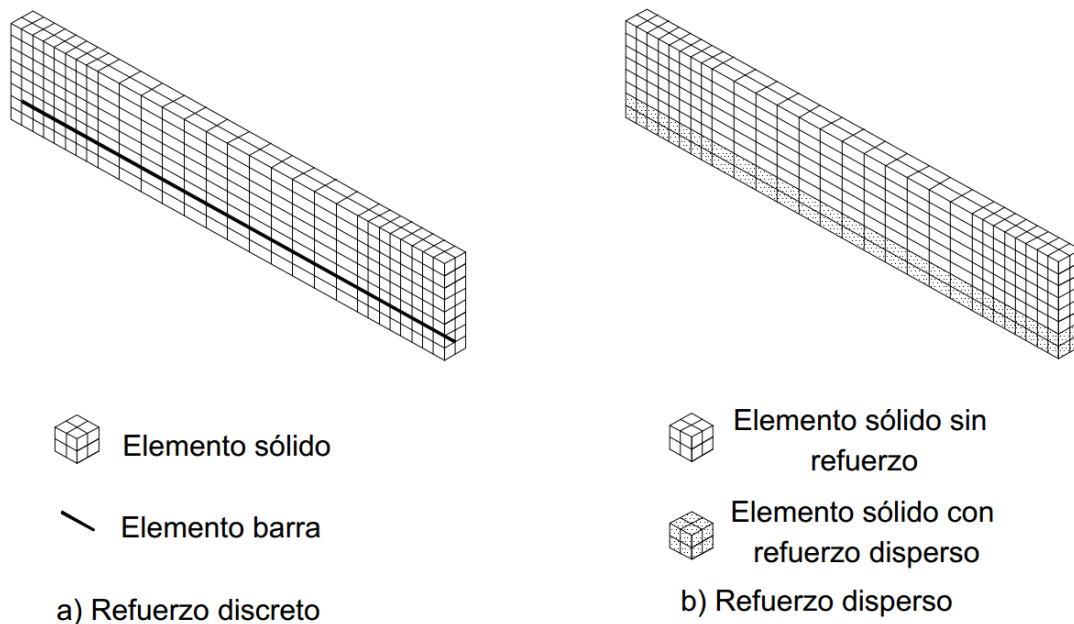


Figura 13 Mallado de la viga. (Barbosa & Ribeiro, 1998)

Tres años más tarde, Fanning (2001) estudio la respuesta carga-desplazamiento experimental de una viga de concreto reforzado y una viga Tipo-T de concreto postensado (Figura 14) y utilizó estos datos para analizar la capacidad del modelado numérico implementado en el ANSYS, versión 5.5, para predecir la respuesta última de las vigas de concreto reforzado. Para poder obtener la respuesta ultima de la viga pontensada y la viga con refuerzo ordinario utilizó el elemento SOLID65, este elemento tiene la capacidad de modelar la respuesta no lineal de materiales frágiles basado en el modelo constitutivo para el comportamiento triaxial del concreto de acuerdo a Williams y Warnke (1974). Para el modelado del acero de refuerzo y de presfuerzo se utilizó el elemento LINK8. Estableció que el modelo de grieta dispersa resultado un modelo numérico apropiado para capturar los modos de falla a flexión de sistemas de concreto reforzado.



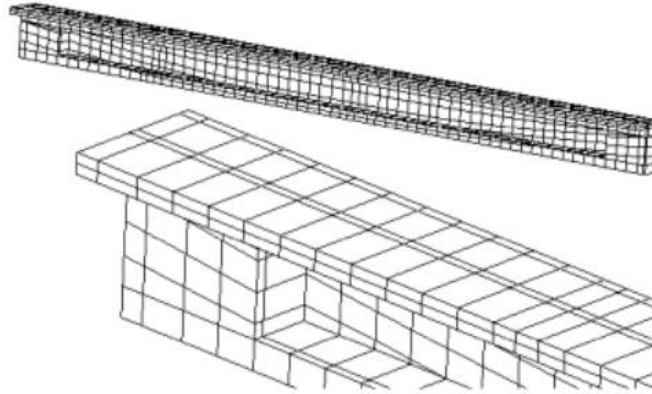


Figura 14 Viga postensada, malla de elementos finitos. (Fanning, 2001)

Wolansky, (2004) estudió vigas de concreto reforzado y presforzado usando el análisis de elementos finitos para entender la respuesta a carga-deformación. Utilizó el paquete de Análisis de Elemento Finito disponible en ANSYS, versión SAS 2003, para modelar una viga de concreto con las dimensiones y propiedades correspondiente a la viga C1 ensayada por Buckhouse (1997). Para modelar el concreto reforzado fue empleado el elemento SOLID65 debido a su capacidad de deformaciones plásticas, agrietamiento en tres direcciones ortogonales y aplastamiento, y para el acero se utilizó el elemento LINK8 que tiene capacidad de sufrir deformaciones plásticas. Debido a la simetría de la viga, solo fue necesario modelar un cuarto de la viga (Figura 15).

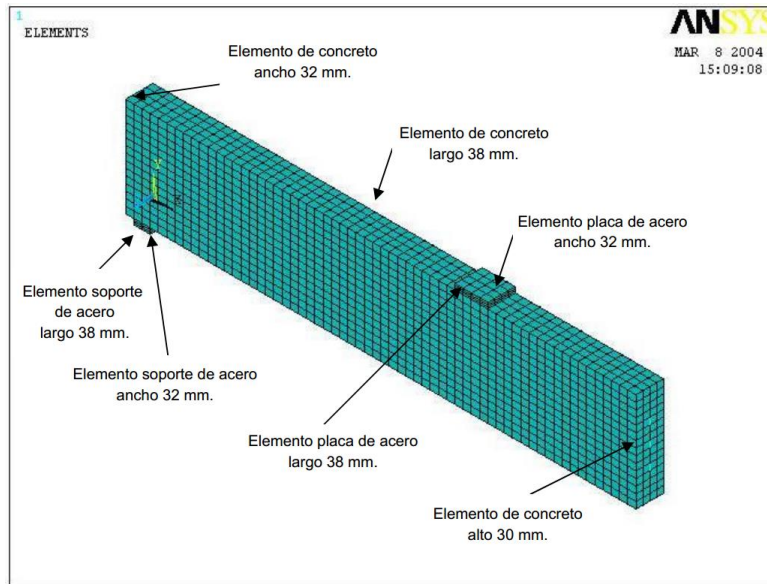


Figura 15 Mallado del concreto, placa de acero y soporte de acero. (Wolanski, 2004)

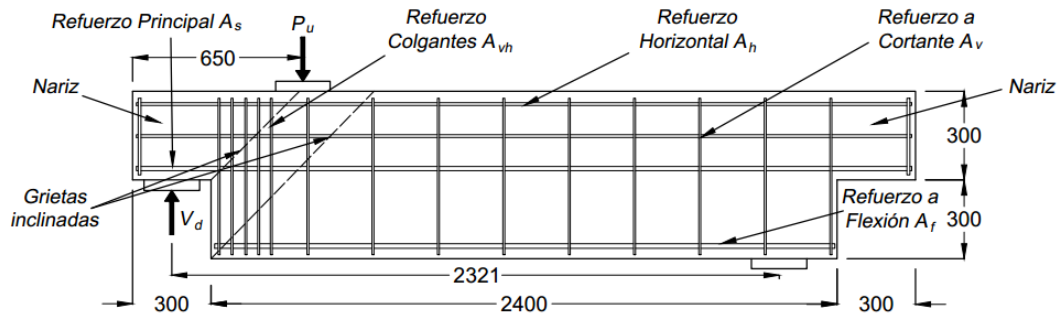
Revathi y Menon, (2005) llevaron a cabo estudios experimentales y de elemento finito en ANSYS para ensayar vigas subreforzadas, sobre reforzadas y a cortante, para validar el potencial de la simulación numérica para predecir respuestas no-lineales de los elementos. Los resultados fueron similares a sus estudios experimentales. El comportamiento de ductilidad de vigas subreforzadas, modo de falla frágil en elementos sobre reforzados y vigas a cortante fueron bien desarrolladas por los modelos numéricos. Los patrones de grietas en los especímenes tuvieron buena correlación con los patrones obtenidos en el análisis numérico.

Dahmani et al., (2010) realizó una investigación acerca de la capacidad del software ANSYS (versión 8.0) para el análisis y predicción de patrones de agrietamiento en vigas de concreto reforzado y la ventajas que tiene la simulación numérica contra las pruebas experimentales. Fueron utilizados los elementos SOLID65 y LINK8 para modelar el concreto y acero respectivamente. Las cargas aplicadas en las diferentes etapas de la modelación que van desde el inicio del agrietamiento, fluencia del acero y la falla de la viga de concreto tuvieron buena correlación con las calculadas a mano.

Abhinav y Valsson, (2012) enfocaron su estudio a la determinación de las propiedades estáticas de la estructura como deflexiones y distribuciones de esfuerzos. Para esto tomaron una viga de concreto presforzado para hacer su análisis. Después con ayuda del software ANSYS (versión 12.1) la viga fue modelada como simplemente apoyada. Concluyeron que a través del uso del MEF pudieron tener resultados muy parecidos entre el modelo de elementos finitos y los resultados teóricos, especialmente la deflexión y esfuerzos en la línea central con agrietamiento inicial y progresivo.

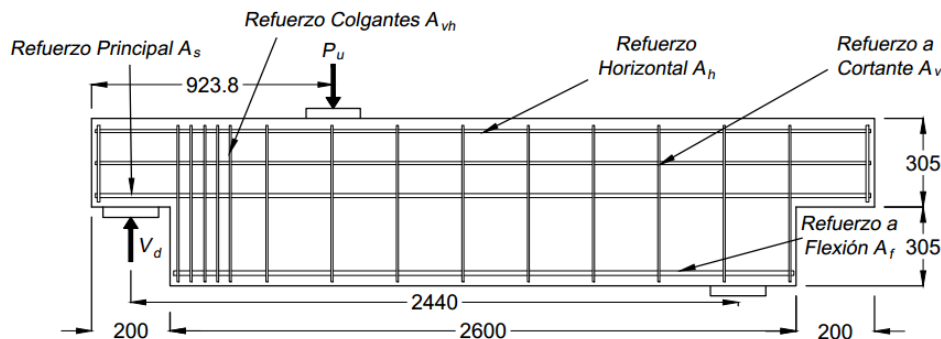
Un año después, se realizó el análisis no-lineal mediante el método finito de dos vigas de extremos recortados en 3 dimensiones (Mohammed A. , 2013). Estudió principalmente los efectos de utilizar una resistencia de concreto de 32-34 MPa, una resistencia de fluencia del acero de 2.83-7.39 MPa y la relación claro/peral de 0.56-0.59.

Gracias a estudios previos analizó la falla en cortante usando el programa de ANSYS, para el modelado del concreto usó SOLID65 y para el acero de refuerzo el elemento LINK8. Tomo resultados de los autores Lu et al. (2003) y Mattock y Chan (1979) para la creación y validación del modelo numérico (Figura 16).



a) Viga B56, dimensiones y detalle de armado ,  $a/d = 0.56$

[Unidades en mm]



b) Viga B59, dimensiones y detalle de armado ,  $a/d = 0.59$

Figura 16 Vigas en estudio. a) Lu et al. (2003); b) Mattock y Chan (1979)

Se determinó que la resistencia a cortante aumenta con el incremento de la resistencia del concreto y al utilizar una relación  $a/d$  menor. El mecanismo de falla de la viga de extremos recortados es bien modelado usando el modelo de elemento finito del ANSYS.

Dos años más tarde, Joshuva et al. (2014) analizaron vigas de concreto reforzado y pretensado para ver su comportamiento no-lineal bajo cargas externas usando el análisis de método de elemento finito de manera muy similar a los trabajos previamente mencionados. Con ayuda del ANSYS (versión 12.0) evaluaron la respuesta carga-deflexión con variaciones de esfuerzos en el concreto y

deformaciones en el refuerzo de acero, estos resultados fueron comparados con resultados obtenidos de la teoría de análisis estructural. Los resultados fueron similares, aunque observaron discrepancia en el valor inicial de la predeformación en los tendones, la razón no fue clara. Comparando los resultados del comportamiento de la viga de concreto reforzado contra la de concreto presforzado, tuvo mejores resultados la viga presforzada tanto en carga de servicio y mayor capacidad última de carga.

Gomes (2017), realizó una aplicación de análisis de fiabilidad para el caso específico de vigas de concreto reforzado sujetas a cuatro pruebas a flexión, y se consideró dos diferentes modelos desarrollados en ANSYS. Uno con el elemento SOLID65 y con SOLID185. Ambos modelos utilizaron el elemento LINK180 para el modelado del acero de refuerzos. Los modelos fueron calibrados con resultados de datos experimentales. Concluyó que el modelo de microfalla (SOLID185) es mejor para el análisis de fiabilidad de estructuras de concreto, debido a que el elemento SOLID65 tiene muchos problemas de convergencia.

### 2.3 Método de Diseño del PCI

El diseño del área de apoyo, que está en el cambio de sección en el extremo final del miembro, requiere el estudio de modos potenciales de falla. El manual de diseño del PCI (PCI, 2004) establece cinco modos de falla para vigas de extremo recortado (Figura 17):

1. Flexión y tensión axial en el extremo final de la viga. Proporcionar refuerzo a flexión,  $A_f$ , más refuerzo a tensión axial,  $A_n$ .
2. Cortante directo en la unión de la zona no recortada y recortada. Proporcionar refuerzo a cortante por fricción compuesto por  $A_{vf}$  y  $A_h$ , más refuerzo a tensión axial,  $A_n$ .
3. Falla a tensión diagonal en la esquina re-entrante. Proporcionar refuerzo a cortante,  $A_{sh}$ .
4. Falla a tensión diagonal en el extremo final de la viga. Proporcionar refuerzo a cortante compuesto por  $A_h$  y  $A_v$ .
5. Falla a tensión diagonal en la zona no recortada. Esto es resistido al proporcionar la longitud de desarrollo de  $A_s$  más allá de la grieta potencial.

Cada uno de los modos potenciales de falla deben ser estudiados de manera independiente. El refuerzo requerido no es acumulativo, por ejemplo  $A_s$  será el valor más grande de lo requerido por el 1 o 2, no la suma de estos.  $A_h$  es el más grande de lo obtenido por 2 o 4, no la suma.

Para los modos de falla anteriores se requiere aplicar ciertas ecuaciones que son aplicables cuando la relación claro/peralte a cortante no es mayor a la unidad. El refuerzo en el extremo recortado (Ecuaciones 1 a 7) debe ser colocado en todos los casos cuando al menos una o más de las siguientes condiciones se cumpla:

- La altura de la zona recortada excede  $0.2H$  (Figura) o 8 pulgadas.
- El ancho de la zona recortada excede 12 pulgadas ( $l_p$  en la Figura).
- Para elementos menores que 8 pulgadas de ancho, menos de la mitad del refuerzo principal a flexión se extiende al final del elemento por encima de la nariz.
- Para elementos de 8 o más pulgadas, menos de una tercera parte del refuerzo principal a flexión se extiende al final del elemento por encima de la nariz.

Los puntos anteriores indican que solo los extremos recortados cortos, de poca altura, teniendo una mínima cantidad del refuerzo principal o más extendiéndose en la punta arriba de la nariz no requieren todo el refuerzo del extremo recortado.

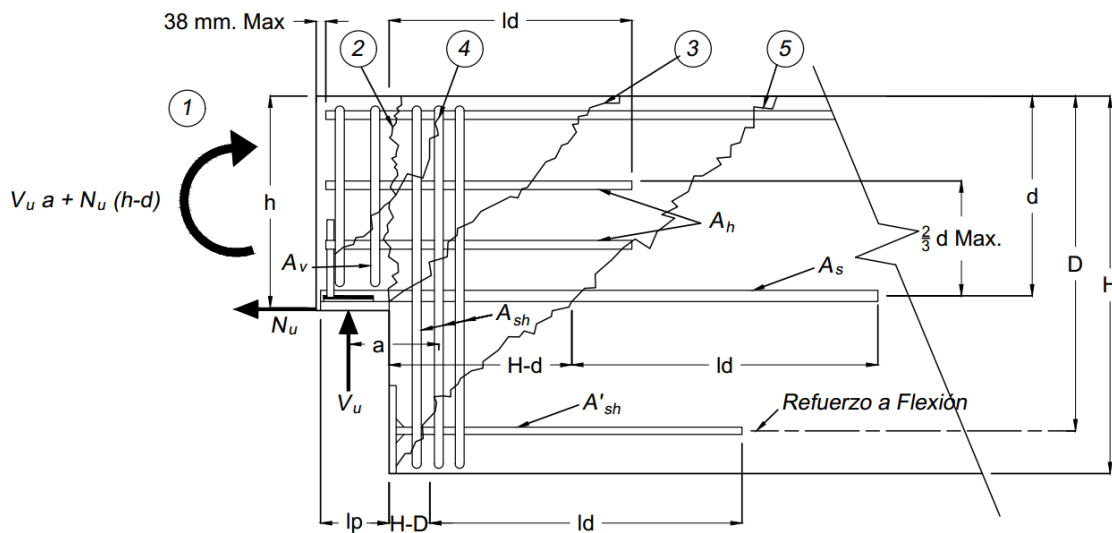


Figura 17 Grietas potenciales de acuerdo al tipo de falla en los extremos recortados (PCI,2004)

### 2.3.1 Expresiones para el cálculo de refuerzo para cada tipo de falla

#### 1.-Flexión y tensión axial en extremo final de la viga.

El refuerzo horizontal es determinado de manera similar para las ménsulas en columnas.

$$A_s = A_f + A_n = \frac{1}{\Phi f_y} \left[ V_u \left( \frac{a}{d} \right) + N_u \left( \frac{h}{d} \right) \right] \quad (1)$$

Donde:

$$\Phi = 0.75$$

$a$  = claro a cortante

$h$  = peralte total en el extremo recortado

$d$  = distancia del centroide del refuerzo  $A_s$  hasta la fibras externas, (in)

$f_y$  = esfuerzo de fluencia del acero, (psi)

$A_s$  = área de acero de refuerzo convencional

$A_f$  = área de refuerzo a flexión

$A_n$  = área de refuerzo requerida para resistir tensión axial

$V_u$  = fuerza a cortante factorizada

$N_u$  = fuerza axial factorizada

#### 2.-Cortante directo

La grieta vertical potencial mostrada en la Figura 17 es resistida por la combinación de  $A_s$  y  $A_h$ .

$$A_s = \frac{2V_u}{3\Phi f_y \mu_e} + A_n \quad (2)$$

$$A_n = \frac{N_u}{\Phi f_y} \quad (3)$$

$$A_h = 0.5 (A_s - A_n) \quad (4)$$

Donde:

$$\Phi = 0.75$$

$f_y$  = esfuerzo de fluencia de  $A_s, A_n, A_h$ , (psi)

$$\mu_e = \frac{1000\lambda b h \mu}{V_u} \leq \text{Tabla 4.3.6.1 (PCI)}$$

$b$  = ancho de la cara a compresión o tensión del elemento

$\mu$  = coeficiente de fricción

$\mu_e$  = coeficiente de fricción a cortante efectivo

$A_h$  = área de fricción a cortante del acero en grieta vertical del extremo recortado

$\lambda$  = factor de conversión por unidad de peso del concreto

### 3.-Tensión diagonal en la esquina re-entrante

El refuerzo requerido para resistir el inicio del agrietamiento a tensión diagonal mostrado en la Figura () como 3 puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$A_{sh} = \frac{V_u}{\Phi f_y} \quad (5)$$

Donde:

$$\Phi = 0.75$$

$f_y$  = esfuerzo de fluencia de  $A_{sh}$ , (psi)

$A_{sh}$  = barras verticales o diagonales en la zona potencial de agrietamiento diagonal, in<sup>2</sup>

$V_u$  = carga aplicada factorizada

### 4.-Tensión diagonal en extremo recortado

Se requiere refuerzo adicional en la grieta número 4 en el extremo recortado (figura 3) tal que:

$$\Phi V_n = \Phi(A_v f_y + A_h f_y + 2bd\lambda\sqrt{f'_c}) \quad (6)$$

Donde:

$V_n$  = resistencia nominal a cortante

Por lo menos la mitad del refuerzo requerido en esta zona debe ser aplicado verticalmente. Por lo tanto:

$$\min A_v = \frac{1}{2f_y} \left( \frac{V_u}{\Phi} - 2bd\lambda\sqrt{f'_c} \right) \quad (7)$$

### 5.- Falla a tensión diagonal en la zona no recortada

Para asegurar el anclaje del refuerzo es necesario lo siguiente:

1. Las barras horizontales  $A_s$  debe ser extendidas a un mínimo de  $l_d$  pasando la grieta 5, y anclada al final de la viga mediante soldaduras a travesaños, placas o ángulos.
2. Las barras horizontales  $A_h$  debe ser extendidas a un mínimo de  $l_d$  pasando la grieta 2 y anclada al final de la viga por ganchos o algún otro medio adecuado
3. Para asegurar el desarrollo del refuerzos de los colgantes,  $A_{sh}$ , este debe ser doblado y continuar en paralelo al fondo de la viga, o refuerzo horizontal separado,  $A'_{sh} \geq A_{sh}$  de ser aplicado. La extensión del refuerzo en el fondo de la viga debe ser al menos  $l_d$  pasando la grieta 5.

4. El refuerzo vertical,  $A_v$ , debe ser propiamente anclado por ganchos como lo requerido por ACI 318-02.
5. Refuerzo de alambres soldados en lugar de barras serán usados para refuerzo. Estos serán anclados de acuerdo a ACI 318-02.

## **6.- Otras consideraciones**

1. El peralte en la parte final de la viga (extremo recortado) no debe ser menor a la mitad del peralte de viga, a menos de que la viga sea más aperaltada de lo necesario por otras razones no estructurales.
2. El refuerzo de los colgantes,  $A_{sh}$ , debe de ser colocado lo más cercano posible a la esquina re-entrante tomando en cuenta el proceso constructivo. Éste refuerzo no debe de ser considerado a otros requerimientos a cortante, pero si a torsión.
3. Si el esfuerzo a flexión en la sección de peralte máximo de la viga enseguida al cambio de geometría, usando los factores de carga y propiedades de la sección gruesa, excede  $7.5\sqrt{f'_c}$ , el refuerzo longitudinal debe ser colocado en la viga para desarrollar la resistencia a flexión requerida.



## **CAPÍTULO 3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO**

Para tener certeza en la validación del modelo se recurrirá a un ensaye experimental para validar el uso de diversos algoritmos y componentes del modelo de elemento finito con la finalidad de obtener el comportamiento más cercano de la conexión de extremo recortado bajo carga simétrica. La calibración del modelo se obtendrá a través de un parámetro que determinará la fiabilidad y exactitud del modelo, esto es mediante la curva carga-desplazamiento obtenida al aplicar la carga simétrica al espécimen de referencia.

### **3.1 Modelo de validación**

En el capítulo anterior se presentó una serie de trabajos referentes al estudio de la conexión de vigas de concreto a través de extremos recortados, tanto experimentales como numéricos incluso algunos con ambas vertientes. Para la validación del modelo numérico, desarrollado en este estudio, se seleccionó el trabajo de Moreno Martínez y Meli Piralla (2014), ya que se cuenta con los resultados del ensaye del extremo recortado y propiedades de los materiales utilizados en el espécimen.

Para comprender el por qué se utilizaron ciertos parámetros para el modelo de validación es necesario describir el procedimiento del proceso del documento con el que se validará (Moreno Martínez & Meli, 2014).

#### **3.1.1 Estudio experimental**

En esta etapa se llevó a cabo el ensaye del extremo recortado bajo carga vertical simétrica de servicio que se presenta cuando se utilizan todos los carriles que conforman el viaducto. En la Figura 18 y 19 se muestra el espécimen y aspectos generales necesarios para obtener mediciones y resultados del ensaye, como son la ubicación de apoyos, aplicación de la carga y ubicación de los potenciómetros.



a) Vista lateral



b) Vista frontal

Figura 18 Espécimen de laboratorio Instituto de Ingeniería de la UNAM. (Moreno Martínez & Meli, 2014)

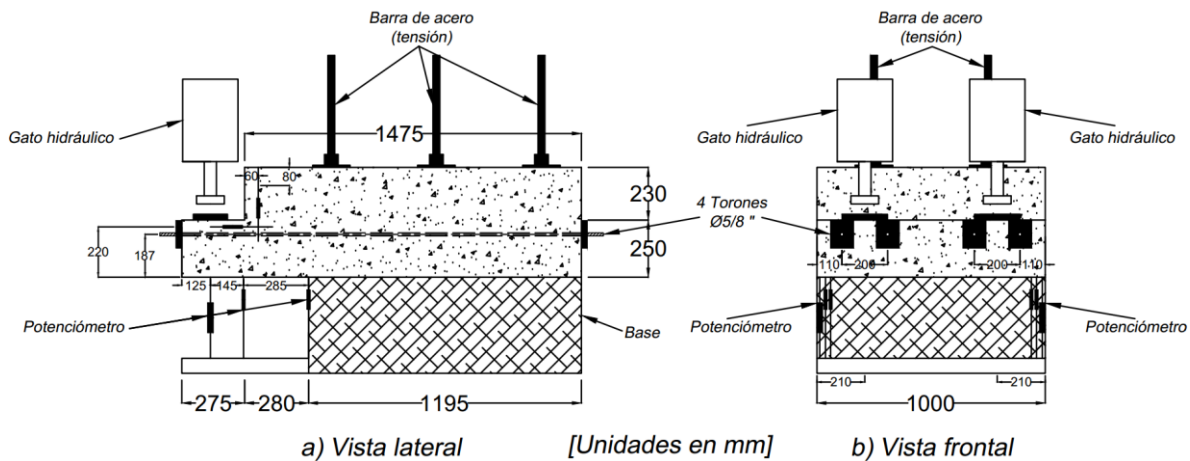


Figura 19 Esquema del espécimen en estudio AutoCAD

El espécimen ensayado consiste en un extremo recortado de viga postensado con la siguiente configuración geométrica: 175 cm de largo, 48 cm de alto en la zona no recortada (peralte máximo), 25 cm de alto en el extremo recortado y 100 cm de ancho. Al espécimen se le aplicó un postensado longitudinal que contribuye con 74% a la flexión, y comprime la sección crítica (esquina re-entrante). El postensado es dado por cuatro cables de diámetro de 5/8", el grado del acero de prefuerzo,  $f_{pu}$ , es de 1861.6 MPa y cada cable tiene una tensión de 147.1 kN.

El diseño del espécimen se realizó de acuerdo con el Manual de diseño del PCI, la resistencia a la fluencia fue de 402 kN, resistencia a corte directo 637 kN, resistencia a flexión 814 kN y corte por tensión diagonal 1039 kN.

### Propiedades mecánicas de los materiales

Para conocer la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, el módulo de Poisson, la resistencia a la tensión, y el módulo de ruptura del concreto, se obtuvieron 15 cilindros para los dos primeros especímenes, además 6 vigas de 15 cm x15 cm x 60 cm. Dichas muestras fueron probadas a 14, 21 y 28 días, y una última el día de la prueba de cada espécimen.

Para el armado del espécimen fueron empleados varios diámetros de barras de acero (Figura 20) y para obtener sus propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tensión simple para obtener el esfuerzo de fluencia y la resistencia última. Se probaron dos especímenes por cada diámetro. En cada barra ensayada se colocó un anillo instrumentado, además se utilizaron extensómetro tipo strain gage. De acuerdo con los resultados obtenidos, la resistencia promedio a la fluencia,  $f_y$ , fue de 387.4 MPa. Las propiedades mecánicas de los materiales son expuestas en la Tabla 1.

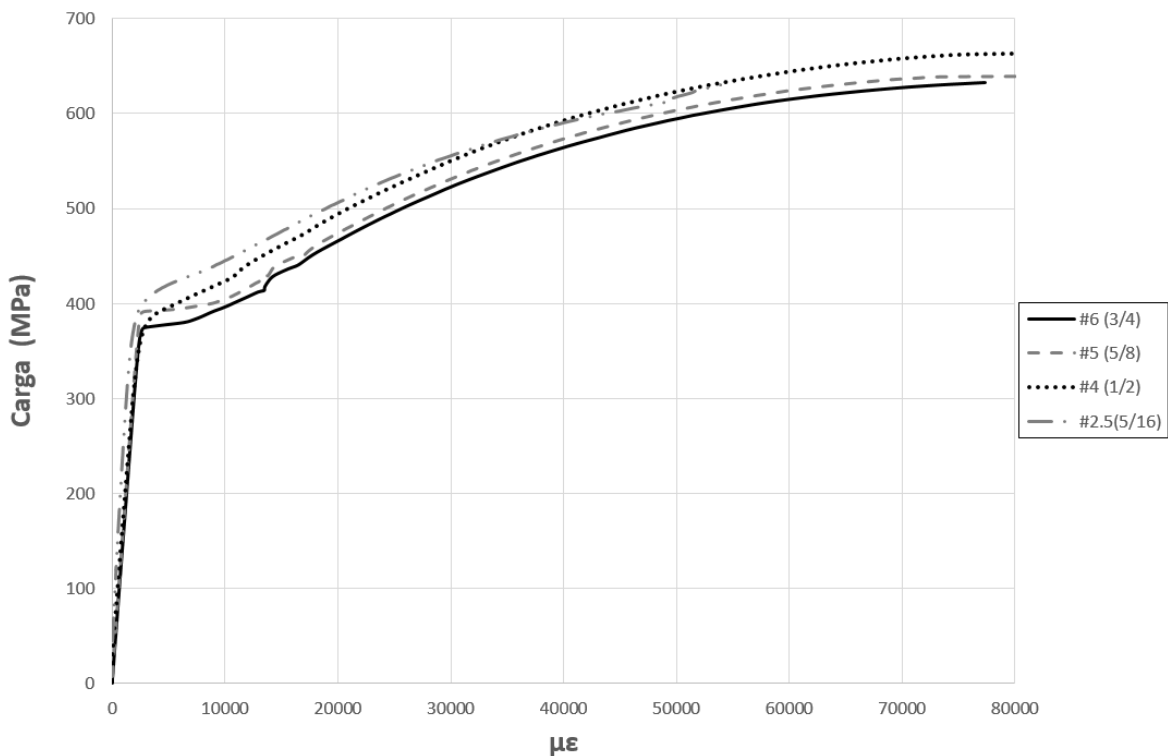


Figura 20 Curvas esfuerzo-deformación del acero

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los materiales

Material	$f'_c$ (MPA)	$f_t$ (MPA)	$E_c$ (GPA)	$f_y$ (MPA)	$E_s$ (GPA)	$\nu$
Concreto	57.5	4.39	28.2			0.23
Barras colgantes #2.5				407.8	151	
Barras parrillas #4				382.8	129.58	0.30
Cable Presfuerzo $\varnothing 5/8''$				1589	186	

### Instrumentación

Para la instrumentación del espécimen de ensaye se utilizaron un total de 33 extensómetros (strain gages) adheridos a las barras de acero (Figura 21 y 22), previamente instalados durante el habilitado de acero de refuerzo, para obtener las deformaciones unitarias de las barras, detectar la fluencia de las barras y observar el nivel de esfuerzos alcanzado para una carga aplicada dada. Los extensómetros fueron colocados en los colgantes, parrillas, refuerzo a flexión superior e inferior y en el postensado. Además, se utilizaron 10 potenciómetros colocados simétricamente en ambos costados del espécimen para medir desplazamientos y rotaciones mostrados previamente en la Figura 19.

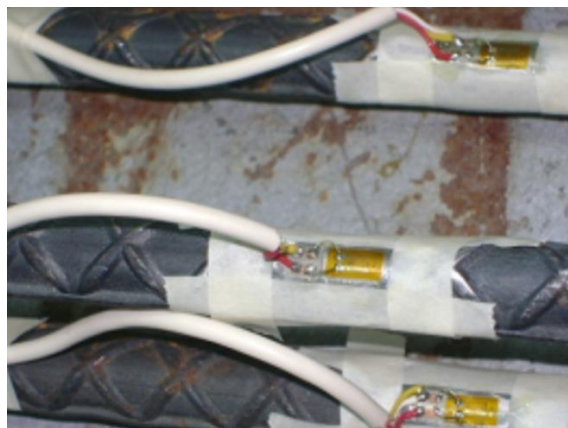


Figura 21 Habilitado de extensómetros sobre barras de refuerzo. (Moreno Martínez & Meli, 2014)

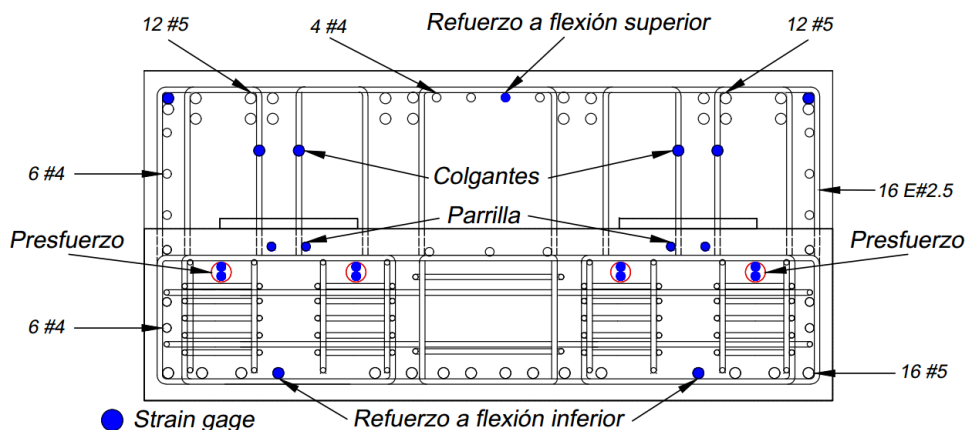


Figura 22 Ubicación de Strain gages en el espécimen

### Aplicación de la carga

El protocolo de carga consistió en aplicar carga vertical simétrica directamente sobre el extremo recortado mediante 2 gatos hidráulicos con capacidad de 981 kN cada uno. Para la carga simétrica se aplicó 180 kN en un apoyo y 180 kN en el otro correspondiente a la carga de servicio.

El espécimen fue anclado a la base de concreto por 6 barras de acero que fueron tensionadas para asegurar un contacto adecuado entre las dos superficies de concreto (Figura 19). Las cargas horizontales que pueden ser producidas por el tráfico o debido a un sismo no fueron simuladas en el ensaye porque estas serían resistidas por la parrilla de refuerzo sin tener impacto en modo de falla crítica, por el contrario, la fluencia de los colgantes debido a la carga vertical aplicada impacta directamente en los modos de falla.

Finalmente, como resultado del ensaye se muestra la Figura 23, la curva carga-desplazamiento obtenida de la aplicación de la carga de servicio. En la cual se detectó una pequeña variación en la pendiente de la curva, que representa un cambio de rigidez iniciando el agrietamiento al casi aplicar el 100% de la carga de servicio (177 kN)

Además, se anexa la Figuras 24 que muestra la evolución de las deformaciones unitarias, la cuales fueron obtenidas mediante los strain gages en cada incremento de carga hasta llegar a la carga de servicio.

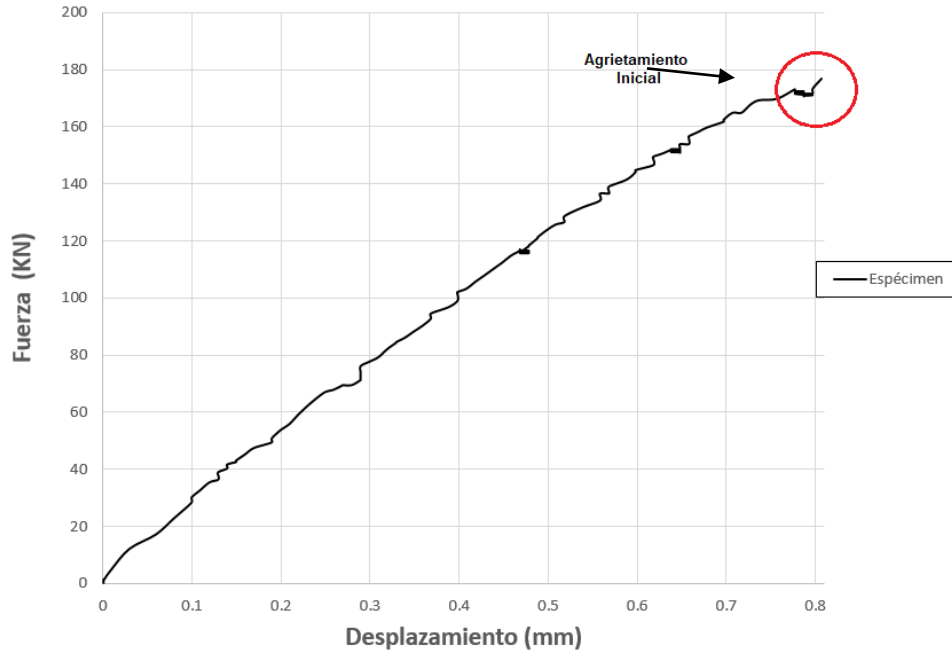


Figura 23 Curva Carga-desplazamiento. (Moreno Martínez & Meli, 2014)

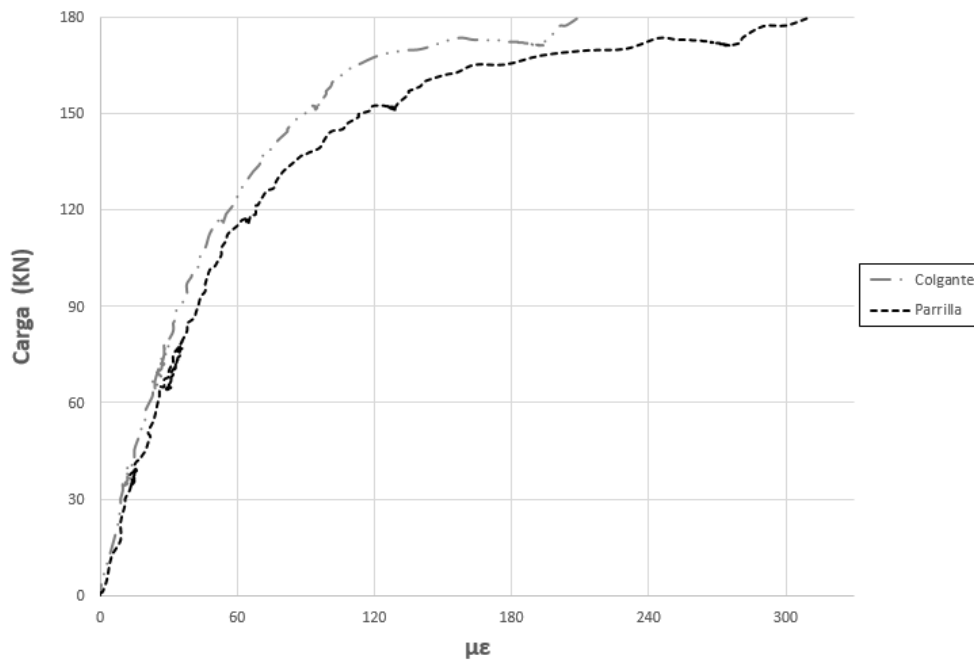


Figura 24 Relación carga/deformación. (Moreno Martínez & Meli, 2014)

### **3.1.2 Fase numérica**

El modelo de elemento finito utilizó principalmente un elemento sólido de 8 nodos, llamado en ANSYS SOLID65, para modelar elementos de concreto simple o concreto armado (acero disperso) y para el modelado del acero de refuerzo se utilizó el elemento LINK8 de dos nodos, para modelar el acero de refuerzo y acero de presfuerzo de manera discreta. Estos elementos y otros más se describen en los siguientes apartados.

Las propiedades mecánicas de los materiales aplicados al modelo numérico (Tabla 1 y Figura 20) son necesarios para lograr la calibración y validación de modelo.

La implementación del análisis y solución del modelo de elemento finito se realizó en tres pasos. Primero se aplicó una deformación unitaria inicial al acero de presfuerzo (LINK8) para simular el postensado, el cuál aporta el 74% a flexión del espécimen. El segundo paso fue aplicar gradualmente un desplazamiento en las placas de carga hasta llegar al valor de 1 mm equivalente a la carga de servicio de 180 kN.

En los siguientes puntos se verá a detalle cada uno de los pasos para realizar el modelo numérico, su calibración y su validación. Así mismo se describirán detalles importantes como lo es la geometría, el armado y consideraciones necesarias (condiciones de apoyo y frontera) aplicadas al modelo.

### **3.2 Detalles geométricos**

A continuación, se muestran las dimensiones generales del modelo, así como también el acero de refuerzo y presfuerzo en el extremo recortado. Es importante señalar que con base a la literatura consultada y a los resultados del ensaye experimental se sabe que el acero de refuerzo que este más cercano a la esquina re-entrante será el primero en tener esfuerzos considerables incluso llegar a la fluencia durante la aplicación de la carga de servicio. Tomando en cuenta lo anterior, el acero que se consideró de manera discreta (Figura 25) en el modelo numérico fue: colgantes, parrillas, acero de presfuerzo. Además, en la Figura 26 se aprecia el acero total del diseño.

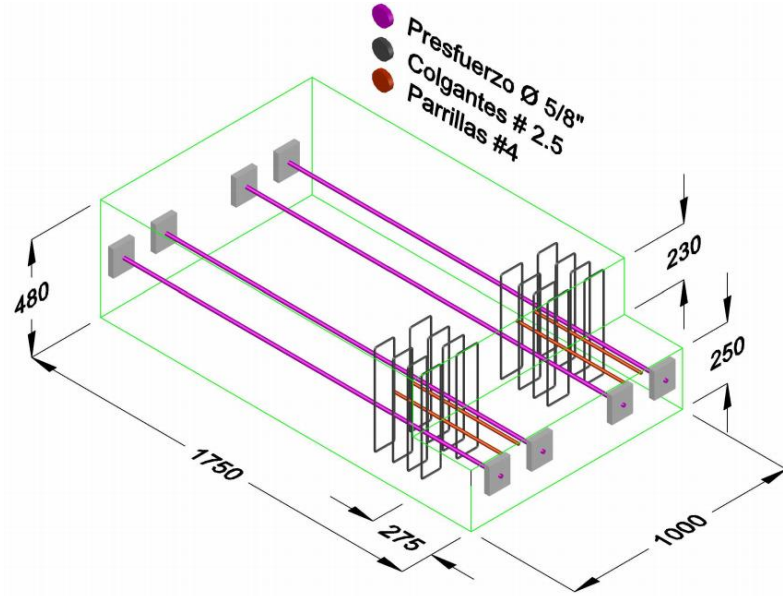


Figura 25 Acero discreto en el modelo, dimensiones en mm.

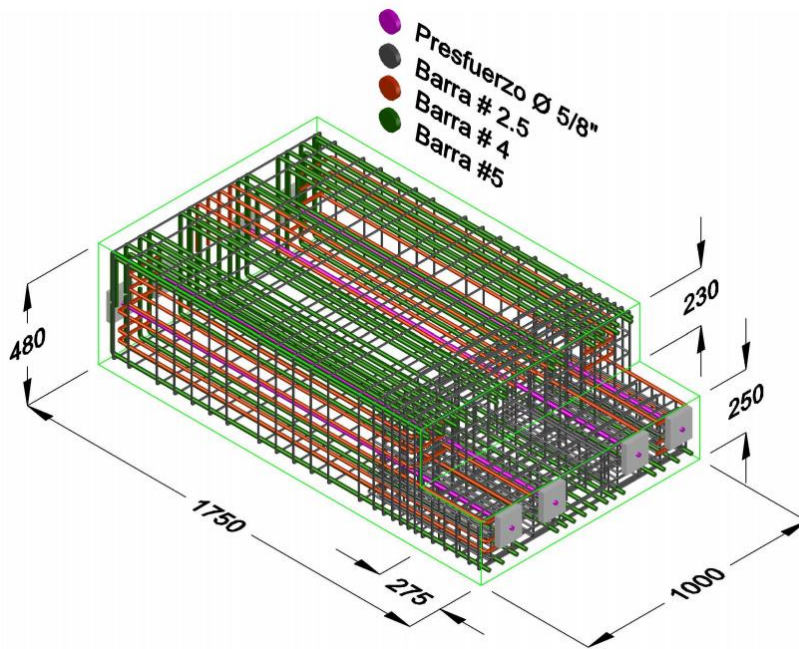


Figura 26 Armado del espécimen, dimensiones en mm.



### 3.3 Modelo de elemento finito

La modelación de estructuras de concreto reforzado (CR) es muy compleja, debido principalmente al comportamiento no lineal del concreto y acero al trabajar juntos. Agrietamiento del concreto, resistencia a tensión, propiedades del material no-lineal multiaxial y comportamiento en interfaces complejas eran previamente ignorados o tratados de manera muy aproximada.

La formación de grietas es sin duda alguna uno de los más importantes fenómenos no-lineales dado que las grietas gobiernan el comportamiento de las estructuras de concreto. En consecuencia, cualquier programa que se utilice para el análisis de estructuras de concreto debe de usar algún procedimiento numérico que permita el monitoreo de grietas. Desde que el análisis del método finito fue aplicado al concreto, la formación de grietas ha recibido especial atención (Borst & Nauta, 1985).

Hay un gran número de modelos constitutivos que se han ido mejorando para poder predecir, de la manera más cercana a la realidad, la respuesta no-lineal del concreto reforzado bajo diferentes tipos de carga. Estos modelos del comportamiento del concreto pueden ser clasificados de manera general en dos categorías:

1. Aquellos que se derivan de análisis de regresión lineal de datos experimentales (modelos empíricos)
2. Aquellos modelos basados en la teoría de la mecánica continua para su desarrollo, de igual manera recurren a datos obtenidos experimentalmente para su calibración

Las teorías de la mecánica de los medios continuos (elasticidad no-lineal, plasticidad, viscoplasticidad, etc.) fueron inicialmente adoptados para describir el comportamiento de materiales casi-homogéneos e isotrópicos como el acero. Conforme pasó el tiempo, el uso de estas teorías fue extendiéndose para describir el comportamiento fenomenológico de materiales heterogéneos como el concreto, el cual incluye discontinuidades. Las formulaciones resultantes usualmente incorporan un número de parámetros, la evaluación de dichos parámetros es esencial para poder conseguir una correlación más cercana entre el comportamiento esperado del modelo y su contraparte obtenida experimentalmente.

Estos parámetros, los cuales son relacionados a las características de la resistencia del concreto después de alcanzar su máximo, son considerados durante la calibración basado en el uso de información experimental de la estructura.

Gracias a los avances computacionales y a la simulación numérica (a través del análisis de elemento finito) en los últimos años ha permitido obtener resultados cada vez más precisos y en un menor tiempo de procesamiento.

Este trabajo de investigación utiliza el paquete de ANSYS debido a una extensa documentación disponible ajena a la empresa. Además, debido a su capacidad de analizar la no-linealidad del concreto a través de los modelos constitutivos con los que cuenta, tiene una interfaz amigable y la posibilidad de importar modelos de programas como AutoCAD.

### 3.3.1 Tipos de elementos

El modelo final está compuesto principalmente por dos tipos de elemento: SOLID65 y LINK8 los cuales se describen a continuación:

SOLID65 (Figura 27)

Es utilizado para el modelado de sólidos 3-D con o sin barras de refuerzo. Para su aplicación en concreto, por ejemplo, la capacidad sólida del elemento debe ser utilizada para modelar el concreto mientras que la capacidad de refuerzo es disponible para el modelado del comportamiento del acero de refuerzo.

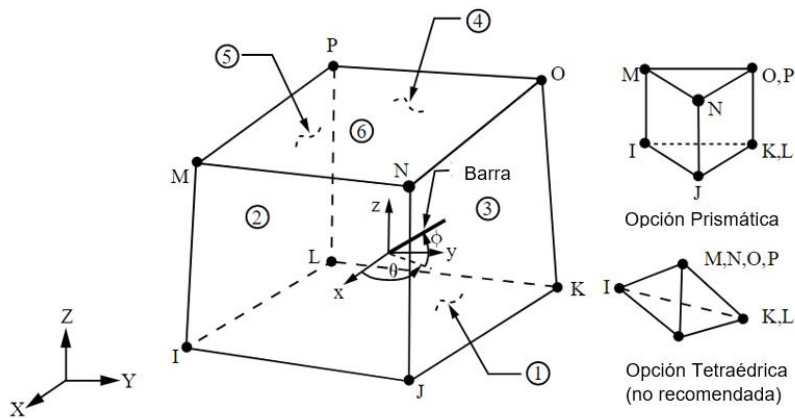


Figura 27 Elemento SOLID65 Fuente: ANSYS 2009(v.12.0)

El elemento es definido por 8 nodos, cada uno de ellos tiene 3 grados de libertad: desplazamiento nodal en X, Y y Z. Hasta tres diferentes tipos de refuerzo disperso pueden ser aplicados. El material es capaz de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión. El más importante aspecto de este elemento es el tratamiento de las propiedades no lineales del material. El concreto es capaz de agrietarse (en tres direcciones ortogonales), aplastarse, deformación plástica y flujo plástico. El refuerzo es capaz de resistir esfuerzo de compresión y tensión, pero no cortante. También son capaces de deformaciones plásticas y flujo plástico.

### LINK8 (Figura 28)

Es un elemento tipo barra el cual puede ser usado en distintas aplicaciones de ingeniería. Este elemento puede ser utilizado para modelar armaduras, cables colgantes, barras de refuerzo, resortes, etc. Es un elemento uniaxial tensión-compresión 3-D, cuenta 2 nodos y 3 grados de libertad en cada uno de ellos: desplazamientos nodales en dirección X, Y y Z. Plasticidad, flujo plástico, endurecimiento por deformación y grandes deformaciones son incluidas.

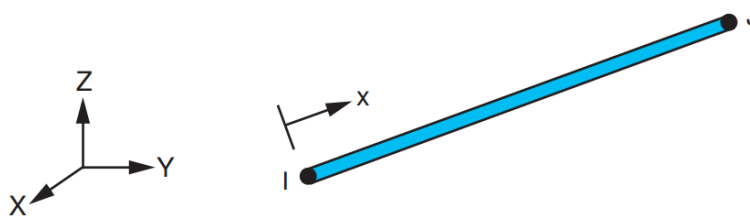


Figura 28 Elemento LINK8 Fuente: ANSYS 2009 (v.12.0)

El modelo en desarrollo llamado P74-PHGD (modelo con **P**ostensado del **74%**, **P**resfuerzo, **H**angers, **G**rid de manera **D**iscreta), contó con 49552 elementos hexaédricos y 964 elementos barra (Tabla 2).

Tabla 2 Resumen de elementos del modelo P74-PHGD

Partes del modelo	Tipo elemento		# Nodos	Grados de libertad
	SOLID65	LINK8		
Concreto	49552	-----	396416	1189248
Acero de refuerzo	-----	964		

En las figuras siguientes se muestran los elementos que constituyen al modelo, en la Figura 29 se observan los elementos sólidos en vista 3-D, en la Figura 30 se observa la ubicación y orientación del refuerzo disperso dentro de los elementos sólidos, finalmente en la Figura 31 se parecía la ubicación del acero de refuerzo y presfuerzo de manera discreta (colgantes, presfuerzo y parillas).

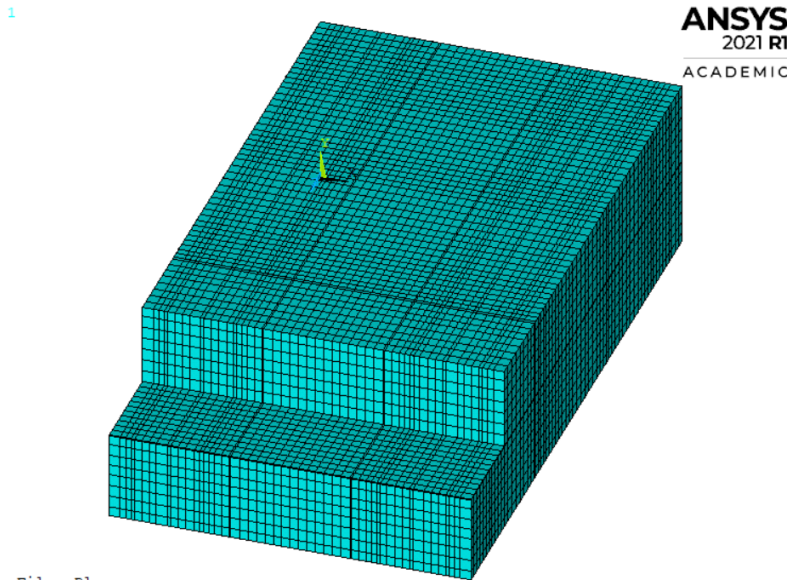


Figura 29 Elementos sólidos, SOLID65

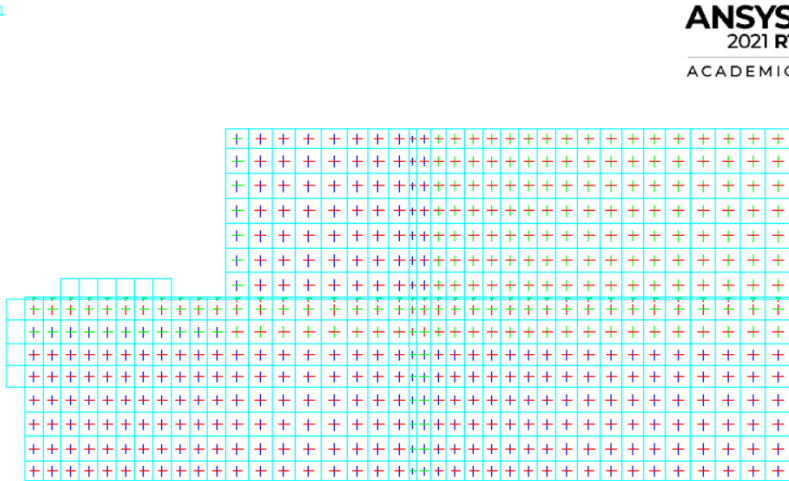


Figura 30 Orientación del acero disperso dentro del SOLID65

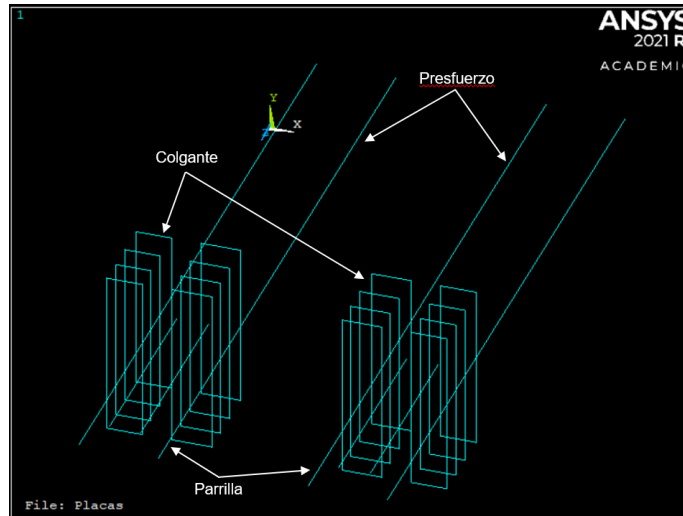


Figura 31 Ubicación del acero discreto LINK8

### Acero de presfuerzo

El modelado de acero de presfuerzo a través del elemento LINK8 se realiza mediante datos de entrada llamados constantes reales, este elemento requiere el ingreso de dos constantes: 1) Área de la sección y 2) Deformación inicial.

A través de la aplicación de una deformación unitaria inicial permite al LINK8 simular el acero de presfuerzo. Esta deformación inicial al ser aplicado a los torones debe garantizar la fuerza de compresión en ellos que aporte el porcentaje a flexión solicitado (Figura 32).

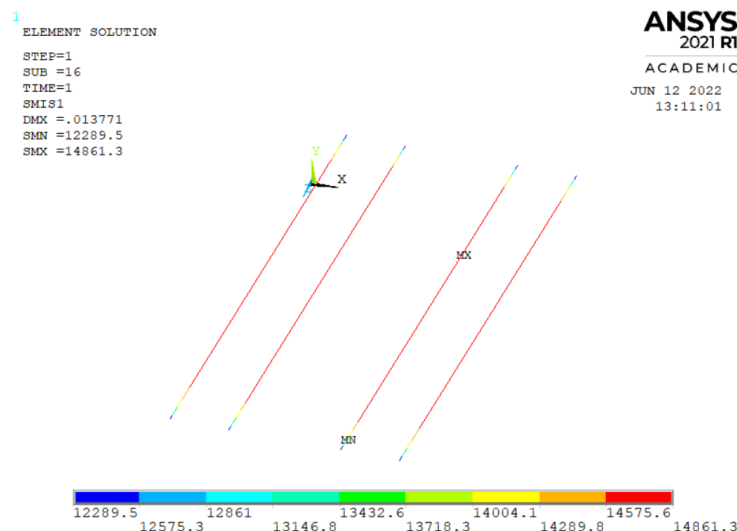


Figura 32 Aplicación del postensado, a través del LINK8

### **3.3.2 Elementos de contacto**

Los modelos de contacto buscan definir lo que ocurre entre las superficies: separación o aplastamiento. Estas formulaciones se basan en restricciones para impedir la penetración.

En base a la documentación del ANSYS, los elementos de contacto pueden ser clasificados en: rígido a flexible y flexible a flexible, dependiendo del comportamiento de los cuerpos en contacto. Estos son denominados como cuerpo objetivo (TARGET) y cuerpo contacto (CONTACT).

En ANSYS hay distintos elementos de contacto que son: un objetivo llamado TARGE1xx y el contacto de la serie CONTA1xx. A pesar que, en esta investigación no se estudia la interacción entre superficies de contacto sino el agrietamiento del concreto fue necesario el uso de estos elementos para la aplicación de la carga en el modelo, esto se explicará en los próximos apartados.

En el modelo P74%-PHGD se utilizaron los elementos TARGE170 y CONTA173; elemento objetivo y contacto respectivamente, esto debido a las características del elemento SOLID65 utilizado en las zonas de contacto, puesto que no tienen nodos intermedios.

#### CONTA173

Es utilizado para representar el contacto y deslizamiento entre dos superficies tridimensionales. Tiene tres grados de libertad en dirección X, Y y Z. Tiene las mismas características geométricas como el sólido con el que se conecta. La geometría y localización de los nodos se observa en la Figura 33, está definido por 4 nodos, pudiéndose degradar a un elemento de tres nodos, esto dependiendo de la forma del elemento sólido subyacente.

#### TARGE170

Es empleado para representar superficies asociadas a un elemento de contacto tridimensional, posee tres grados de libertad en dirección X, Y y Z. Se adapta a nodos, líneas y superficies 3-D. Se puede aplicar cualquier desplazamiento rotacional o longitudinal. La geometría y localización de los nodos se observa en la

Figura 34, donde también se observa los distintos casos para este elemento, iniciando con las superficies en general asociados, respectivamente, a los elementos CONTA173 y CONTA174.

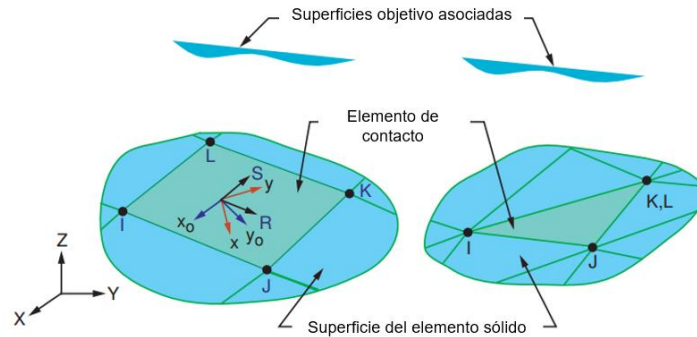


Figura 33 Geometría CONTA173 Fuente: ANSYS 2009(v.12.0)

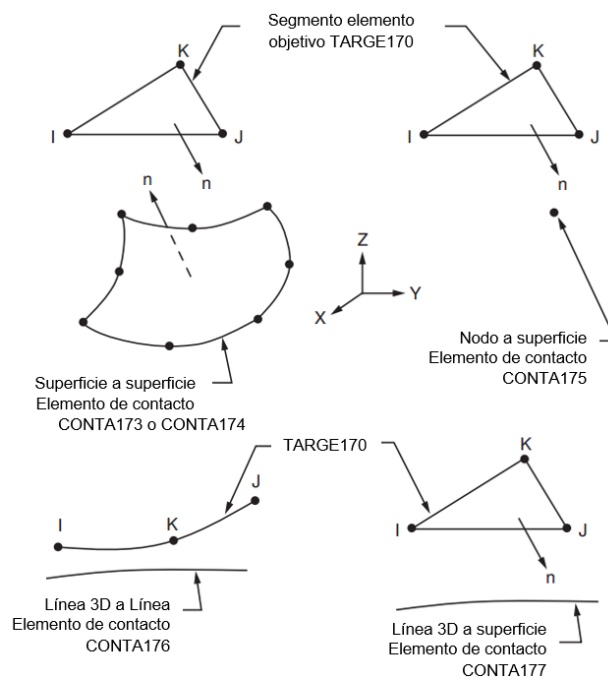


Figura 34 Geometría TARGE170 Fuente: ANSYS 2009(v.12.0)

Estos dos elementos son aplicados al modelo y se observan en la Figura 35, donde el elemento TARGE170 genera un maestro y el elemento CONTA173 una superficie de contacto. A través de esta interacción de estos dos elementos se realizó la aplicación de la carga vertical de servicio al modelo, explicado en el apartado de protocolo de cargas.

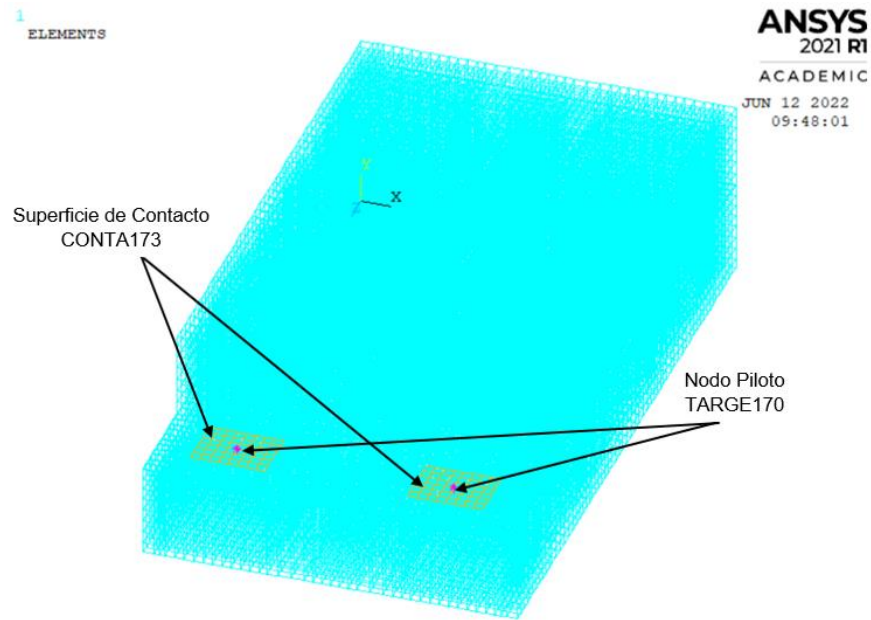


Figura 35 Superficie de contacto en el modelo

### 3.4 Propiedades mecánicas de los materiales

En este trabajo se utilizan distintas teorías para modelar el comportamiento no lineal del material, se describirán a continuación los modelos aplicados al concreto y al acero de refuerzo y presfuerzo.

#### 3.4.1 Modelo del material Concreto

A través del elemento SOLI65 se puede asignar propiedades elásticas e inelásticas del material, incluso tiene la capacidad de aplicar el modelo de daño para concreto propuesto por Willam y Warnke en 1975 (Figura 36), esto permite al concreto agrietarse a tensión y aplastarse a compresión. El concreto al alcanzar su máximo esfuerzo a tensión se produce una grieta, ANSYS no tiene la capacidad de evaluar al ablandamiento por deformación del concreto, por lo que realiza una caída lineal que permite la convergencia de los resultados (Figura 37).

El agrietamiento y aplastamiento son determinados por una superficie de falla. Los esfuerzos principales con mayor importancia se encuentran en las direcciones X y Y, representadas por  $\sigma_{xp}$  y  $\sigma_{yp}$ , respectivamente. En la Figura 36 se muestran tres superficies de fluencia como proyecciones en los planos  $\sigma_{xp}$  y  $\sigma_{yp}$ . El modo de falla



depende del signo de  $\sigma_{zp}$  (esfuerzo principal en la dirección Z). Por ejemplo, si  $\sigma_{xp}$  y  $\sigma_{yp}$  son negativos (compresión) y  $\sigma_{zp}$  es positivo (tensión), se podría predecir un agrietamiento en una dirección perpendicular a  $\sigma_{zp}$ . Sin embargo, si  $\sigma_{zp}$  es cero o negativo, la falla del material será por aplastamiento (ANSYS 2009).

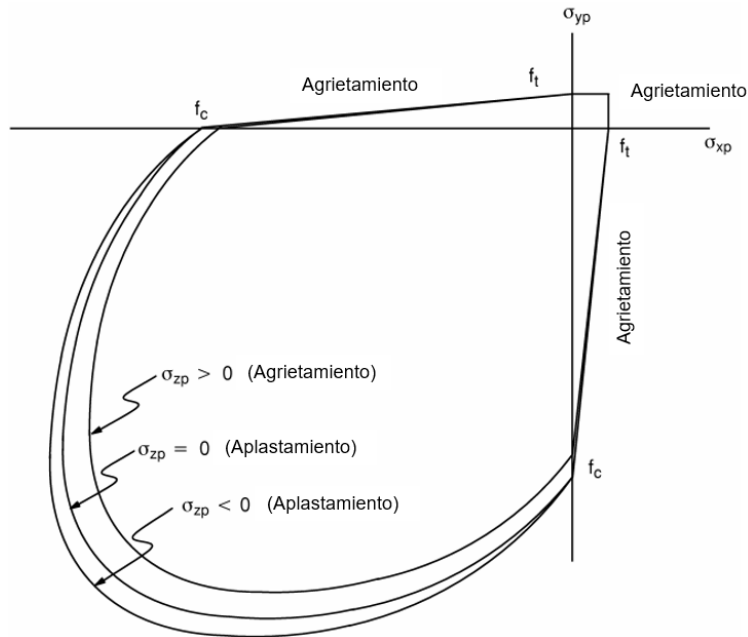


Figura 36 Superficie de falla en el espacio de esfuerzo principal  $\sigma_{zp}$ , ANSYS 2009

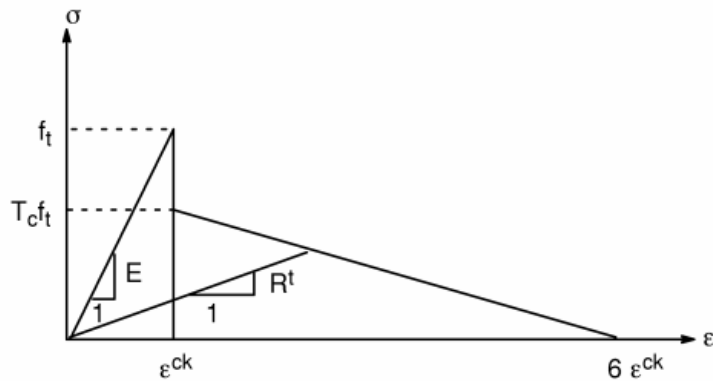


Figura 37 Resistencia de la condición agrietada, ANSYS 2009

La superficie de falla depende de 5 parámetros, de la etapa elástica se requiere el modelo de elasticidad y relación Poisson (obtenidos de pruebas de laboratorio mediante el ensaye de cilindros de concreto a compresión) y de la etapa inelástica coeficiente de transferencia de corte para grieta cerrada, coeficiente de transferencia para grieta abierta, esfuerzo de tensión uniaxial y esfuerzo de compresión uniaxial.

La falla a tensión consiste de un criterio de esfuerzo máximo de tensión. Si la deformación plástica es tomada en cuenta, el comportamiento del material es elástico lineal hasta su falla. Cuando la falla es alcanzada los esfuerzos en esa dirección toman un valor de cero, ya que no hay esfuerzos de ablandamiento en compresión ni en tensión. Dos coeficientes de transferencia de cortante (grieta cerrada y grieta abierta) son usados para considerar la retención de rigidez a cortante en el concreto agrietado (Barbosa & Ribeiro, 1998).

Es necesario tomar en cuenta las deformaciones plásticas del concreto para ello se necesita, además de las propiedades elásticas e inelásticas antes mencionadas, ingresar la cohesión, el ángulo de fricción interno y ángulo de dilatación para abastecer el modelo de plasticidad de Drucker-Prager.

El criterio de fluencia de Drucker-Prager es un modelo dependiente de la presión que determina si un material ha sobrepasado el límite elástico. Este criterio fue introducido para tratar de representar la deformación plástica de los suelos. Este criterio, así como sus muchas variantes, han sido aplicados para rocas, concreto, polímeros, espumas y otros materiales que presentan un comportamiento dependiente de la presión.

El modelo Drucker-Prager modifica la función de fluencia Mohr-Coulomb para evitar singularidades asociadas a las esquinas. A diferencia del modelo de Mohr-Coulomb, el modelo de superficie de fluencia Drucker-Prager alisa y se representa como un cono cilíndrico en el espacio de tensión principal (Figura 38).

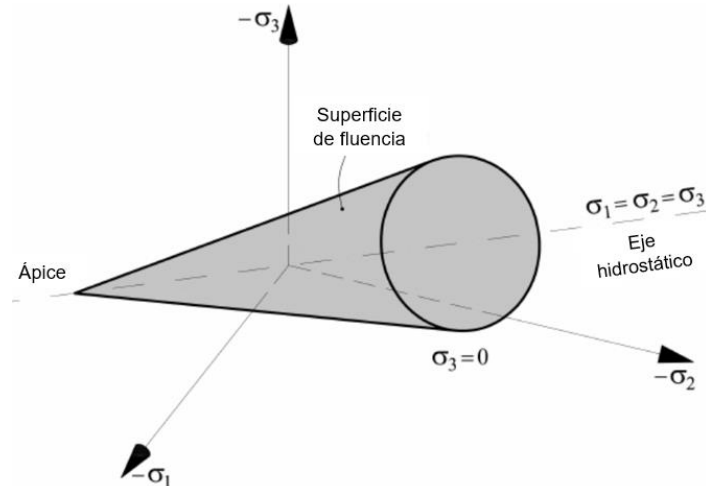


Figura 38 Superficie de Fluencia, Modelo de plasticidad Drucker-Prager,

### 3.4.2 Modelo del material Acero

Para el modelado del acero se utiliza la teoría plástica que permite modelar el comportamiento no-lineal del material. En esta teoría la respuesta de un material después de la fluencia es descrita especificando una nueva superficie de fluencia, llamada superficie de carga o superficie de fluencia subsecuente. La regla que especifica la respuesta a la post-fluencia es llamada regla de endurecimiento. Las otras dos hipótesis utilizadas por la teoría plástica son el criterio de fluencia inicial y la regla de flujo. El criterio de fluencia inicial define el límite elástico del material y la regla de flujo define la magnitud y dirección de los incrementos en las deformaciones plásticas. La regla de teoría incremental de plasticidad, aplicada en este trabajo, es el criterio de fluencia de Von Mises que maneja el ANSYS.

El criterio de fluencia de Von Mises define el límite elástico de metales dúctiles. Puede expresarse por una superficie de fluencia que se observa en la Figura 39, situada en el espacio de esfuerzos principales ( $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$ ). La superficie del cilindro es llamada superficie de fluencia. Los puntos dentro de la superficie representan los estados elásticos, los puntos fuera representan los estados plásticos y los puntos en la superficie de fluencia representan los estados críticos. La orientación del cilindro es paralela a la línea hidrostática de esfuerzos. Siempre que un esfuerzo principal es constante, la zona de fluencia se vuelve una elipse como se observa en la Figura 39.

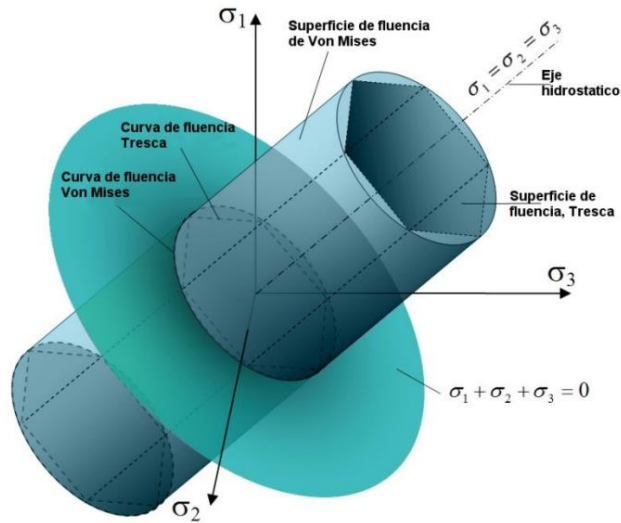


Figura 39 Superficie de fluencia de Von Mises, (Wikimedia)

A continuación, se describen las características del concreto, acero de refuerzo y acero de presfuerzo que son los tres materiales que componen el modelo. Las características de los materiales son tomadas de los resultados de las pruebas de laboratorio (Moreno Martínez & Meli, 2014).

### Características de los materiales

La definición del comportamiento del concreto en el modelo se realizó a través de ingresaron los 5 parámetros para abastecer el modelo de daño de Willam y Warnke, más la cohesión, ángulo de fricción interna, y ángulo de dilatancia para modelar la plasticidad del concreto (Tabla 3).

Gran parte de los valores utilizados fueron obtenidos de pruebas de laboratorio otros fueron obtenidos de la literatura como lo son coeficientes de transferencia para grieta abierta o cerrada. El rango de los coeficientes de transferencia abarca un rango de 0 a 1, donde 0 representa la pérdida completa de transferencia a cortante y 1 una transferencia de cortante sin pérdidas. Valores para coeficientes de transferencia para grieta abierta menores a 0.2 conducen a problemas de convergencia como se reporta en la en literatura, se utilizó un valor de 0.25.

El esfuerzo uniaxial de aplastamiento en este modelo se basó en la resistencia a compresión uniaxial ( $f'_c$ ) y se denota como  $f_t$ . Se ingresó el valor de -1 para

desactivar la capacidad de aplastamiento del concreto para evitar problemas de convergencia, esto es sugerido por diversos investigadores.

Tabla 3 Propiedades del concreto para aplicación al modelo

Parte del modelo	Propiedades del material	
Concreto	Isotrópico Lineal	
	Modulo Elasticidad	282000 kg/cm <sup>2</sup>
	Coeficiente de Poisson	0.23
	Concreto	
	Coef. Transf. Grieta A.	0.25
	Coef. Transf. Grieta C.	0.7
	Esfuerzo de tensión Uniaxial	44.73 kg/cm <sup>2</sup>
	Esfuerzo de compresión Uniaxial	-1
	Drucker-Prager	
	Cohesión	241.5
	Ángulo de fricción interno	11.54
	Ángulo de dilantancia	11.54

El modelo P74%-PHGD comprende barras de refuerzo del numero #2.5 y #4 de forma discreta y por barras de refuerzo del numero #2.5, #4 y #5 de forma dispersa (a través del elemento SOLID65) correspondiente a la cuantía volumétrica en el sentido longitudinal; cuenta además de acero de presfuerzo Ø5/8". Las propiedades tanto elásticas como inelásticas de los distintos aceros se observan en la Tabla 4.

La curva elasto-plástica de los distintos aceros fueron modeladas en ANSYS mediante la opción de material MISO (Endurecimiento Isotrópico Multilineal) la cual utiliza los criterios de Von Mises junto con una hipótesis de trabajo de endurecimiento isotrópico. El comportamiento del material se describe mediante una curva esfuerzo-deformación conformada por segmentos de línea, comenzando en el origen con valores positivos de esfuerzo y deformación. La curva es continua desde el origen y puede tener hasta 100 puntos. La pendiente del primer segmento de la curva corresponde al módulo de elasticidad del material y es muy importante que ningún segmento de línea debe de tener pendiente menos a cero.

Tabla 4 Propiedades del acero para aplicación del modelo

<b>Parte del modelo</b>	<b>Propiedades del material</b>	
VAR #2.5	Isotrópico Lineal	
	Modulo Elasticidad	1597873 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de Poisson	0.2
	Isotrópico multilíneal Von Mises	
	Deformación unitaria	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
	0.002539	4057
	0.032997	5790
VAR #4	Isotrópico Lineal	
	Modulo Elasticidad	1494377 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de Poisson	0.2
	Isotrópico multilíneal Von Mises	
	Deformación unitaria	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
	0.002401	3588
	0.051923	6395
Acero disperso	Isotrópico Lineal	
	Modulo Elasticidad	1578000 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de Poisson	0.2
	Isotrópico multilíneal Von Mises	
	Deformación unitaria	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
	0.00248	3914
	0.006	4027
Acero de presfuerzo	Isotrópico Lineal	
	Modulo Elasticidad	1900000 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de Poisson	0.2
	Isotrópico multilíneal Von Mises	
	Deformación unitaria	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
	0.00852	16200
	0.02	18000
0.04	19000	

### 3.5 Condiciones de Frontera y Protocolo de Carga

El proceso de análisis y solución del modelo se llevó a través del protocolo de control de desplazamientos bajo condiciones de frontera, las cuales tienen como objetivo garantizar que el modelo se desempeñe lo más cercado posible que el espécimen experimental durante su ensaye.

Se aplicaron condiciones de frontera de desplazamientos indicados en la Figura 40 restringiendo el modelo para tener una única solución. Durante la prueba de laboratorio, el espécimen fue colocado en una base de concreto y sujetado por la parte superior por 6 barras de acero; para simular la base de concreto se colocaron restricciones al centro geométrico del elemento en los ejes X y Z (Figura 40), también se incluyó una línea de restricciones adicional a lo largo del eje Z, donde termina la zona crítica de transición (119.5 en X, zona de colgantes) en la dirección Y. Para simular las 6 barras de acero se utilizó un elemento resorte lineal denominado COMBIN14 para reproducir la rigidez aportadas por las anclas en el ensaye. Se colocaron nodos duplicados en el mismo punto para crear el elemento resorte con longitud cero con un inicio y fin, además en un extremo se restringieron sus desplazamientos y rotaciones mientras que el otro extremo se le permitió el desplazamiento en dirección Y (Figura 40).

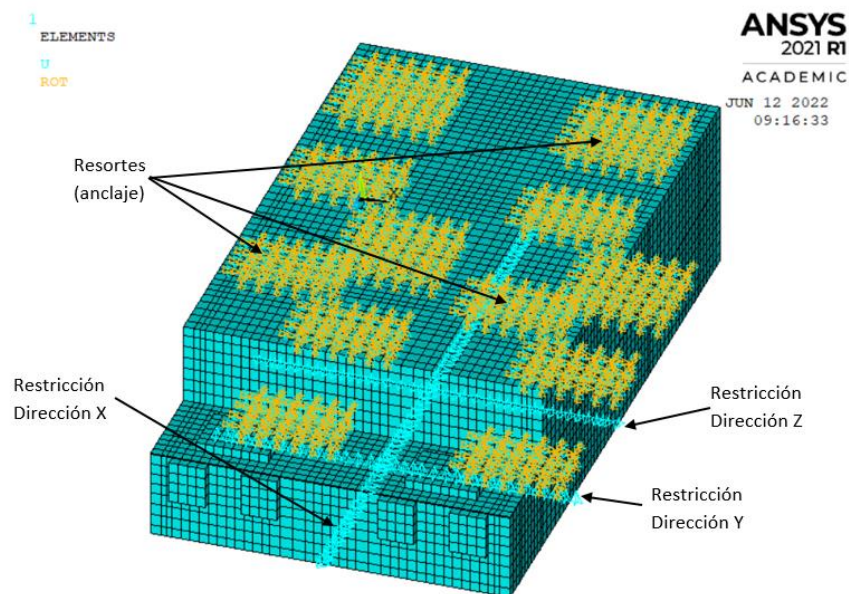


Figura 40 Condiciones de frontera en el modelo

El análisis del modelo contempló 3 partes, el primer paso de 1 segundo fue cuando se aplicó el postensado al elemento, el segundo paso fue la aplicación de la carga de servicio y por el último paso contemplo la descarga del elemento.

### 3.5.1 Carga de servicio simétrica

Se modelaron un par de placas de acero colocadas sobre la nariz necesarias para transmitir la carga de los vehículos, representada mediante dos gatos hidráulicos. Se usaron elementos sólidos isoparamétricos 3D considerando las propiedades mecánicas elásticas del acero estructural empleado.

La aplicación de carga al modelo fue a través del protocolo de control de desplazamientos para ello se requirió un área de contacto controlada por un nodo piloto en cada placa de carga (Figura 41).

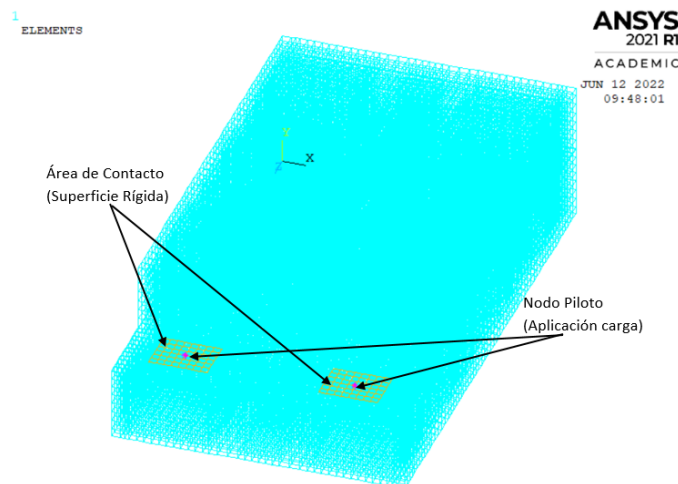


Figura 41 Elementos para la aplicación de carga

Para crear el área de contacto sobre las placas de acero se utilizó el elemento CONTA173, con el que se creó una superficie de contacto permitiendo que, al ser aplicada una carga sobre las placas, todos los nodos que conforman la superficie se desplacen de la misma forma (nodos esclavos). La función del nodo piloto, creado con el elemento TARGE170, es transferir y controlar el desplazamiento vertical, inducido a través de él, sea igual en toda la superficie de contacto. El desplazamiento para las condiciones de servicio simétrica fue de 1 mm, este valor se obtuvo de las mediciones del ensaye del espécimen.



### **3.6 Calibración**

Esta etapa del estudio es necesaria debido a la importancia de un modelo lo suficientemente preciso y eso se logrará configurando ciertos parámetros del modelo de elemento finito. El objetivo es obtener el comportamiento más similar al ensaye experimental de validación, comparando su comportamiento mediante la curva carga-desplazamiento obtenida y las deformaciones unitarias del acero de refuerzo. El proceso de calibración se logrará separando algunos de los puntos más importantes tanto en convergencia como para precisión del modelo, entre ellos están: mallado, tipos de elementos y modelo del material. Los dos últimos ya se han descrito quedando pendiente el mallado.

#### **3.6.1 Mallado**

Para poder realizar el mallado del modelo en ANSYS, primeramente, se comenzó con la etapa artesanal que consisten en el dibujo del espécimen en AutoCAD. Cabe mencionar que el extremo recortado se subdividió en 20 partes sin contar las placas relacionadas al postensado y a las de aplicación de la carga. Estas divisiones se realizaron de manera estratégica para poder contemplar partes cruciales para la elaboración del modelo numérico, como son las líneas por donde va el acero discreto del elemento, la posición de las placas, condiciones de frontera y ubicación de los resortes que simulan el anclaje del elemento (Figura 42). Una vez realizado el dibujo en formato “.sat” se exporta al programa de ANSYS a través del comando satín.

Una vez exportado el dibujo al ANSYS se prosigue al mallado del modelo, para obtener mejores resultados del elemento SOLID65 se recomienda que el mallado sea hexaédrico, así como también es necesario que los elementos y nodos de volúmenes contiguos coincidan y poder obtener un mallado uniforme y sin problemas de relaciones de aspectos. El comando que permitió realizar el mallado del concreto y las placas de acero fue VSWEEP para ello se deben de asignar los atributos particulares para cada parte del elemento.

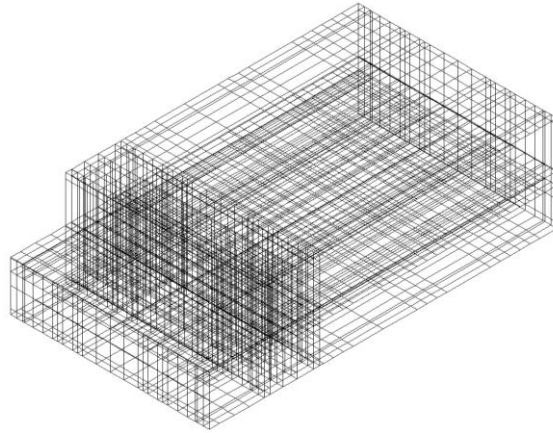


Figura 42 Dibujo del espécimen, AutoCAD formato .sat

El resultado final del mallado del modelo se muestra en la Figura 12 en donde se observa el extremo recortado, las placas de carga, las placas del postensado y en la Figura 43 se representa el acero discreto debido al postensado y a los colgantes.

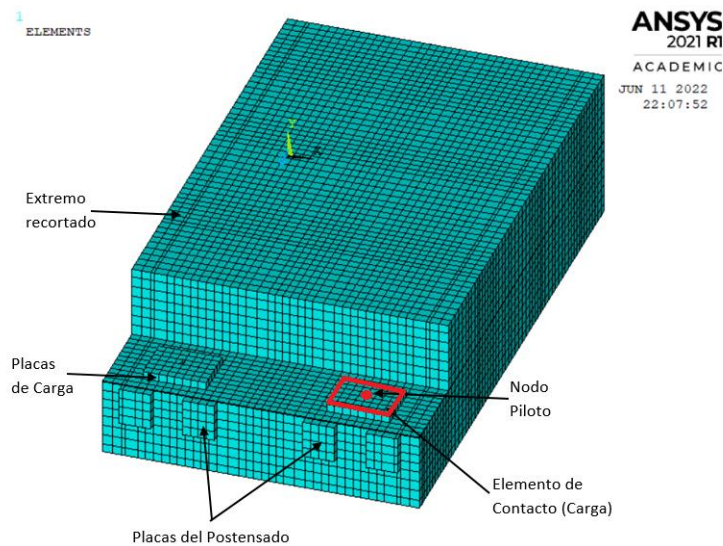


Figura 43 Mallado del modelo

### 3.7 Validación

Como se mencionó en un inicio uno de los parámetros de validación fue a través de la curva carga-desplazamiento. A través del monitoreo de los nodos pilotos, que introdujeron el desplazamiento de 1 mm correspondiente a la carga de servicio, se creó la curva carga-desplazamiento del modelo. En la Figura 44 se muestra el resultado del modelo P74-PHD comparándolo con los resultados de la prueba de laboratorio realizada en Instituto de Ingeniería de la UNAM.

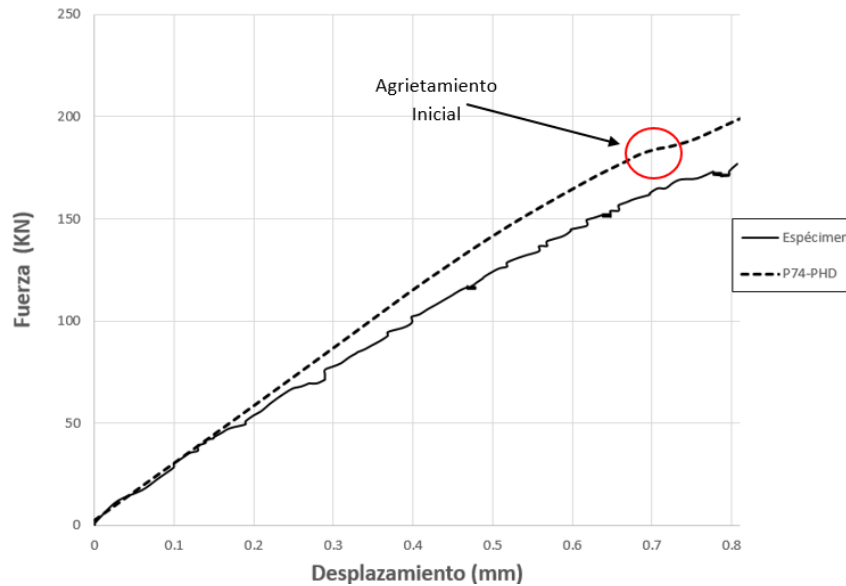


Figura 44 Curva Carga-Desplazamiento, prueba experimental vs modelo

Durante la prueba de laboratorio se registró que el inicio del agrietamiento ocurrió a una carga de servicio de 177 kN, observando la Figura 44 se observa que la curva del modelo P74-PHD tiene una caída de su rigidez, esto está estrechamente relacionado con el inicio del agrietamiento. El valor de carga cuando ocurre la variación de rigidez fue de 184 kN con una variación del 4% respecto a su contraparte experimental.

Basado en la literatura, no hay ningún modelo numérico que pueda obtener al 100% el mismo comportamiento que su contraparte experimental, por lo que al observar los resultados se asume una buena correlación entre el modelo numérico y el espécimen. El siguiente paso es la realización de más modelo haciendo cambios paramétricos, principalmente en el porcentaje de postensado, lo que conlleva a realizar cambios en el acero a flexión en la esquina re-entrante, el 100% del acero a flexión en la esquina re-entrante se respetó para satisfacer lo indicado en el PCI.

## **CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE MODELOS DE CONEXIONES DE EXTREMO RECORTADO**

En este capítulo se muestra el proceso de selección, configuraciones geométricas y detalles del armado de los modelos de estudio basados en el modelo validado P74-PHGD. Debido a lo anterior se observarán que los modelos en estudio tendrán similitudes entre sí y con el modelo P74-PHGD, como por ejemplo el tipo de elemento finito, algoritmos utilizados y geometría del modelo.

Los resultados de los modelos de estudio se evaluarán en términos del comportamiento de la curva carga-desplazamiento y de la carga en que inicia el agrietamiento en la esquina re-entrante para detectar que propuesta tiene mejor desempeño en retardar la aparición de la primera grieta.

### **4.1 Elección y descripción general de los modelos en estudio**

El propósito de este trabajo de investigación es, como anteriormente se mencionó, es observar que configuración paramétrica tiene el mejor comportamiento ante carga vertical de servicio retardo el inicio del agrietamiento prematuro en la esquina re-entrante. En la Tabla 5, se muestran los detalles de las tres propuestas seleccionadas, a su vez cada una de ellas tiene vertientes en cuestión del acero modelado discretamente. Los modelos mantienen las mismas dimensiones geométricas del modelo P74-PHGD; esto con la finalidad de aprovechar al máximo los elementos calibrados en este modelo. Las propiedades mecánicas de los materiales son las mismas que el modelo validado.

Uno de los principales criterios para la selección de los modelos fue el porcentaje de postensado y su impacto que tiene ante la aparición de las grietas prematuras bajo condiciones de servicio. Así mismo se analizó un modelo que contempla, además del postensado, el uso de barras diagonales en sustitución de colgantes permitiendo el descongestionamiento de acero en el extremo recortado. Estas barras diagonales, colocadas en modelo P62-PHGDD, tienen la cualidad que al descomponer su fuerza contribuyen al cortante en la esquina re-entrante y a la flexión en la zona recortada.

Tabla 5 Modelos en estudio.

Modelo	Cambios Paramétricos			
	Parrillas VAR	Colgantes VAR	% Postensado	Diagonales VAR
P29-PHD	6 - #5	20 - #2.5	29	---
P52-PHD	4 - #5	20 - #2.5	52	---
P62-PHD	5 - #4	20 - #2.5	62	---
P62-PHGD	5 - #4	20 - #2.5	62	---
P62-PHGDD	2 - #4	4- #2.5	62	3 - #5
P74-PD	2 - # 4	20 - #2.5	74	---
P74-PHD	2 - # 4	20 - #2.5	74	---
P74-PHGD	2 - # 4	20 - #2.5	74	---

Algo importante a mencionar respecto a los cambios de armado y porcentaje de postensado en los modelos (Tabla 5), es que en todas las propuestas se respetó el diseño del elemento, es decir, si el momento nominal en la nariz es de 14.7 t-m y el cortante nominal en la esquina re-entrante de 41.1 t; todos los modelos respetaron dichos valores con alguna variación ( $\pm$ ) debido a lo diámetros comerciales de las varillas.

#### 4.2 Modelos de elemento finito

En la Tabla 6 se muestra el tipo y número de elementos, así como el tiempo de cálculo computacional de cada uno. En la Figura 45 se observa el mallado de los modelos agrupados en tres conjuntos, esto debido a que el mismo archivo CAD.sat permitió el mallado de los modelos que comparten la misma consideración de acero discreto. En la Figura 46 se muestra el acero discreto considerado en los modelos.

Tabla 6 Cantidad de elementos y tiempo de solución

Nombre	Partes del modelo	Tipo elemento		# Nodos	Grados de libertad	Tiempo de Calculo
		SOLID65	LINK8			
P29-PHD	Concreto	35602	-----	284816	854448	6 ( $\pm$ )
P52-PHD						
P62-PHD						
P74-PHD						
P62-PHGD	Concreto	49552	-----	396416	1189248	16 ( $\pm$ )
P74-PHGD						
P62-PHGDD	Concreto	66510	-----	532080	1596240	12 ( $\pm$ )

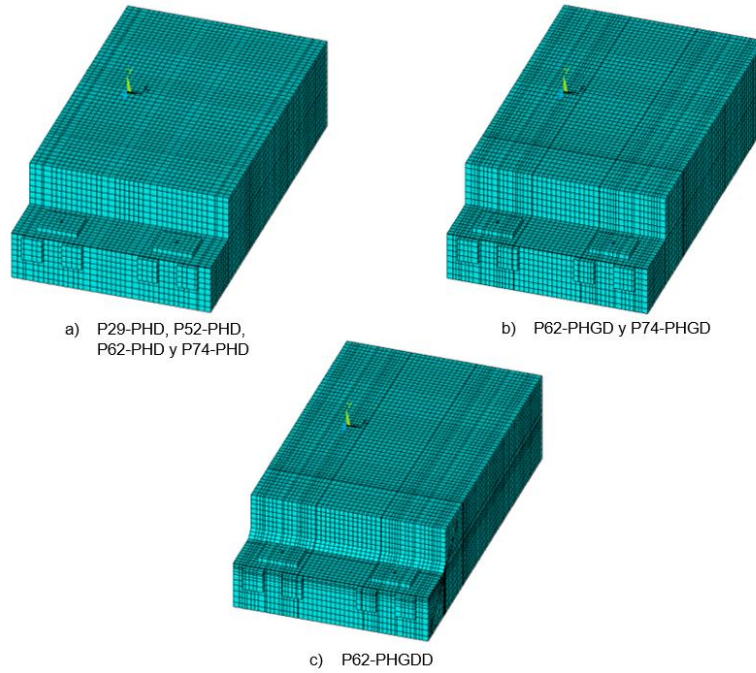


Figura 45 Mallado de modelos

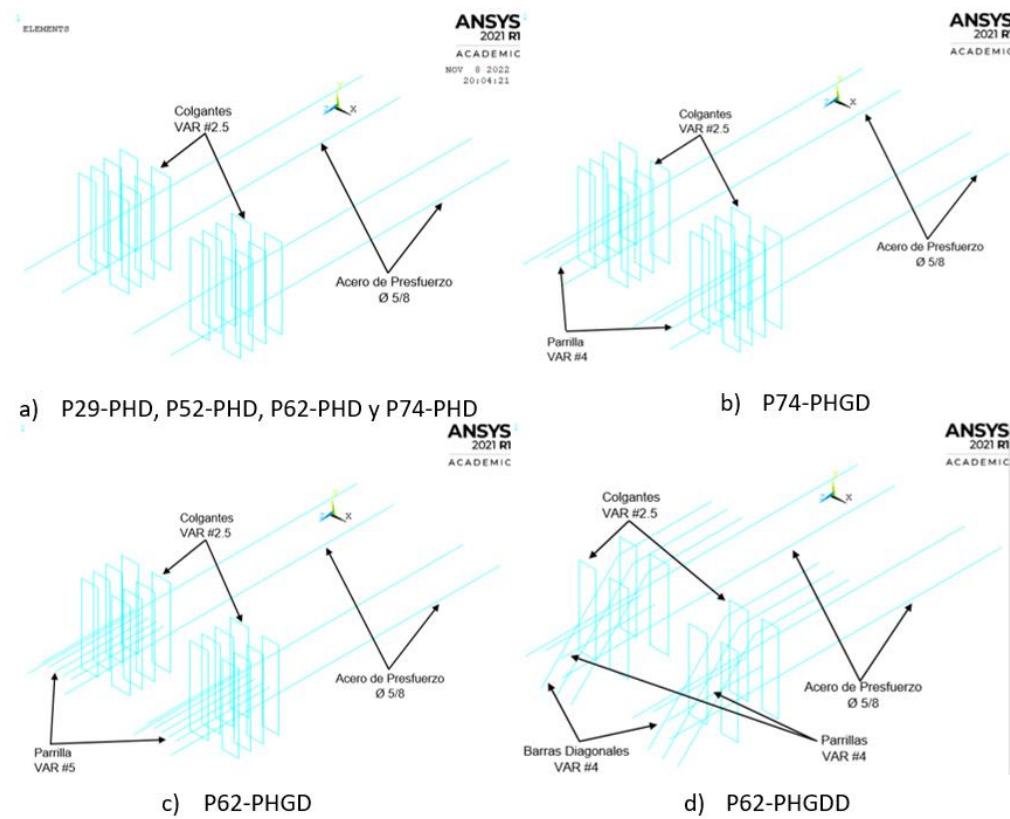


Figura 46 Acero discreto en modelos

### 4.3 Propiedades de los materiales

Solo fue requerido agregar las propiedades de la varilla del #5 (Tabla 6), puesto que los demás materiales fueron definidos en el capítulo anterior.

Tabla 7 Propiedades del acero

Parte del modelo	Propiedades del material	
VAR #5	Isotrópico Lineal	
	Modulo Elasticidad	1597873 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de Poisson	0.2
	Isotrópico multilineal Von Mises	
	Deformación unitaria	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
	0.00238	3895
	0.04841	6114
0.08666	6524	

### 4.4 Protocolo de carga

El proceso de análisis y solución del modelo se llevó tal y como se abordó para el modelo de validación, incluyendo sus condiciones de frontera. El primer paso de 1 segundo corresponde a la aplicación del postensado al elemento, el segundo paso fue la aplicación de la carga de servicio y el último paso la descarga del elemento. La aplicación de la carga fue de manera incremental como lo requiere el procedimiento de Newton-Raphson. Estos incrementos son determinados de manera automática por el ANSYS, para es necesario ingresar tres datos: incremento inicial, incremento mínimo e incremento máximo. Después de cada incremento de carga fue aplicado, se debe de cumplir con los criterios de convergencia para poder ir al siguiente paso de carga.

#### 4.4.1 Aplicación del postensado

En la Figura 47 se muestra la forma deformada del modelo al finalizar la aplicación del postensado, se puede apreciar el efecto que tiene la fuerza compresiva en el extremo recortado.

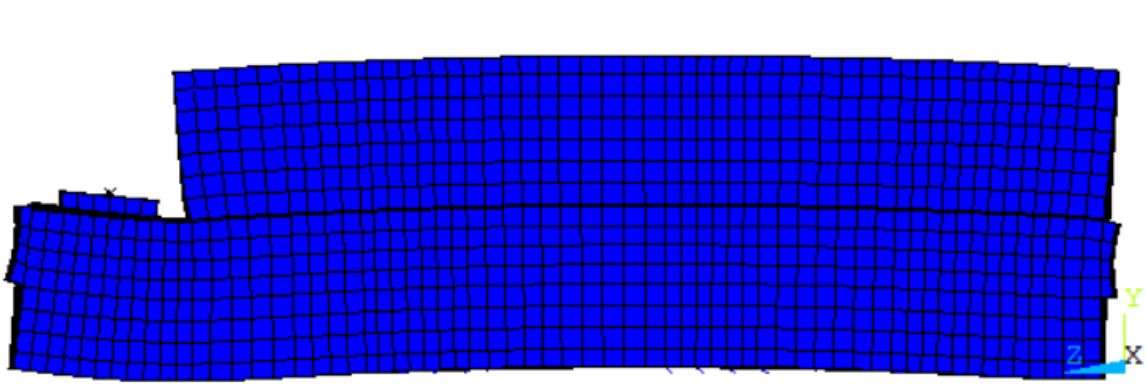


Figura 47 Forma deformada debido al postensado, P29-PHD

#### 4.4.2 Aplicación de carga de servicio

El segundo paso de carga de 2 segundos corresponde a la aplicación de la carga de servicio simétrica. La primera grieta aparece en el sub paso de carga 1.4178 (Figura 48) equivalente a una carga de servicio de valor 114 kN. El agrietamiento final debido a la aplicación total de la carga servicio y esfuerzo en el concreto en dirección Z se observan en la Figura 49 y Figura 50 respectivamente.

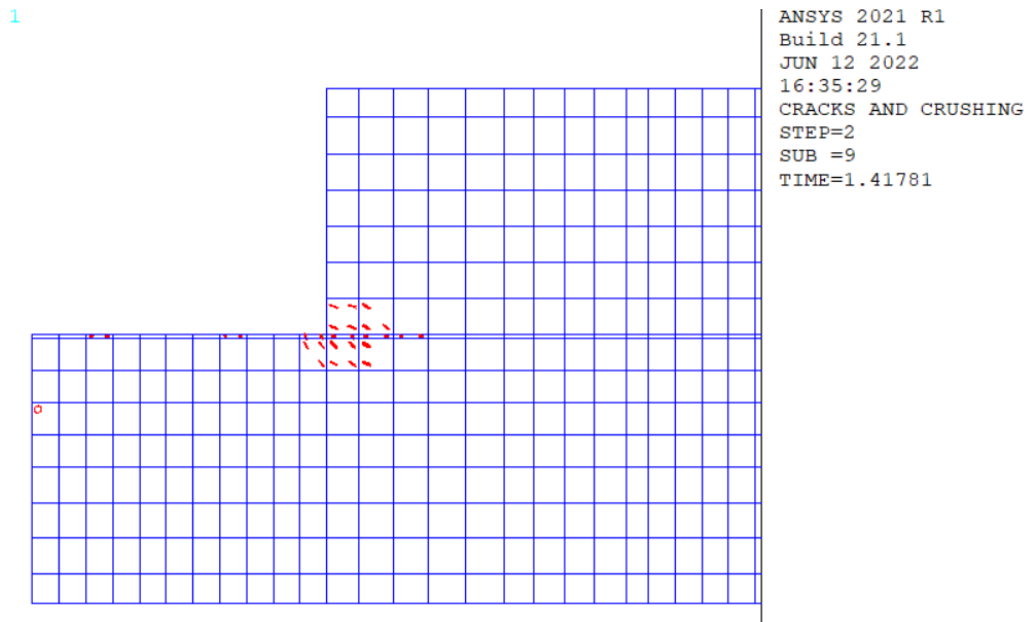


Figura 48 Primera grieta, modelo P29-PHD



1

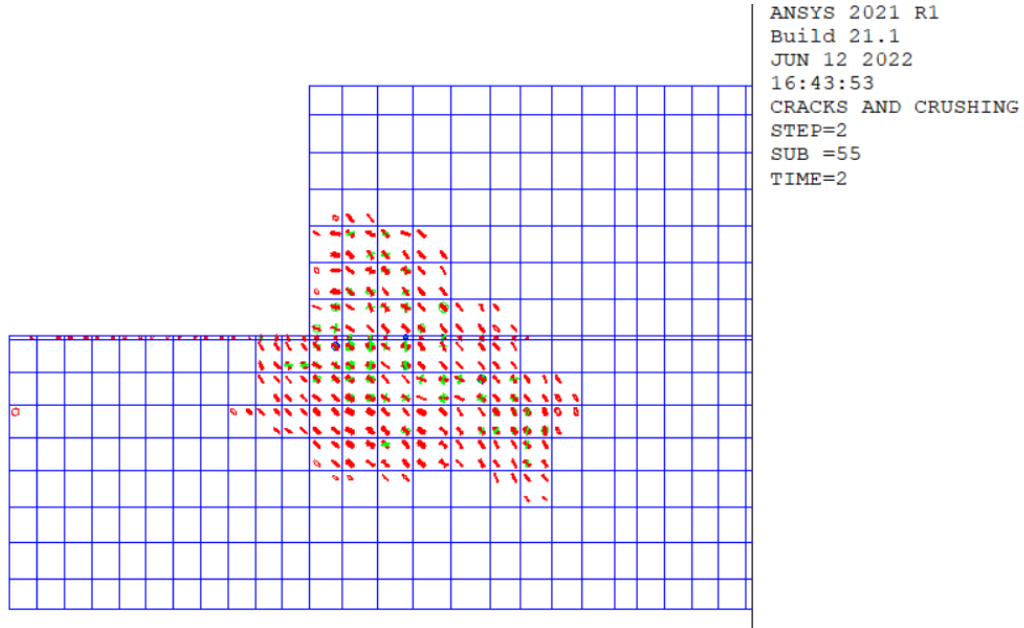


Figura 49 Agrietamiento final carga de servicio, P29-PHD

1

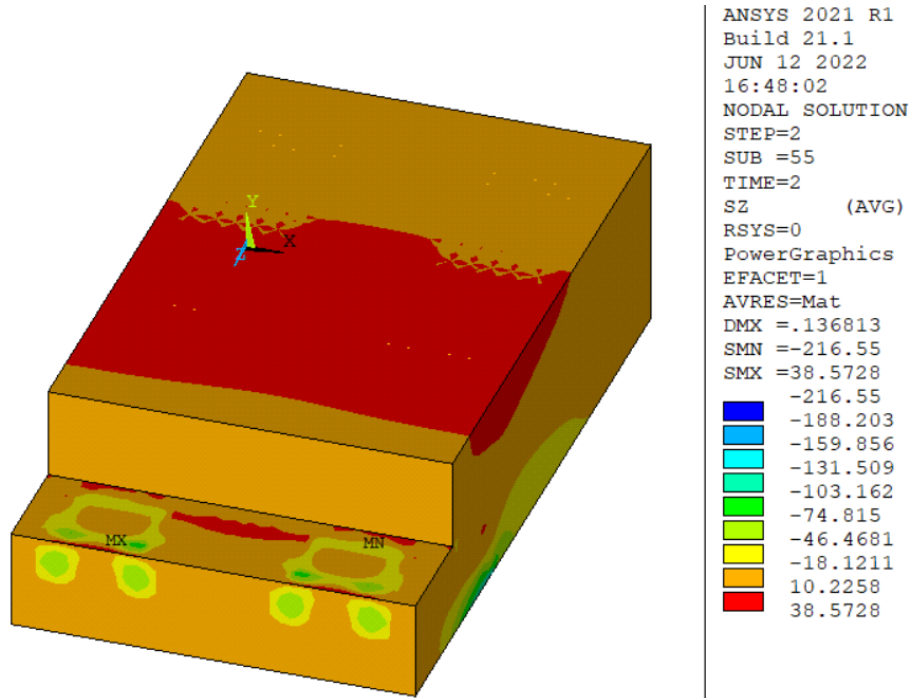


Figura 50 Esfuerzos en el concreto bajo carga de servicio, P29-PHD.

Posteriormente, se retiró la carga originando la siguiente configuración de esfuerzos mostrada en la Figura 51, finalmente al analizar el agrietamiento del elemento se detectó que la grietas se cerraron debido a la acción del postensado (Figura 52).

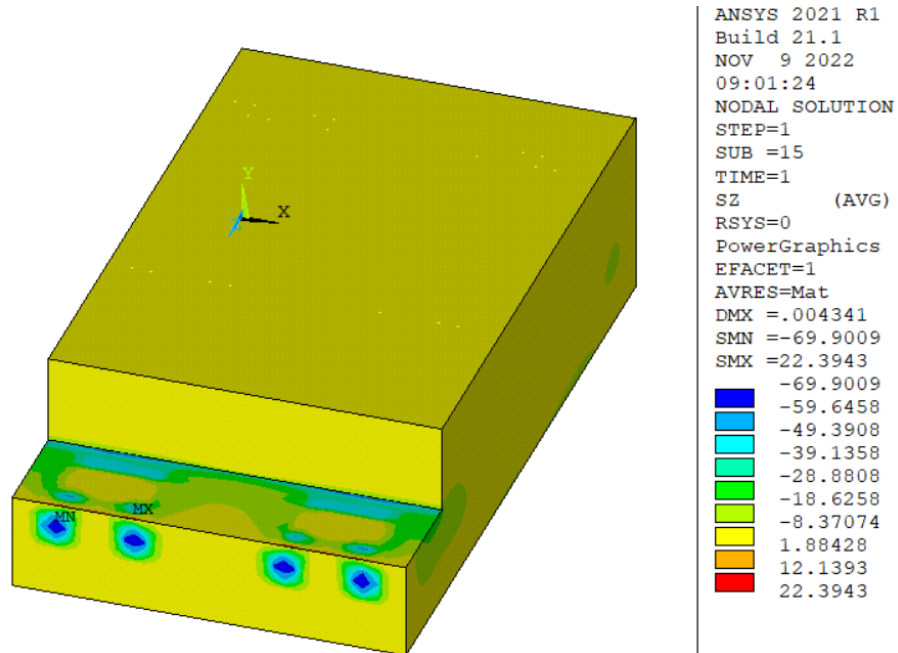


Figura 51 Esfuerzos en el concreto descarga, P29-PHD.

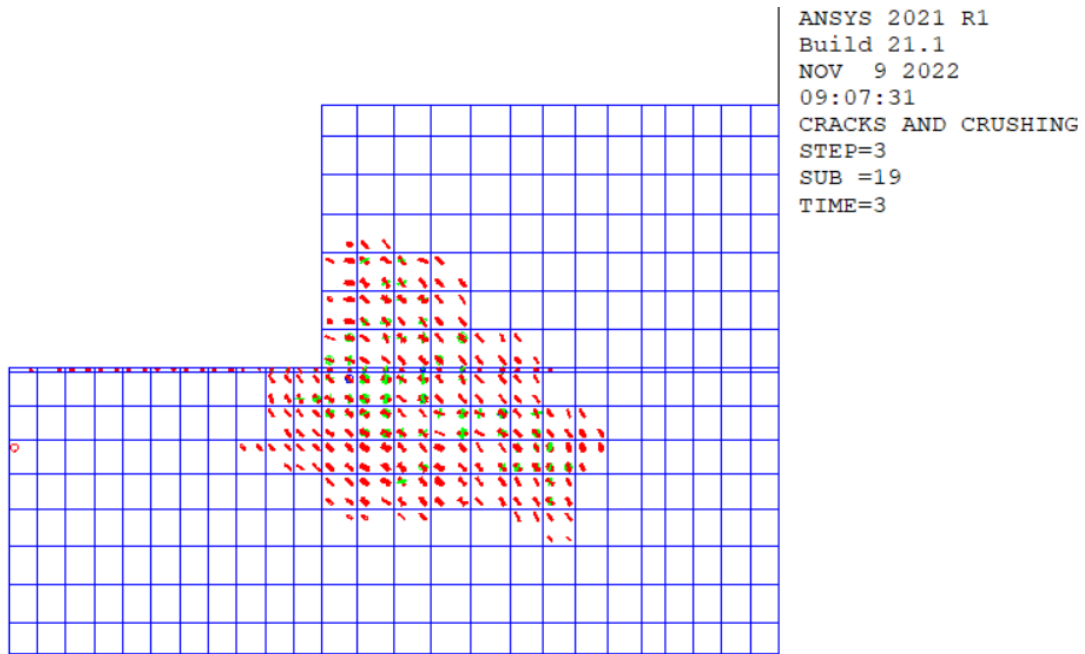


Figura 52 Agrietamiento del modelo (Descarga)

#### 4.5 Respuesta Carga-Desplazamiento nuevos modelos

Una manera concreta de analizar los resultados de cada uno de los modelos es comparar el comportamiento de la curva carga-desplazamiento entre cada uno de ellos. La Figura 53 contempla los modelos del 74% de postensado, la diferencia entre cada uno de ellos es la cantidad de elementos discretos asignados.

La Figura 54 incluye todos los modelos que tienen la consideración de utilizar tanto el acero de presfuerzo como los colgantes de manera discreta. La Figura 55 presenta dos modelos que incluyen parrillas de forma discreta y también se anexa el modelo P62-PHGDD que contempla barras en diagonal. Finalmente, en la Tabla 7 se indica el subpaso de carga en el cual aparece la primera grieta en la esquina re-entrante, así como el agrietamiento inicial de cada modelo (Figura 56) y sus respectivas cargas que lo provoca.

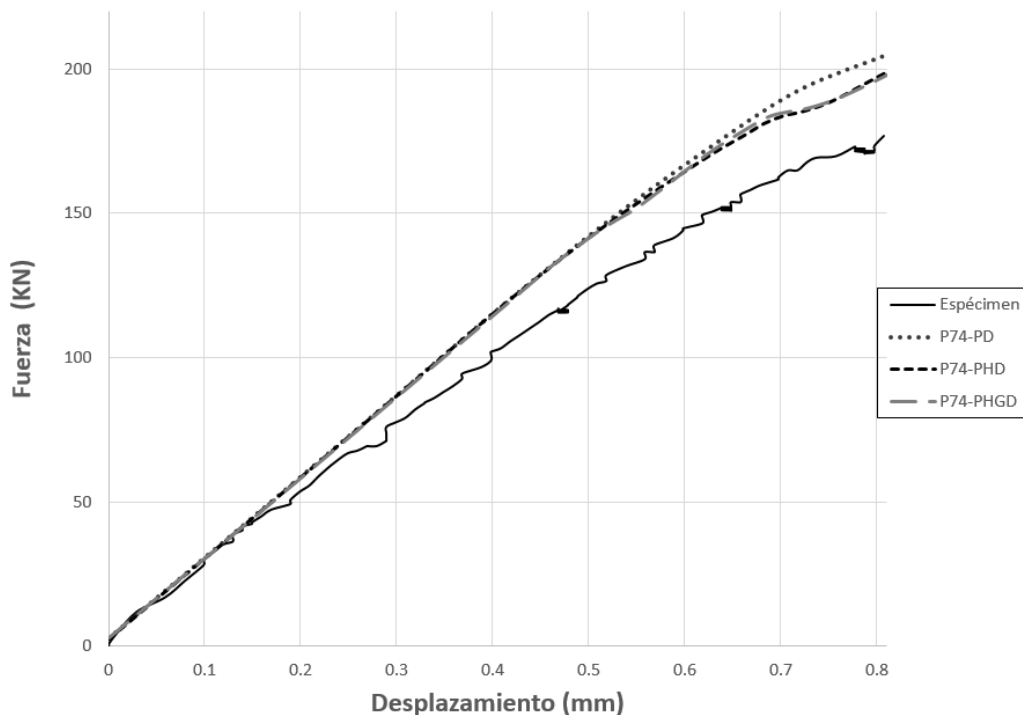


Figura 53 Curva Carga-Desplazamiento, modelos con 74% de postensado

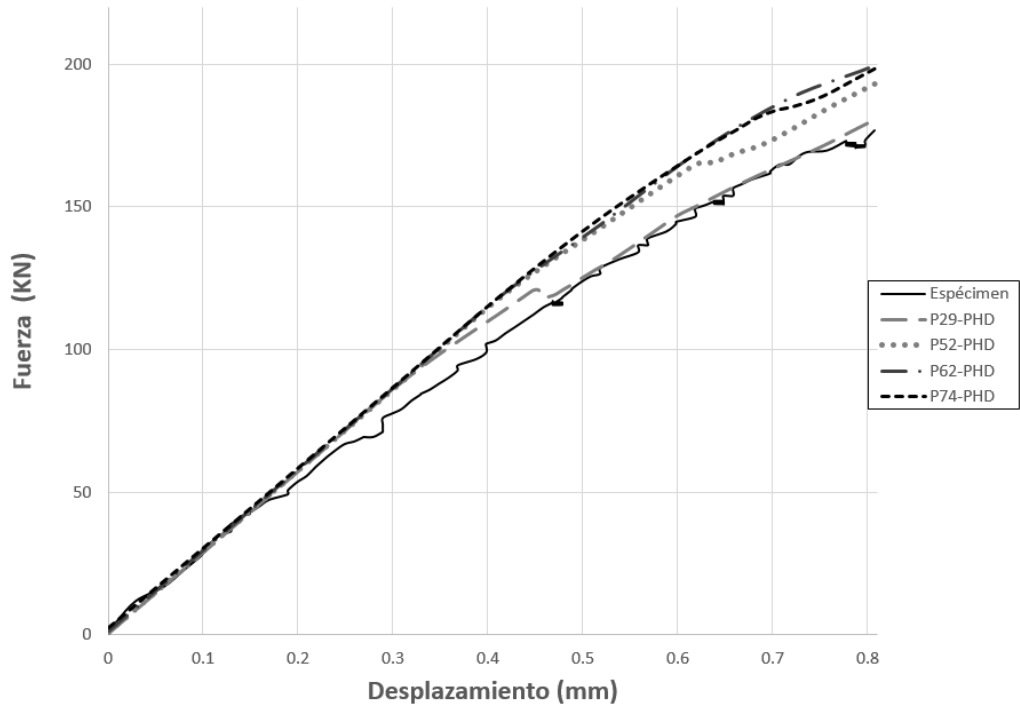


Figura 54 Curva Carga-Desplazamiento, modelos con postensado y colgantes discretos

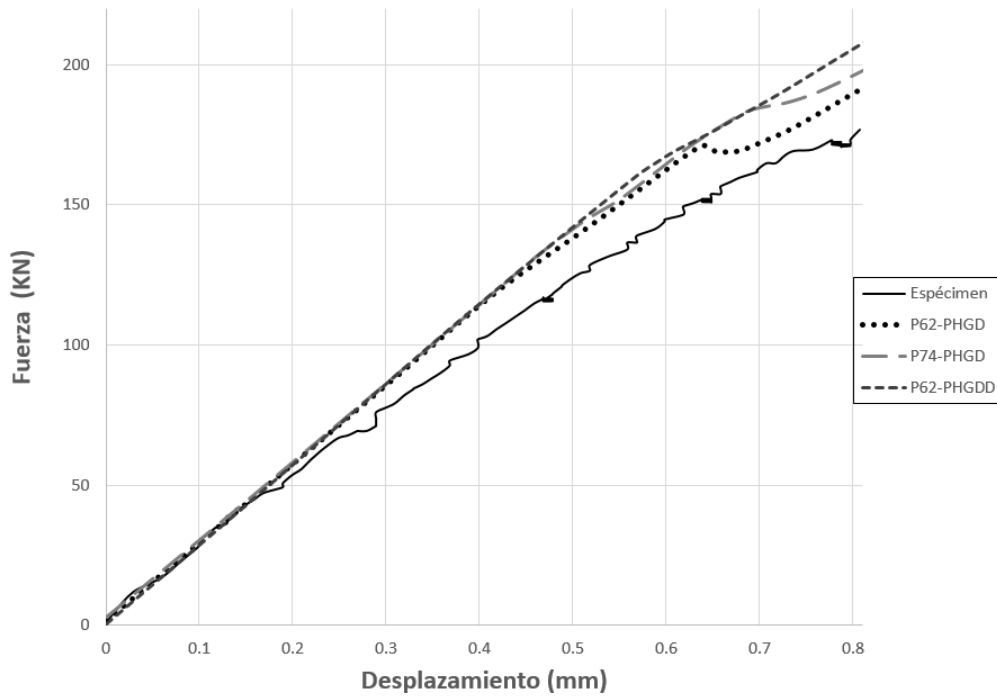


Figura 55 Curva Carga-Desplazamiento, modelos con parrillas discretas

Tabla 8 Primer grieta e inicio de agrietamiento en los modelos

Modelo	Primera grieta			Inicio de Agrietamiento	
	Subpaso de carga	KN	% respecto a carga de servicio	Subpaso de carga	KN
P29-PHD	1.4178	114	63	1.451	121
P52-PHD	1.5178	142	79	1.617	165
P62-PHD	1.5178	143	79.5	1.717	188
P62-PHGD	1.5178	142.5	79	1.638	171
P62-PHGDD	1.4684	133.5	74	-----	-----
P74-PD	1.5178	146.5	81.4	1.717	192
P74-PHD	1.5178	146	81	1.703	184
P74-PHGD	1.5078	143	79.5	1.603	183

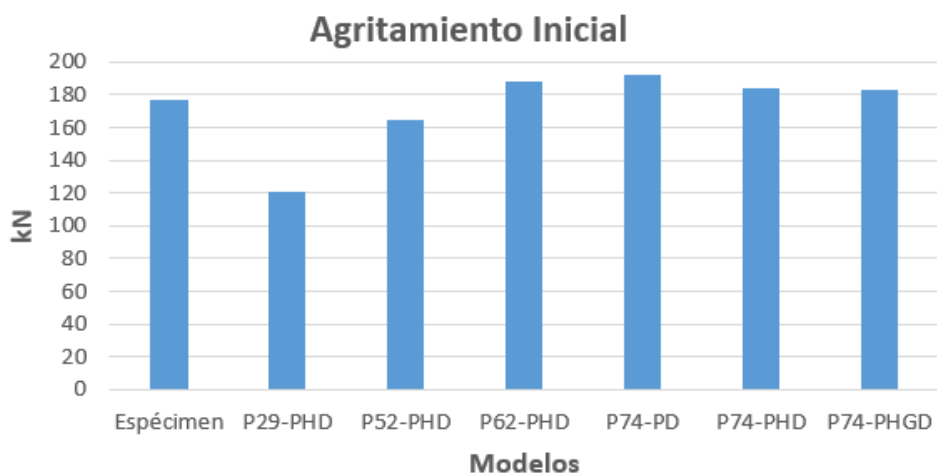


Figura 56 Comparación del inicio del Agrietamiento en los modelos

#### 4.6 Discusión

Basado en los resultados obtenidos de los modelos numéricos, se confirma que la parte más débil de la viga de extremo recortado es la esquina re-entrante para los cambios paramétricos realizados. Lo más crítico es que la pérdida de rigidez comienza sin alcanzar la carga de servicio simétrica en todos los modelos con postensado menor del 74%, esto debido a la evolución del agrietamiento. El uso de barras diagonales más el 62% de postensado en el modelo P62-PHGDD contribuyó a mejorar el desempeño de la curva carga-desplazamiento aunado de que la

primera grieta ocurrió a de 133.5 kN un 8.8% menor al modelo con el 74 % de postensado.

La simulación utilizando el método de elemento finito permite obtener una aproximación aceptable entre el espécimen de referencia y el modelo numérico. Una vez calibrado el modelo se tiene la seguridad que los resultados de los nuevos modelos con cambios paramétricos son confiables evitando realizar pruebas de laboratorio, las cuales además de ser costosas requieren un tiempo considerable para llevarlas a cabo.

Un punto importante a tomar en cuenta es que para desarrollar un buen modelo numérico es necesario conocer las ventajas y desventajas del software a utilizar. En este caso en particular, el programa de ANSYS fue elegido porque en su paquetería de elementos cuenta con el SOLID65, el cual se utiliza para modelar concreto. Este elemento permite que concrete se aplaste y principalmente que se agriete, esto último es la parte central de este trabajo ver como evoluciona el agrietamiento en el modelo. Una debilidad del modelo del concreto en ANSYS es que una vez que se rebase el esfuerzo máximo a tensión del concreto, no hay forma para evaluar el ablandamiento del concreto. Por lo tanto, si se utiliza un software que pueda evaluar el ablandamiento del concreto los resultados de la simulación serán más precisos.

## **CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES**

Las simulaciones numéricas considerando el enfoque del agrietamiento disperso nos permitió obtener las siguientes conclusiones:

- Los modelos simularon el primer agrietamiento y su localización.
- La calibración del modelo P74-PHD respecto al espécimen tuvo una aceptable correlación, tanto en la gráfica carga-desplazamiento como en la carga asociada al inicio del agrietamiento.
- El porcentaje de postensado del modelo es importante en la evolución del agrietamiento, pues se detectó que entre más alto sea su valor mejor desempeño tendrá el elemento, tal es el caso del modelo P74-PHGD que el agrietamiento inicial comenzó hasta el 100% de la carga de servicio simétrica.
- El uso de barras diagonales, que sustituyeron el 50% de los colgantes, más un 62% de postensado permitió que el modelo P62-PHGDD no presentará pérdida de rigidez en la aplicación de la carga de servicio simétrica.
- Entre más acero discreto se utilice en la zona de aplicación de la carga y en las partes cercanas al cambio de sección en el modelo numérico, el resultado tendrá mayor similitud con el espécimen de referencia, permitiendo detectar con más exactitud que configuración de refuerzo y presfuerzo contribuirá a retardar la aparición de la grieta en la esquina re-entrante en condiciones de cargas de servicio.

## REFERENCIAS

- Abhinav, S., & Valsson, V. (2012). Finite element analysis of prestressed concrete beams. *International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering*, 27-31.
- Aswin, M., Syed, Z., Wee, T., & Liew, M. (2014). Prediction of failure loads of RC dapped-end beams. *Applied Mechanics and Materials*, 463-468.
- Atta, A., & El-Shafiey, T. (2014). Strengthening of RC dapped-end beams under torsional moment. *Magazine of Concrete Research*, 1065-1072.
- Atta, A., & Taman, M. (2016). Innovative method for strengthening dapped-end beams using an external prestressing technique. *Materials and Structures*, 3005-3019.
- Barbosa, A., & Ribeiro, G. (1998). Analysis of reinforced concrete structures using Ansys nonlinear concrete model. *Computational Mechanics*, 1-7.
- Barton, D., Anderson, R., Bouadi, A., Jirsa, J., & Breen, J. (1991). *An Investigation of Strut-And-Tie Models for Dapped Beam Details*. Austin: Center for Transportation Research The University of Texas.
- Borst, R., & Nauta, P. (1985). Non-orthogonal cracks in a smeared finite element model. *Eng. Comput*, 35-46.
- Brinkley, F. (2013). Behavior of prestressed, precast concrete thin-stemmed members with dapped-end. *Tesis*. Raleigh, North Carolina, USA.
- Dahmani, L., Khennane, A., & Kaci, S. (2010). Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software. *Strength of Materials*, 232-244.
- Desnerck, P., Lees, J., & Morley, C. (2016). Impact of the reinforcement layout on the load capacity of reinforced concrete half-joints. *Engineering Structures*, 227-239.
- Fanning, P. (2001). Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 111-119.
- Hamoudi, A., Phang, M., & Bierweiler, R. (1975). Diagonal shear in prestressed concrete dapped beams. *ACI Journal*, 347-350.
- Huang, P., & Nanni, A. (2006). Dapped-end strengthening of full-scale prestressed double tee beams with FRP composites. *Advances in Structural Engineering*, 293-308.



- Huang, P.-C. (2000). *Dapped-end strengthening of precast prestressed concrete double tee beams with FRP composites*. Missouri: University of Missouri--Rolla.
- Joshuva, N., Saibabu, S., Sakaria, P., Lakshmikandhan, K., & Sivakumar, P. (2014). Finite element analysis of reinforced and pre-tensioned concrete beams. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 449-457.
- Liem, S. (1983). *Maximum shear strength of dapped-end or corbel*. Quebec.
- Lu, W.-Y., Chen, T.-C., & Lin, I.-J. (2015). Shear strength of reinforced concrete dapped-end beams with shear span-to-depth ratios larger than unity. *Journal of Marine Science and Technology*, 431-442.
- Lu, W.-Y., Lin, I.-J., Hwang, S.-J., & Lin, Y.-H. (2003). "Shear strength of high-strength concrete dapped-end beams". *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 26, No. 5, pp 671-680.
- Mattock, A. H., & Chan, T. C. (1979). Design and Behavior of dapped-end beams. *PCI Journal*, 28-45.
- Mattock, A., & Chan, T. (1979). Design and behavior of dapped-end beams. *PCI Journal*, 28-45.
- Mattock, A., & Theryo, T. (1986). Strength of precast prestressed concrete members with dapped ends. *PCI Journal*, 58-75.
- Mohammed, A. (2013). Nonlinear Three-Dimensional Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Dapped-End Beams. *Iraqi Journal of civil engineering*, 1-16.
- Mohammed, B., Aswin, M., Liew, M., & Zawaki, N. (2019). "Structural performance of RC and R-ECC dapped-end beams based on the role of hanger or diagonal reinforcements combined by ECC". *International Journal of Concrete Structures and Materials*, pp 1-19.
- Moreno Martínez, J., & Meli, R. (2014). Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beams. *Engineering Structures*, 152-163.
- Nanni, A., & Huang, P. (2002). Validation of an alternative reinforced detail for the dapped ends of double prestressed tees. *PCI Journal*, 38-49.
- PCI. (2004). Dapped-End Bearing. En PCI, *PCI design handbook* (págs. 301-304). Chicago.

- Qasim, M. S. (2020). A review on structural behavior, analysis and design of RC dapped end beams. *Materials science and engineering* .
- Revathy, P., & Menon, D. (2005). Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering* , 135-137.
- Wang, Q., Guo, Z., & Hoogenboom, P. (2005). Experimental investigation on the shear capacity of RC dapped end beams and design recommendations. *Structural Engineering and Mechanics*, 221-235.
- William, K., & Warnke, E. (1974). Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete. *IABSE*, 0-29.
- Wolanski, A. (Mayo de 2004). Flexural behaviour of reinforced and prestressed concrete beams using Finite Elemen Analysis. *Tesis*. Milwaukee, Wisconsin, EUA.
- Yang, K., Lee, J., & Ashour, A. (2011). Shear strength of reinforced concrete dapped-beams using mechanism analysis. *Magazine of Concrete Research*, 81-97.