

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MODELAMIENTO DISCRETO NO LINEAL DE LA RESPUESTA
ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO
REFORZADOS CON ACERO DE ALTA RESISTENCIA UTILIZANDO
TECNOLOGÍA DE ELEMENTO FINITO Y ELASTO-PLASTICIDAD.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCIÓN ESTRUCTURAS.**

AUTOR: QUILLUPANGUI CAIZA, IRVIN MARCELO
irvin_q@hotmail.com

DIRECTOR: PhD. ÁVILA VEGA, CARLOS FABIÁN
cavila67@gmail.com

Quito, Septiembre 2020

DECLARACIÓN

Yo **QUILLUPANGUI CAIZA, IRVIN MARCELO** declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional en el país; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Irvin Marcelo Quillupangui Caiza

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

Como director del trabajo de titulación ***Modelamiento discreto no lineal de la respuesta estructural de elementos de hormigón armado reforzados con acero de alta resistencia utilizando tecnología de elemento finito y elasto-plasticidad.*** Desarrollado por ***Irvin Marcelo Quillupangui Caiza***, estudiante de la Facultad De Ingeniería Civil Y Ambiental. Habiendo supervisado la realización de este trabajo y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobada la redacción final del documento escrito para que prosiga con los trámites correspondientes a la sustentación de la Defensa oral.

Carlos Fabián Ávila Vega PhD.
Director de proyecto

DEDICATORIA

A mi padre **Cesar** quien con su abnegación y esfuerzo ha sido un apoyo fundamental e incondicional en mi vida, siempre velando por mi bienestar y educación.

A mis hermanos **Fernando y Francisco** por su paciencia y comprensión, quienes siempre me apoyaron en los objetivos que me he propuesto.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional y los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, quienes son parte fundamental de mi formación académica y personal.

Especialmente, al PhD. Ávila Vega, Carlos Fabián, por brindarme su conocimiento y el apoyo necesario en la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE VIGAS.....	11
FIGURA 2. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE COLUMNAS.....	12
FIGURA 3. GEOMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DE ACERO, A) VIGA 20X20, B) VIGA20X30	12
FIGURA 4. GEOMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DE ACERO, A)COLUMNA 20X20, B) COLUMNA20X30	13
FIGURA 5. GEOMETRÍA DEL ELEMENTO SOLID65.....	14
FIGURA 6 ACERO DE REFUERZO DISCRETO DENTRO DE UNA MATRIZ DE HORMIGÓN.....	15
FIGURA 7. INTERACCIÓN ENTRE NODOS DE ACERO Y HORMIGÓN.....	15
FIGURA 8.GEOMETRÍA DEL ELEMENTO LINK 8	16
FIGURA 9. GEOMETRÍA DEL ELEMENTO SOLID45.....	16
FIGURA 10. CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN UNITARIA, HORMIGÓN DE 25.77MPA.	18
FIGURA 11. CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN UNITARIA, HORMIGÓN DE 12 MPA.	19
FIGURA 12. CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN ACERO DE ALTA RESISTENCIA INGRESADA A ANSYS	22
FIGURA 13. DISCRETIZACIÓN DE LA MATRIZ DE HORMIGÓN, A) VIGAS, B) COLUMNAS	29
FIGURA 14. DISCRETIZACIÓN DEL REFUERZO LONGITUDINAL. A) COLUMNAS B) VIGAS	31
FIGURA 15. DISCRETIZACIÓN DEL REFUERZO TRANSVERSAL. A) VIGAS B) COLUMNAS	31
FIGURA 16. DISCRETIZACIÓN DE APOYOS Y PLACA DE CARGA	32
FIGURA 17. UBICACIÓN DE LA PLACA DE CARGA, A) VIGAS, B) COLUMNAS	33
FIGURA 18. APLICACIÓN DE RESTRICCIONES LATERALES EN VIGAS	35
FIGURA 19.RESTRICCIÓN ADICIONAL EN EL APOYO IZQUIERDO.....	35
FIGURA 20. COMPARACIÓN DE COEFICIENTES DEL MODELO CONSTITUTIVO DEL HORMIGÓN, VIGA 20X20	37

FIGURA 21. COMPARACIÓN DE COEFICIENTES DEL MODELO CONSTITUTIVO DEL HORMIGÓN, VIGA 20X30	37
FIGURA 22. COMPARACIÓN DE COEFICIENTES DEL MODELO CONSTITUTIVO DEL HORMIGÓN, COLUMNA 20X20	39
FIGURA 23. COMPARACIÓN DE COEFICIENTES DEL MODELO CONSTITUTIVO DEL HORMIGÓN, COLUMNA 20X30	40
FIGURA 24. CURVA ESFUERZO-DEFLEXIÓN, VIGA 20X20.....	47
FIGURA 25. CURVA ESFUERZO-DEFLEXIÓN, VIGA 20X30.....	47
FIGURA 26. DEFLEXIÓN TOTAL DEL MODELO, VIGA 20X20	49
FIGURA 27. DEFLEXIÓN TOTAL DEL MODELO, VIGA 20X30	49
FIGURA 28. ESFUERZOS EQUIVALENTES EN LA MATRIZ DE HORMIGÓN EN MPA, VIGA 20X20.....	51
FIGURA 29. ESFUERZOS EQUIVALENTES EN LA MATRIZ DE HORMIGÓN EN MPA, VIGA 20X30.....	51
FIGURA 30. FUERZA AXIAL VARILLAS LONGITUDINALES EN N, VIGA 20X20.....	52
FIGURA 31. FUERZA AXIAL VARILLAS LONGITUDINALES EN N, VIGA 20X30.....	53
FIGURA 32. FUERZA AXIAL EN ESTRIBOS, A)VIGA20X20 B) VIGA20X30	54
FIGURA 33. CURVAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN UNITARIA, COLUMNA 20X20	55
FIGURA 34. CURVAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN UNITARIA, COLUMNA 20X30	56
FIGURA 35.ESFUERZO EFECTIVO EN LA MATRIZ DE HORMIGÓN A) COLUMNA 20X20 B) COLUMNA 20X30.....	57
FIGURA 36. FUERZA AXIAL EN EL REFUERZO LONGITUDINAL. A) COLUMNA 20X20 B) COLUMNA 20X30	58
FIGURA 37. FUERZA AXIAL EN EL REFUERZO TRANSVERSAL. A) COLUMNA 20X20 B) COLUMNA 20X30	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COEFICIENTES PARA DESCRIBIR LA SUPERFICIE DE FALLA DEL HORMIGÓN.....	20
TABLA 2. VALORES OBTENIDOS DE FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	21
TABLA 3. AGRUPACIÓN DE ELEMENTOS EN LOS MODELOS COMPUTACIONALES.....	28
TABLA 4. DISCRETIZACIÓN DE LA MATRIZ DE HORMIGÓN.....	29
TABLA 5. DISCRETIZACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	30
TABLA 6. DISCRETIZACIÓN DE APOYOS Y PLACA DE CARGA.....	32
TABLA 7. CANTIDAD DE ELEMENTOS FINITOS EN LOS MODELOS COMPUTACIONALES.....	32
TABLA 8. CANTIDAD DE NODOS EN LOS MODELOS COMPUTACIONALES.....	33
TABLA 9. ELEMENTOS CORRESPONDIENTES A LA PLACA DE CARGA.....	34
TABLA 10. ELEMENTOS RESTRINGIDOS PARA LOS MODELOS COMPUTACIONES.....	34
TABLA 11. NODOS ADICIONALES RESTRINGIDOS.....	36
TABLA 12. PORCENTAJE DE ERROR DEL MODELO COMPUTACIONAL DE VIGAS.....	38
TABLA 13. COMPARACIÓN DE VALORES MÁXIMOS DE CARGA Y DEFORMACIÓN EN VIGAS.....	38
TABLA 14. COMPARACIÓN DE VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN UNITARIA EN COLUMNAS.....	40
TABLA 15. PORCENTAJE DE ERROR DEL MODELO COMPUTACIONAL DE COLUMNAS.....	41
TABLA 16. PROPIEDADES DEL ACERO DE REFUERZO.....	42
TABLA 17. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN USADO EN VIGAS.....	42
TABLA 18. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN USADO EN COLUMNAS.....	43
TABLA 19. VALORES MÁXIMOS DE CARGA Y DEFLEXIÓN EN VIGAS.....	48
TABLA 20. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y EL ANÁLISIS NUMÉRICO EN VIGAS..	48
TABLA 21. ESFUERZO DE TRABAJO DE VARILLAS DE ACERO.....	54
TABLA 22. VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN UNITARIA PARA COLUMNAS.....	56
TABLA 23. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y EL ANÁLISIS NUMÉRICO EN COLUMNAS.....	57

INDICE

DECLARACIÓN.....	II
APROBACIÓN DEL DIRECTOR.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.2 ALCANCE.	7
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.	7
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.4 METODOLOGÍA.....	8
1.4.1 ACTIVIDAD 1: INVESTIGACIONES PRELIMINARES	8
1.4.2 ACTIVIDAD 2: CREACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES.....	9
1.4.3 ACTIVIDAD 3: COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	9
CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 GENERALIDADES.....	10
2.2 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO	10
2.2.1 PREPROCESAMIENTO.....	10
2.2.1.1 Geometría del modelo.	11
2.2.1.2 Discretización o mallado.....	13
2.2.1.2.1 Idealización de la matriz de hormigón	14
2.2.1.2.2 Idealización del acero de refuerzo	14
2.2.1.2.3 Idealización de la placa de carga y apoyos.	16

2.2.1.3	Modelos constitutivos.....	16
2.2.1.3.1	Matriz de hormigón.....	16
2.2.1.3.2	Acero de refuerzo	22
2.2.1.3.3	Placa de cargas y apoyos.	23
2.2.1.3.4	Interfaz entre elementos finitos	23
2.2.1.4	Condiciones frontera.....	24
2.2.2	PROCESAMIENTO	24
2.2.2.1	Cantidades primarias desconocidas.	24
2.2.2.2	Ensamble	24
2.2.2.2.1	Matriz de rigidez local	24
2.2.2.2.2	Matriz de rigidez global.	25
2.2.2.2.3	Ensamble de vector de fuerzas y condiciones de apoyo	25
2.2.2.3	Solución global.....	26
2.2.2.3.1	Análisis lineal	26
2.2.2.3.2	Análisis no lineal.....	26
2.2.3	POS PROCESAMIENTO.	27
CAPÍTULO 3 - MODELO COMPUTACIONAL		28
3.1	GENERALIDADES.....	28
3.2	CREACIÓN DE GRUPOS.....	28
3.3	DISCRETIZACIÓN	29
3.3.1	MATRIZ DE HORMIGÓN	29
3.3.2	ACERO DE REFUERZO.....	30
3.3.3	PLACA DE CARGA Y APOYOS.....	31
3.4	CONDICIONES DE FRONTERA.....	33
3.4.1	CARGA.....	33
3.4.2	APOYOS.....	34
3.5	LEYES CONSTITUTIVAS.....	36
3.5.1	VIGAS	36
3.5.2	COLUMNAS	39
3.5.3	INTERFAZ ENTRE ELEMENTOS FINITOS.	41

3.5.4	CARACTERISTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	42
3.6	CODIFICACIÓN APDL	43
CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....		46
4.1	GENERALIDADES.....	46
4.2	VIGAS	46
4.2.1	CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO	46
4.2.2	CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE LA MATRIZ HORMIGÓN.....	50
4.2.3	CARACTERIZACION NUMÉRICO COMPUTACIONAL DEL ACERO DE REFUERZO.	52
4.3	COLUMNAS.....	55
4.3.1	CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO.....	55
4.3.2	CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE LA MATRIZ HORMIGÓN.....	57
4.3.3	CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DEL ACERO DEL REFUERZO.....	58
CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		61
5.1	CONCLUSIONES	61
5.2	RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		65

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un análisis de la respuesta no lineal de elementos de hormigón armado reforzado con acero de alta resistencia (esfuerzo de fluencia 5000 kg/cm²), sobre la base de un modelo computacional empleando tecnología de elemento finito y que utilizó modelos constitutivos que aproximan la respuesta no-lineal de los materiales. Los modelos son validados en base a una comparación de las curvas carga-deformación obtenidas en ensayos de laboratorio y curvas obtenidas como resultados del modelo numérico computacional.

Para el análisis computacional se crearon modelos que representan a los elementos estructurales ensayados en el trabajo de Quijia y Vaca (2016). Los modelos computacionales implementan una idealización discreta del acero de refuerzo y de la matriz de hormigón con leyes constitutivas para cada componente (i.e. hormigón, acero de refuerzo, interfaz hormigón-acero de refuerzo).

Para este análisis numérico computacional se empleó el programa basado en tecnología del elemento finito, ANSYS Workbench 19.2 versión estudiantil, donde se incluyó bloques de código en el lenguaje de diseño paramétrico de ANSYS, en los cuales se definió las propiedades mecánicas de cada material y condiciones de la superficie de interacción entre materiales.

Los resultados muestran que utilizando una idealización discreta del acero de refuerzo, leyes constitutivas diferenciadas para cada tipo de material, las curvas de comportamiento de los modelos computacionales se asemejan en un grado aceptable a las curvas de los elementos ensayados. El nivel de aproximación obtenido en los modelos computacionales generados en este trabajo deja abierta la posibilidad de continuar el estudio del comportamiento mecánico de elementos estructurales construidos con acero de refuerzo de alta resistencia que empieza a ser fabricado en el Ecuador.

ABSTRACT

In this project, an analysis of the non-linear response of concrete elements reinforced with high-strength steel (yield stress 5000 kg / cm²) is carried out for this a computational model based on finite element technology was based and used constitutive models that approximate the non-linear response of materials. The models are validated based on a comparison of the load-deformation curves obtained in laboratory tests and curves obtained as results of numerical computational model.

For the computational analysis, models were created that represent the structural elements tested in the work of Quijia and Vaca (2016). The computational models implement a discrete idealization of the reinforcing steel and the concrete matrix with constitutive laws for each component (i.e. concrete, reinforcing steel, concrete-reinforcing steel interface), in order to analyze the individual behavior of the materials as well as their contribution to the behavior. overall of the reinforced concrete element when it is subjected to a loading process.

For this computational numerical analysis, the program based on finite element technology, ANSYS Workbench 19.2 student version, was used, which included code blocks in the ANSYS parametric design language, in which the mechanical properties of each material were defined. and surface conditions of interaction between materials.

The results show that using a discrete idealization of the reinforcing steel, different constitutive laws for each type of material, the load-deformation curves of the computational models are similar to an acceptable degree to the curves of the elements tested. The level of approximation obtained in the computational models make fro this work leaves open the possibility of continuing the study of the mechanical behavior of structural elements built with high-strength reinforcing steel that is beginning to be manufactured in Ecuador.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Durante las últimas décadas con el avance de la tecnología, los métodos de análisis numérico se han convertido en un importante medio de investigación del comportamiento de sistemas ante fenómenos físicos. El Método de Elemento Finito (MEF por sus siglas en español) es uno de los métodos más empleados en mecánica debido a las ventajas que presenta: trabajar con geometrías irregulares, sistemas con materiales con diferente comportamiento, implementación de análisis no lineal, así como también el número de parámetros que se puede controlar en el análisis. Debido a estas facilidades el MEF se encuentra en la actualidad en un gran número de aplicaciones computacionales comerciales, entre los más importantes tenemos: ANSYS, Adina, Abaqus. (Nikishkov, 2004) .

La primera aparición del método fue en los trabajos de Alexander Hrennikoff (1941) y Richard Courant (1942), quienes identificaron que es posible discretizar el dominio de un sistema continuo en subdominios llamados elementos finitos. El nombre de “Método de elemento finito” fue empleado por primera vez en el 1956 en una publicación de Ray W. Clough (Umer & Mir, 2014).

El MEF apareció principalmente como una herramienta dedicada al análisis del fuselaje de naves en la industria Aeroespacial, no obstante, entre los años de 1950 a 1960, se extendió el uso de este método a sistemas con diversas condiciones de frontera, como procesos de carga, análisis de fluidos o variaciones de temperatura.

Entre los años 1965 y 1976 se implementaron mejoras al MEF que permitieron ampliar y mejorar el proceso de análisis. Varios cambios en el proceso de solución

del MEF fueron implementados por Irons, B. quien incluyó modelos isoperimétricos (1966), solucionadores frontales (1970) y funciones de forma (1977). Otro investigador que aportó al desarrollo del MEF, fue Melosh, R. quien implementó el método de Rayleigh-Ritz (1976), el cual permite encontrar aproximación a los valores propios de las matrices que se generan durante el proceso de solución.

En el campo de la ingeniería civil, el análisis de elementos estructurales usando el MEF, paso por una evolución constante, a continuación, se presenta los avances más notorios.

En 1967 se realizó una de las primeras investigaciones empleado el MEF para el análisis de elementos de hormigón armado, en esta investigación se hace mención a los elementos usados para representar al concreto, al acero de refuerzo, los enlaces de unión entre estos materiales. Además, de describir los patrones de grietas que se pueden presentar en elementos de hormigón armado sometidos a momento flector, (Ngo & Scordelis , 1967).

El primer estudio centrado en describir el comportamiento de elemento de hormigón armado ante carga axial, fue realizada por Yusef R. Rashid, quien, analizó la respuesta de modelos que implementaban el criterio de falla de Von-Mises y las ecuaciones de Prandtl-Reuss para describir las deformaciones en el rango plástico, con este estudio se intentó obtener expresiones analíticas para predecir el comportamiento de elemento de hormigón armado en todo su historial de carga (Rashid , 1968).

Las primeras investigaciones que se enfocaron en implementar modelos de comportamiento más detallado para el hormigón, fueron las que relacionaron la resistencia del material con la presión de confinamiento al cual está sometido, por lo cual, se realizaron investigaciones para conocer cuál es la relación entre las resistencia a tensión y compresión que presenta el hormigón ante un carga

uniaxial y una biaxial (Kupfer, Hilsdorf, & Rusch, 1969). Además, se analizaron investigaciones relacionadas con el coeficiente de compresibilidad y el coeficiente de Poisson (Palaniswamy & Shah, 1974), e inclusive se formuló una ley constitutiva para el hormigón considerando un estado de tensión tridimensional utilizando teoría de plasticidad (Chen & Chen, 1975).

Para el año 1975, uno de los parámetros, aún no definidos para el hormigón, era la superficie de falla específica para este material. Los primeros análisis de elementos de hormigón empleando el MEF consideraban el modelo de falla descrito para suelos propuesto por D.C. Drucker y W. Prager en 1952. Este parámetro fue mejorado por Niels Saabye Ottosen, el cual propuso que la relación que existe entre esfuerzo y la deformación de un material isótropo en un estado de esfuerzo homogéneo puede representarse en términos de tres invariantes relacionadas con los esfuerzos de confinamiento del material (Ottosen, 1977).

De igual manera, una investigación que sirvió para mejorar el concepto de la superficie de falla de hormigón fue presentada por (William & Warnke, 1975), en la cual, proponen parámetros para describir una superficie de falla para el hormigón cuando es sometido a altas presiones, para esto se consideró elasto-plasticidad perfecta en el caso de compresión y fragilidad en el caso de la tensión.

Las investigaciones que presentaron un avance significativo en el análisis de elementos de hormigón armado, aparecieron desde en 1989, donde se presentó relaciones geométricas para la transformación de las coordenadas del material de refuerzo. Estas relaciones transforman las coordenadas globales a coordenadas locales, lo que permitió implementar refuerzos con geometrías especiales que no estén definidas en el eje principal del elemento padre, este procedimiento se probó con éxito en elementos con mallado regular e irregular (Elwi & Hruday, 1989).

Debido a varios factores (i.e. naturaleza de los materiales, ambiente, agrietamiento, cargas, etc.), los elementos de hormigón armado no presentan un

comportamiento elástico, por este motivo es necesario realizar un análisis del elemento en todo el historial de carga. En 1976, se presenta una investigación donde se estudia la respuesta no lineal de elementos de hormigón armado, ante un proceso de carga que provoca el agrietamiento por tensión y la fluencia del material de refuerzo, para esta investigación se consideró compresión multiaxial de la matriz de hormigón y elementos isoperimétricos. Los resultados de este análisis fueron cotejados por datos experimentales, además se usó un solo programa de elemento finito no lineal que incorporaba un método de solución con matriz de rigidez constante y variable (Bažant, 1985).

En año 1979, con el fin de representar las curvaturas iniciales y giros moderados en cuerpos rígidos sometidos a cargas puntuales en alguno de sus ejes centroidales, se incorpora ecuaciones diferenciales de orden superior en el proceso computacional en cual se basa el MEF, dando como resultado un mejoramiento de: la velocidad, aproximación y estabilidad de los análisis no lineales realizados, sin incrementar la capacidad computacional requerida para el análisis. Además muestra que el análisis no lineal en donde se actualiza la malla del modelo, depende del tipo de malla del elemento y de las propiedades que describen a la malla (i.e. Lagrangiana, Euleriana o Arbitraria) (Belyschko, Lui, Moran, & Elkhodary, 2013) (Belytschko & Glaum, 1979).

Para el caso de los elementos de hormigón armado con refuerzo longitudinal y transversal, se realizó un estudio en 1993, en el cual se incorporaba una discretización del material de refuerzo, además de implementar un modelo de comportamiento para el hormigón relacionado con la presión de confinamiento, con esto se presentó un análisis tridimensional donde se estudiaba la interacción del refuerzo transversa y longitudinal, además de un análisis a las deformaciones del concreto dentro y fuera del núcleo confinado del elemento (Phillips & Zienkiewicz, 1976).

En 1985 se presenta una investigación donde se expone un nuevo criterio para

representar las grietas en elementos de hormigón armado, ya que el modelamiento continuo de grietas presentado por Rashid en 1982, se usaba únicamente por limitaciones de los equipos de cómputo de esa época. Esta investigación muestra que el comportamiento de elementos de hormigón armado debe considerarse no lineal en todo su rango de carga, debido a micro agrietamiento progresivo que se presenta en los elementos y que el análisis es independiente del mallado del modelo y dependiente del tamaño del elemento (Cheng & Fan, 1993).

En esta investigación para definir la superficie de falla de la matriz hormigón dentro del modelo computacional, es necesario definir los parámetros de transferencia de corte en grieta. Para esto, se recopilaron investigaciones que usen ANSYS para estudiar el comportamiento de elementos de hormigón armado con similares condiciones de borde que las usadas en este trabajo.

En la publicación de (Ghailan & Aziz, 2007), se compara el comportamiento de vigas al variar la cantidad de fibras de acero de refuerzo (SFRC), para este estudio se ensayaron 4 vigas, los modelos tenían las mismas características geométricas.

En la investigación presentada por (Ru-deng L. U., 2008), se realiza una comparación de los valores de los coeficientes de transferencia de corte para vigas sometidas a diferentes tipos de carga y para hormigones de diferente resistencia a la compresión, para este trabajo se ensayaron 22 vigas, los modelos tenían las mismas características geométricas.

En el estudio presentado por (Jenkins, Frosch, & PE, 2015), se estudia el pandeo de columnas de hormigón armado, al ser sometida a carga excéntrica, teniendo en cuenta la esbeltez del elemento, en este estudio se analizó 3 modelos con diferentes geometrías.

El trabajo realizado por (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017), investigó el mecanismo de falla para vigas al variar la cantidad de acero longitudinal, para esta

investigación se ensayaron 3 vigas (una por cada cantidad de acero), los modelos tenían las mismas características geométricas.

En Ecuador, la mayoría de investigaciones relacionadas con acero de alta resistencia implementado en la ingeniería civil, se centra en el estudio de perfiles de acero y su comportamiento ante procesos de soldadura o ante ambientes agresivos (e.g. altas temperaturas o humedad elevada).

Hasta a la fecha de este trabajo existen pocas investigaciones que estudian la incidencia del uso de acero de alta resistencia como material de refuerzo en elementos de hormigón armado.

La primera investigación fue presentada por (Nieto & Perez, 2015), en esta, se comparan las secciones de elementos de hormigón armado al usar varillas de acero grado 80 y las secciones cuando se usa varillas de acero grado 60. Para esto se crearon modelos computacionales de un edificio con sistema estructural dual de 10 niveles, los modelos creados incorporan un modelo distribuido del acero de refuerzo. Este trabajo se enfoca principalmente en realizar un análisis comparativo de carácter económico.

La segunda investigación presentada por (Quijia & Vaca, 2016), estudia la respuesta de elementos de hormigón armado que incluyen acero de alta resistencia como material de refuerzo, estos elementos fueron sometidos a flexión y a carga axial, para esto se realizaron ensayos de cuatro especímenes por cada elemento.

Con esta recopilación de investigaciones, se puede entender de mejor manera la aportación de este estudio, ya que, se analiza el comportamiento de elementos de hormigón armado que usan acero de alta resistencia (f_y de 500MPa) fabricado en Ecuador, mediante la comparación de curvas de comportamiento obtenidas en ensayos de laboratorio y curvas obtenidas de un análisis numérico. Para alcanzar

este objetivo, se creó modelos computacionales que implementan una idealización discreta del acero de refuerzo longitudinal y transversal que es usado en elementos de hormigón armado, todo esto en un contexto no lineal.

Esta investigación tiene vital importancia por cuanto se proponen modelos numéricos que implementan leyes constitutivas para cada material que compone un elemento estructural. Esto permitirá entender el comportamiento de hormigones con acero de refuerzo de alta resistencia fabricados en Ecuador, y a la vez reducirá la necesidad de modelos experimentales que por su costo limitan su uso y por lo tanto la posibilidad de comprender el comportamiento de nuevos materiales y su uso en aplicaciones de ingeniería.

1.2 ALCANCE.

- Este trabajo se limita a la creación de modelos computacionales implementando una idealización discreta del material de refuerzo, además de leyes constitutivas diferenciadas para el hormigón y para el acero de refuerzo.
- Se cuenta con resultados experimentales correspondientes a trabajos anteriores, donde se analizó la respuesta de vigas y columnas de hormigón armado reforzados con acero de alta resistencia.
- Se usará la versión estudiantil del software comercial basado en tecnología de elemento finito ANSYS Workbench 19.2.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Analizar la respuesta de elementos estructurales de hormigón armado reforzados con acero de alta resistencia, mediante la comparación de curvas

esfuerzo-deformación obtenidas en ensayos experimentales y curvas obtenidas como resultado de un análisis numérico computacional empleando tecnología de elemento finito.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Especificar modelos constitutivos para el hormigón y para el acero que represente de una mejor manera el comportamiento de estos materiales cuando forman parte de elementos de hormigón armado sometidos a carga axial y a momento flexionante en un contexto no lineal.
- Comparar los resultados obtenidos en ensayos previos de laboratorio con los resultados del análisis numérico computacional discreto, para obtener un porcentaje de diferencia entre modelos experimentales y modelos computacionales.
- Calibrar los parámetros necesarios para el análisis lineal y no lineal de elementos de hormigón armado reforzados con acero de alta resistencia en el software basado en el método de elemento finito ANSYS.

1.4 METODOLOGÍA.

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

1.4.1 ACTIVIDAD 1: INVESTIGACIONES PRELIMINARES

Realizar una investigación de trabajos relacionados, donde se implemente una idealización discreta del material de refuerzo en elementos de hormigón armado, así también, investigaciones relacionados con el análisis del comportamiento de elementos de hormigón armado que incluyan material de

refuerzo con un esfuerzo de fluencia mayor a 420 MPa, además, buscar leyes constitutivas que representen el comportamiento de los materiales (hormigón y acero) cuando interactúan en elementos de hormigón armado sometidos a un proceso de carga.

1.4.2 ACTIVIDAD 2: CREACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES.

Creación de modelos computacionales en la versión estudiantil de ANSYS workbench 19.2, haciendo especial énfasis en la discretización espacial y geométrica del acero de refuerzo. Además, la codificación de las características de los materiales, donde conste las propiedades mecánicas y leyes constitutivas seleccionadas, como última sub-actividad, se calibra todos los que intervienen en el análisis lineal y no lineal de los modelos computacionales y de la superficie de interacción entre materiales

1.4.3 ACTIVIDAD 3: COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Una vez listos los modelos computacionales, la última etapa consiste calibrar los valores umbrales de los materiales para generar curvas de respuesta, las cuales serán comparadas con las curvas obtenidas de ensayos experimentales

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

En este capítulo se expone el proceso necesario para realizar un análisis usando el método de elemento finito. Adicionalmente se detalla toda la información necesaria para la creación de geometrías y caracterización de los materiales que componen el modelo computacional que representará a los elementos de hormigón armado que se estudian en este proyecto de mecánica computacional de estructuras.

2.2 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

El método de elemento finito (MEF), es un método numérico que permite generar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen el comportamiento de sistemas continuos sometidos a diversas condiciones de borde (i.g. aplicación de carga, variación de temperatura, diferentes tipos apoyos, etc.).

Dado que en los sistemas continuos los grados de libertad (GDL) son infinitos, el proceso del MEF consiste en descomponer al sistema en elementos finitos, reduciendo así el número de GDL's y generando ecuaciones diferenciales con un menor grado de complejidad, (Umer & Mir, 2014)

2.2.1 PREPROCESAMIENTO

El preprocesamiento en el MEF consiste en especificar toda la información necesaria para la creación y posterior solución de un modelo matemático de un sistema estructural. Esta información sirve para describir un modelo computacional capaz de reproducir un fenómeno físico. Los productos de esta

etapa afectan de manera directa la calidad de los resultados del MEF y el costo computacional que se genere durante la etapa de análisis. (Baetu & Ciongradi, 2011)

En este paso se especifican condiciones de restricción, tipo de carga aplicada, la geometría, naturaleza y las leyes constitutivas de cada material que componen el modelo.

2.2.1.1 Geometría del modelo.

Los modelos computacionales de vigas y columnas representan los elementos ensayados en el trabajo experimental de (Quijia & Vaca, 2016), los modelos computacionales fueron generados en su totalidad dentro del entorno del “Diseñador de geometría” que incorpora el módulo Workbench de ANSYS, ya que tiene capacidad de modelar en 3d sistemas compuestos de distinto materiales.

En la Figura 1 y 2 se presenta la configuración experimental utilizada en el trabajo de (Quijia & Vaca, 2016). En las Figuras 3 y 4 se muestra la geometría de cada elemento y la ubicación del acero de refuerzo detallado para cada elemento estructural.

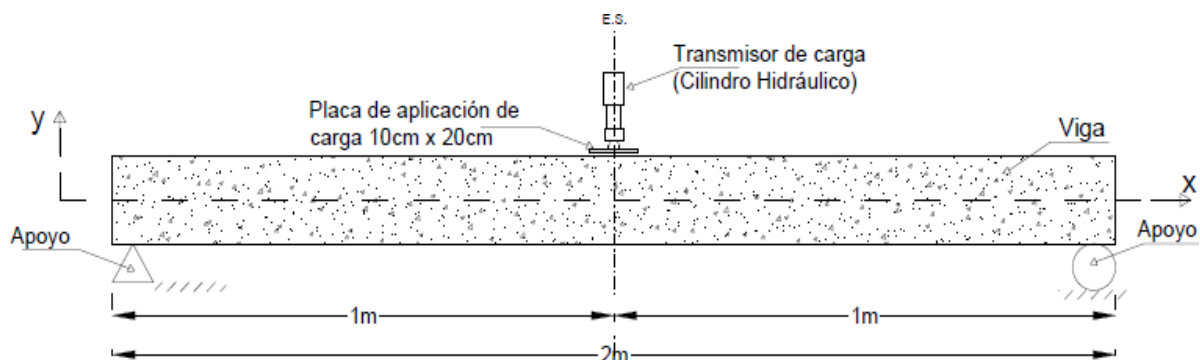


Figura 1. Configuración del ensayo de Vigas.
Elaborado por: Irvin Quillupangui

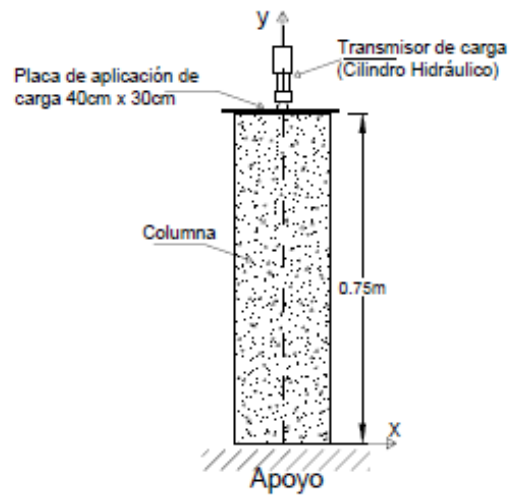


Figura 2. Configuración del ensayo de columnas.
Elaborado por: Irvin Quillupangui

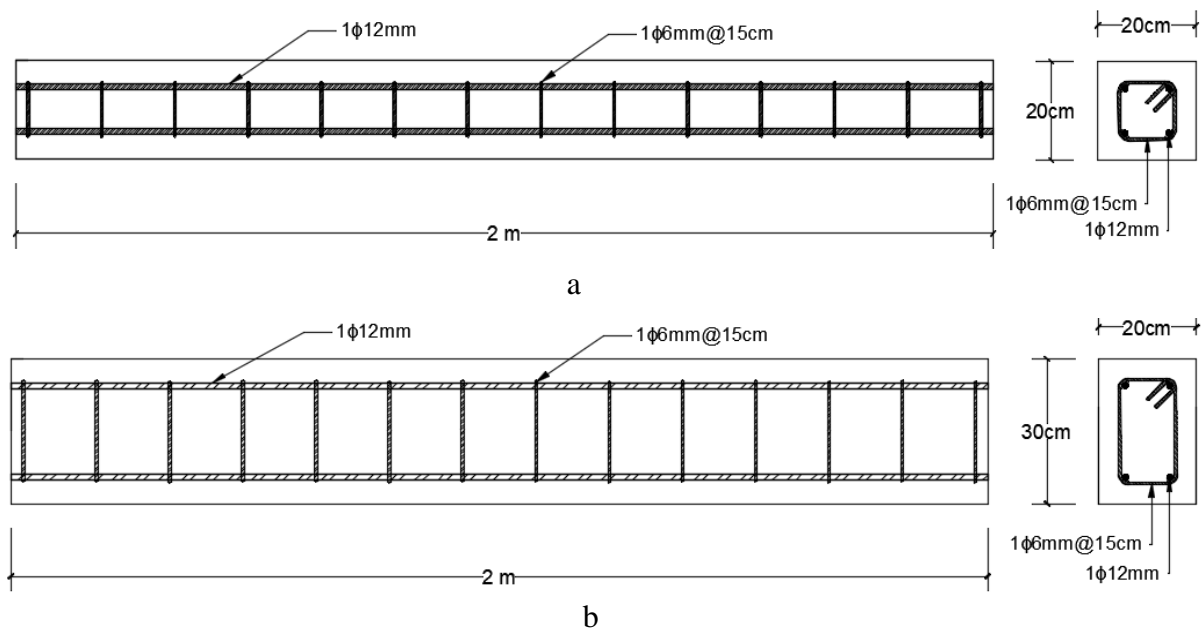


Figura 3. Geometría y distribución de acero, a) Viga 20x20, b) Viga20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

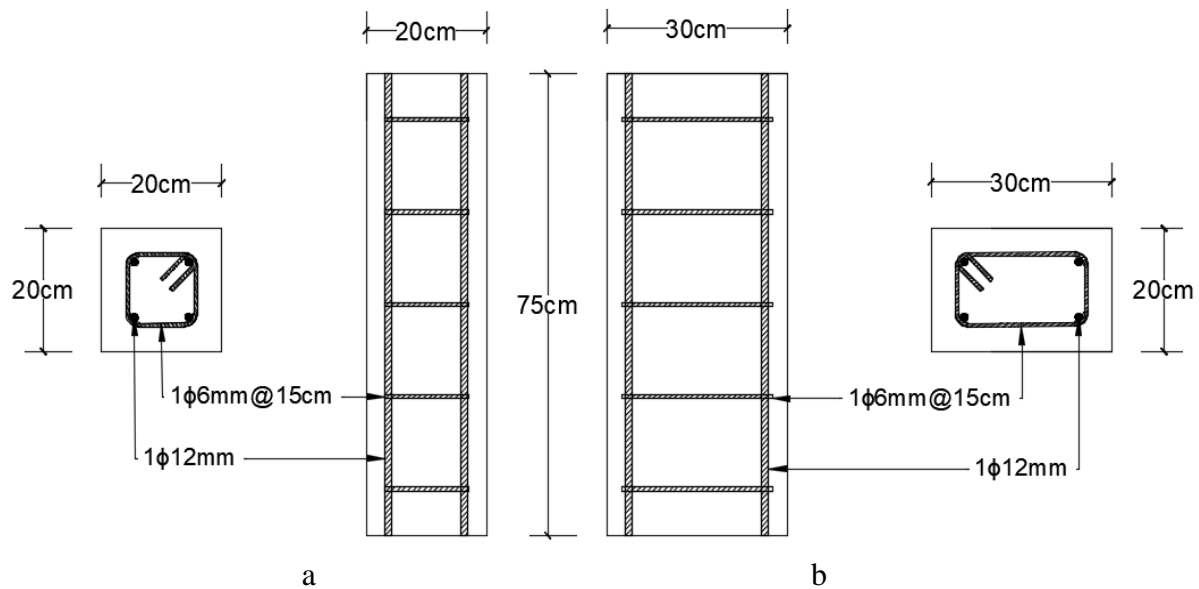


Figura 4. Geometría y distribución de acero, a) Columna 20x20, b) Columna 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

2.2.1.2 Discretización o mallado

Este paso consiste en dividir el modelo computacional en elementos finitos con geometrías simples interconectados a través de nodos. Mediante el mallado se define la ubicación de los elementos finitos con respecto a ejes locales y ejes globales.

Los modelos creados para esta investigación tienen una geometría sencilla, por lo que se optó por un mallado estructurado. Este tipo de mallado presentan una alta regularidad, ya que, se basa en elementos hexaédricos. Por este motivo la cantidad de elementos finitos generados en el modelo es menor y por ende se genera una menor demanda de recursos computacionales.

Los modelos generados en este trabajo constan de volúmenes que representan la matriz de hormigón, la cual, contiene cuerpos discretos interconectados que representan al acero de refuerzo. Adicionalmente del elemento de hormigón armado, se crearon cuerpos indeformables para presentar las condiciones de borde (e.g. placa de carga y apoyos).

Dentro de la librería de materiales que incorpora ANSYS existen 190 elementos que permiten representar diversos fenómenos físicos. Para esta investigación se eligió los elementos que permiten representar la naturaleza de los materiales que compone un elemento de hormigón armado.

2.2.1.2.1 Idealización de la matriz de hormigón

El hormigón es un elemento frágil, que presenta diferente comportamiento en compresión y en tensión. Este material puede ser asignado en ANSYS al elemento Solid65, un hexaedro sólido con ocho nodos, con tres grados de libertad traslacionales en cada nodo. La geometría de este elemento se presenta en la Figura 5.

El elemento solid65 es usado para representar la matriz de hormigón, ya que, puede interactuar con material de refuerzo discreto o distribuido, además puede incorporar hasta tres diferentes materiales de reforzamiento. (Baetu & Ciongradi, 2011)

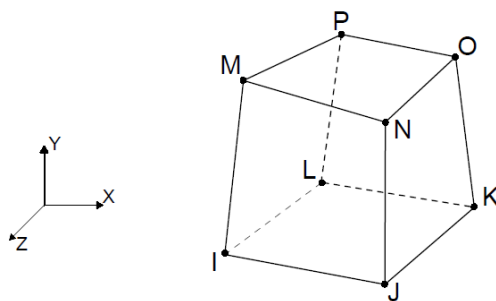


Figura 5. Geometría del elemento solid65.

Fuente: (Kohnke, 1998)

2.2.1.2.2 Idealización del acero de refuerzo

Esta investigación se caracteriza por representar de manera discreta el acero

refuerzo. Este tipo de representación permite crear elementos individuales tipo barra con características geométricas y mecánicas similares al reforzamiento físico.

En la Figura 6 se muestra el acero de refuerzo discreto dentro de la matriz de hormigón y en la Figura 7 la interacción entre los nodos de la matriz de hormigón con el acero de refuerzo.

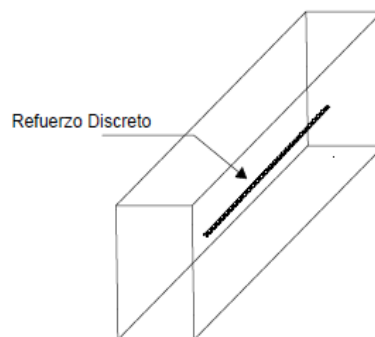


Figura 6 Acero de refuerzo discreto dentro de una matriz de hormigón.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

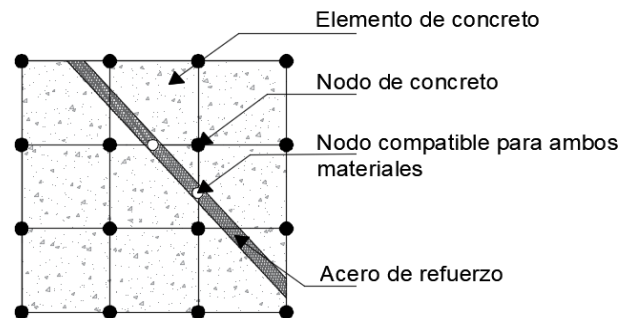


Figura 7. Interacción entre nodos de acero y hormigón.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

El acero de refuerzo usado en los modelos computacionales es representado por el elemento link8. Este es un elemento tipo barra con dos nodos (uno en cada extremo) y tres grados de libertad traslacionales en cada nodo.

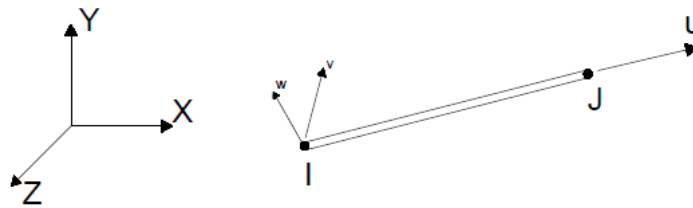


Figura 8. Geometría del elemento LINK 8.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Este elemento no considera efectos de corte ni transmisión de momento, por lo que solo permite modelar efectos axiales, los cuales son considerados uniformes en toda la sección del elemento. (Kohnke, 1998) (Baetu & Ciongradi, 2011)

2.2.1.2.3 Idealización de la placa de carga y apoyos.

Para representar los apoyos y la placa de carga se eligió el elemento solid45. Este elemento es un sólido de 8 nodos con 3 grados de libertad traslacionales en cada nodo. A este elemento se le asignó características mecánicas para representar un comportamiento de un sólido indeformable.

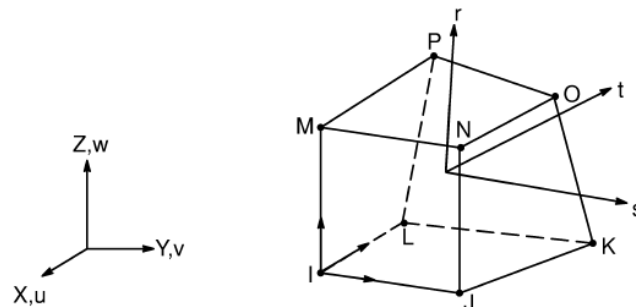


Figura 9. Geometría del elemento solid45.

Fuente: (Kohnke, 1998)

2.2.1.3 Modelos constitutivos.

2.2.1.3.1 Matriz de hormigón

Para la creación de los bloques de código APDL que define las características correspondientes a la matriz de hormigón. Se empleó el modelo de

endurecimiento multilineal planteado por (Reddiar, 2010), Ecuación 1, este modelo modifica la ley constitutiva planteada por (Kent, & Park, 1971), e incluye conceptos de los modelos presentados por: (Hognestad, Hanson, & McHenry, 1955), (Popovics, 1973).

$$f_c = K * f'_c * (1 - |1 - x|)^n \quad \text{Ec.(1)}$$

Dónde:

f_c : Esfuerzo en el hormigón.

f'_c : Máxima resistencia a la compresión del hormigón.

K : Coeficiente por confinamiento, para hormigón sin confinamiento se considera 1

n : Relación entre el esfuerzo aplicado al hormigón y la máxima resistencia a la compresión = $\frac{E_c * \epsilon_{co}}{f'_c}$

ϵ_{co} : Deformación a la cual el hormigón comienza el proceso de agrietamiento

E : Módulo de elasticidad = $5000 * f'_c^{0.5}$

x : Relación entre una deformación dada y la deformación a la cual el hormigón se agrieta = $\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}$

La ley constitutiva presentada por (Reddiar, 2010) fue elegida porque la información necesaria para describir la relación esfuerzo-deformación se puede obtener de la tesis (Quijia & Vaca, 2016). Además el modelo constitutivo elegido, permite representar al hormigón con un módulo de elasticidad bastante aproximado al valor dado en la Norma Ecuatoriana de la construcción del 2015.

Para el caso de la vigas, el módulo de elasticidad inicial obtenido por la fórmula

descrita por (Reddiar, 2010), tiene un valor aproximado al que presentaron los modelos físicos y que constan en el trabajo en la cual se basa esta investigación. En base a esta buena aproximación se creó la curva de comportamiento constitutivo del hormigón de 25.77MPa para vigas, La curva ingresada para el análisis se muestra en la Figura 10.

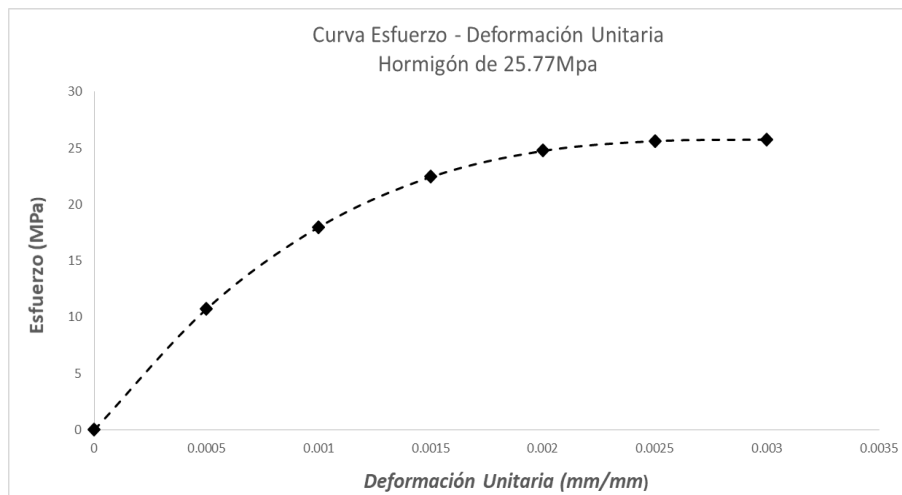


Figura 10. Curva Esfuerzo - Deformación Unitaria, hormigón de 25.77Mpa.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

La curva esfuerzo–deformación para el caso de las columnas se la obtuvo por un proceso de ingeniería inversa desde la curva carga – desplazamiento de los elementos columna. La tesis de (Quijia & Vaca, 2016) no reporta datos experimentales del comportamiento constitutivo de los materiales utilizados en columnas.

La Figura 11 reporta la aproximación utilizada para describir la relación esfuerzo – deformación del hormigón utilizado en las columnas.

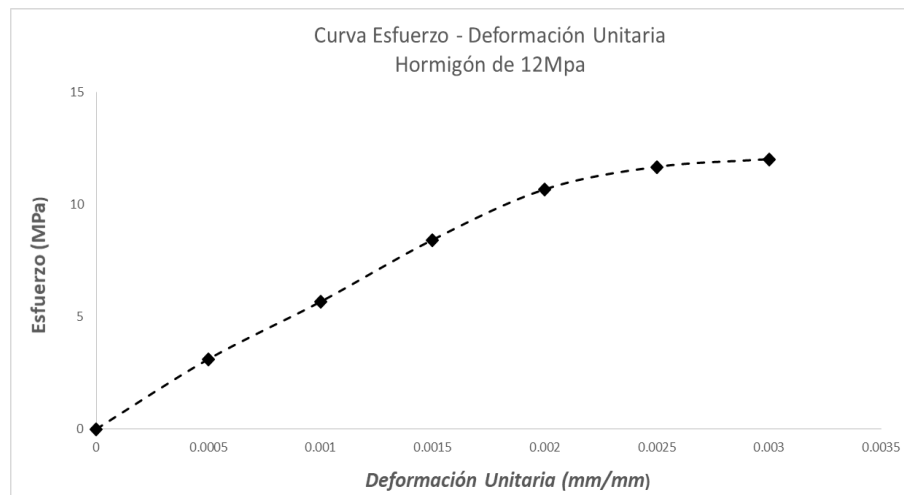


Figura 11. Curva Esfuerzo - Deformación Unitaria, hormigón de 12 MPa.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

La superficie de falla es el último parámetro necesario para describir la respuesta constitutiva del hormigón en toda la historia de carga. Para reproducir una respuesta no lineal del hormigón es necesario ingresar información del comportamiento a tensión, compresión y de la pérdida de resistencia producida por la aparición de grietas.

En la Tabla1 se detalla los coeficientes necesarios para describir la superficie de falla para un análisis no lineal. Los primeros cuatro coeficientes se relacionan con el comportamiento mecánico del hormigón y la interacción con el acero de refuerzo. Los coeficientes restantes se calculan dentro del proceso de solución del modelo computacional, estos coeficientes se relacionan con la resistencia máxima a compresión de acuerdo a las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Descripción	Notación
Coeficiente de transferencia de corte en grieta abierta	C1
Coeficiente de transferencia de corte en grieta cerrada	C2
Máxima resistencia a la tracción uniaxial.	f_t
Máxima resistencia a la compresión uniaxial.	f'_c
Máxima resistencia a la compresión biaxial.	f_{cb}
Estado de esfuerzo hidrostático ambiental.	σ_h
Máxima resistencia a la compresión para un estado biaxial de compresión súper impuesta en el estado de esfuerzo hidrostático.	f_1
Máxima resistencia a la compresión para un estado uniaxial de compresión súper impuesta en el estado de esfuerzo hidrostático.	f_2

Tabla 1. Coeficientes para describir la superficie de falla del hormigón.

Fuente: (Kohnke, 1998)

$$f_{cb} = 1.2 f'_c \quad \text{Ec.(2)}$$

$$f_1 = 1.45 f'_c \quad \text{Ec.(3)}$$

$$f_2 = 1.725 f'_c \quad \text{Ec.(4)}$$

$$\sigma_h = \sqrt{3} f'_c \quad \text{Ec.(5)}$$

Los valores para describir la superficie de falla son coeficientes de transferencia de corte en grieta abierta y cerrada, módulo de ruptura y la máxima resistencia a compresión. A continuación, se presenta la información sobre estos valores.

Según el artículo de (Ru-deng L. U., 2008), para establecer un valor de los coeficientes de transferencia de corte es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Coeficiente de transferencia corte en grieta abierta (C1). Valor positivo, comprendido entre 0 y 1, a un valor más alto el modelo computacional representa una mayor capacidad de resistir corte.
- Coeficiente de transferencia corte en grieta cerrada (C2). Valor positivo, comprendido entre 0 y 1, mayor que el coeficiente C1. Este valor tiene relación con la resistencia última del material.

Los coeficientes que dependen de la resistencia del hormigón se calcularon de la siguiente manera.

- Máxima resistencia a la tracción uniaxial (f_t). Para este coeficiente se empleó la fórmula presentada en el (ACI 318, 2019)
- Máxima resistencia a la compresión uniaxial (f'_c). Este valor es de 25.77 MPa para vigas y 12MPa para columnas (Quijia & Vaca, 2016)

Para elegir los valores de los coeficientes de transferencia de corte se presenta la tabla 2 donde constan valores propuestos en investigaciones enfocadas en estudiar la respuesta de elementos de hormigón armado aplicando las mismas condiciones de borde que en este trabajo.

Coeficiente de transferencia de corte en grieta abierta	Coeficiente de transferencia de corte en grieta cerrada	Autor
0.4	0.9	(Ru-deng L. U., 2008)
0.25	0.8	(Ghailan & Aziz, 2007)
0.3	1	(Darmansyah, et al, 2017)
0.2	0.8	Foros

Tabla 2. Valores obtenidos de fuentes bibliográficas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con estos valores se realizó un primer análisis para comparar las curvas de respuesta y entonces seleccionar el valor para los coeficientes con los que se genere una mejor aproximación a los datos experimentales, el proceso de selección se presenta en la sección 3.5.

2.2.1.3.2 Acero de refuerzo

Esta investigación es pionera en realizar un estudio computacional del comportamiento del acero de alta resistencia que se está fabricando en Ecuador.

El modelo constitutivo para el refuerzo se implementa en base a un modelo isotrópico bilineal con un comportamiento elasto-plástico perfecto. En estos modelos una vez alcanzada la fluencia del material la deformación continúa sin presentar aumento de resistencia (módulo tangente igual a 0). La resistencia a la tracción del acero usado para esta investigación es de 500MPa, un módulo de elasticidad de 200GPa y un módulo de Poisson de 0,3.

Con la información descrita, se creó la curva mostrada en la Figura 12 para representar el comportamiento constitutivo del acero usado en vigas y columnas.

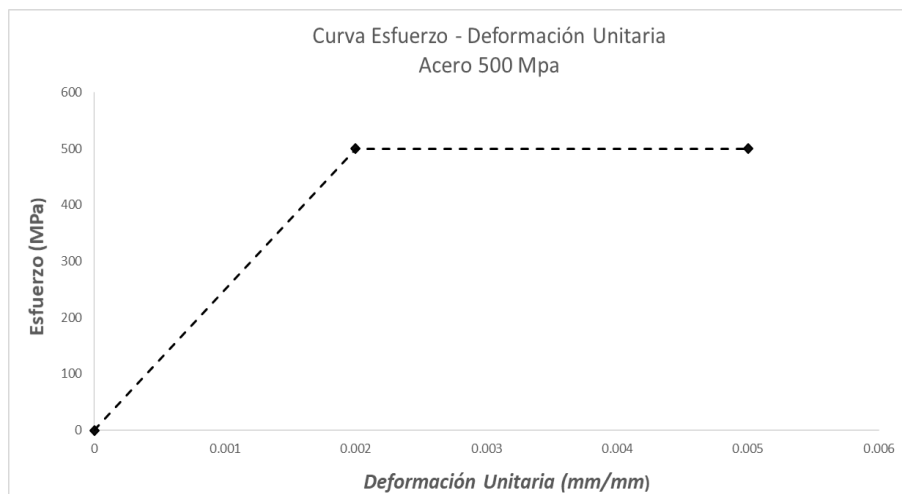


Figura 12. Curva esfuerzo-deformación Acero de alta resistencia ingresada a ANSYS.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

2.2.1.3.3 Placa de cargas y apoyos.

Para representar al material de los apoyos y placa de carga se empleó un material indeformable disponible de la librería de ANSYS, al cual se impuso características de un cuerpo rígido.

La placa de carga en ambos modelos está unida al hormigón mediante una *conexión sin fricción*, esto para representar únicamente la transferencia de carga. Para el caso de los apoyos se eligió una *conexión sin separación*, la cual mantiene las caras de los cuerpos unidas cuando se presenta desplazamientos por la deformación de los elementos. (Newman, 2018).

2.2.1.3.4 Interfaz entre elementos finitos

Los modelos computacionales creados para esta investigación combinan elementos finitos con diferentes características geométricas (e.g. sólidos y barras). Las ecuaciones de restricción implementadas automáticamente por ANSYS sirven para unir elementos con las mismas características geométricas.

Este inconveniente se soluciona al incluir un bloque de código APDL que permite establecer una tolerancia para el desplazamiento entre nodos durante el proceso de solución.

Esta tolerancia puede tomar valores entre 0 y 1, mientras menor sea la tolerancia menor serán los movimientos permisibles entre nodos, en un intento por modelar los mecanismo de adherencia entre el hormigón y el acero de refuerzo.

Al incluir este tipo de interfaz no debe existir una gran diferencia entre el mallado de los cuerpos que están en contacto (i.e. la matriz de hormigón y el acero de refuerzo). Las ecuaciones dan prioridad a los grados de libertad del elemento con un mallado menos denso. (Miller E. , 2012).

2.2.1.4 Condiciones frontera

Son valores exactos o aproximados de las variables primarias en ciertos puntos del dominio del problema, los cuales sirven para limitar el flujo de variables en las cercanías de dichos puntos, (Trefethen, 1994).

Para esta investigación, las condiciones de borde aplicadas a las vigas consisten en una carga monótonica colocada en el centro del vano, y la configuración de apoyos de una viga simplemente apoyada,

Para las columnas las condiciones de frontera consisten en una carga monótonica aplicada en la cara superior y un apoyo fijo en la cara inferior.

2.2.2 PROCESAMIENTO

En este paso, se da solución a modelos matemáticos que reproducen un fenómeno físico. Para la solución se toma en cuenta la información generada en el preprocesamiento y se aplica relaciones mecánicas para obtener las cantidades primarias desconocidas.

2.2.2.1 Cantidades primarias desconocidas.

La identificación de las cantidades primarias desconocida consiste en reconocer los resultados que se puede obtener del MEF, estos valores se calculan en los nodos y pueden ser: en un análisis de esfuerzos los desplazamientos, en un análisis de transferencia de calor la temperatura, en un análisis de dinámica de fluidos la velocidad, etc.

2.2.2.2 Ensamble

2.2.2.2.1 Matriz de rigidez local

Para cada elemento finito se genera una matriz de rigidez, considerando los ejes locales de cada elemento. La matriz generada recoge las propiedades del elemento y define la relación que existe entre la acción aplicada al elemento y los valores primarios desconocidos en los nodos de ese elemento, Ecuación 2.

$$[K^e]\{u\} = \{f\} \quad \text{Ec.(6)}$$

Dónde:

K^e : Matriz elemental de rigidez

u : Matriz elemental de desplazamientos

f : Matriz elemental de acciones internas

2.2.2.2.2 Matriz de rigidez global.

Para obtener la matriz de respuesta global del sistema es necesario transformar a coordenadas globales las matrices de rigidez locales y unir todas las matrices de rigidez de los elementos finitos. La matriz combinada representa el comportamiento global del sistema y su relación con las condiciones de borde aplicadas.

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad \text{Ec.(7)}$$

Dónde:

K : Matriz de rigidez total = $\sum_1^n [K^e]$.

e : Número de elementos discretizados.

u : Vector de desplazamientos.

F : Vector de fuerzas aplicadas.

2.2.2.2.3 Ensamble de vector de fuerzas y condiciones de apoyo

El vector de fuerzas generado en ANSYS toma en cuenta las acciones

aplicadas directamente en los nodos de los elementos finitos. Las resultantes de las acciones que se aplican en los elementos, además de las acciones resultantes de procesos temperatura, precisión y aceleración. (Kohnke, 1998).

2.2.2.3 Solución global

Para determinar los valores de las principales variables desconocidas, es necesario resolver el sistema de ecuaciones de equilibrio que rigen el comportamiento global, la forma de solución depende del tipo de análisis que se realice.

2.2.2.3.1 Análisis lineal

Para resolver un sistema en un contexto lineal, ANSYS usa el método de matriz inversa directamente en la ecuación de equilibrio global presentada en la Ecuación 2.

$$[K^{-1}]\{F\} = \{u\} \quad \text{Ec.(8)}$$

Dónde:

K : Matriz de rigidez total = $\sum_1^n [K^e]$.

u : Vector de desplazamientos nodales.

F : Vector de fuerzas aplicadas.

2.2.2.3.2 Análisis no lineal

Para resolver un sistema que presente un comportamiento no lineal, ANSYS emplea el proceso iterativo de Newton-Raphson, el cual divide la ecuación de respuesta global en pasos incrementales de carga. Esto para representar las deformaciones permanentes generadas en los materiales que conforman el sistema. Esta nueva relación de equilibrio incremental se presenta en la Ecuación 5.

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad \text{Ec.(9)}$$

Dónde:

K_i^T : Matriz de rigidez tangente.

i : Número de la iteración actual.

F^a : Vector de fuerzas aplicadas.

F_i^{nr} : Vector de restauración de cargas internas del sistema.

2.2.3 POS PROCESAMIENTO.

En este paso se calculan las incógnitas secundarias mediante el uso de los valores obtenidos de las incógnitas primarias usando relaciones mecánicas.

CAPÍTULO 3

MODELO COMPUTACIONAL.

3.1 GENERALIDADES

En este capítulo se presenta: (1) el proceso de creación de los modelos computacionales en base a un esquema de discretización de la matriz de hormigón y de las barras de acero de refuerzo en cada uno de los elementos estructurales estudiados, (2) la asignación de modelos constitutivos de cada material que compone a los elementos de hormigón armado y (3) la definición de las condiciones de frontera.

3.2 CREACIÓN DE GRUPOS

Una vez generada la geometría que configura a los elementos estructurales en estudio, es conveniente agrupar a las partes que presentan las mismas características mecánicas. Todo esto para facilitar la asignación de dichas características mediante los bloques de código APDL. La Tabla 3 presenta la cantidad de elementos y su designación a un grupo determinado.

Tipo de elementos	Número de cuerpos				Nombre del grupo
	Viga 20x20	Viga 20x30	Columna 20x20	Columna 20x30	
Matriz de hormigón	1	1	1	1	Concreto
Barras Longitudinales	4	4	4	4	Refuerzo
Estribos	14	14	5	5	Estribos
Placa de carga y Apoyos	3	3	2	2	Impactor

Tabla 3. Agrupación de elementos en los modelos computacionales.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

3.3 DISCRETIZACIÓN

3.3.1 MATRIZ DE HORMIGÓN

Para la discretización de la matriz de hormigón, se generó una malla de elementos finitos que se ajustan a la geometría de las vigas y de las columnas. Para la generación de la malla se tuvo en cuenta las deformaciones que predominan tanto en las vigas como en las columnas que son objeto de estudio.

Las dimensiones de los elementos finitos en los que se dividió la matriz de hormigón para los modelos de vigas y columnas se presenta en la Tabla 4 y el mallado de la matriz de hormigón en cada modelo se presenta en la Figura 13.

Elemento	Dirección	Vigas	Columnas
		Longitud (mm)	Longitud (mm)
solid65	x	80	50
	y	20	50
	z	100	50

Tabla 4. Discretización de la matriz de hormigón.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

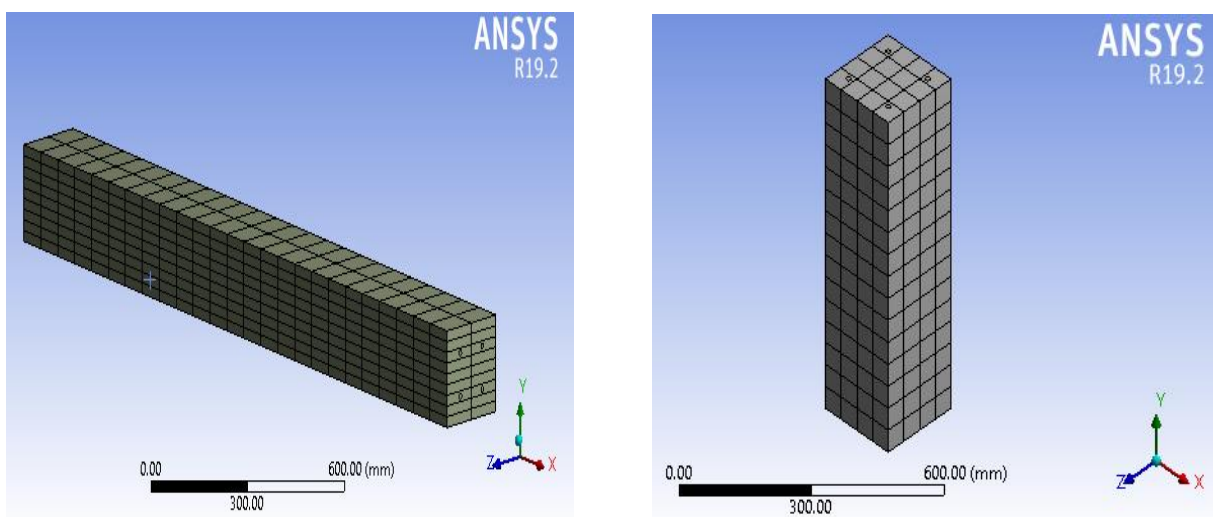


Figura 13. Discretización de la matriz de hormigón, a) Vigas, b) Columnas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

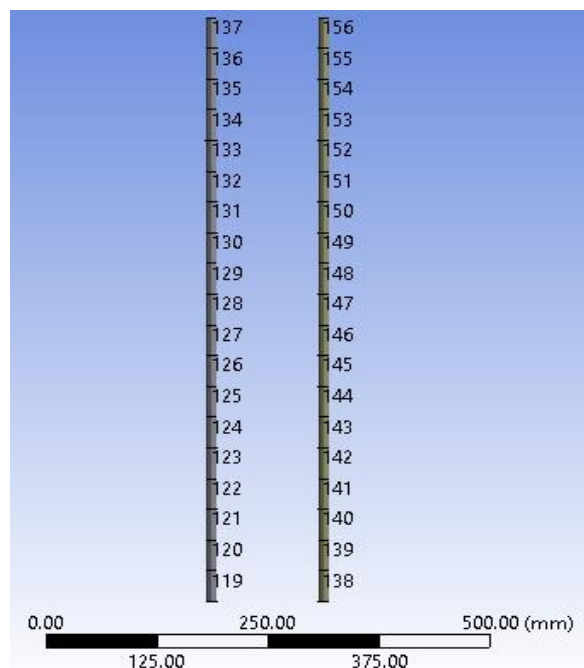
3.3.2 ACERO DE REFUERZO

La discretización para el acero de refuerzo consistió en dividir las barras únicamente en su eje longitudinal, ya que en este tipo de elementos predominan las deformaciones axiales. En la Tabla 5 se muestra las dimensiones de los elementos finitos del acero de refuerzo. En las Figuras 14 y 15 se muestra el mallado del refuerzo longitudinal y transversal respectivamente.

Elemento	Dirección	Vigas	Columnas
		Longitud (mm)	Longitud (mm)
link8. Refuerzo Longitudinal	x	100	40
link8. Refuerzo Transversal	x	55	40

Tabla5.Discretización del acero de refuerzo.

Elaborado por: Irvin Quillupangui



a)

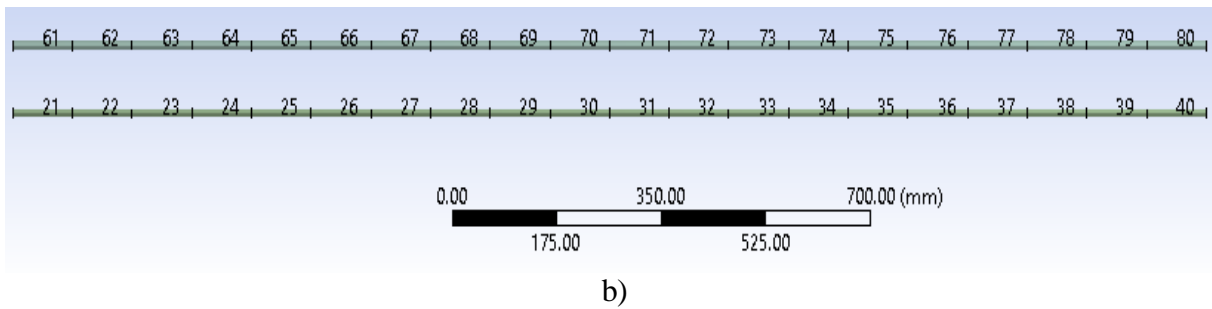


Figura 14. Discretización del refuerzo longitudinal. a) Columnas b) Vigas

Elaborado por: Irvin Quillupangui

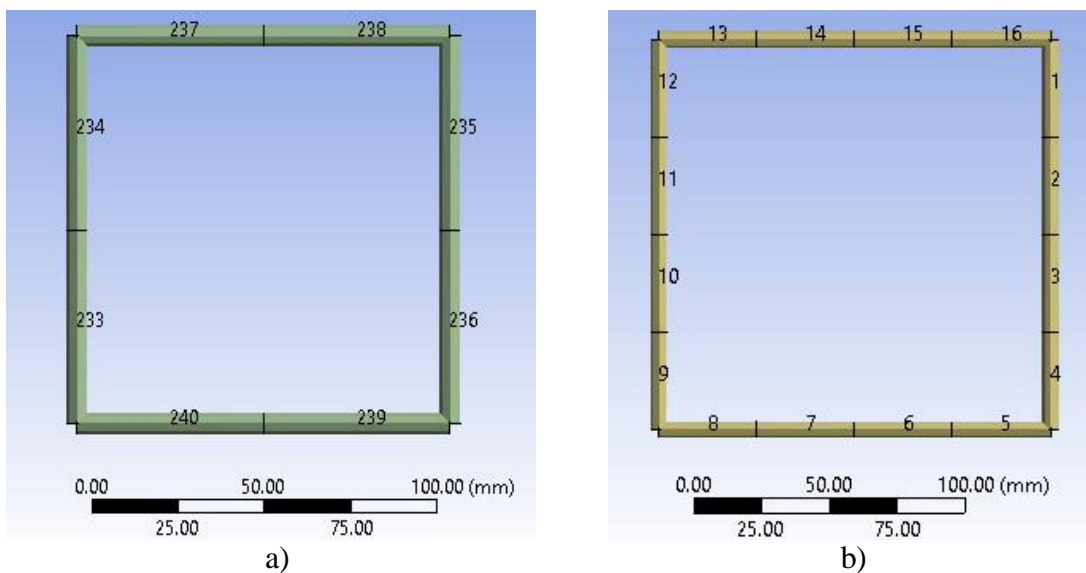


Figura 15. Discretización del refuerzo transversal. a) Vigas b) columnas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

3.3.3 PLACA DE CARGA Y APOYOS

Los cuerpos indeformables se los malló en hexaedros con todas las dimensiones iguales. En la tabla 6 y Figura 16 se presenta información del mallado de la placa de apoyo y de los apoyos.

Elemento	dirección	Vigas	Columnas
		longitud (mm)	longitud (mm)
solid45 (Placa de carga)	x	50	50
	y	50	50
	z	50	50
solid45 (Apoyos)	x	50	50
	y	50	50
	z	50	50

Tabla 6. Discretización de apoyos y placa de carga.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

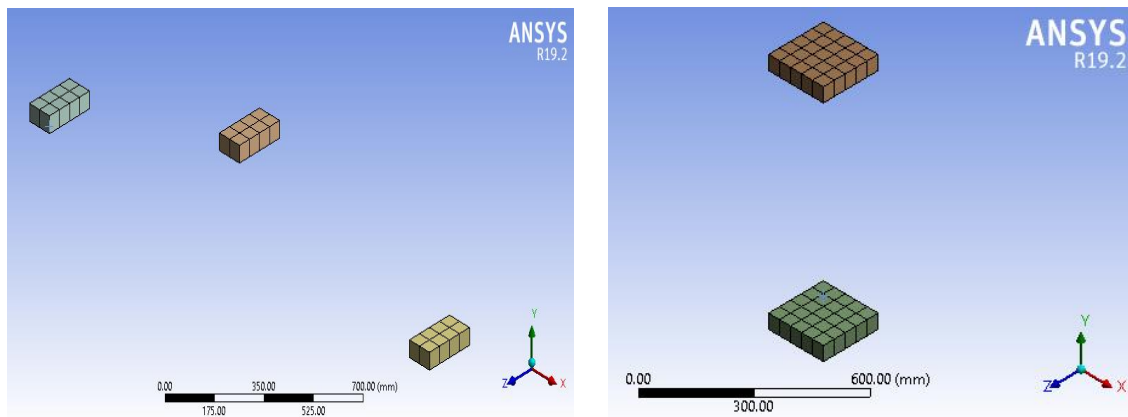


Figura 16. Discretización de apoyos y placa de carga.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con toda la información de la discretización de los materiales, se presenta las Tablas 7 y 8 donde consta el número total de elementos y de nodos en los modelos computacionales.

Modelo		Cantidad de elementos				Total de elementos por modelo
		Hormigón	Acero		Placa de carga y Apoyos	
			Longitudinal	Transversal		
Viga	20x20	225	80	112	48	465
	20x30	260	80	140	48	528
Columna	20x20	240	76	80	50	446
	20x30	250	72	110	48	480

Tabla 7. Cantidad de elementos finitos en los modelos computacionales

Modelo		Cantidad de nodos				Total de nodos por modelo
		Hormigón	Acero		Placa de carga y Apoyos	
			Longitudinal	Transversal		
Viga	20x20	520	164	224	135	1043
	20x30	588	164	280	135	1167
Columna	20x20	400	156	160	144	860
	20x30	396	148	220	140	904

Tabla 8. Cantidad de nodos en los modelos computacionales.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

3.4 CONDICIONES DE FRONTERA

3.4.1 CARGA

El proceso de carga en el modelo computacional se reprodujo en función de una carga puntual monótonica implementada a incrementos y ubicada en la placa de carga, En la Figura 17 se muestra las condiciones de borde creadas para el análisis.

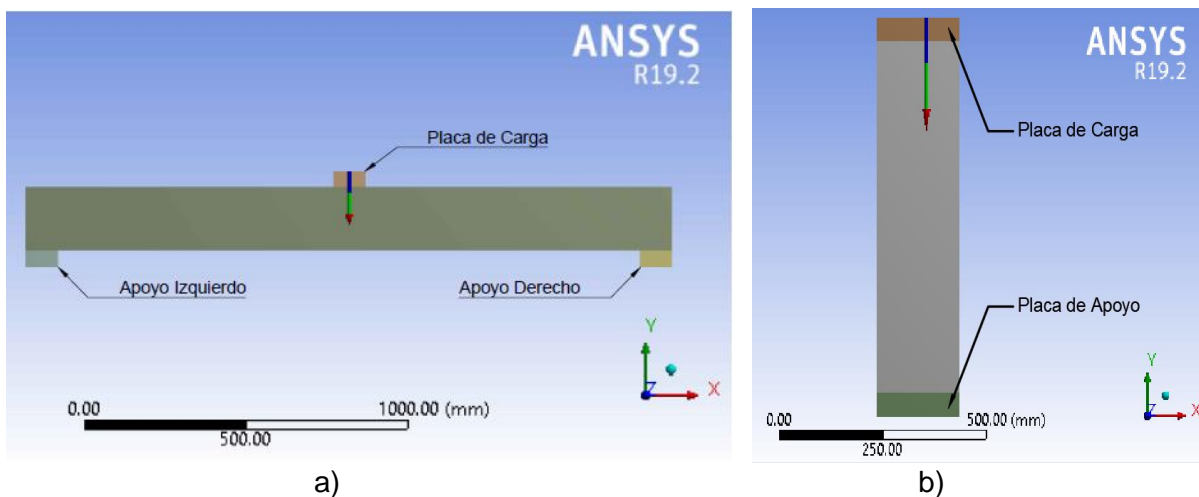


Figura 17. Ubicación de la placa de carga, a) Vigas, b) Columnas

Elaborado por: Irvin Quillupangui

La carga fue aplicada en la cara superior de los elementos que componen la placa de carga. En la Tabla 9 se presenta los elementos finitos correspondientes a la placa de carga en cada modelo.

Modelo		Elemento	
		Inicial	Final
Viga	20x20	81	96
	20x30	1	16
Columna	20x20	622	646
	20x30	1577	1600

Tabla 9. Elementos correspondientes a la placa de carga.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

3.4.2 APOYOS

Para representar los apoyos usados en los ensayos de laboratorio se creó cuerpos ubicados en los extremos de la viga y bajo la columna según se muestra en la Figura 17. Esta aproximación permite establecer restricciones al desplazamiento para los tres ejes ortogonales. En la Tabla 10 se muestran los elementos restringidos en cada modelo.

Modelo		Elemento	
		Inicial	Final
Viga 20x20	Apoyo Izquierdo	97	112
	Apoyo Derecho	113	128
Viga 20x30	Apoyo Izquierdo	17	32
	Apoyo Derecho	33	47
Columna 20x20	Placa de Apoyo	597	621
Columna 20x30	Placa de Apoyo	1553	1576

Tabla 10. Elementos restringidos para los modelos computaciones.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Para el caso de las vigas, además de las restricciones en los apoyos de los extremos de la viga, se incluyeron 2 restricciones adicionales, una para asegurar la flexión en el modelo y la otra para garantizar la condición de una viga simplemente apoyada. Para asegurar el comportamiento a flexión en el modelo e impedir el desplazamiento en la dirección del eje Z, se añadió una restricción de los vértices laterales de la matriz de hormigón, como se ve en la Figura 18, permitiendo solo la flexión en el plano XY.

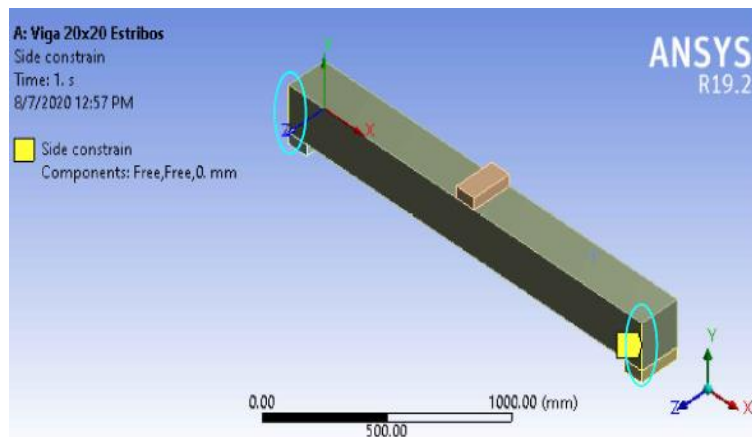


Figura 18. Aplicación de restricciones laterales en vigas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Para garantizar el comportamiento de una viga simplemente apoyada, se implementó una restricción que fija los nodos del vértice inferior izquierdo de la matriz de hormigón al apoyo, no así en el vértice inferior derecho en el cual se dejó libre para representar un apoyo móvil, Figura 19.

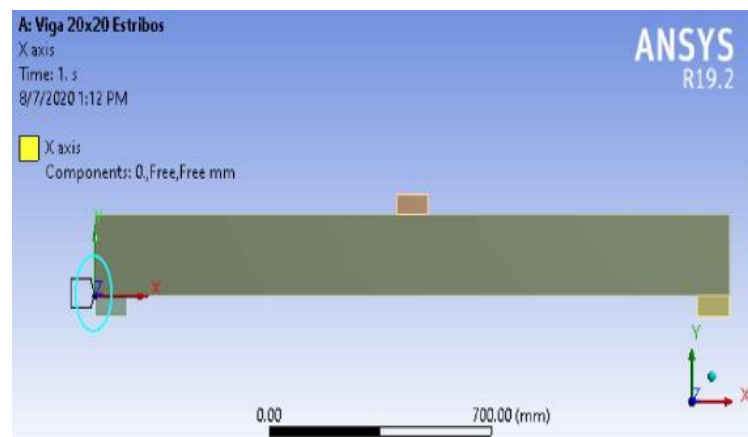


Figura 19. Restricción adicional en el apoyo izquierdo.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

En la Tabla 11, se muestran los nodos con restricciones adicionales en los modelos de vigas.

Modelo	Número de nodo	Eje de Restricción
Viga 20x20	932-941	Z
	966-975	Z
	208-212	X
Viga 20x30	1055-1068	Z
	1088-1101	Z
	44-48	X

Tabla 11. Nodos adicionales restringidos.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

3.5 LEYES CONSTITUTIVAS.

La caracterización mecánica de los materiales en función de los parámetros identificados en cada uno de los modelos constitutivos utilizados en el modelo computacional es un componente clave de este estudio. Se utilizaron datos experimentales reportados en el trabajo base de este estudio y se completaron datos con referencias bibliográficas de estudios sobre hormigón armado anteriores.

Los valores de los coeficientes de transferencia de corte dependen de las propiedades mecánicas del hormigón y de las condiciones de borde que se aplican al elemento de hormigón armado. Para seleccionar los coeficientes de transferencia de corte en grieta adecuado para cada modelo se hizo un análisis inicial del cual se eligió los valores que generan una mejor aproximación a los valores experimentales.

3.5.1 VIGAS

Para vigas se probaron los coeficientes expuestos en la Tabla 2 manteniendo

constante los valores del comportamiento del acero, las curvas de comportamiento obtenidas como resultado de este primer análisis se presentan en las Figuras 20 y 21 para la viga 20x20 y 20x30 respectivamente.

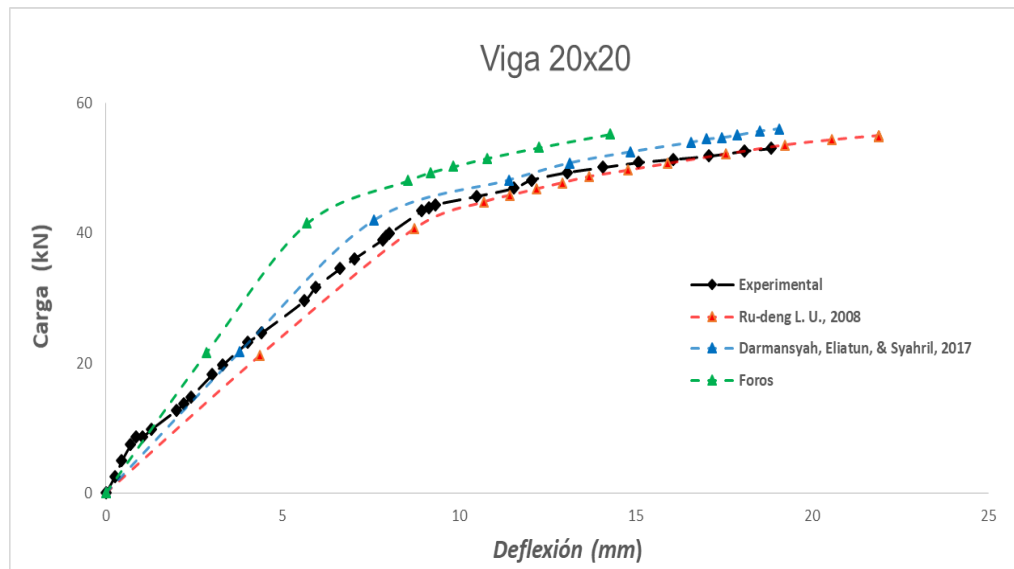


Figura 21. Comparación de coeficientes del modelo constitutivo del hormigón, viga 20x20.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

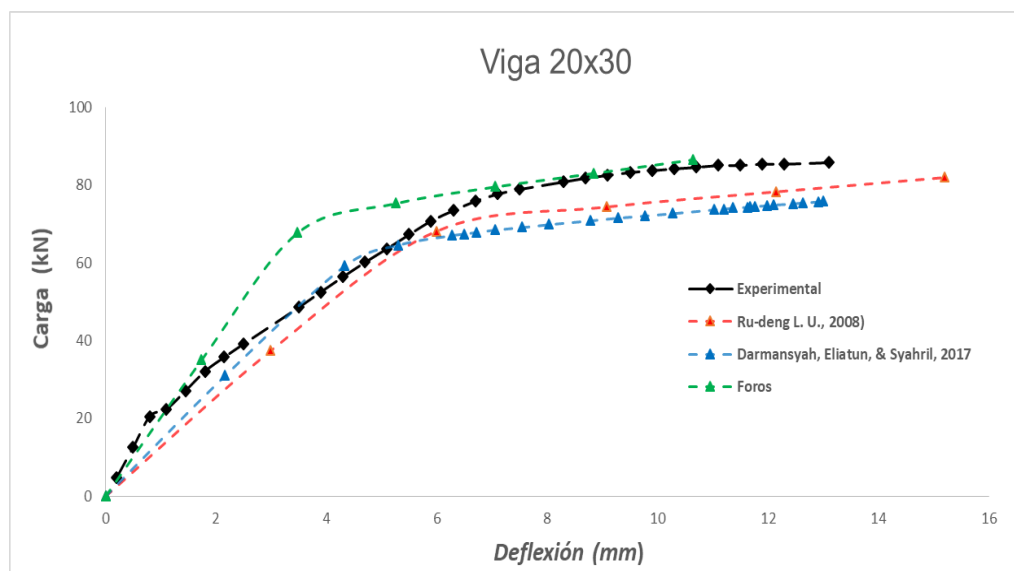


Figura 20. Comparación de coeficientes del modelo constitutivo del hormigón, viga 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con base a los resultados de este análisis se presenta la Tabla 12 donde consta la comparación de cargas y deflexiones máximas que presentan los modelos. Además se calcula el error relativo entre los resultados computacionales y experimentales y se los presenta en la Tabla 13.

Modelo	Experimental		Análisis computacional					
	Carga Máx. (kN)	Def. Máxima (mm)	Ru-deng L. U., 2008		Darmansyah, et al, 2017		Foros	
			Carga Max. (kN)	Def. Max. (mm)	Carga Max. (kN)	Def. Max. (mm)	Carga Max. (kN)	Def. Max. (mm)
Viga 20x20	53.04	18.84	54.81	21.89	56.08	19.06	55.28	14.28
Viga 20x30	85.77	13.1	81.95	15.20	75.86	13.0	86.56	10.63

Tabla 12. Comparación de valores máximos de carga y deformación en vigas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Al aplicar los valores presentados por (Ghailan & Aziz, 2007), el modelo computacional de la viga 20x20 llega al 47% (24.9kN) de la carga máxima, de igual manera, la viga 20x30 llega solo al 34% (29.13kN) de la carga total, lo que representa un error de 53% y 66% respectivamente. Es evidente que la caracterización del material con estos parámetros obtenidos de referencias bibliográficas produce altos valores de error en el modelo computacional y por lo tanto no reproducen el fenómeno de flexión en vigas al aplicar las condiciones de borde usadas en esta investigación.

Modelo	Error (%)					
	Ru-deng L. U., 2009		Darmansyah, et al, 2018		Foros	
	Carga Max.	Def. Max.	Carga Max.	Def. Max.	Carga Max.	Def. Max.
Viga 20x20	3.33	16.20	5.72	1.16	4.22	34.74
Viga 20x30	4.46	16.05	11.56	0.73	0.92	30.04

Tabla 13. Porcentaje de error del modelo computacional de Vigas.

Al aplicar los valores obtenidos en foros disponible en internet (forum.ansys, 2019), los resultados del análisis muestran una tendencia que se aproxima al comportamiento del miembro estructural, al no tener información que respalde las condiciones de borde que generan esos valores se decidió descartar su uso.

Como resultado de este proceso se decidió tomar los valores de los parámetros del modelo constitutivo del hormigón presentados por (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017), ya que son los valores que presentan errores más bajos y una tendencia de la curva de comportamiento con un buen nivel de aproximación a los modelos físicos.

3.5.2 COLUMNAS

Para establecer los coeficientes de transferencia de corte en grieta para las columnas se realizó una comparación entre los coeficientes usados por (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017) y los coeficientes presentados en la investigación de (Jenkins, Frosch, & PE, 2015).

Los resultados de estos análisis computacionales junto a las curvas experimentales se presentan en las Figuras 22 y 23 para la columna de 20x20 y 20x30 respectivamente.

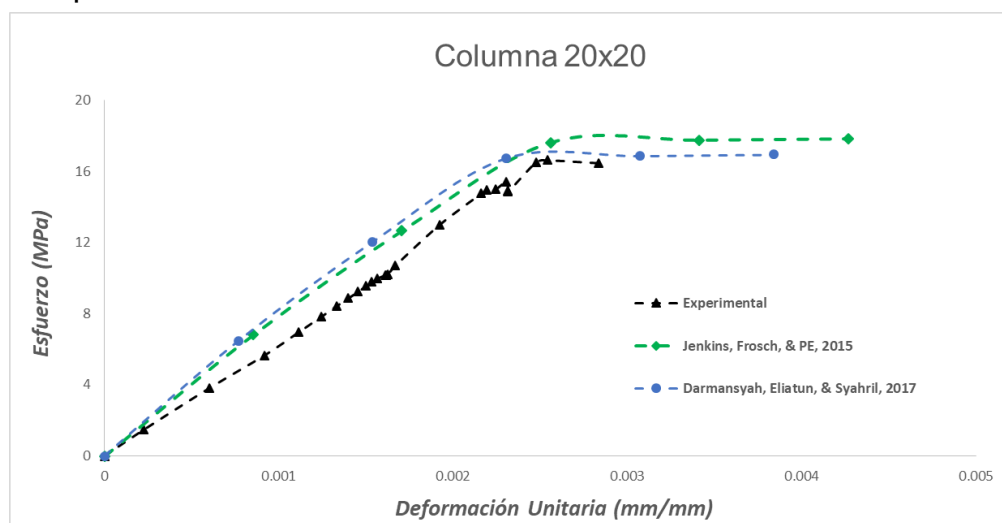


Figura 22. Comparación de coeficientes del modelo constitutivo del hormigón, columna 20x20

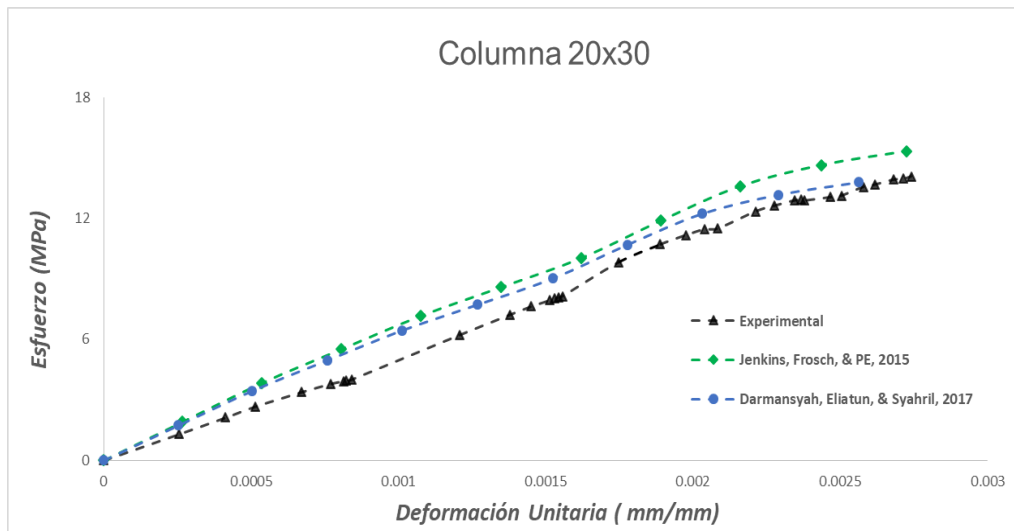


Figura 23. Comparación de coeficientes del modelo constitutivo del hormigón, columna 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con base a estos resultados se elaboró la Tabla 14 donde constan los valores máximos de esfuerzos y deformación unitarias alcanzadas por el modelo computacional. En la Tabla 15 se calcula el error relativo entre los datos experimentales y los valores máximos que presenta el modelo computacional.

Modelo	Experimental		Análisis computacional			
	Esfuerzo Máximo (MPa)	Def. Unitaria Máxima (mm/mm)	Darmansyah, et al, 2017		Jenkins, et al 2015	
			Esfuerzo Max. (MPa)	Def. Unitaria Max. (mm/mm)	Esfuerzo Max. (MPa)	Def. Unitaria Max. (mm/mm)
Columna 20x20	16.47	0.00283	16.94	0.00384	17.93	0.00426
Columna 20x30	14.08	0.00274	13.78	0.00256	15.32	0.00272

Tabla 14. Comparación de valores máximos de esfuerzo y deformación unitaria en columnas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Modelo	Error			
	Darmansyah, et al, 2017		Jenkins, et al 2015	
	Esfuerzo Max. (%)	Def. Unitaria Max. (%)	Esfuerzo Max. (%)	Def. Unitaria Max. (%)
Columnas 20x20	2.88	35.46	8.90	50.27
Columnas 20x30	2.11	6.59	8.83	0.76

Tabla 15. Porcentaje de error del modelo computacional de columnas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Luego de este análisis se decidió tomar los valores de los parámetros del modelo constitutivo del hormigón presentados por (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017). Al usar estos valores los resultados de esfuerzo y deformación unitaria que presentan los modelos computacionales tienen errores más bajos. Además la tendencia de la curva de comportamiento tiene un buen nivel de aproximación comparada con su contraparte del modelo experimental.

3.5.3 INTERFAZ ENTRE ELEMENTOS FINITOS.

En este trabajo se optó por implementar un bloque de código que contiene Ecuaciones de restricción de interfaz (CEINTF). Estas ecuaciones permiten representar la interacción entre cuerpos de diferentes características sin que todos los nodos coincidan, (Miller E. , 2012).

Para definir la interfaz entre materiales mediante código APDL, es necesario seleccionar los elementos que componen el modelo y establecer una tolerancia para el desplazamiento de nodos pertenecientes a diferentes materiales.

En las investigaciones que se centran en estudiar el comportamiento de elementos de hormigón armado, (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017), (Jenkins, Frosch, & PE, 2015) y (Wolanski,, 2004), se establece una tolerancia

al desplazamiento relativo de nodos de 0,1. Este valor representa de una manera adecuada la interacción real entre el hormigón y las varillas de acero cuando forman parte de un elemento de hormigón armado.

3.5.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Coefficiente	Valor	Unidad
Módulo de Elasticidad	200	GPa
Módulo de Poisson	0.3	
Esfuerzo de fluencia	500	MPa
Módulo tangente	0	MPa

Tabla 16. Propiedades del acero de refuerzo

Coefficiente	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad	24080	MPa
Módulo de Poisson	0.2	
Transferencia de corte abierto (C1)	0.3	
Transferencia de corte cerrado (C2)	1	
Módulo de ruptura (ft)	3.16	MPa
Resistencia a compresión ($f'c$)	25.77	MPa
Comportamiento no lineal	Def. Unitaria (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
Punto 1	0.0005	10.73
Punto 2	0.001	17.99
Punto 3	0.0015	22.44
Punto 4	0.002	24.76
Punto 5	0.0025	25.64
Punto 6	0.003	25.77

Tabla 17. Propiedades del hormigón usado en vigas.

Coeficiente	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad	6686	MPa
Módulo de Poisson	0.2	
Transferencia de corte abierto (C1)	0.3	
Transferencia de corte cerrado (C2)	1	
Módulo de ruptura (ft)	2.15	MPa
Resistencia a compresión (f'c)	12	MPa
Comportamiento no lineal	Def. Unitaria (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
Punto 1	0.0005	3.11
Punto 2	0.001	5.66
Punto 3	0.0015	8.41
Punto 4	0.002	10.66
Punto 5	0.0025	11.66
Punto 6	0.003	12

Tabla 18. Propiedades del hormigón usado en columnas

3.6 CODIFICACIÓN APDL

El ingreso de la información que describe el comportamiento de los materiales que conforman el modelo computacional, se realizó mediante bloques de código en el lenguaje de diseño paramétrico de ANSYS (APDL por sus siglas en Inglés).

Estos códigos fueron ingresados en los atributos de cada material (i.e. hormigón y acero de refuerzo) para asignar sus características mecánicas. Además se modificó el proceso de solución mediante la adición de un bloque de código que habilita la interacción entre materiales con diferentes características.

A continuación, se presenta el formato de los códigos usados en esta investigación, dando una explicación de cada comando que se emplea.

Elemento solid65, Matriz de hormigón

Código	Significado
ET,MATID,SOLID65	Tipo de elemento (ET), Identificación del material (MATID) SOLID-65
MP,EX,MATID,24080	Propiedad del material (MP), Modulo de Young(EX) en MPa
MP,NUXY,MATID,0.2	Propiedad del material (MP), Modulo de Poisson (NUXY)
MPTEMP,MATID,0	Propiedad del material temperatura (MPTEMP),
TB,MISO,MATID,1,6,0	Tabla de datos (TB), Endurecimiento isotrópico multilineal (MISO) Número de puntos para la curva esfuerzo-deformación (6)
TBPT,,0.00036, 8.1067	Punto i de la curva (TBPT), deformación (mm/mm), esfuerzo (MPa)
TBPT,,1,25.77	Punto n de la curva (TBPT), deformación (mm/mm), esfuerzo (MPa)
TB,CONCR,MATID,1,9	Tabla de datos (TB), Propiedades del concreto (CONCR)
MPTEMP,22	Temperatura para el módulo de elasticidad (22°C)(MPTEMP)
TBDATA,1,C1, C2, ft,-f'c	Constantes para representar el comportamiento del hormigón, tabla1 capítulo 2
tb_rebarratio_x = 0.0 tb_rebarratio_y = 0.0018 tb_rebarratio_z = 0.0018	Cuantía de acero de confinamiento en cada dirección.
R,solid65_matid, steel_matid,tb_rebarratio_x,0,0, steel_matid,tb_rebarratio_y, RMORE,90,0, steel_matid,tb_rebarratio_z,90,90, RMORE, ,	Descripción de ejes principales para la dirección de los estribos
CMSEL,S,Concreto,ELEM EMODIF,ALL,TYPE,solid65_matid, EMODIF,ALL,MAT,solid65_matid, EMODIF,ALL,REAL,solid65_matid,	Designación de propiedades para el volumen de hormigón.

Elemento LINK8, Acero de refuerzo

Código	Significado
ET,MATID,LINK8	Tipo de elemento (ET), Identificación del material (MATID) Link8
MPDATA,EX,MATID,,2e5	Propiedad del material (MP), Modulo de Young(EX) en MPa
MPDATA,NUXY,MATID,,0.3	Propiedad del material (MP), Modulo de Poisson (NUXY)

Interfaz entre materiales

Código	Significado
/PREP7	Modificación de la malla, cuando se presente desplazamiento entre elementos
CMSEL,S,BarrasLongitudinales,ELEM	Conjunto de elementos que representan a las barras longitudinales de acero
CMSEL,A,Estribos,ELEM	Conjunto de elementos que representan a los estribos.
NSLE,S	Comando para activar la compatibilidad de deformación entre nodos de diferentes cuerpos.
CMSEL,S,Concreto,ELEM	Volumen que representa a la matriz de hormigón.
CEINTF,0.1,	Interfaz entre ecuaciones de restricción (CEINTF), Tolerancia de desfase entre nodos. (0.1)
ALLSEL,ALL	Comando para la selección de nodos en cada iteración (ALLSEL), cuerpos perteneciente al modelo (ALL)
/SOLU	Modificación de cargas y condiciones de apoyo, cuando se presenta desplazamiento entre elementos

Toda la información presentada en esta sección fue obtenida de los manuales de ANSYS y de las siguientes referencias bibliográficas: (Kohnke, 1998), (Paleti , Sambana , & Chaitanya , 2010), (Miller E. , 2012), (Thompson & Thompson, 2017)

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

4.1 GENERALIDADES

Esta sección muestra un análisis comparativo de los modelos experimentales del trabajo de (Quijia & Vaca, 2016) y el modelo numérico computacional generado como parte importante de este trabajo.

Las comparaciones se establecen en función de los datos reportados en el trabajo experimental de (Quijia & Vaca, 2016) . Más allá de esta posibilidad, este estudio, a diferencia del experimental, también permite el análisis de otras variables que difícilmente pueden ser obtenidas en un trabajo experimental. En este contexto podemos destacar el gran potencial que tienen los modelos computacionales para el análisis del comportamiento mecánico de elementos estructurales complejos como aquellos construidos con materiales compuestos.

Este estudio computacional sería el primero en el país que permite representar un acero de alta resistencia como componente de elementos del hormigón armado en base a un modelo numérico computacional.

4.2 VIGAS

4.2.1 CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO

En las Figuras 24 y 25, se muestra un análisis comparativo las curvas carga – deflexión para las vigas de 20x20 y 20x30, respectivamente. Las curvas mostradas evidencian un buen grado de aproximación entre el modelo computacional y su contraparte experimental.

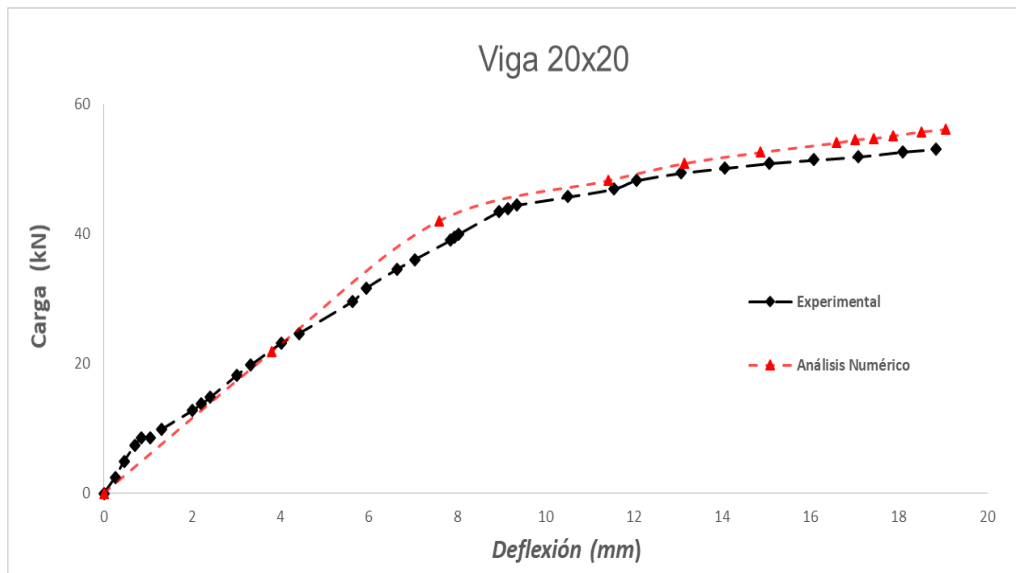


Figura 24. Curva Esfuerzo-Deflexión, Viga 20x20.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

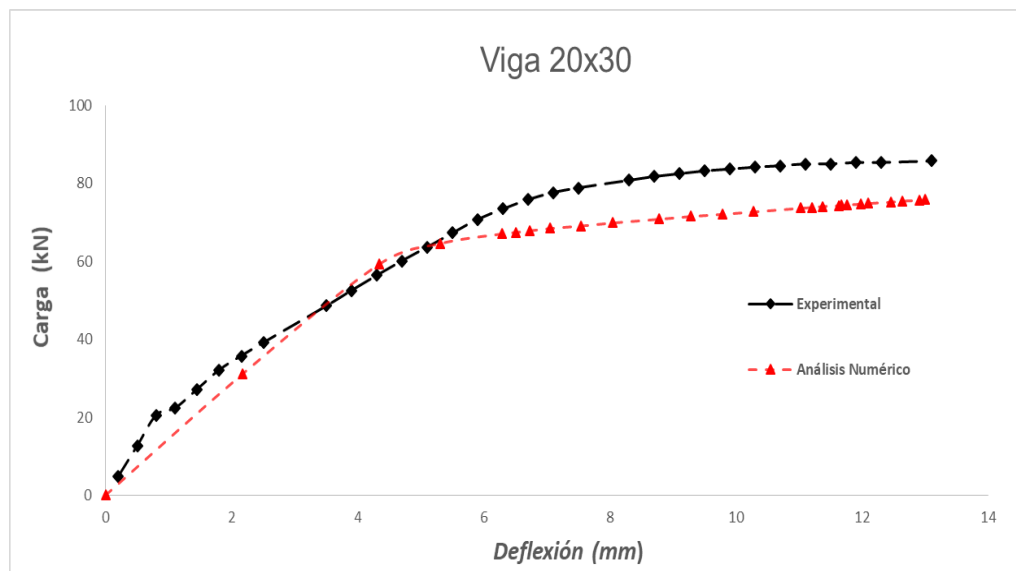


Figura 25. Curva Esfuerzo-Deflexión, Viga 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con base a los resultados del análisis computacional se presentan la Tabla 19 donde se evidencia los valores máximos tanto de carga como de deflexión para cada modelo. En la tabla 20 se presenta el porcentaje de error y el coeficiente de correlación entre las curvas experimentales y computacionales.

Modelo	Experimental		Análisis computacional	
	Carga Máxima(kN)	Deflexión Máxima (mm)	Carga Máxima (kN)	Deflexión Máxima (mm)
Viga 20x20	53.05	18.85	56.08	19.06
Viga 20x30	85.78	13.10	75.86	13.00

Tabla 19. Valores máximos de carga y deflexión en vigas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Modelo	Error		Coeficiente de correlación
	Carga Máxima (%)	Deflexión Máxima (%)	
Viga 20x20	5.72	1.16	0.9988
Viga 20x30	11.56	0.73	0.9892

Tabla 20. Porcentaje de error entre los datos experimentales y el análisis numérico en Vigas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

De la Tabla 20 es necesario resaltar que el valor del coeficiente de correlación de las curvas de comportamiento tienen valores próximos a 1 lo que demuestra que el modelo computacional reproduce con un buen nivel de aproximación el fenómeno de flexión en vigas de hormigón armado en todo el historial de carga.

En las Figuras 26 y 27 se muestra el máximo estado de deformación en milímetros (mm) que presentan los modelos computacionales. A las imágenes se aplicó un factor de ampliación de 3 para facilitar la visualización de resultados.

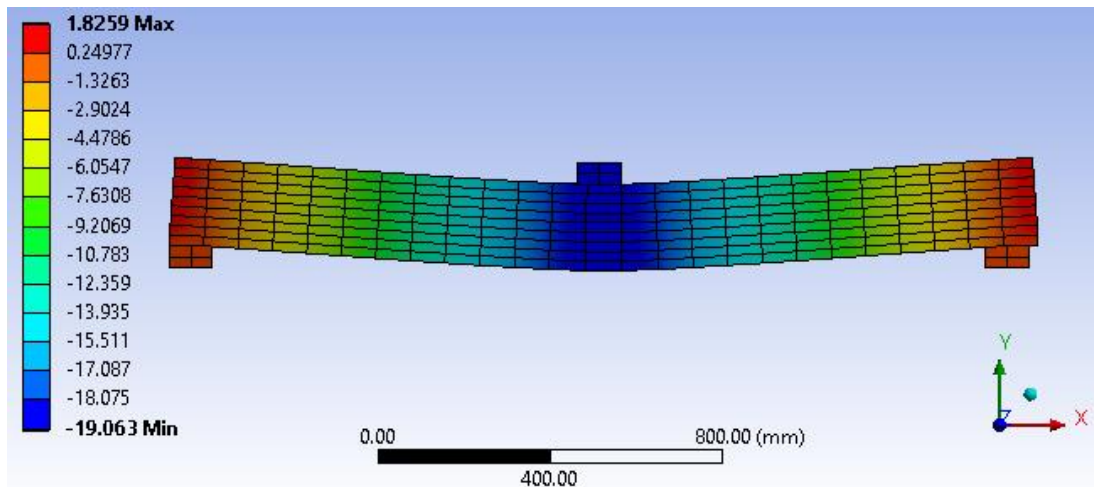


Figura 27. Deflexión total del modelo, viga 20x20.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

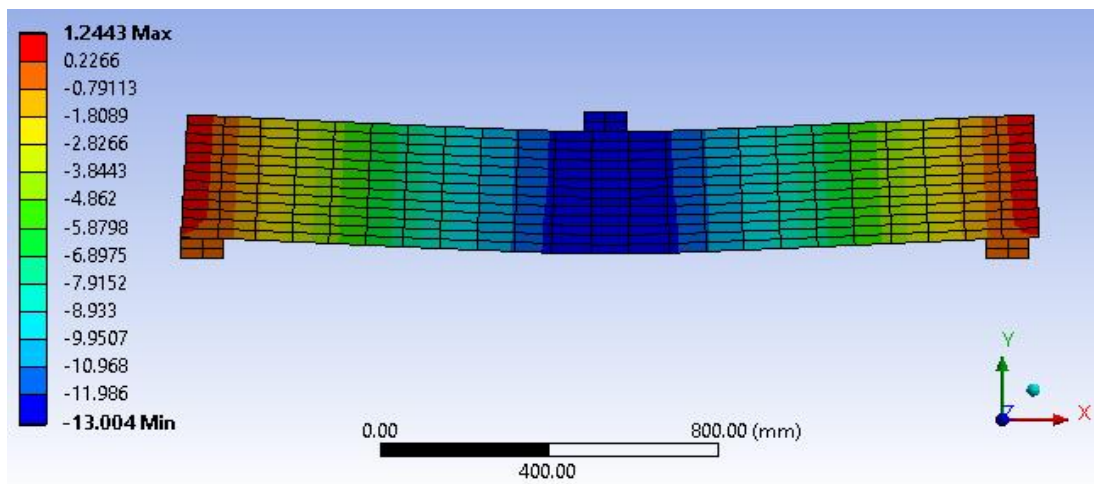


Figura 26. Deflexión total del modelo, viga 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Las figuras 26 y 27 muestran el perfil de deflexiones en toda geometría de las vigas, a diferencia de los modelos experimentales en las cuales se capturaron únicamente las deflexiones en el centro de la luz. Con esto se quiere destacar el alto potencial que tienen los modelos computacionales para analizar, caracterizar y reproducir el comportamiento mecánico de estructuras complejas, venciendo así algunas limitaciones de configuración y costos experimentales.

Con base a todos los datos reportados, podemos concluir que el modelo computacional creado reproduce con un alto grado de aproximación todos los aspectos relacionados con el fenómeno de flexión en vigas al implementar acero de refuerzo de alta resistencia en base a un esquema computacional discreto en los modelos computacionales.

4.2.2 CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE LA MATRIZ HORMIGÓN

Los resultados presentados en esta sección se basan en el proceso de validación del modelo numérico computacional presentados en el capítulo anterior. El potencial de los modelos numérico-computacionales puede evidenciarse, puesto que, permiten estudiar de manera más detallada el comportamiento de un elemento estructural y de los materiales que lo conforman.

Para analizar el comportamiento de la matriz de hormigón se presentan las Figuras 28 y 29, donde se muestra la distribución del esfuerzo efectivo de Von-Mises que se genera en la matriz de hormigón con la aplicación de la carga máxima resistida por el modelo experimental. El esfuerzo efectivo de Von-Mises permite pasar de un estado general de esfuerzos a un estado de tensión pura, manteniendo la misma energía de distorsión por unidad de volumen en el material.

Este método para representar los esfuerzos generados dentro de la matriz de hormigón fue elegido para comparar el único parámetro del comportamiento del hormigón que se presenta la tesis de (Quijia & Vaca, 2016).

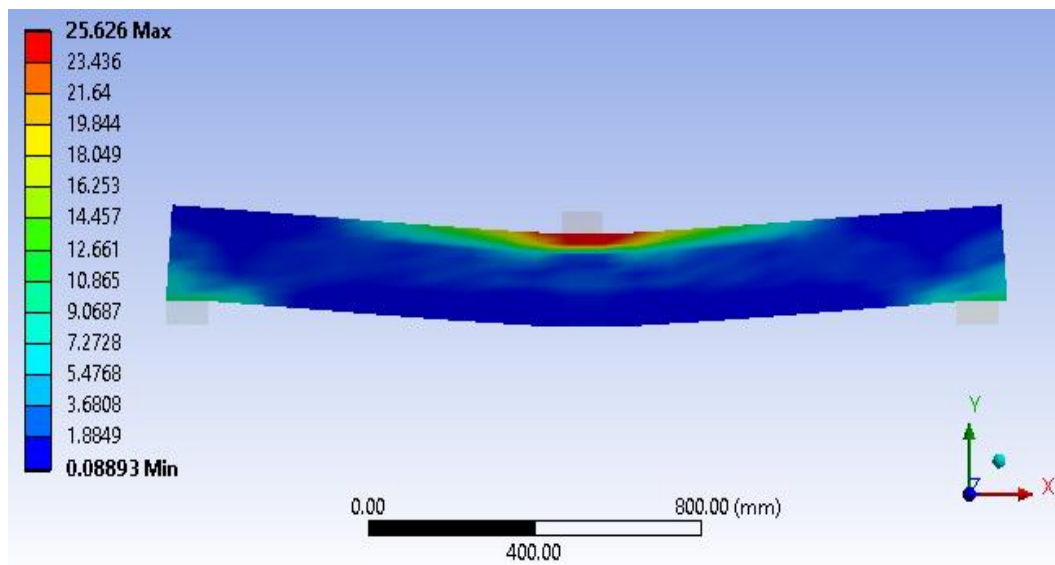


Figura 29. Esfuerzos equivalentes en la matriz de hormigón en MPa, Viga 20x20.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

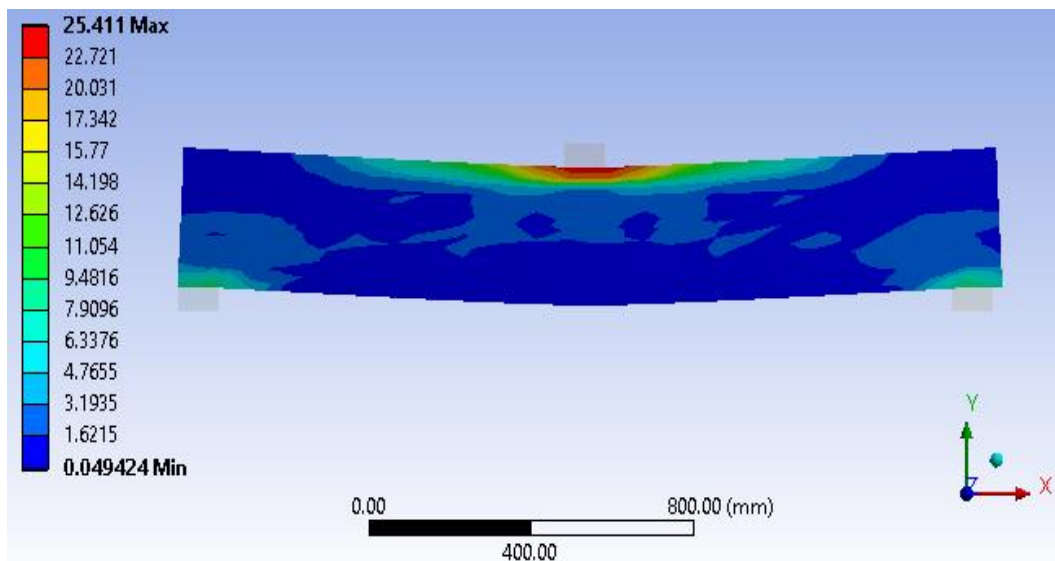


Figura 28. Esfuerzos equivalentes en la matriz de hormigón en MPa, Viga 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

El esfuerzo equivalente máximo que alcanza la matriz de hormigón dentro del modelo de la viga de 20x20 es de 25.62MPa lo que representa el 99.8 % de la resistencia máxima del hormigón, para el caso de la viga 20x30 se alcanzó 25.41 MPa lo que representa el 98.7% del f'_c , por lo que, la zona de hormigón ubicada bajo la placa de carga se encuentra en proceso de aplastamiento.

4.2.3 CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DEL ACERO DE REFUERZO.

Como parte esencial de incluir una idealización discreta del acero de refuerzo es la capacidad de obtener información del comportamiento individual del material refuerzo.

Ya que esta investigación se centra en la creación de un modelo computacional para la validación del comportamiento de elemento de hormigón armado que usan del acero de refuerzos de alta resistencia que se está fabricando por la industria ecuatoriana, se presenta la fuerza que se alcanza en las barras de acero del refuerzo longitudinal y transversal.

4.2.3.1 Refuerzo Longitudinal

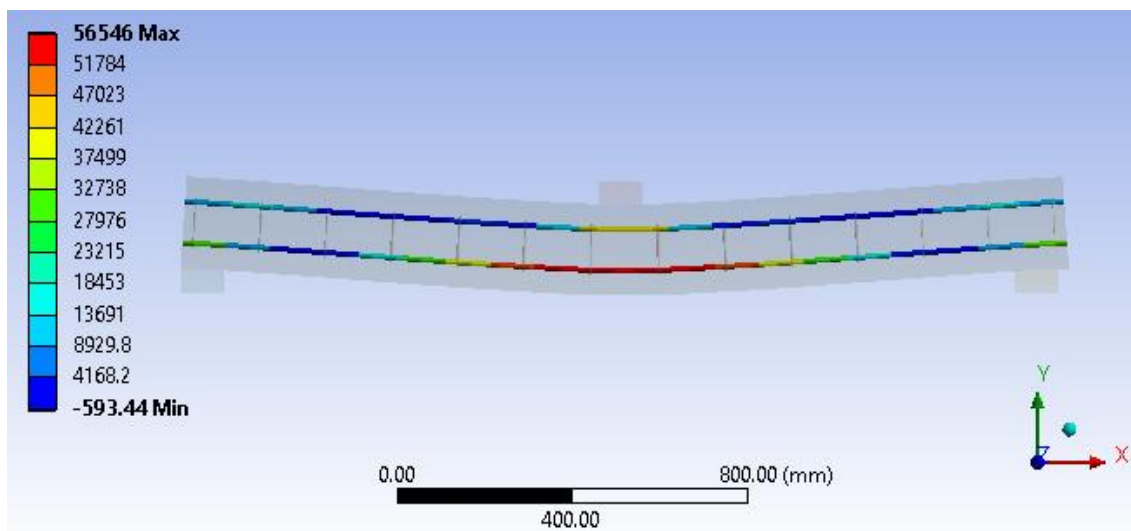


Figura 30. Fuerza axial varillas longitudinales en N, viga 20x20.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

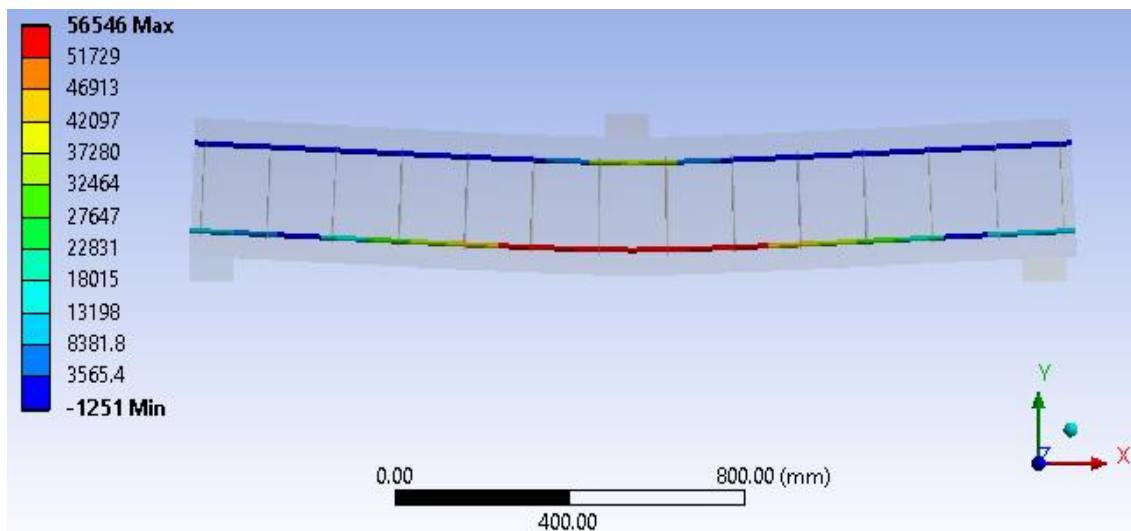


Figura 31. Fuerza axial varillas longitudinales en N, viga 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Las Figuras 30 y 31, muestra la fuerza axial máxima en Newtons [N] que alcanzan las barras de acero.

Relacionando la carga aplicada al modelo y la fuerza de axial generada en las varillas se puede obtener los valores de carga en los cuales el refuerzo longitudinal comienza con el proceso de fluencia. Para el caso de la viga 20x20 el inicio de la fluencia ocurre cuando se aplica el 75.8% (41.4 kN), de la carga total, para el caso de la viga 20x30 esto ocurre aplicando el 87.8% (71.1kN) de la carga total.

4.2.3.2 Estribos.

Para analizar el comportamiento en los estribos se consideró los estribos que están ubicados en los extremos de la viga, ya que presentan una mayor fuerza axial. La distribución de la fuerza axial generada en los estribos en los modelos de vigas se presenta en la Figura32.

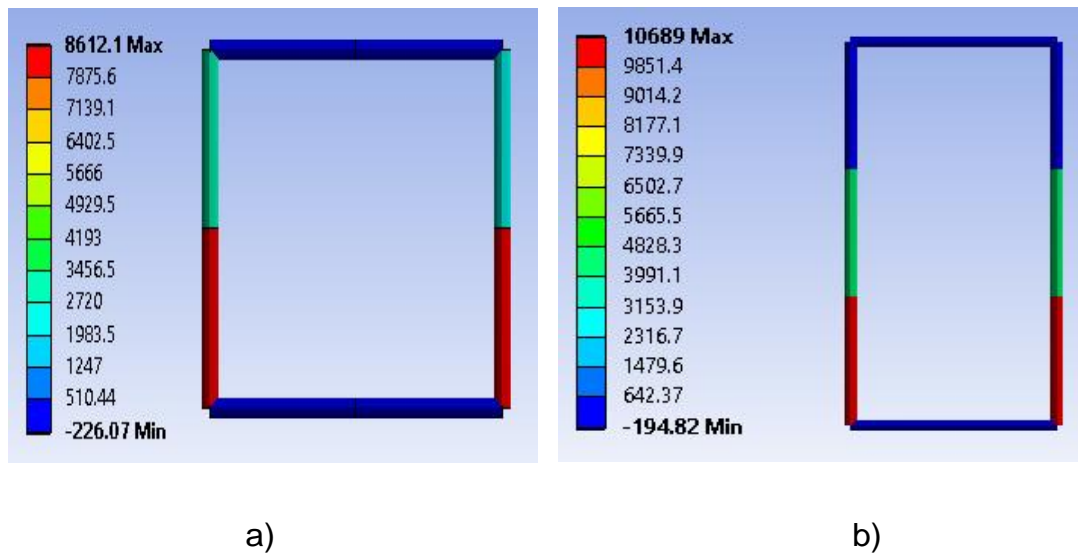


Figura 32. Fuerza Axial en estribos, a) Viga 20x20 b) Viga 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con los valores de fuerza axial en los elementos de acero de refuerzo, se elaboró la Tabla 21, donde se calcula el esfuerzo de trabajo de las varillas de acero en el estado final de carga.

Modelo	Elemento	Área (mm ²)	Fuerza Axial (N)	Esfuerzo (Mpa)	% de f_y	Estado
Viga 20x20	Refuerzo Longitudinal	113.10	56546	499.98	100.00	Fluye
	Estribos	28.27	8612.1	304.59	60.92	No fluye
Viga 20x30	Refuerzo Longitudinal	113.10	56546	499.98	100.00	Fluye
	Estribos	28.27	10689	378.05	75.61	No fluye

Tabla 21. Esfuerzo de trabajo de varillas de acero.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con base a la información presentada en la Tabla 21, se puede decir que no es necesario usar estribos que sean de acero de alta resistencia, ya que, el esfuerzo máximo que alcanzan los estribos se puede cubrir con capacidad que presentan las barras de acero de resistencia ordinaria (420MPa).

4.3 COLUMNAS.

Para el caso de las columnas, la comparación se hizo entre curvas esfuerzo–deformación unitaria, debido a que las curvas carga - deformación presentadas en la tesis de (Quijia & Vaca, 2016) no concuerdan con los datos recolectados de los ensayos.

4.3.1 CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO.

Para esta comparación, se procesó los resultados del análisis numérico para obtener una curva esfuerzo – deformación unitaria de todo el elemento.

En las figura 33 y 34 se presenta la curva obtenida del análisis computacional y la curva de los ensayos de laboratorio a las que se tuvo acceso.

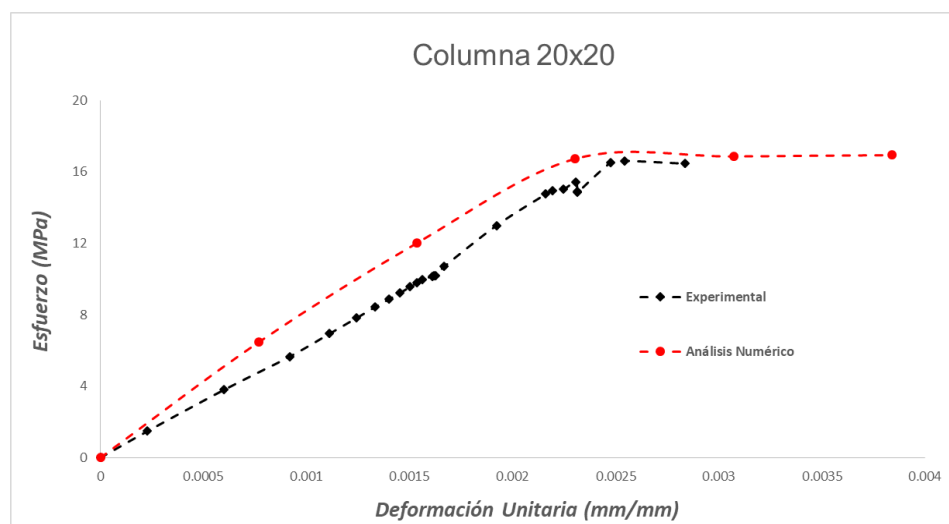


Figura 33. Curvas Esfuerzo – Deformación Unitaria, Columna 20x20

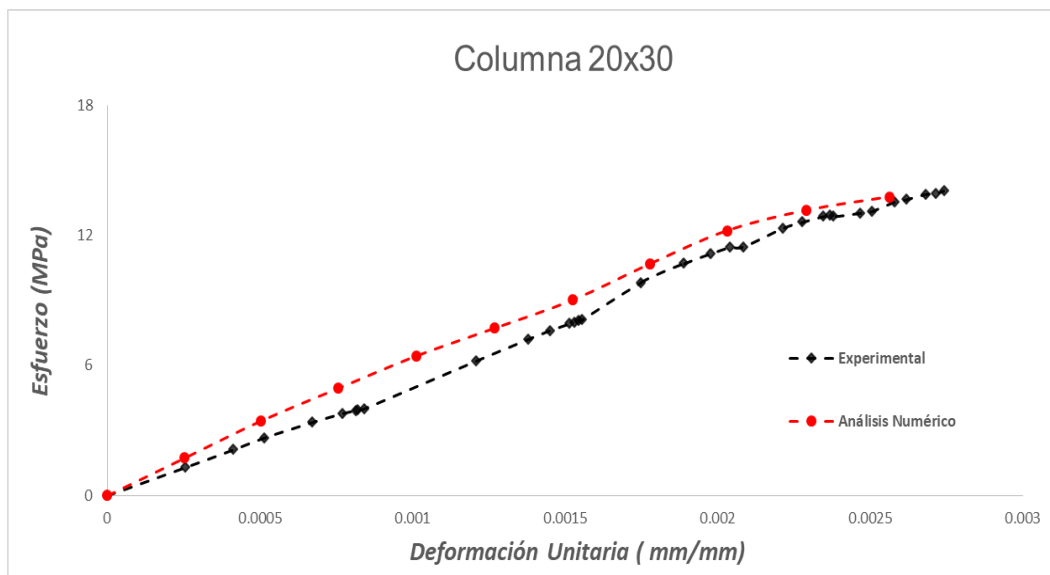


Figura 34. Curvas Esfuerzo – Deformación Unitaria, Columna 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Con base a los resultados del análisis computacional se presentan la Tabla 22 donde se evidencia los valores máximos tanto de esfuerzo como de deformación unitaria para cada modelo. En la tabla 23 se presenta el porcentaje de error y el coeficiente de correlación entre las curvas experimentales y numérico-computacionales

Modelo	Experimental		Análisis computacional	
	Esfuerzo Max. (MPa)	Def. Unitaria Max. (mm/mm)	Esfuerzo Max. (MPa)	Def. Unitaria Max. (mm/mm)
Columna 20x20	16.47	0.00283	16.94	0.00384
Columna 20x30	14.08	0.00274	13.78	0.00256

Tabla 22. Valores máximos de esfuerzo y deformación unitaria para columnas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Modelo	Error		Coeficiente de correlación
	Esfuerzo Max. (%)	Def. Unitaria Max. (%)	
Columna 20x20	2.88	35.46	0.9762
Columna 20x30	2.1075	6.5938	0.9984

Tabla 23. Porcentaje de error entre datos experimentales y el análisis numérico en columnas.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

De la Tabla 23 es necesario resaltar que el valor del coeficiente de correlación de las curvas de comportamiento tienen valores próximos a 1 lo que demuestra que el modelo computacional reproduce con un buen nivel de aproximación el fenómeno de compresión en columnas de hormigón armado en todo el historial de carga.

4.3.2 CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DE LA MATRIZ HORMIGÓN.

De igual manera que las vigas, se muestra la distribución del esfuerzo equivalente en MPa, que se genera dentro de la matriz de hormigón, Figura 35.

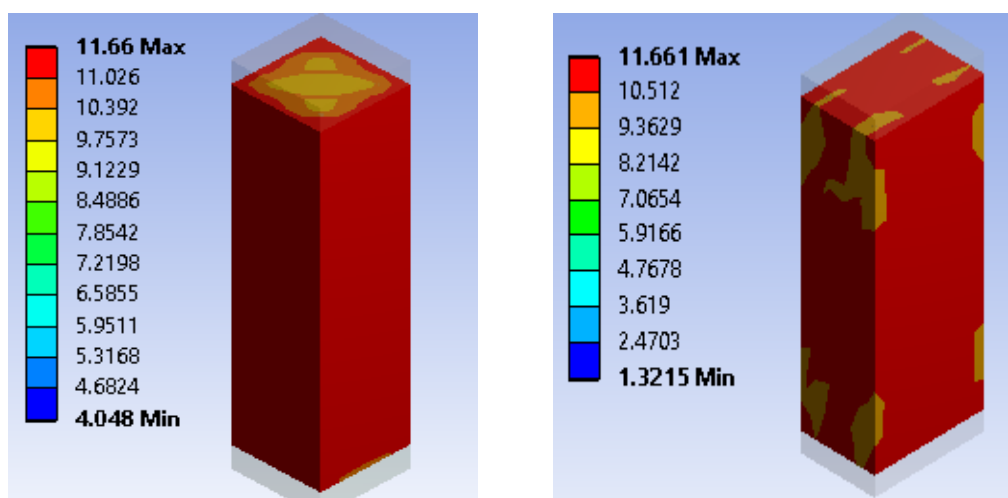


Figura 35. Esfuerzo efectivo en la matriz de hormigón a) Columna 20x20 b) Columna 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

En Figura 35 se puede apreciar que la zona donde se presenta un mayor esfuerzo equivalente es en la porción intermedia de la columna, llegando a ser de 11.66 MPa para ambas columnas, este valor de esfuerzo efectivo representa el 97% de la resistencia máxima a la compresión del hormigón.

4.3.3 CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO COMPUTACIONAL DEL ACERO DEL REFUERZO.

4.3.3.1 Refuerzo Longitudinal.

Para continuar con el estudio del comportamiento del acero refuerzo se presenta la Figura 36, donde se muestra la carga axial en Newtons (N), que se genera en las varillas correspondientes al refuerzo longitudinal.

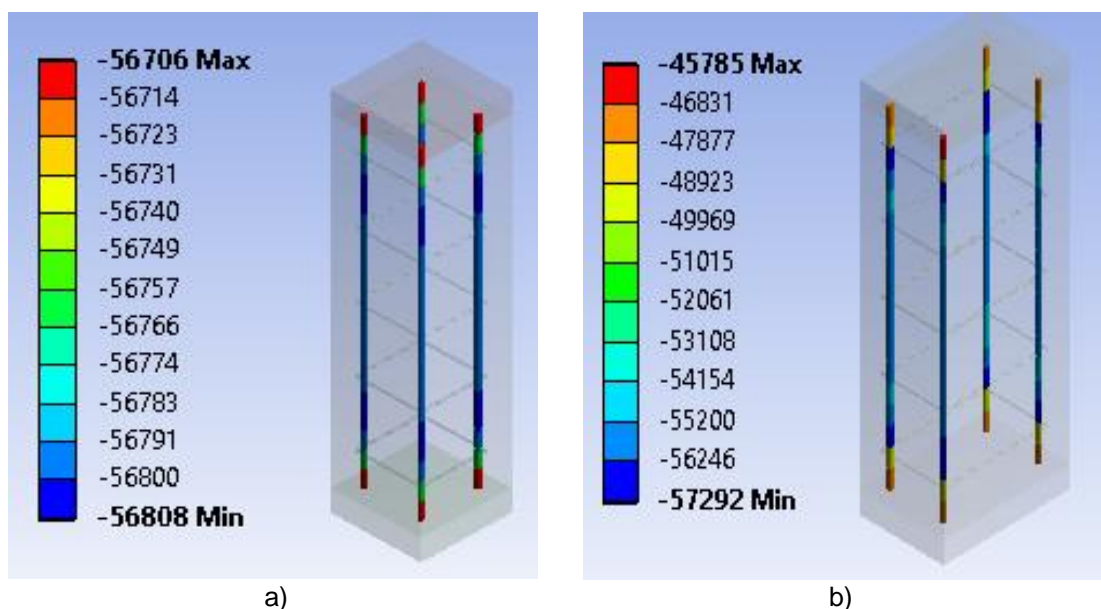


Figura 36. Fuerza Axial en el refuerzo longitudinal. a) Columna 20x20 b) Columna 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

En la Figura 36, se puede ver que en la porción del refuerzo longitudinal donde se encuentran estribos se presenta una variación la fuerza axial, debido a la

restricción que efectúan los estribos ante expansión del núcleo confinado de concreto y el pandeo de las barras de refuerzo longitudinal.

4.3.3.2 Esfuerzo transversal.

Para analizar el comportamiento de los estribos se presenta la figura 37, donde se expone la fuerza axial en Newtons (N) generada en todos los estribos de las columnas en el estado máximo de carga que soporta los modelos computacionales.

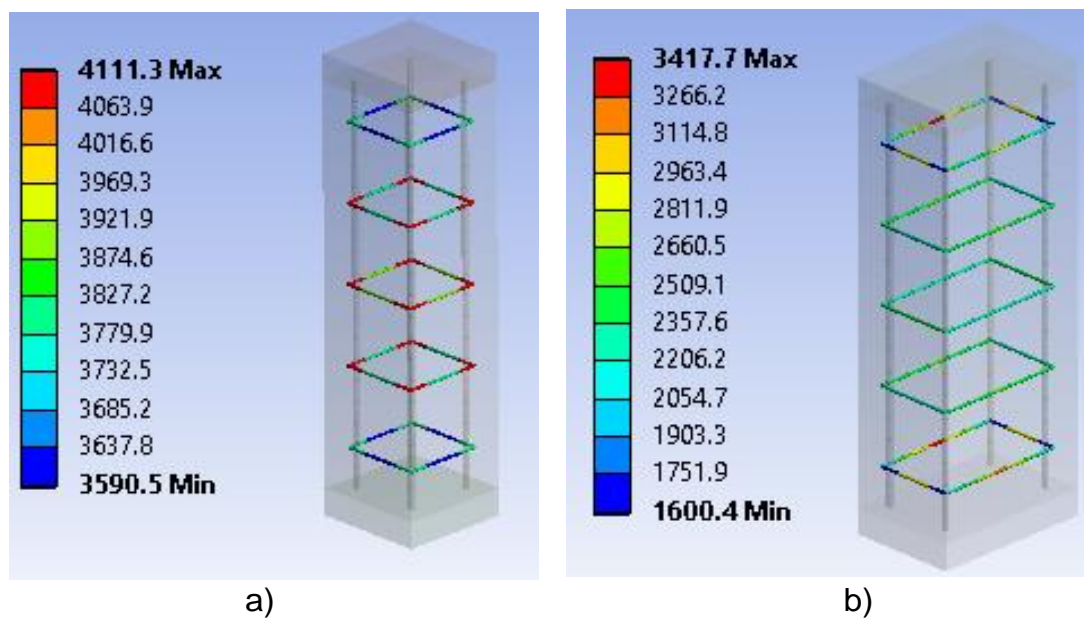


Figura 37. Fuerza Axial en el refuerzo transversal. a) Columna 20x20 b) Columna 20x30.

Elaborado por: Irvin Quillupangui

Los resultados expuestos en la Figura 37, muestra de una manera clara la acción que realizan los estribos en un elemento estructural de hormigón armado sometido a carga axial.

Para la columna 20x20 la fuerza axial se concentra en los vértices del estribo, lo que resalta la importancia de realizar un doblé 135° para que cumpla con la acción de confinar al concreto y los refuerzos longitudinales. Para la columna 20x30 la máxima fuerza axial que se desarrolla en la zona más larga de los

estribos, esto ocasionado por una distancia grande entre refuerzos longitudinales.

Los estribos en la columna de 20x20 alcanzan un esfuerzo máximo de 145MPa y en las columnas 20x30 alcanza 337MPa. Lo que demuestra que no es necesario el uso de acero de alta resistencia en estribos para columnas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los modelos numérico-computacionales generados en este trabajo reproducen con un alto nivel de aproximación (i.e. coeficientes de correlación mayores al 97%) las curvas experimentales que caracterizan el comportamiento mecánico de vigas y columnas de hormigón armado reforzado con acero de alta resistencia (500MPa).
- Para el caso de las vigas se estableció una comparación entre las curvas carga-desplazamiento obtenidas experimentalmente y las generadas computacionalmente. En el caso de las columnas la comparación se estableció en función de la curva esfuerzo-deformación unitaria obtenida experimentalmente con su contraparte computacional generada en este proyecto.
- A diferencia de los modelos experimentales, la validación del modelo computacional permite un estudio más detallado del comportamiento mecánico de los elementos estructurales estudiados. Esto se debe a las limitaciones propias de una configuración experimental y al potencial de los modelos computacionales basado en tecnología de elemento finito para evaluar la respuesta mecánica de cualquier punto material del modelo continuo.
- El modelo constitutivo usado para el hormigón de vigas y columnas que mejor define el comportamiento es el modelo de endurecimiento multilineal planteado por (Reddiar, 2010), complementado por una superficie de falla descrita por cuatro parámetros adicionales para describir la superficie de

falla, de los cuales se destacan: (1) módulo de transferencia de corte en grieta abierta y grieta cerrada, (2) máxima resistencia a compresión uniaxial, (3) máxima resistencia a tracción uniaxial.

- En el caso del acero de refuerzo, el modelo constitutivo implementado en el modelo computacional corresponde a un modelo isotrópico bilineal con un comportamiento elástico-plástico perfecto, que presenta un módulo tangente de cero una vez sobrepasado el esfuerzo de cedencia (500MPa)
- Las condiciones de frontera representadas en el modelo computacional pueden describirse de la siguiente manera: (1) cargas. _ para vigas se aplicó una carga monotónica impuesta en una placa de carga ubicada en el centro de la luz, en caso de las columnas se aplicó una carga monotónica impuesta en una placa de distribución ubicada en la cara superior del elemento, (2) apoyo . _ para vigas la configuración de apoyos corresponde a los de una viga simplemente apoyada, para el caso de las columnas la configuración de apoyos consiste en un apoyo fijo ubicado en la cara inferior del elemento.
- Los coeficientes de transferencia en grieta usado en el modelo computacional son los recomendados por (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017). En vigas los valores utilizados son de 0.3 y 1 para los coeficientes de transferencia de corte en grieta abierta y cerrada respectivamente. Con estos valores el fenómeno de flexión en todo el historial de carga de una viga simplemente apoyada sometida a un ensayo de tres puntos se reproduce con un buen nivel de aproximación avalado por el valor del coeficiente de correlación entre las curvas experimentales y computacionales, el cual llega a alcanzar 99.8% para la viga de 20x20 y 98.9% para la viga de 20x30.
- Para columnas se adoptaron los mismos valores sugeridos por (Darmansyah, Eliatun, & Syahril, 2017), esto es, 0.3 y 1 para los coeficientes de transferencia de corte en grieta abierta y cerrada respectivamente. Según

los coeficientes de correlación calculados el modelo computacional reproduce con un buen nivel de aproximación a los resultados reportados de los experimentos. El coeficiente de correlación es de 97.6% para la columna de 20x20 y del 99.8% para la columna de 20x30.

- La representación discreta del acero de refuerzo, tanto longitudinal como transversal, además de la posibilidad de describir computacionalmente el comportamiento mecánico de cada material ha permitido generar y validar un modelo numérico-computacional para elementos estructurales de hormigón armado con aceros de alta resistencia. La comparación de los resultados del análisis numérico-computacional con su contraparte experimental evidencia un error de deflexión máxima igual al 1.16% para la viga de 20x20 y de 0.73% para la viga de 20x30. En cuanto a la carga máxima el error es de 5.72% para la viga de 20x20 y de 11.56% para la viga 20x30.
- Estos altos niveles de aproximación corroboran que los coeficientes utilizados para caracterizar la superficie de falla del hormigón reproducen la respuesta mecánica del material. Los resultados del modelo computacional muestran fluencia en el acero cuando se alcanza la carga máxima y esto es corroborado por las conclusiones de los estudio experimentales en los cuales se basa este proyecto
- El modelo computacional basado en el MEF puede generar información complementaria a los datos recabados en ensayos de laboratorio. En este proyecto se reportan, por ejemplo, datos sobre el comportamiento de las barras de refuerzo que muestran mayores esfuerzos. Importante mencionar que este nivel de detalle en la caracterización en los elementos es difícil de alcanzar en los modelos experimentales.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos de laboratorio de los materiales que componen a los elementos estructurales reforzados con acero de alta resistencia, a fin de obtener los datos necesarios para definir una ley constitutiva más detallada del comportamiento del acero y del hormigón para ser empleada en futuras investigaciones numérico-computacionales.
- Ampliar el estudio de sistemas más complejos (i.e. pórticos) que incorporen acero de alta resistencia como refuerzo, para entender la influencia de este nuevo tipo de acero en la respuesta estructural del sistema.
- Refinar la geometría del acero refuerzo utilizado aplicaciones computacionales especializadas en la generación de modelos geométricos en 3 dimensiones.
- Incluir en estudios posteriores un análisis comparativo de la influencia del tamaño de la malla en la respuesta estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *ACI 318. (2019). Building Code Requirements. Michigan. USA.*
- *Baetu, S., & Ciongradi, I. P. (2011). Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete slit walls with ANSYS. 31.*
- *Bažant, Z. P. (1985). Mechanics of fracture and progressive cracking in concrete structures. Dordrecht.: Springer.*
- *Belyschko, T., Luj, W. K., Moran, B., & Elkhodary, K. (2013). Nonlinear finite elements for continua and structures. John wiley and sons.*
- *Belytschko, T., & Glaum, L. W. (1979). Applications of higher order corotational stretch theories to nonlinear finite element analysis.*
- *Chen, A., & Chen, W. (1975). Constitutive relations for concrete . (ASCE, Ed.) Journal Engineering Mechanics, 101.*
- *Cheng , Y., & Fan, Y. (1993). Modeling of reinforcement in concrete and reinforcement confinement coefficient. Finite elements in analysis and design , 271-284.*
- *Darmansyah, T., Eliatun, E., & Syahril, T. (2017). 3D ANSYS Numerical modeling of reinforced concrete beam, behavior under different collapsed mechanisms. International Journal of Mechanics and Applications, 14-23.*
- *Elwi, A. E., & Hrudey, T. M. (1989). Finite element model for curved embedded reinforcement. Journal of Engineering Mechanics, 4, 740-754.*
- *forum.ansys. (2019, octubre). <https://forum.ansys.com>. Retrieved from [https://forum.ansys.com: https://forum.ansys.com/discussion/1685/concrete-modeling-questions](https://forum.ansys.com/discussion/1685/concrete-modeling-questions)*
- *Ghailan , D. B., & Aziz, A. H. (2007). Shear Behavior of RC beams with full or partial SFRC shear span. Journal of engineering and sustainable development , 30-45.*

- Hognestad, E., Hanson, N., & McHenry, D. (1955). *Concrete stress distribution in ultimate strength desing.* 455-480.
- Jenkins, R. W., Frosch, J. R., & PE, F. (2015). *Improved procedures for rge design of slender structural concrete columns.*
- Kent,, C. D., & Park, R. (1971). *Flexural Members with Confined Concrete. Journal of the Structural Division, 1971, Vol. 97, Issue 7, 1969-1990.*
- Kohnke, P. (1998). *ANSYS Theory reference.*
- Kupfer, H., Hilsdorf, H., & Rusch, H. (1969). *Behaviour of concrete under biaxial stresses. Journal Proceeding, 656-666.*
- Miller, E. (2012, June). *How to die degrees of freedom together.*
- Miller, E. (2012, Febrary 8). <http://www.padtinc.com>. Retrieved from <http://www.padtinc.com/blog/reducing-the-size-of-your-rst-file-outres-is-your-friend/>
- Newman, P. (2018, Julio 18). <https://studentcommunity.ansys.com>. Retrieved from <https://studentcommunity.ansys.com/thread/what-is-the-difference-between-bonded-contact-region-and-fixed-joint/>
- Ngo, D., & Scordelis , A. (1967). *Finite element analysis of reinforced concrete beams. Journal Proceedings, 152-163.*
- Nieto, C. J., & Perez, H. (2015). *USO DE VARILLAS DE ALTA RESISTENCIA (GRADO 80) EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS MEDIANTE SISTEMAS ESTRUCTURALES DUALES.* Quito.
- Nikishkov, G. P. (2004). *Introduction to the finite element method.*
- Ottosen, N. S. (1977). *A failure criterion for concrete. American Society of Civil Engineering, 4, 527-535.*
- Palaniswany, R., & Shah, S. (1974). *Fracture and stress-strain eralationship of concrete under triaxial compression. ASCE Struct Div, 5, 901-9016.*

- Paleti , S., Sambana , K., & Chaitanya , D. (2010). *Finite element analysis using ANSYS 11.0*. New Delhi.
- Phillips , D. V., & Zienkiewicz, O. (1976). *Finite element non-linear analysis of concrete structures (Vol. 61)*. Institution of civil Engineers Proceedings.
- Popovics, S. (1973). *A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete* . *Cement and concrete research* , 583-599.
- Quijia, N., & Vaca, L. (2016, Junio). *Análisis del refuerzo longitudinal y transversal en vigas y columnas de hormigon armado utilizando acero de dos fluencia mediante ensayos de carga*. Quito, Ecuador.
- Rashid , Y. (1968). *Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels*. *Nuclear engineering and design* , 656-666.
- Reddiar, M. K. (2010). *Stress-strain model of unconfined and confined concrete and stress-block parameters (Doctoral dissertation, Texas A & M University)*.
- Ru-deng, L. U. (2008). *Values of shear transfer coefficients of concrete element solid65 in ansys*. *Journal of Jiangsu University(2)*, 18.
- Ru-deng, L. U. (2008). *Values of shear transfer coefficients of concrete element solid65 in Ansys*. *Journal of Jiangsu University*, 18.
- Thompson, M. K., & Thompson, J. M. (2017). *ANSYS Mechanical APDL for finite Element Analysis*.
- Trefethen. (1994). *Boundary conditions*.
- Umer, F., & Mir, A. (2014). *Finite element approach to reinforced concrete using Ansys*. *Finite element approach to reinforced concrete using Ansys*.
- William, K. J., & Warnke, E. P. (1975). *Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete*.
- Wolanski,, A. J. (2004). *Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis (Doctoral dissertation)*.