

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN
ESTRUCTURAS



METODOLOGÍA DE ANÁLISIS NUMÉRICO USANDO ANSYS CON
FINES DE REFORZAMIENTO MEDIANTE ENCAMISADO DE
COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE PIURA,
2024

TESIS

Presentada por:

Bach. Helio Heli García Sandoval

ORCID: 0000-0002-7938-9957

Asesor:

Mg. José Martín Velásquez Vargas

ORCID: 0000-0002-6338-7455

Para obtener el grado académico de:
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN
ESTRUCTURAS



METODOLOGÍA DE ANÁLISIS NUMÉRICO USANDO ANSYS CON
FINES DE REFORZAMIENTO MEDIANTE ENCAMISADO DE
COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE PIURA,
2024

TESIS

Presentada por:

Bach. Helio Heli García Sandoval

ORCID: 0000-0002-7938-9957

Asesor:

Mg. José Martín Velásquez Vargas

ORCID: 0000-0002-6338-7455

Para obtener el grado académico de:
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

Tesis

**“METODOLOGÍA DE ANÁLISIS NUMÉRICO USANDO ANSYS CON
FINES DE REFORZAMIENTO MEDIANTE ENCAMISADO DE
COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE PIURA,
2024”**

Presentada por:

Bach. Helio Heli García Sandoval

**Tesis sustentada y aprobada el 06 de enero de 2025; ante el siguiente
jurado examinador:**

PRESIDENTE:	Mtra. Dina Marlene COTRADO FLORES
SECRETARIO:	Mtro. Wilber Percy MENDOZA RAMÍREZ
VOCAL:	Dr. Genner Alvarito VILLAREAL CASTRO
ASESOR:	Mg. José Martín VELÁSQUEZ VARGAS

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo HELIO HELI GARCIA SANDOVAL, en calidad de: estudiante de la Maestría en ingeniería civil con mención en estructuras de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 76188803.

Soy autor (a) de la tesis titulada:

“METODOLOGÍA DE ANÁLISIS NUMÉRICO USANDO ANSYS CON FINES DE REFORZAMIENTO MEDIANTE ENCAMISADO DE COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE PIURA, 2024.

Con asesor: Mg. José Martín Velásquez Vargas.

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de Maestro en ingeniería civil con mención en estructuras, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 3% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y

a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 06 de enero de 2025.



HELIO HELI GARCIA SANDOVAL
76188803

Dedicatoria

*A Dios, para que mis habilidades sirvan
como instrumento de su plan.*

*A mis padres, por su infinito amor y
el gran ejemplo que representan
en mi vida.*

A mis hermanos, por su enorme cariño.

*A mi novia Nury, cuya bondad y amor
me inspiran a ser mejor.*

Y a mí, por no dejar de perseguir mis sueños.

Agradecimientos

A la Universidad Privada de Tacna por permitirme seguir cultivando mi desarrollo académico, al cuerpo docente que me acompañó en el transcurso de la maestría, y principalmente a mi asesor el Mg. Ing. José Velásquez Vargas por sus enseñanzas y valiosos consejos que hicieron posible esta investigación.

A los jurados que con su experiencia y ojo crítico supieron hacer notar los aspectos que se debieron mejorar y puntualizar en el presente trabajo, su estricta guía es garantía de los buenos resultados obtenidos; también al personal administrativo de esta casa de estudios, especialmente a la Sra. Roxana Mamani, por su gran labor de seguimiento y orientación.

Finalmente, al laboratorio de energía de la Universidad de Piura, por permitirme usar el Software ANSYS y sus instalaciones, así como al grupo Estructuras Udep, por facilitarme el uso legítimo del Software Etabs.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	VII
Agradecimientos.....	VIII
Índice de contenidos.....	IX
Índice de Tablas.....	XII
Índice de Figuras.....	XIII
Resumen.....	XVI
Abstract.....	XVII
Introducción.....	1
CAPÍTULO 1 EL PROBLEMA.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Formulación del problema.....	6
1.2.1. Interrogante principal.....	6
1.2.2. Interrogantes secundarias.....	6
1.3. Justificación de la investigación.....	6
1.4. Objetivos de la investigación.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Antecedentes de la investigación.....	9
2.2. Bases teóricas.....	14
2.2.1. Vulnerabilidad en edificaciones.....	14
2.2.2. Intervención estructural.....	19
2.2.3. ¿Cuándo es requerida la intervención estructural?.....	21
2.2.4. Beneficios de la intervención.....	22
2.2.5. Perjuicios por la no intervención.....	23
2.2.6. Métodos de reforzamiento estructural para concreto armado.....	25
2.2.7. Detalles constructivos para columnas de concreto armado reforzadas mediante encamisado.....	33

2.3. Definición de conceptos	42
2.3.1. Definiciones básicas y conceptos clave	42
2.3.2. Propiedades y parámetros de los materiales	43
2.3.3. Modelado y análisis en ANSYS	44
CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO	45
3.1. Hipótesis	45
3.1.1. Hipótesis general	45
3.1.2. Hipótesis específicas.....	45
3.2. Operacionalización de variables	45
3.2.1. Identificación de la variable independiente	45
3.2.2. Identificación de la variable dependiente	46
3.2.3. Operacionalización de variables	46
3.3. Tipo de investigación.....	48
3.4. Nivel de investigación	48
3.5. Diseño de investigación.....	49
3.6. Ámbito y tiempo social de la investigación.....	49
3.7. Población y muestra.....	49
3.8. Caso de estudio.....	50
3.8.1. Distribución arquitectónica.....	52
3.8.2. Sistema estructural.....	53
3.8.3. Elementos estructurales de interés.....	57
3.9. Procedimiento, técnica e instrumentos	60
3.9.1. Procedimiento de la investigación	60
3.9.2. Técnica de recolección de datos	60
3.9.3. Instrumentos utilizados.....	61
CAPÍTULO 4.....	62
METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN DEL REFORZAMIENTO	
EN ANSYS	62
4.1. Análisis estructural de la edificación.....	62
4.1.1. Cargas sobre la columna estudiada.....	66
4.1.2. Comprobación del diseño de la columna.....	69

4.2. Cálculo del refuerzo por encamisado	70
4.2.1. Criterio de las propiedades de materiales	71
4.2.2. Rediseño mediante flexo-compresión biaxial.....	74
4.3. Definición de la geometría de trabajo.....	76
4.3.1. Geometría de la columna existente	77
4.3.2. Geometría de la columna reforzada	78
4.4. Mallado del modelo 3D	81
4.4.1. Malla de la columna existente	81
4.4.2. Malla de la columna reforzada	84
4.5. Condiciones de frontera.....	86
4.5.1. Condiciones de la columna existente.....	87
4.5.2. Condiciones de la columna reforzada.....	89
4.6. Análisis del solucionador.....	91
CAPÍTULO 5 RESULTADOS.....	93
5.1. Esfuerzos normales.....	93
5.1.1. Detalle en la estructura antigua.....	93
5.1.2. Detalle en la estructura reforzada	96
5.2. Esfuerzos cortantes	101
5.2.1. Detalle en la estructura antigua.....	101
5.2.2. Detalle en la estructura reforzada	104
5.3. Vector principal de esfuerzos	106
5.3.1. Detalle en la estructura antigua.....	107
5.3.2. Detalle en la estructura reforzada	109
5.4. Comprobación de hipótesis	114
CONCLUSIONES.....	117
RECOMENDACIONES.....	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXOS	126
APÉNDICE.....	136

Índice de Tablas

Tabla 1. Operacionalización de las variables.	47
Tabla 2. Cuadro de dimensiones de los elementos estructurales.	55
Tabla 3. Materiales utilizados y propiedades.	76
Tabla 4. Distribución de estribos en la columna.	77
Tabla 5. Parámetros de evaluación de calidad de malla.	83
Tabla 6. Condiciones de frontera de la columna existente.	87
Tabla 7. Condiciones de frontera de la columna reforzada.	89
Tabla 8. Verificación de las hipótesis.	115

Índice de Figuras

Figura 1. Vivienda autoconstruida en Lima	3
Figura 2. Vivienda adaptada a espacios comerciales	19
Figura 3. Tipos de encamisado con concreto armado en columnas	26
Figura 4. Dowels en columnas encamisadas.....	27
Figura 5. Área de concreto confinado en columnas encamisadas.....	27
Figura 6. Reforzamiento con perfiles de acero.	29
Figura 7. Opciones de distribución de armaduras de acero.	30
Figura 8. Viga reforzada con fibras de carbono.....	31
Figura 9. Deformaciones en una columna cargada vs sin cargar.....	34
Figura 10. Anclaje del acero principal en la cimentación I.....	35
Figura 11. Anclaje del acero principal en la cimentación II.	35
Figura 12. Anclaje con reforzamiento de cimentación.	36
Figura 13. Uso de capiteles en encamisados.....	37
Figura 14. Acápite de acero añadido al encamisado.....	37
Figura 15. Configuración de estribos en U.	38
Figura 16. Estribos acoplados para encamisado.	39
Figura 17. Caso de encamisado en dos laterales.....	40
Figura 18. Estribos para encamisados de un solo lado.....	40
Figura 19. Croquis de ubicación de la vivienda estudiada.....	50
Figura 20. Fachada de la edificación.....	51
Figura 21. Uso de la edificación	52
Figura 22. Plano referencia de la propiedad.....	53
Figura 23. Distribución estructural de la vivienda.	54
Figura 24. Detalle del sistema estructural 1.	55
Figura 25. Detalle del sistema estructural 2.	56
Figura 26. Columnas C3 y C4.....	56
Figura 27. Columna C3 del caso de estudio.....	57
Figura 28. Vista superior de la columna C3.....	58
Figura 29. Levantamiento de las medidas del acero de la columna C3.	59

Figura 30. Modelo geométrico en Etabs.	62
Figura 31. Modelo 3D en Etabs.	63
Figura 32. Resultado del modelado en Etabs.	64
Figura 33. Modelo terminado y DFN.....	65
Figura 34. Resultados DFC y DMF.	66
Figura 35. Elemento estructural de interés.....	67
Figura 36. Carga axial en la columna C3.....	68
Figura 37. Fuerza cortante y momento flector en la columna C3.....	68
Figura 38. Falla del diseño existente.....	69
Figura 39. Consideraciones dimensionales del encamisado.	71
Figura 40. Perfil del encamisado en CSI Column.....	75
Figura 41. Comprobación del diseño por encamisado.....	75
Figura 42. Modelo tridimensional de la columna existente.	78
Figura 43. Modelo tridimensional de la columna encamisada.....	80
Figura 44. Mallado del concreto y acero de la columna existente.	82
Figura 45. Calidad de la malla de la columna sin reforzar.....	83
Figura 46. Mallado del concreto y acero de la columna encamisada.....	85
Figura 47. Calidad de la malla de la columna reforzada.....	86
Figura 48. Condiciones de frontera del caso sin reforzar.....	88
Figura 49. Condiciones de frontera del caso reforzado.....	90
Figura 50. Detalle del análisis del solucionador de ambos casos.	91
Figura 51. Esfuerzos normales en el acero de la columna sin reforzar.....	94
Figura 52. Detalle de los esfuerzos normales en el acero de la columna sin reforzar.....	94
Figura 53. Esfuerzos normales en el concreto de la columna sin reforzar.....	95
Figura 54. Esfuerzos normales en el acero de la columna reforzada.	97
Figura 55. Detalle de los esfuerzos normales en el acero de la columna reforzada.	98
Figura 56. Esfuerzos normales en el concreto de la columna reforzada.....	99
Figura 57. Esfuerzos normales en la interacción concreto existente y acero añadido.....	100

Figura 58. Esfuerzos cortantes en el acero de la columna sin reforzar.	102
Figura 59. Esfuerzos cortantes en el concreto de la columna sin reforzar.	103
Figura 60. Esfuerzos cortantes en el acero de la columna reforzada.	104
Figura 61. Esfuerzos cortantes en el concreto de la columna reforzada y detalle adicional.	105
Figura 62. Vectores principales de esfuerzo en el acero de la columna sin reforzar.	107
Figura 63. Vectores principales de esfuerzo en el concreto de la columna sin reforzar.	109
Figura 64. Vectores principales de esfuerzo en el acero de la columna reforzada.	110
Figura 65. Vectores principales de esfuerzo en el concreto de la columna reforzada.	111
Figura 66. Vista lateral de los vectores principales de esfuerzo del concreto del caso reforzado.	112
Figura 67. Interacción de los vectores principales del concreto existente y acero añadido.	114

Resumen

Objetivo: La presente tesis titulada: “Metodología de análisis numérico usando ANSYS con fines de reforzamiento mediante encamisado de columnas de concreto armado en ciudad de Piura, 2024” tiene como principal finalidad establecer una metodología de análisis numérico usando en software de elementos finitos ANSYS para mejorar la comprensión del refuerzo estructural por medio de encamisado de columnas de concreto armado sujetas a déficits de resistencia ya sea por un diseño mal ejecutado o por un aumento en las solicitaciones de carga ante un nuevo uso de la edificación.

Metodología: Para esta investigación se tomó un caso de estudio crítico ubicado en la ciudad de Piura al norte del Perú, de esta edificación se obtuvo datos de diseño y distribución arquitectónica para posteriormente realizar un análisis estructural en Etabs, consiguientemente se seleccionó al elemento estructural de interés para el reforzamiento y finalmente se modeló en ANSYS tanto el caso sin reforzar como en el reforzado.

Resultados: Desde el análisis estructural en Etabs se demostró que la columna a analizar tenía un déficit de resistencia considerable y que no cumplía con las normas de diseño de concreto armado nacionales como extranjeras vigentes, con el modelado en ANSYS se demostró que el refuerzo contribuye a un mejor desempeño estructural al evaluar interiormente los esfuerzos principales tanto el concreto como el acero de las diferentes partes.

Conclusiones: Mediante el uso de la metodología de ANSYS se logró una mejor comprensión estructural del aporte de resistencia del refuerzo por encamisado en la columna del caso estudiado.

Palabras clave: Reforzamiento estructural, encamisado de columnas, modelado en ANSYS.

Abstract

Objective: The present thesis, titled: “Methodology for the Numerical Analysis using ANSYS of Reinforcement through Jacketing of Reinforced Concrete Columns in the City of Piura, 2024,” aims to establish a numerical analysis methodology using the finite element software ANSYS to improve the understanding of structural reinforcement through the jacketing of reinforced concrete columns subjected to strength deficits, whether due to poorly executed design or an increase in load demands for a new use of the building.

Methodology: For this research, a critical case study located in the city of Piura in northern Peru was chosen. Design and architectural layout data were obtained from this building to subsequently perform a structural analysis in ETABS. Then, the structural element of interest for reinforcement was selected and finally modeled in ANSYS, considering both the unreinforced and reinforced cases.

Results: From the structural analysis in ETABS, it was demonstrated that the column under analysis had a significant strength deficit and did not comply with current national and international reinforced concrete design standards. Through the ANSYS modeling, it was shown that the reinforcement contributes to better structural performance by evaluating the principal stresses internally in both the concrete and steel in different parts of the column.

Conclusions: Through the use of the ANSYS methodology, a better structural understanding of the strength contribution of the jacketing reinforcement in the studied column was achieved.

Keywords: Structural strengthening, column jacketing, ANSYS modeling.

Introducción

En el Perú cada vez son más comunes las prácticas de auto construcción de edificaciones, esto obedece a una serie de factores entre los que destaca la capacidad económica de las familias que en muchas ocasiones no pueden contratar servicios profesionales adecuados. Por otro lado, cada vez más propietarios realizan modificaciones en sus propiedades con fines comerciales, en la mayoría de los casos sin consultar a ingenieros o arquitectos capaces de garantizar un cambio seguro para los nuevos usos. Los déficits estructurales generados por la autoconstrucción y el cambio de uso, así como algunos desastres naturales, suelen desencadenar en la necesidad de reforzar las edificaciones con el fin de salvaguardar la integridad de sus ocupantes y garantizar su durabilidad en el tiempo.

El presente trabajo se concentra en la técnica de reforzamiento estructural en concreto armado conocida como encamisado, esta solución al déficit estructural en columnas siempre ha conseguido buenos resultados, pero muy pocas veces se logra comprender el comportamiento interno de los elementos como el concreto y el acero al añadirles nuevos materiales para su reforzamiento, esta tesis emplea el programa de elementos finitos ANSYS para esclarecer la comprensión del refuerzo por encamisado y dejar una metodología de modelado capaz de aplicarse a cualquier caso de reforzamiento que requiera un nivel más alto de comprensión.

La investigación se estructura con cinco capítulos que presentan la siguiente composición:

El capítulo I aborda la realidad nacional de los distintos problemas relacionados con la autoconstrucción y se encarga brindar una justificación del estudio, así como de presentar las principales interrogantes y objetivos de la presente investigación.

El capítulo II muestra en un inicio un compendio de investigaciones estructurales que emplean el uso de programas de elementos finitos como ANSYS que han tenido resultados satisfactorios, posteriormente se abordan los conceptos principales de lo que concierne al reforzamiento estructural y las técnicas y detalles empleados en el proceso.

El capítulo III abarca temas de metodología de investigación, se presentan las principales hipótesis, se dan a conocer las variables y su operacionalización; también se presentan las características del tipo de investigación y demás datos fundamentales como el ámbito y tiempo social, así como los instrumentos y técnicas de selección de información. Finalmente se muestra el caso de estudio sobre el que se realizará la tesis.

El capítulo IV establece los pasos de la metodología que se aplicara para el reforzamiento estructural de la columna de concreto armado, primero empieza mostrando el análisis estructural de la edificación y se determinan las fuerzas actuantes sobre el elemento estudiado, seguido de esto se verifica que requiere reforzamiento y con base en eso se procede a modelar la columna en ANSYS con una metodología paso a paso que garantice una correcta simulación.

El capítulo V aborda los resultados obtenidos mediante la simulación realizada al aplicar la metodología del modelado en ANSYS, estos resultados se presentan como la información de los esfuerzos internos de los materiales del caso reforzado como el sin reforzar, a fin de poder determinar el grado de mejor. Finalmente se procede a resumir lo que sería la comprobación de las hipótesis propuestas.

En última instancia se exponen las conclusiones y recomendaciones de la investigación, así como las fuentes bibliográficas, anexos y apéndices.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

En el Perú la autoconstrucción es una práctica muy extendida debido a diversos factores socioeconómicos y culturales. La autoconstrucción implica que las familias construyen sus propias viviendas sin la intervención de profesionales del ámbito de la ingeniería y la arquitectura, dejando de lado consideraciones importantes de diseño y sin básicamente ninguna supervisión, esto genera diversas problemáticas estructurales y de seguridad. No es de extrañar que el paisaje en las periferias urbanas luzca como en la Figura 1, principalmente en las ciudades más pobladas del país. A continuación, se hará un repaso detallando la situación de la realidad nacional de esta problemática.

Figura 1.

Vivienda autoconstruida en Lima



Nota. Tomado de una publicación de Aguilar, 2017, sobre la autoconstrucción.

- **Prevalencia de la Autoconstrucción:** Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), aproximadamente el 70% de las viviendas en zonas urbanas y rurales del Perú son producto de la autoconstrucción. Este fenómeno es más pronunciado en áreas periféricas y urbanizaciones informales, donde las familias construyen sus propias viviendas de manera gradual y sin asistencia técnica profesional. Espinosa (2017). ex presidente de la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO), señala que en Lima, alrededor del 70% de las viviendas se han construido mediante autoconstrucción (Valdivia, 2023)
- **Factores Socioeconómicos:** La falta de acceso a viviendas asequibles y la limitada oferta de crédito hipotecario para sectores de bajos ingresos impulsan a muchas familias a optar por la autoconstrucción. Este método permite a las familias distribuir los costos de construcción en el tiempo, aunque a menudo resulta en edificaciones con deficiencias estructurales y de calidad (Valdivia, 2023)
- **Crecimiento de la Autoconstrucción:** En el Perú, cada vez existen más edificaciones para viviendas, locales comerciales, almacenes, centros de entretenimiento, etc. No solo se ha continuado construyendo nuevas estructuras, sino que también es cada vez más frecuente que se amplíen las edificaciones preexistentes añadiendo más pisos. En la mayoría de los casos, esto se realiza sin hacer algún estudio estructural que pueda avalar la sobre construcción en dichas estructuras (Espinosa, 2017).

De acuerdo con el informe de la OCDE (2023) a pesar de los desafíos, el sector de la construcción en Perú ha mostrado una tendencia de crecimiento. En 2023, se registró un aumento del 3.5% en la producción del sector construcción en comparación con el año anterior, impulsado en parte por la recuperación postpandemia y la inversión en infraestructura pública y proyectos privados.

Dentro de las causas socio económicas también podemos encontrar que el costo promedio de construcción por metro cuadrado varía significativamente según la región. En Lima, el costo puede oscilar entre S/ 3,000 y S/ 9,000, mientras que, en regiones como Cajamarca, Huánuco y Apurímac, regiones un poco más alejadas del país, los costos son menores, variando entre S/ 2,000 y S/ 4,000.

Debido a la situación descrita anteriormente y considerando el riesgo sísmico en el que se encuentra inmerso el Perú sale a la luz la necesidad del reforzamiento estructural de estas edificaciones que en su mayoría padecen problemas por la falta de asesoramiento técnico y la informalidad de la construcción. En el Perú el reforzamiento estructural de las edificaciones urbanas como viviendas no es tan conocido y menos aún aplicado, sin embargo, con el transcurso del tiempo y ante la ocurrencia de los previstos movimientos telúricos es natural esperar que tome más notoriedad.

El campo del reforzamiento estructural es un área que abarca desde el uso de ensanchamientos con concreto armado hasta nuevas técnicas como el uso de fibras de carbono, sin embargo, todos estos procedimientos convergen en resolver las deficiencias estructurales que pueda tener la edificación, no solo a nivel de su conjunto sino también de forma individual en los elementos que la componen (vigas, columnas, muros, etc.).

Precisamente para tratar casos de elementos estructurales puntuales de los cuales se requiera una comprensión de su comportamiento más detallada es que se están empezando a utilizar programas de elementos finitos como ANSYS, que al ser simulaciones en 3D pueden brindar un nuevo panorama al entendimiento del refuerzo de las estructuras.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Interrogante principal

¿De qué manera la metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS puede mejorar la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024.?

1.2.2. Interrogantes secundarias

- ¿Se puede validar la efectividad del encamisado en la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS?
- ¿Cómo optimizar los parámetros de diseño del encamisado para maximizar el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales?

1.3. Justificación de la investigación

Es de suma importancia profundizar en el estudio de los métodos de refuerzo de estructuras ya existentes, en este caso, de concreto armado. Como se mencionará durante el progreso de esta investigación, existen diversos factores que debilitan las estructuras o afectan su comportamiento ante cargas estáticas o dinámicas.

Ante el inminente peligro que estas situaciones representan, es menester identificar, analizar y reparar las estructuras que presenten problemas de resistencia

debido al uso inadecuado, mal diseño o pobre proceso constructivo, todo esto siempre para hacer primar la seguridad de las personas que ocupan los ambientes.

Cabe resaltar que actualmente no existen guías detalladas de como analizar el reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado usando el software ANSYS, lo que brindará nuevas alternativas a los futuros investigadores del tema de reforzamiento estructural.

Finalmente, esta investigación se encuentra dentro de los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU, principalmente en el apartado de: Industria, innovación e infraestructuras (9) y Ciudades y comunidades sostenibles (11).

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

El principal objetivo de esta investigación es el siguiente: *Establecer una metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS puede mejorar la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024.*

1.4.2. Objetivos específicos

Del objetivo principal se presentan los siguientes objetivos secundarios:

- Validar la efectividad del encamisado en la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS.

- Optimizar los parámetros de diseño del encamisado para maximizar el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Las principales investigaciones recopiladas relacionadas con el uso de softwares de elementos finitos como ANSYS en investigación de elementos estructurales son las siguiente:

El estudio denominado *Finite element modeling of reinforced concrete column under monotonic lateral loads* de Al-Amin & Ahsan (2012) investiga el comportamiento de columnas de concreto armado sometidas a cargas laterales mediante análisis numérico utilizando ANSYS. El estudio considera la relación no lineal esfuerzo-deformación del concreto y el comportamiento bilineal del acero, además de los efectos del confinamiento por refuerzo lateral. Se modelaron columnas en voladizo de sección rectangular, comparando los resultados con datos experimentales de campo. La curva carga-deflexión es casi lineal en la zona elástica, donde la rigidez es constante, conforme a las recomendaciones del ACI. En la zona plástica, la rigidez disminuye hasta llegar a cero. También se observó que el aumento de la sección transversal o la reducción de la altura incrementan la rigidez de la columna. El estudio concluye que los resultados numéricos coinciden con los datos experimentales, lo que valida el uso de ANSYS para el análisis estructural de columnas de concreto armado sometidas a cargas laterales. Este estudio se enfocó en columnas sin necesidad de reforzamiento, mientras que la presente investigación se centrará en columnas reforzadas mediante encamisado.

La investigación *Nonlinear analysis of reinforced concrete column with ANSYS* de Pawar & Pawar (2016) explora el uso del método de elementos finitos (FEM) para modelar el comportamiento de columnas de concreto armado sometidas a cargas axiales simétricas y excéntricas, utilizando el software ANSYS.

Tradicionalmente, los estudios sobre el comportamiento de las estructuras de concreto armado se basaban en ensayos experimentales a escala real. Sin embargo, con el avance de herramientas como el MEF (Método de elementos finitos), se ha vuelto posible modelar con precisión fenómenos como flexión, cortante, torsión y pandeo de elementos estructurales complejos. El estudio en cuestión modela columnas de concreto armado hasta su falla mediante un análisis no lineal, proporcionando una representación precisa del comportamiento estructural bajo cargas combinadas. Los resultados del análisis mostraron que los mecanismos de falla bajo cargas axiales y excéntricas fueron modelados de manera precisa, validando las capacidades de ANSYS para simular la respuesta de las columnas de concreto armado hasta el colapso. El estudio destacó la sensibilidad de los resultados a factores como el tamaño de la malla, las propiedades de los materiales y los incrementos de carga, lo que sugiere que estos aspectos deben ser cuidadosamente considerados en futuros análisis paramétricos como el del presente trabajo. En conclusión, el uso de ANSYS en este contexto se considera una herramienta efectiva para el análisis no lineal de estructuras de concreto armado, proporcionando información valiosa para estudios futuros. La investigación propuesta se diferencia de la citada en que las columnas de este trabajo tienen un déficit de resistencia que requiere un refuerzo y también que este refuerzo no es probado hasta la capacidad última.

Otra investigación es *Finite element analysis of reinforced concrete beam-column connections with governing joint shear failure mode* de Najafgholipour et al. (2017) aquí se aborda el análisis del comportamiento de las conexiones viga-columna en estructuras de concreto armado, especialmente aquellas sin refuerzo transversal en la zona de la junta, que pueden exhibir un comportamiento frágil durante un evento sísmico. Esta falta de ductilidad en las conexiones puede comprometer el rendimiento general de la estructura bajo cargas sísmicas. El estudio propone un modelo de elementos finitos no lineal para investigar la falla por cortante en las juntas de estas conexiones, enfocándose en la capacidad de cortante, las deformaciones y los patrones de grietas. El modelo numérico utiliza el

concepto de plasticidad distribuida del concreto y simula el daño plástico en toda la geometría. El modelo se valida comparando los resultados numéricos con ensayos experimentales en dos conexiones viga-columna no dúctiles (una exterior y una interior) vulnerables a la falla por cortante en la junta. En las conclusiones, se destaca que el modelo numérico desarrollado en este estudio logra simular con precisión el comportamiento no lineal de las conexiones viga-columna, capturando adecuadamente el modo de falla por cortante en la junta. Los resultados numéricos, que incluyen la capacidad de cortante, las deformaciones y los patrones de grietas, coinciden de manera satisfactoria con los resultados experimentales. Esto confirma la validez del modelo como una herramienta numérica eficaz para estudiar diferentes configuraciones de conexiones viga-columna en estructuras de concreto armado. El modelo puede ser utilizado en investigaciones futuras para evaluar y predecir el comportamiento de conexiones viga-columna en diversas situaciones y ha sido útil para la selección de las condiciones de frontera de esta investigación. Si bien el trabajo resumido se trataba de conexiones entre vigas y columnas, no deja de ser un modelado de elementos finitos tal como el que se plantea en esta investigación.

El artículo denominado *Finite element modeling and analysis of RC beams with GFRP and steel bars* de Srihari et al. (2017) aborda el problema de la corrosión de las barras de acero en estructuras de concreto armado, especialmente en ambientes marinos agresivos. Este deterioro es una preocupación significativa para la durabilidad de las infraestructuras, ya que puede llevar al fallo de las estructuras. Para abordar este problema, se sugiere reemplazar las barras de acero por materiales resistentes a la corrosión, como los polímeros reforzados con fibra (FRP). El estudio se centra en el comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas con barras de acero y barras de GFRP (polímero reforzado con fibra de vidrio), utilizando un análisis no lineal de elementos finitos (FEA) en ANSYS. Se modelaron cuatro vigas: dos de control con barras de acero y GFRP, y dos con una combinación de ambos materiales variando el porcentaje de refuerzo. El comportamiento estructural, incluyendo la capacidad de carga, la deflexión y el patrón de fisuración,

fue estudiado y los resultados numéricos fueron comparados con pruebas experimentales. En las conclusiones, el estudio muestra que el modelo FEA en ANSYS puede simular con precisión el comportamiento de las vigas de concreto armado con refuerzo de GFRP y acero, prediciendo la capacidad de carga y los patrones de fisuración con un margen de error inferior al 10% en comparación con los resultados experimentales. Las vigas reforzadas con GFRP y acero presentaron mayor rigidez, ductilidad y capacidad de resistencia a las cargas después de la fisuración. En todas las vigas, el modo de falla predicho fue el aplastamiento del concreto en la zona de compresión después de que el acero o GFRP alcanzaron su límite de rendimiento, mostrando que el uso combinado de GFRP y acero mejora el desempeño estructural. Esta investigación aborda métodos alternativos de reforzamiento que, como el encamisado, incrementan la capacidad estructural de los elementos. En este trabajo se realizará el refuerzo mediante el uso de un encamisado de concreto armado.

Otra investigación donde se hace uso de la modelación numérica mediante ANSYS es el titulado *Modeling the behaviour of concrete shear walls with BFRP reinforcement* de Rahman et al. (2019) aquí se emplean barras de polímeros reforzados con fibra de basalto (BFRP) como alternativa al acero en el refuerzo de muros de corte de concreto armado. La corrosión del acero en estructuras de concreto es un problema crítico para la industria de la construcción, y el uso de BFRP ofrece varias ventajas, como su alta resistencia a la corrosión, mayor resistencia a la tracción y la capacidad de desarrollar modos de falla más dúctiles, características particularmente útiles en sistemas de resistencia a cargas laterales, como los muros de corte. El estudio utiliza el software ANSYS y el elemento Solid65 para modelar el comportamiento de los muros de corte bajo cargas cíclicas laterales, siguiendo las pautas del protocolo ATC 24 para pruebas sísmicas. Los resultados muestran que los modelos reforzados con BFRP desarrollaron una capacidad última similar a los muros reforzados con acero, pero con una capacidad significativamente mayor para disipar energía, lo que sugiere un gran potencial en el uso de BFRP para mejorar la durabilidad y el desempeño sísmico. Las

conclusiones indican que los muros de corte reforzados con BFRP muestran una mayor capacidad de disipación de energía acumulada en comparación con los muros reforzados con acero. En el experimento con refuerzo de acero, se observó una grieta significativa que limitó la resistencia residual, mientras que los resultados del análisis numérico sugieren que el modelo podría soportar desplazamientos mayores. Aunque los resultados iniciales entre los modelos experimentales y numéricos son alentadores, se señala que un refinamiento adicional de la malla de elementos finitos podría mejorar aún más la precisión del análisis. En este trabajo de investigación, así como en el resumido, se ha prestado especial consideración al tratamiento y características del mallado de los elementos, pero no se ha trabajado con grietas.

Finalmente, un último antecedente para la confiabilidad del programa ANSYS es el artículo denominado *Numerical simulation of the influence of bond strength degradation on the behaviour of reinforced concrete beam-column joints externally strengthened with FRP sheets* de Al-Rousan & Alkhaldeh (2021) donde se enfocan en estudiar los efectos de la degradación de la resistencia de adherencia entre los compuestos de polímero reforzado con fibra (FRP) y el concreto en juntas viga-columna de concreto armado. Utilizando el análisis no lineal por elementos finitos (NLFEA), el estudio investiga cómo diferentes porcentajes de degradación de adherencia (de 0% a 100%) afectan el rendimiento estructural de las juntas reforzadas con FRP, considerando factores como la capacidad de carga, ductilidad, disipación de energía y degradación de rigidez. Los resultados numéricos se validaron comparando con estudios experimentales previos. El estudio muestra que los esquemas de refuerzo con FRP con degradaciones de adherencia inferiores al 30% mejoran significativamente el comportamiento sísmico de las juntas, logrando mayor capacidad de carga, desplazamientos mayores, mayor ductilidad y una disipación de energía más eficiente. Las conclusiones del estudio confirman que el refuerzo externo con FRP es efectivo en mejorar el rendimiento sísmico de las juntas viga-columna, siempre que la degradación de la adherencia sea inferior al 30%. Este refuerzo permite

reubicar la rótula plástica en las vigas, alejándola de la zona de la junta, lo que aumenta la resistencia lateral y mejora la ductilidad. El estudio también muestra que las juntas con degradación de adherencia inferior al 30% presentan un comportamiento completamente dúctil, con ciclos de carga-desplazamiento amplios y poca degradación de la rigidez y resistencia. Finalmente, se propone una nueva guía para predecir el nivel de daño, capacidad de carga y rigidez inicial, lo que ayudará a los ingenieros a diseñar esquemas de rehabilitación eficientes para juntas con diferentes niveles de degradación de adherencia y daño. El estudio previamente mencionado valida la capacidad de usar el software ANSYS para cualquier situación de refuerzo, en esta caso con fibras de carbono en uniones estructurales reforzadas, por otro lado en esta tesis se usará ANSYS para un refuerzo estructural de tipo encamisado.

Como se ha podido ver a través de este compendio de investigaciones que abarcan distintas problemáticas estudiadas desde el punto de vista de las simulaciones computacionales, cada vez más investigadores han empezado a usar herramientas de elementos finitos como ANSYS para obtener datos e información fiable en sus trabajos, incluso este software se alinea con las tendencias modernas de reforzamiento estructural mediante el uso de polímeros de fibra de carbono, por lo que se puede concluir que su uso en la presente investigación es adecuado.

Cabe mencionar que en la literatura científica aún no existe ninguna investigación mediante simulación numérica en ANSYS que plantee un reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado incrementando la sección del elemento en una sola dirección, en este sentido, esta investigación es pionera.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Vulnerabilidad en edificaciones

Los criterios de vulnerabilidad en edificaciones se refieren a los factores que influyen en la susceptibilidad de una estructura a sufrir daños o colapsar ante eventos extremos como sismos, deslizamientos, o fenómenos meteorológicos. Estos criterios abarcan tanto aspectos estructurales como no estructurales. A continuación, se describen los principales criterios de vulnerabilidad:

- **Materiales de Construcción:** tanto el tipo de materiales utilizados en la construcción como la calidad de estos influye directamente en la vulnerabilidad de una edificación. En Perú, una gran proporción de las viviendas utiliza materiales vulnerables frente a movimientos sísmicos, como el adobe, la quincha, y la tapia. Según datos del INEI (2014), hasta el 2013 el 47,1% de las viviendas en el país están construidas con estos materiales, lo que representa más de 3.6 millones de casas. Estas viviendas albergan a más de 14 millones de personas, y las regiones con mayor concentración de viviendas de adobe son Cajamarca, La Libertad y Puno. Estas zonas tienen una alta dependencia de materiales como el adobe y la quincha debido a factores económicos y culturales, lo que sumado al poco control de diseño y construcción las hace especialmente vulnerables en caso de sismos; en contraparte las construcciones realizadas empleando concreto armado tienen un mejor desempeño ante esos eventos que los materiales de mampostería reforzada.
- **Tipo de Sistema Estructural:** Como es conocido, los sistemas de albañilería confinada son los más utilizados en las zonas de las principales ciudades del Perú, también y en menor medida se emplean sistemas aporticados para edificios de moderada altura y sistemas de muros de ductilidad limitada para grandes multifamiliares; mientras más grande es el proyecto, es mucho más probable que cuente especialistas encargados tanto de un buen diseño como de una correcta ejecución, el problema yace cuando se ejecutan proyectos más pequeños generalmente sin la supervisión de un especialista de la construcción, en estos casos es cuando los sistemas estructurales como la albañilería y

pórticos de pocos niveles, ven comprometido su correcto funcionamiento al tener una distribución o diseño deficiente.

- **Edad de la construcción:** el auge de la construcción en Perú ha estado vinculado a varias fases de crecimiento económico, particularmente en las últimas dos décadas. Uno de los periodos más significativos de expansión ocurrió entre 2000 y 2010, cuando la inversión en infraestructura pública y privada aumentó considerablemente debido al crecimiento económico del país. Durante este tiempo, el sector de la construcción experimentó un crecimiento sostenido gracias a la inversión en proyectos de infraestructura como carreteras, hospitales y viviendas sociales. Programas como Mi Vivienda impulsaron la construcción de viviendas en las áreas urbanas, especialmente en Lima Metropolitana, donde se concentró la mayor parte de las edificaciones nuevas. Esto quiere decir que en el Perú el mayor porcentaje de construcciones tiene una vida relativamente joven, y que su vulnerabilidad no pase por su longevidad, sino por otros aspectos, sin embargo, en el caso de las edificaciones anteriores a este auge, si requerirán especial atención por su edad y el reglamento con el que fueron construidas, ya que al tener varias décadas quizás no cumplan con los estándares modernos de seguridad estructural.
- **Mantenimiento y estado de conservación:** en Perú, el mantenimiento y el estado de conservación de las estructuras, especialmente las de concreto, presentan desafíos importantes. A pesar de la creencia común de que el concreto es un material que no requiere mantenimiento, las estructuras, como las de cualquier otro material, necesitan intervenciones periódicas para evitar deterioro y costos elevados en reparaciones. La falta de un sistema adecuado de seguimiento y mantenimiento a largo plazo, y la dependencia excesiva de inspecciones visuales, a menudo lleva a que los daños solo se detecten en etapas avanzadas, cuando la reparación es más costosa. Uno de los principales problemas es que, en muchas ocasiones, las labores de mantenimiento se postergan hasta que el daño es evidente, lo que encarece significativamente los costos de reparación.

Los expertos recomiendan realizar inspecciones regulares, incluyendo pruebas específicas como la evaluación de la carbonatación y análisis petrográficos, para identificar problemas antes de que se vuelvan graves. El mantenimiento preventivo es clave para prolongar la vida útil de las estructuras y reducir costos a largo plazo. En resumen, las edificaciones mal mantenidas, con corrosión en el acero de refuerzo, grietas en los muros, o problemas en la impermeabilización, tienen una mayor vulnerabilidad. Un buen mantenimiento reduce el riesgo de fallos estructurales.

- **Diseño estructural, irregularidades y normativas:** El principal problema de la autoconstrucción es el nulo trabajo de corroborar el diseño que se está realizando, desde factores como la capacidad de carga de los elementos como vigas, columnas o muros, hasta los desplazamientos máximos permitidos en las deformaciones en cada nivel. Precisamente este último punto conlleva a presentar las ya conocidas irregularidades de planta o altura, que son consecuencia de la mala distribución de ambientes arquitectónicos y elementos estructurales, que originan discontinuidades y afecta significativamente la distribución de esfuerzos concentrándolos muchas veces en una zona que se vuelve más vulnerable ante cargas sísmicas. Si se aplicara correctamente la normativa de diseño vigente, se evitaría o minimizaría el riesgo de deterioro y colapso en estas construcciones.
- **Modificaciones no planificadas:** Ya que la mayoría de estas construcciones no cuentan con planos de básicamente ninguna especialidad, es muy probable que se vayan distribuyendo los espacios en el proceso constructivo, esta situación deja como consecuencia edificaciones muy asimétricas en casi todos sus niveles, incrementando de esta manera su vulnerabilidad, también es recurrente que en proyectos de albañilería confinada se hagan instalaciones inadecuadas tanto sanitarias como eléctricas, y debido a que esto no está contemplado desde el inicio de la construcción, se debilita la continuidad de los muros, reduciendo su capacidad de carga al reducir su sección transversal por la instalación de estas

tuberías. En caso la construcción si cuente con planos, cualquier modificación realizada en el proceso constructivo deberá ser primero aprobada por los profesionales responsables y colocada en los planos de entrega finales.

- **Condiciones del suelo:** La integridad de un buen proyecto de construcción no solo pasa por un correcto diseño de la edificación y posteriormente un proceso de ejecución de calidad, sino que muchas veces el tema de la capacidad del suelo es ignorado incluso por los profesionales de ingeniería, la capacidad de carga que tiene el suelo, como principal propiedad, debería ser analizada en un laboratorio para poder optimizar los cálculos en las cimentaciones y tener una perspectiva correcta de su comportamiento. Desde suelos blandos y arenosos hasta duros y rocosos, siempre se debe prestar atención a este factor. Incluso en algunos casos estos suelos no son aptos para resistir construcciones al encontrarse sobre masas de agua pantanosas o restos de desechos humanos que han sido cubiertos. En última instancia también es conveniente mencionar que se debe evitar completamente zonas como quebradas que puedan activarse ante eventos climáticos estacionales.
- **Sobrecarga en uso:** Las edificaciones tienen distintos criterios de diseño de acuerdo con la finalidad que van a cumplir, en este sentido es muy distinto diseñar una vivienda o por ejemplo un centro comercial, ya que este último requiere más medidas de seguridad por la cantidad de personas que puede albergar. El crecimiento poblacional suele traer consigo la demanda de nuevos locales de atención tanto de bienes como de servicios, es aquí que muchos propietarios de viviendas, especialmente en zonas de alto tránsito suelen adaptar sus casas como establecimientos que no tienen nada que ver con su función principal, muchas veces estas adaptaciones van de la mano con renovaciones del espacio que dañan el sistema estructural a cambio de conseguir mayores espacios libres. El nuevo uso que se les da a estas construcciones converge en mayores sobrecargas a la edificación lo que aumenta su vulnerabilidad, se tiene por ejemplo el caso de la Figura 2, donde se aprecia una vivienda que abajo

cuenta con un restaurante y en las siguientes dos plantas funciona como un gimnasio con máquinas bastante más pesadas que un mobiliario convencional.

Figura 2.

Vivienda adaptada a espacios comerciales



Nota. Tomado del portal de La República, 2023.

2.2.2. *Intervención estructural*

La intervención estructural ha existido durante siglos, pero ha ganado mayor importancia y formalización en las últimas décadas, especialmente con el desarrollo de normativas y códigos estructurales que exigen niveles de seguridad más altos. Los grandes avances en tecnología de materiales y modelado estructural (como los

programas de análisis por elementos finitos) han permitido una mayor comprensión del comportamiento estructural y, por lo tanto, mejores estrategias de intervención.

El uso de técnicas de intervención estructural moderna comenzó a desarrollarse de manera formal en el siglo XX, a medida que los ingenieros y arquitectos se dieron cuenta de la necesidad de reforzar y adaptar las estructuras existentes, especialmente después de eventos catastróficos como terremotos. En Latinoamérica, después del terremoto de 1985 en México, se realizaron grandes avances en el campo del reforzamiento estructural.

Además, el concepto de intervención estructural también ha evolucionado a medida que los códigos y normativas de diseño sismorresistentes han ido mejorando. Esto ha llevado a intervenciones en estructuras antiguas que no se construyeron bajo los estándares actuales, lo que es especialmente relevante en países con alta actividad sísmica.

En Perú las intervenciones estructurales preventivas no son trabajos comunes, pues usualmente los usuarios, por desconocimiento o desinterés, esperan que los deterioros sean muy visibles para tartar de resolverlos. Otro factor inquietante es que, debido al silencio sísmico de nuestro país, muchas estructuras no se han visto probadas en su máxima capacidad de resistencia ante un sismo de gran magnitud que realmente muestre su pobre desempeño y las trágicas consecuencias que esto pueda traer en pérdida de vidas humanas y viviendas.

Existen múltiples razones por las cuales una estructura puede requerir intervención, como, por ejemplo, daños causados por sismos, incendios, sobrecarga, o simplemente por la degradación de los materiales con el tiempo. Además, en muchos casos, las modificaciones en el uso de una edificación (por ejemplo, cuando se cambia de residencial a comercial) también requieren intervenciones estructurales para garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura.

Otro punto importante pero poco manejado en esta región del mundo es el reforzamiento de estructuras que conforman el patrimonio cultural, en lugares como el coliseo romano y diversas zonas de Europa es muy común el empleo de técnicas que mejoran la conservación de estas construcciones antiguas, precisamente Laguna (2016). tiene un trabajo relacionado con el trabajo en este tipo de edificaciones particularmente vulnerables.

2.2.3. *¿Cuándo es requerida la intervención estructural?*

La intervención estructural es necesaria en los siguientes casos:

- **Daño por desastres naturales:** Terremotos, huracanes, deslizamientos de tierra o inundaciones pueden causar daños significativos en las estructuras, lo que hace necesario su reparación o reforzamiento, en este caso la intervención suele ser un trabajo posterior a la ocurrencia del desastre natural en cuestión.
- **Cambios en el uso del edificio:** Si un edificio va a cambiar de uso (por ejemplo, de residencial a comercial o industrial), es bastante probable que se requiera una intervención estructural para adaptarse a las nuevas cargas y requisitos normativos. En este caso la intervención se debe dar antes del nuevo uso, así se garantizará la seguridad
- **Desgaste o degradación de los materiales:** Con el paso del tiempo, y a consecuencia del nulo mantenimiento, los materiales de construcción como el concreto, el acero y la madera pueden degradarse. La intervención estructural es necesaria para restaurar la capacidad de carga y prolongar la vida útil de la estructura.
- **Actualización a normativas modernas:** En muchos países como el Perú, las edificaciones más antiguas no cumplen con los códigos de construcción modernos, especialmente en cuanto a las condiciones de diseño sísmico. En

estos casos, es necesario reforzar la estructura para garantizar su seguridad ante estos eventos.

- **Sobrecarga estructural:** Si la estructura está sometida a cargas mayores que las previstas originalmente (por ejemplo, lo más tradicional en el Perú es la adición de pisos o nuevos equipos pesados), puede requerir una intervención estructural para reforzar los elementos afectados. En este caso el reforzamiento debe darse antes de la ampliación de niveles.

2.2.4. Beneficios de la intervención

Con base en lo visto anteriormente se puede concluir que la intervención estructural tiene una serie de beneficios, los cuales se plasmarán a continuación:

- **Mejora de la resistencia sísmica:** Sobre todo si la estructura se encuentra debilitada por el paso del tiempo o si ha presentado una ejecución deficiente de diseño, la intervención estructural mejora significativamente el comportamiento ante cargas laterales.
- **Prolongación de la vida útil de la estructura:** Al momento de intervenir el principal fin además de la seguridad es garantizar que la edificación pueda continuar sin problemas con el tiempo de servicio esperado.
- **Incremento de la capacidad de carga:** En el caso de construcciones que han tenido que cambiar su uso, la intervención estructural garantiza el correcto funcionamiento ante las nuevas condiciones de servicio.
- **Seguridad y reducción del riesgo de colapso:** La principal función de reglamentos como la NTP E.030 es salvaguardar la vida de las personas que ocupan las edificaciones, la intervención mediante un refuerzo estructural

garantiza el incremento de la seguridad de las construcciones y minimiza los riesgos de colapso de estas en situaciones extremas.

- **Cumplimiento de normativas:** Como es de conocimiento público las normas de construcción se actualizan cada cierto tiempo para poder mejorar el desempeño de las edificaciones y tener mayor seguridad para los ocupantes, el reforzamiento estructural sigue los criterios modernos de diseño lo que garantiza que la estructura intervenida cumpla con los estándares de los códigos modernos de construcción.
- **Preservación de edificaciones históricas:** Para edificios históricos el reforzamiento permite preservar en el tiempo su valor arquitectónico y cultural, a la vez que se garantiza la resistencia estructural de estos.
- **Optimización de mantenimientos:** Con la estructura intervenida en reforzamiento se reduce significativamente la necesidad de trabajos de mantenimiento costosos e incluso la frecuencia de estos, ya que se mejora la durabilidad de los materiales.
- **Incremento del valor de las propiedades:** Debido a la mayor seguridad y durabilidad de una estructura reforzada, después de realizados los trabajos tienen una tendencia a incrementar su valor en el mercado inmobiliario.

2.2.5. Perjuicios por la no intervención

Las principales consecuencias negativas de la omisión o aplazamiento de la intervención estructural en estas edificaciones vulnerables son, por consecuencia, las siguientes:

- **Colapso estructural:** Ya sea de manera parcial o en su totalidad, las construcciones vulnerables presentan mayor riesgo de colapso ante eventos

sísmicos, esto afecta directamente tanto a los ocupantes como a las personas que se encuentran cercanas a la edificación.

- **Pérdida de vidas humanas:** De la mano con el primer punto, una estructura que se encuentra debilitada y falla ante un evento inesperado incrementa significativamente la pérdida de vidas humanas que ocupan la construcción, sin una correcta intervención la edificación no puede brindar las correctas condiciones de seguridad.
- **Degradación de los materiales:** Conforme se va cumpliendo el ciclo de vida de los materiales como el concreto o acero, pueden presentar patologías que necesitan ser atendidas antes de que la degradación de estos sea incorregible.
- **Vulnerabilidad ante desastres naturales:** No solo ante actividades sísmicas, sino inclemencias como huracanes e inundaciones, evitar la intervención aumenta significativamente el peligro de daños a la infraestructura que pueden terminar en la inoperatividad de esta y perjuicios para la integridad de sus ocupantes.
- **Costos de reparación mucho mayores:** Mientras más rápido se atienden los problemas estructurales menor suele ser el costo de los trabajos, en consecuencia, si se aplazan los tiempos de la intervención los costos incrementan.
- **Incremento del costo y frecuencia de mantenimientos:** Los mantenimientos deberían ser una práctica común en la ingeniería estructural, pero esto es algo muy poco común ya que se suele pensar que una vez construida la edificación va a durar para siempre, ante esto, una edificación vulnerable que nunca ha sido atendida requerirá muchos mantenimientos en periodos cortos para tratar de mitigar las diversas patologías que puedan presentarse.

- **Desvalorización de la propiedad:** Si no se dan mantenimientos adecuados ni se interviene estructuralmente las edificaciones, con el paso del tiempo las consecuencias en la infraestructura llegan a ser tan notorias que incluso personas sin conocimiento de construcción pueden determinar que algo está mal con esas propiedades, lo que conlleva a depreciar su valor.
- **Daños a la infraestructura urbana cercana:** Tanto el colapso parcial o total de una edificación vulnerable puede causar, con alta probabilidad, daños a las construcciones cercanas, tales como viviendas e incluso los sistemas de suministro eléctrico y vías públicas.
- **Perdida del patrimonio cultural o histórico:** Las edificaciones históricas suelen ser las más afectadas por el paso del tiempo, si no se atienden con una intervención correcta es muy probable que un evento inesperado conlleve a la pérdida muchas veces irreparable de este patrimonio.

2.2.6. Métodos de reforzamiento estructural para concreto armado

Como parte de mitigar las diferentes vulnerabilidades de las edificaciones es necesaria la intervención estructural, esta intervención cuyo objetivo es restaurar o aumentar la capacidad resistente viene de la mano de los métodos de reforzamiento de las estructuras, el presente trabajo se concentra en el refuerzo de elementos hechos de concreto armado, como se podrá ver a continuación existen múltiples técnicas para reforzar el concreto empleando una diversidad de materiales las cuales serán abordadas en profundidad.

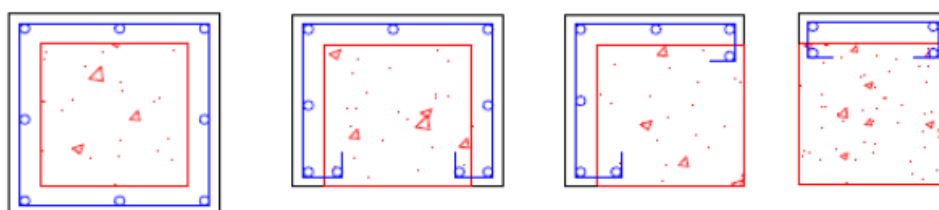
2.2.6.1 Métodos de reforzamiento con concreto armado

El encamisado o “jacketing” de columnas o vigas es uno de los métodos más utilizados en el reforzamiento de estructuras de concreto armado. Consiste en aumentar la sección transversal de una columna o viga existente encapsulándola

con concreto adicional y nuevo refuerzo de acero. Este método es especialmente eficaz para mejorar la capacidad de carga axial en columnas y la resistencia a los esfuerzos cortantes y flectores en vigas. La Figura 3 muestra los distintos tipos de refuerzo por encamisado en columnas.

Figura 3.

Tipos de encamisado con concreto armado en columnas.



Nota. Tomado de la investigación de José Rafael Yépez, 2019.

Como se aprecia en la Figura 3, no es necesario que el encamisado se ubique en todas las zonas de elemento al que se le plantea incrementar el área, sino que, dependiendo del caso y del criterio del diseñador, se puede optar desde sola cara hasta rodearlo completamente.

Existen diversas investigaciones que abordan el encamisado como medio de refuerzo; Mahmud & Ahmed (2017) revelan mediante su experimentación que este método de reforzamiento incrementa significativamente la resistencia de columnas de concreto armado, considerando siempre una buena adherencia entre el material antiguo y el nuevo.

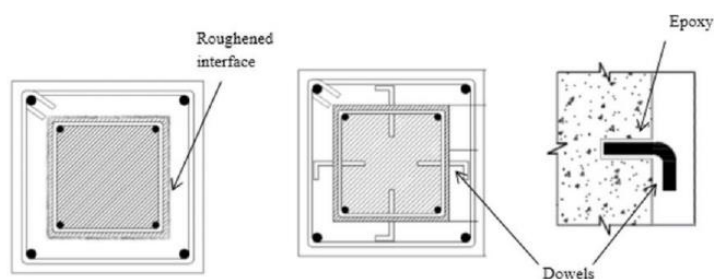
Nasersaeed (2011) en su estudio sobre reforzamiento por encamisado en columnas en pórticos concluyó que el método incrementa la resistencia y también la rigidez de estos elementos, pero es importante considerar una correcta interconexión del acero principal.

Por su parte los investigadores Caglar et al. (2020) en trabajos sobre el estudio de la superficie de contacto entre el concreto antiguo y el añadido por encamisado han sugerido el uso de dowels anclados con epóxicos en el concreto antiguo con el fin de mejorar la sujeción entre los concretos, la

Figura 4 muestra un esquema de lo mencionado.

Figura 4.

Dowels en columnas encamisadas.

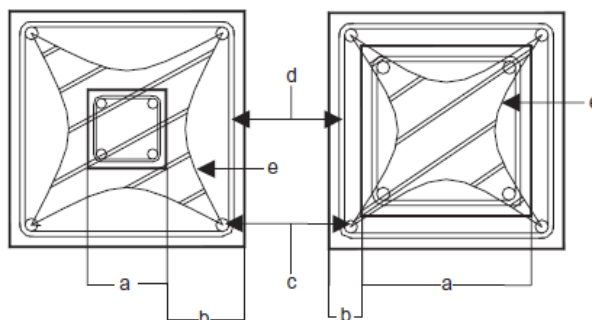


Nota. Tomado del artículo de Caglar et al., 2020.

Otro aporte importante viene de la mano de Ong et al. (2004) en su estudio sobre columnas encamisadas sujetas principalmente a cargas axiales, en este trabajo de investigación se hace hincapié en que el encamisado incrementa la resistencia a incrementar también el área confinada de concreto. La Figura 5 ilustra esto.

Figura 5.

Área de concreto confinado en columnas encamisadas.



Nota. Tomado de la investigación de Ong et al., 2004.

Por otro lado E. N. B. S. Júlio et al. (2005) en un artículo donde se analiza la influencia de cargas monotónicas en columnas encamisadas concluyen que el comportamiento de las columnas recrecidas es monolítico independientemente de cómo se trabaje la interfase entre concretos, al menos sobre las condiciones de carga previstas.

Para finalizar en otra investigación de E. S. Júlio et al. (2003) se determina que el encamisado de columnas no solo mejora la resistencia y rigidez, sino que también incrementa la durabilidad reduciendo el riesgo de corrosión y aumentando la protección al fuego del elemento.

Como se ha podido constatar este método es especialmente utilizado en columnas, debido a que es más sencillo aplicarlo sobre estos elementos antes que sobre vigas, sin embargo, más adelante se indicará que métodos de reforzamiento son más adecuados para las vigas. De acuerdo con lo mencionado, se puede indicar que las principales ventajas del encamisado en columnas residen en incrementar significativamente la capacidad de carga y rigidez, mejorando la ductilidad y la durabilidad ya que logra soportar mayores deformaciones antes de fallar.

Por otro lado, las posibles desventajas radican en que puede aumentar el tamaño de los elementos, lo cual puede ser una desventaja en espacios restringidos, además el proceso de encamisado puede requerir tiempos prolongados de ejecución, especialmente en edificaciones en uso. Más adelante se darán una serie de recomendaciones constructivas para una correcta ejecución del encamisado con concreto armado.

2.2.6.2 Métodos de reforzamiento con estructuras metálicas

Los métodos de refuerzo empleando estructuras o añadiduras metálicas consisten en añadir placas de acero a manera de exoesqueleto sobre los elementos de concreto armado, de esta forma también se logra mejorar el desempeño de su

resistencia e incrementar su rigidez, normalmente estos refuerzos se fijan mediante pernos e incluso pegamentos epóxicos de alta adherencia.

Debido al tipo de técnica que implica añadir un pesado exoesqueleto, este reforzamiento es particularmente recomendado, como el encamisado de concreto, a elementos tipo columna, donde es más permisible un trabajo invasivo.

En un artículo del estado de arte de esta técnica realizado por Wu et al. (2016) se concluye que el reforzamiento con placas de acero es efectivo tanto en columnas circulares como rectangulares, también se comenta que el incremento ante cargas laterales es más significativo, y que el incremento en la resistencia a cargas axiales mejora un poco debido a que el exoesqueleto contribuye a una mejor zona de confinamiento.

Figura 6.

Reforzamiento con perfiles de acero.



Nota. Tomado del experimento de Amulya, 2017.

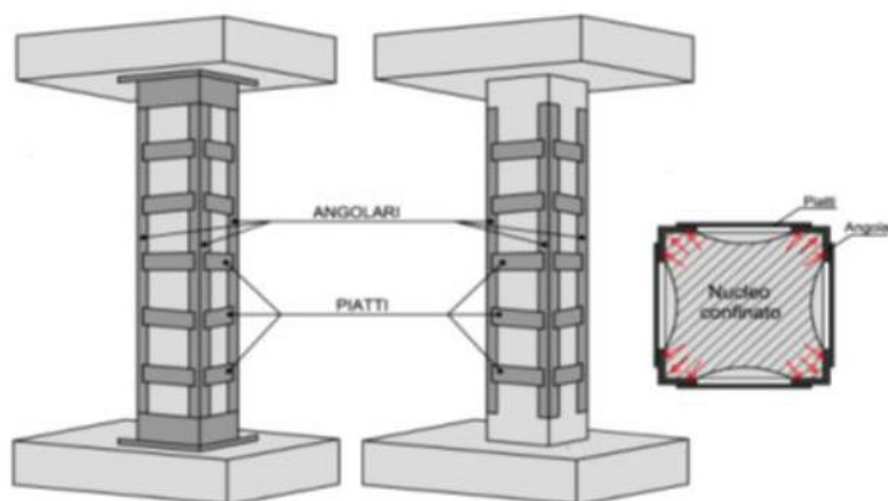
En investigaciones experimentales como las de Amulya (2017) se testeó un modelo a escala del reforzamiento con acero, aquí se llegó a la conclusión que dicho método incrementaba hasta un 20% la capacidad de carga de las columnas y también

fomentaba las fallas dúctiles en estas. La Figura 6 muestra al elemento experimentado.

Otras investigaciones como la de Naji et al. (2021) se enfocan en los efectos del tipo de armadura de refuerzo empleada, de igual manera se demuestra que este refuerzo de acero incrementa la resistencia al proveer una presión lateral pasiva sobre la columna, esto se activa al momento de cargarla con fuerzas axiales. La Figura 7 muestra el detalle de cómo se puede distribuir la armadura de refuerzo en la columna.

Figura 7.

Opciones de distribución de armaduras de acero.



Nota. Tomado de los procedimientos de Naji et al., 2021.

De lo mencionado previamente se puede atribuir que las principales ventajas sobre el reforzamiento con acero radican en que aumentan la capacidad de resistencia, especialmente la lateral y la flexión, y constructivamente requieren menos tiempo de ejecución a diferencia por ejemplo del encamisado de concreto tradicional.

Por otro lado, las contras de este método tienen que ver con la exposición que tiene el acero, lo que lo vuelve vulnerable a problemas de corrosión o golpes en el caso de estacionamientos, también este tipo de refuerzo requeriría de mantenimientos más frecuentemente.

2.2.6.3 Métodos de reforzamiento con fibras de carbono

El uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) es una técnica moderna que se utiliza para mejorar la resistencia a la tracción de elementos de concreto armado. Las láminas de fibra de carbono se aplican externamente a vigas, columnas, o incluso a losas, proporcionando un refuerzo ligero, pero altamente resistente. Este tipo de sistemas de reforzamiento es muy conveniente en casos donde el peso es un factor en contra, principalmente en el caso de vigas y losas. La Figura 8 muestra la aplicación de las fibras de carbono sobre una viga.

Figura 8.

Viga reforzada con fibras de carbono.



Nota. Tomado del trabajo de refuerzo de Horseen, 2023.

Si bien el principal uso de la fibra se da en los elementos estructurales mencionados, es importante mencionar que este método también se está investigando para reforzar las intersecciones de elementos estructurales tales como la unión viga columna en estructuras aporricadas, tal es el caso de la investigación

de Al-Rousan & Alkhawaldeh (2021) que después de experimentar a escala y numéricamente indican que en estas juntas, si se abarca por lo menos un 70% de área cubierta se mejora el comportamiento ante cargas sísmicas e incrementa la ductilidad del elemento, esto es particularmente deseable bajo condiciones de columna fuerte – viga débil.

En relación con el tema, más por la parte de vigas, el artículo de Barour & Zergua (2021) analiza numéricamente el comportamiento de estos elementos horizontales y concluyen que las fibras incrementan la resistencia a la compresión, así como la capacidad de carga última de las vigas reforzadas.

Incluso existen investigaciones que complementan métodos de refuerzo como el ya visto por encamisado de acero con el de fibras, tal es el caso del trabajo de Srihari et al. (2017) donde se logró combinar estas técnicas indicando finalmente que este reforzamiento mejoraba la rigidez de las vigas, así como su ductilidad y resistencia última.

Otros autores también se están decantando por el uso de estas fibras como parte del diseño de elementos como muros de corte, Rahman et al. (2019) muestran una investigación donde al añadir estas fibras se mejora la capacidad de disipación de energía del elemento.

Para finalizar las investigaciones, en el caso de las columnas un artículo sobre el reforzamiento con las fibras CFRP mediante experimentación real y modelada dirigido por Alanazi et al. (2019) corrobora que este método no solo sirve para reforzar sino también para reparar los elementos, siempre y cuando el área de contacto sea la adecuada.

También existen investigaciones de reforzamiento con fibra que se concentran en la optimización del uso de esta, para determinar que tanta área de contacto es necesaria para empezar a garantizar resultados, tal es el caso de la investigación de B.G. Charalambidi (2012) donde se demostró numéricamente que

las incluso con un margen considerable de separación, las fibras lograban aumentar el confinamiento de las columnas y en consecuencia su resistencia.

Con lo visto anteriormente se puede indicar como principal ventaja del método de fibras CFRP su alta resistencia a la tracción y extremadamente baja densidad, lo que facilita técnicas de reforzamiento sin el inconveniente del peso añadido, que en los otros dos métodos suele ser bastante considerable, además de esto las fibras no son elementos que presenten patologías como la corrosión, por lo tanto, no requieren de un mantenimiento exhaustivo, finalmente el uso de estas fibras no aumenta en gran medida el tamaño de los elementos, por lo que es ideal para área de trabajo reducidas y ejecuciones rápidas.

Las contras de este sistema suelen asociarse con el costo del material y la mano de obra especializada y experimentada que garantice una correcta instalación.

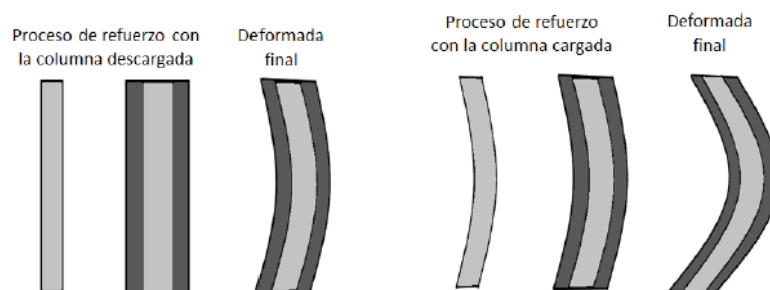
2.2.7. Detalles constructivos para columnas de concreto armado reforzadas mediante encamisado

Para poder garantizar un adecuado comportamiento de la columna reforzada es de suma importancia tener ciertas consideraciones en la ejecución del encamisado, una de las primeras medidas consiste en apuntalar la periferia de la columna con el fin de descargarla en la mayor medida posible y también regresar de su estado de deformación en servicio, en la Figura 9 se muestra las consecuencias de no apuntalar el elemento y trabajar con el elemento en pleno servicio, básicamente la columna reforzada presenta una sobre deformación, contribuyendo a una pobre redistribución de esfuerzos al concreto.

Para las consideraciones de apuntalamiento se recomienda tomar en cuenta las recomendaciones y requerimientos para el diseño de apuntalamiento y cargas de construcción de la American Society of Civil Engineers (ASCE 37-02).

Figura 9.

Deformaciones en una columna cargada vs sin cargar.



Nota. Tomado de la investigación doctoral de José Rafael Yépez, 2019.

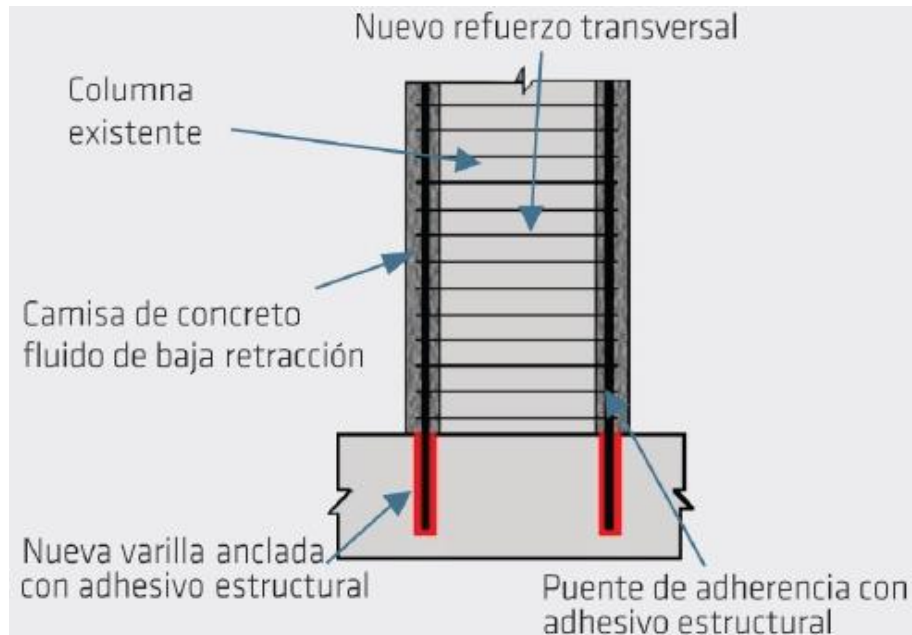
Tomado en cuenta lo mencionado anteriormente, se puede proseguir con las demás consideraciones.

2.2.7.1 Incorporación del acero principal

El acero principal de la armadura del encamisado debe nacer desde la base de la cimentación, con el fin de garantizar una buena sujeción y transmisión de cargas a las bases, lo más común en estos casos es anclar directamente el acero mediante adhesivos epóxicos en orificios de la cimentación, como se aprecia en la Figura 10 y en la Figura 11.

Figura 10.

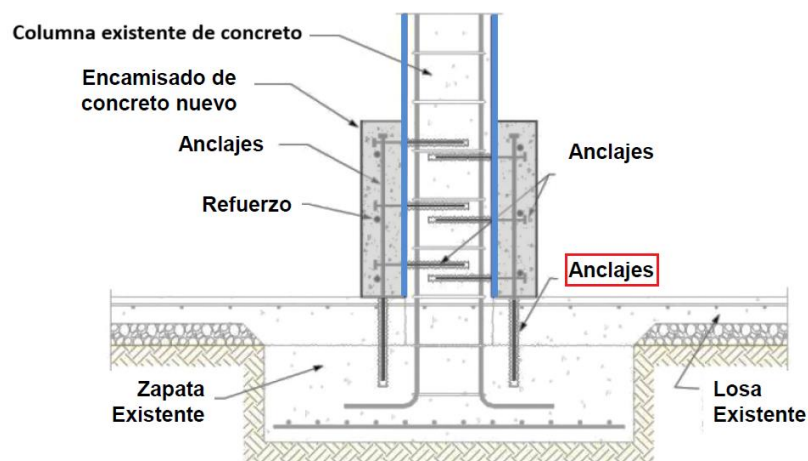
Anclaje del acero principal en la cimentación I.



Nota. Tomado de la revista de productos de Sika Colombia S.A.S., 2017.

Figura 11.

Anclaje del acero principal en la cimentación II.

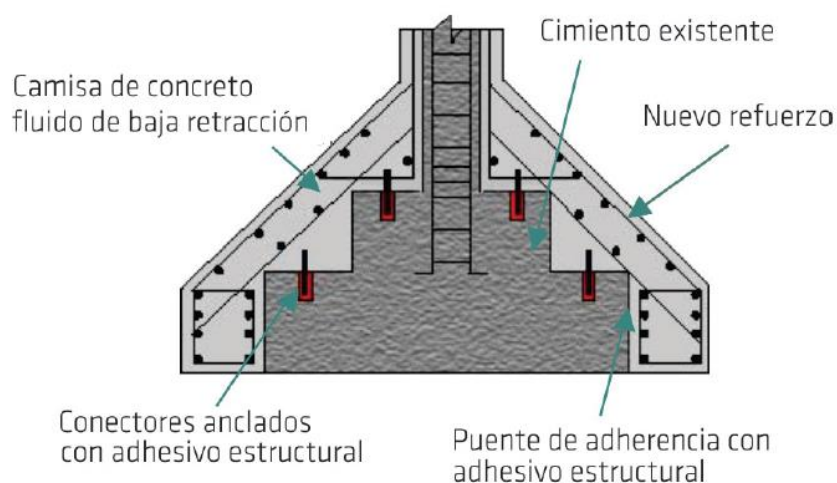


Nota. Tomado de los procedimientos especificados por Tumialan, 2014.

Por el contrario, cuando la base se presume muy pobre y las fuerzas necesitan una mayor área de dispersión, se recomienda encamisar también las bases y sobre este nuevo encamisado trabajar el reforzamiento de la columna, este caso se nota en la Figura 12.

Figura 12.

Anclaje con reforzamiento de cimentación.



Nota. Tomado de la revista de productos de Sika Colombia S.A.S., 2017.

Es importante distribuir correctamente el acero y ubicar su ubicación de acuerdo con el diseño estructural previsto en el encamisado, ya que muchas veces la perforación debilita cualquier elemento especialmente de concreto armado; el diámetro de los agujeros deberá ser ligeramente superior al diámetro de la barra propuesta del diseño.

En cuanto a la zona superior de la columna, lo convencional también es anclar con pegamento de resinas epóxicas al acero con el concreto existente en la losa o viga superior, sin embargo, cuando los cálculos indiquen mayores esfuerzos se puede adoptar por el uso de capiteles de concreto en la parte superior, tal como se muestra en la Figura 13.

Figura 13.

Uso de capiteles en encamisados.



Nota. Tomado del trabajo de Tumialan, 2014, sobre reforzamiento estructural.

En el caso de la Figura 14 se aprecia la incorporación de un acápite de acero, unido a la armadura del encamisado de concreto armado, como es de esperarse estos criterios son de acuerdo con la experiencia y disponibilidad que tenga el ingeniero encargado del diseño y ejecución del reforzamiento.

Figura 14.

Acápite de acero añadido al encamisado.



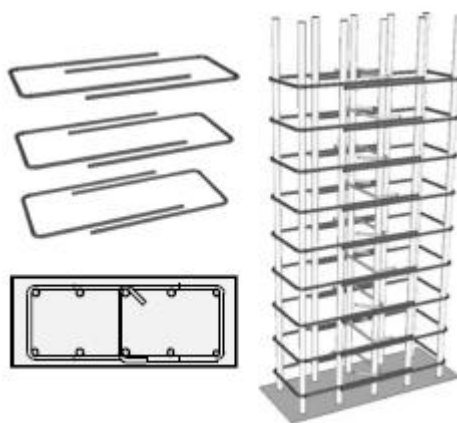
Nota. Tomado de la revista de productos de Sika Colombia S.A.S., 2017.

2.2.6.2 Añadidura de los estribos

Los estribos, principales miembros del aporte a la resistencia al corte, suelen armarse a la vez que el acero principal cuando se realiza la composición del acero de la columna, y en este proceso no hay complicaciones, con un clásico dobles a 135° y posterior amarre al acero, la facilidad de montar el estribo es algo natural. Sin embargo, cuando se trata de procesos de encamisado, la colocación de los estribos no puede realizarse de la manera convencional ya que no pueden introducirse ni por la parte superior ni la inferior de la columna existente, esto ha llevado a encontrar una serie de soluciones que pasan por dividir al estribo en dos secciones y mantener entre ellos un traslape, este tipo de configuración en “U” se puede apreciar en la Figura 15.

Figura 15.

Configuración de estribos en U.



Nota. Tomado de la investigación de reforzamiento estructural de Kim et al., 2019.

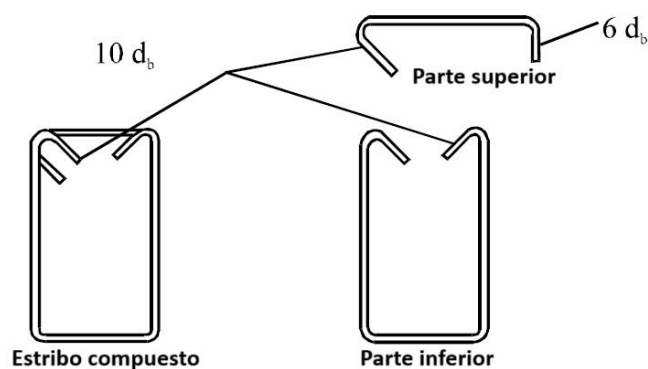
Según la investigación sobre estribos de la autora de la figura anterior, Kim et al. (2019) este tipo de estribos traslapados en dos U, son fácilmente acondicionados a un encamisado tradicional en todas las caras del elemento, y con base en estudios realizados en columnas don diferentes tipos de estribado incluido

el mencionado, concluyó que los estribos en U son capaces de mantener correctamente el área confinada del concreto, además de mantener una adecuada capacidad de deformación sin una falla prematura.

Otro método no muy estudiado, pero que trata de recrear el gancho de 135° de los estribos es el mostrado en la Figura 16, donde se mantiene la posición de ambos ganchos de 135° acoplados en dos partes y al lado izquierdo se deja solo uno, mediante el uso de alambre de amarre estos ganchos pueden mejorar el comportamiento ante las sollicitaciones de fuerza cortante sin fallar prematuramente.

Figura 16.

Estribos acoplados para encamisado.



Nota. Tomado del artículo sobre reforzamiento de Metwally, 2019.

De la manera que se necesite, los estribos deben unir siempre el armazón del acero principal del refuerzo y encajarlo con el concreto preexistente, en la Figura 17, se aprecia un caso inusual, donde se encamisán las 4 caras, pero el acero principal solo se añade a dos lados, probablemente el diseñador tuvo que contemplar problemas de espacio en la ejecución del encamisado, lo que decanto en esta disposición de acero. Sea cual sea el caso, los estribos con forma de U y traslape han sido usado para unir y confirmar el concreto que se añadirá.

Figura 17.

Caso de encamisado en dos laterales.

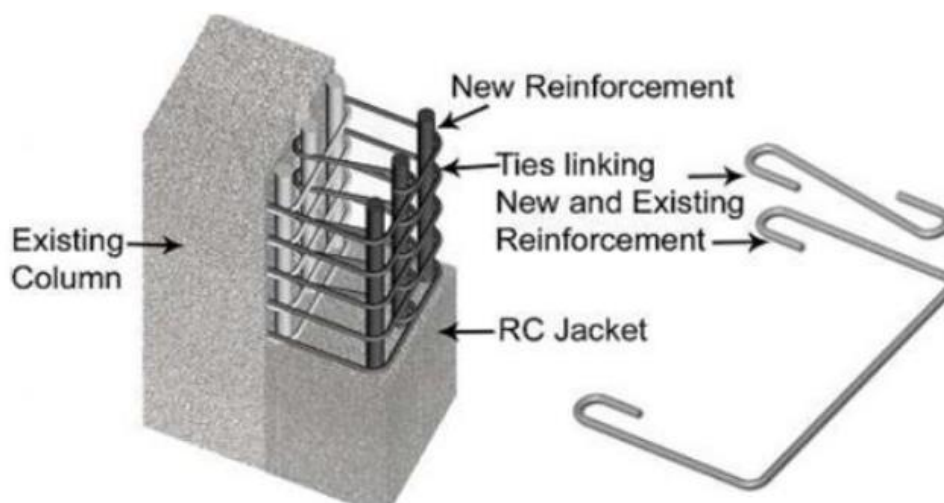


Nota. Tomado de los casos de reforzamiento de Raza et al., 2019.

Finalmente, para el caso puntual de la columna estudiada en esta investigación, como ya se decidió, se optó por encamisar un solo lado, lo que conlleva a añadir el acero principal en una cara y conectarlo al acero existente con los estribos a la misma altura que los preexistentes, la Figura 18 ejemplifica este tipo de distribución.

Figura 18.

Estribos para encamisados de un solo lado.



Nota. Tomado de la investigación de reforzamiento de Necevska-Cvetanovska et al., 2019.

En este último caso, el acero principal cuenta con 3 varillas a un costado, en el reforzamiento de esta investigación solo se cuenta con 2 de estas varillas, por esto no se tiene la necesidad de incrementar un estribo en S, sino que basta con conformar la U y asegurar un gancho que rodee al acero principal de las varillas existentes.

2.2.6.3 Vaciado del concreto

El vaciado del concreto es la etapa final del proceso constructivo del encamisado. El concreto nuevo se vierte alrededor de la columna existente, cubriendo el acero principal y los estribos. Es fundamental que el concreto utilizado en esta etapa sea de alta calidad y proporcione una buena adherencia tanto al refuerzo nuevo como al concreto original. Para estos los casos donde se emplea encofrados se recomienda siempre el uso de concretos aditivados de alta trabajabilidad, incluso autocompactantes, para evitar el uso de máquinas de vibrado que son complicadas de manipular dadas las condiciones del reforzamiento.

Antes del vaciado del concreto, es necesario tratar la superficie del concreto con adhesivos epóxicos que garanticen la correcta unión entre el concreto nuevo y el concreto preexistente, la elección de este pegamento será de acuerdo con el criterio del diseñador y a la oferta del mercado.

Si el volumen de concreto a vaciar es considerable, según José Rafael Yépez (2019) se debería optar por concreto lanzado, sin embargo, para volúmenes pequeños es válido el uso de encofrados previamente formados con una abertura en la parte superior por donde se introducirá el concreto.

Otra recomendación por parte de la literatura radica en que el concreto nuevo no debe ser mucho más resistente que el concreto antiguo, la explicación de esto radica principalmente en la diferencia de módulos de elasticidad y por lo tanto rigideces que pueden alterar el buen comportamiento conjunto, lo que prevalece es

que el nuevo concreto debería ser o de la misma resistencia o de la superior consiguiente, por ejemplo, en este caso se tiene un concreto de 21 MPa trabajando con otro de 28MPa.

Finalmente, es una obligación mantener el proceso de curado durando los días que se requiere según las normas y el tipo de concreto, así mismo, los puntales no deberían de retirarse hasta que el concreto haya alcanzado la resistencia de diseño.

2.3. Definición de conceptos

2.3.1. Definiciones básicas y conceptos clave

- Encamisado estructural: Técnica de reforzamiento que consiste en añadir una capa de concreto y refuerzo a un elemento existente para mejorar su capacidad estructural (José Rafael Yépez, 2019).
- Concreto armado: Material compuesto por concreto y barras de acero diseñados para trabajar en conjunto resistiendo esfuerzos de tracción y compresión (Duarte et al., 2021).
- Flexo-compresión biaxial: Estado de esfuerzos donde una columna soporta fuerzas de compresión combinadas con flexión en dos direcciones perpendiculares (Duarte et al., 2021).
- Método de elementos finitos (FEM): Técnica computacional para descomponer estructuras complejas en elementos más pequeños y resolver ecuaciones diferenciales (Mirlisenna, 2016).
- ANSYS: Software de simulación que utiliza elementos finitos para analizar comportamientos estructurales, térmicos y dinámicos (Ansys, 2011).
- Estructura de concreto reforzado: Sistema compuesto de concreto armado diseñado para resistir diversas condiciones de carga (Duarte et al., 2021).

- Diseño estructural: Proceso de dimensionar y detallar los elementos de una estructura para garantizar su seguridad y funcionalidad (Serquen., 2018).
- Modelo estructural: Representación abstracta o numérica de un elemento o sistema estructural para su análisis y diseño (Serquen., 2018).

2.3.2. Propiedades y parámetros de los materiales

- Módulo de elasticidad: Relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante en un material en su rango elástico (Russell C. Hibbeler, 2010).
- Resistencia a la compresión del concreto: Valor máximo de compresión que un concreto puede soportar antes de fallar (Serquen., 2018).
- Ductilidad: Capacidad de un material para deformarse significativamente antes de fracturarse (Russell C. Hibbeler, 2010).
- Capacidad de resistencia del acero: Fuerza máxima por unidad de área que el acero puede soportar antes de fallar (Serquen., 2018).
- Propiedades mecánicas: Características físicas de un material, como resistencia, rigidez y tenacidad (Russell C. Hibbeler, 2010).
- Relación agua-cemento: Proporción de agua respecto al cemento en una mezcla de concreto, determinante de su resistencia (Kosmatka et al., 2004).
- Adherencia concreto-acero: Fuerza que permite la transferencia de esfuerzos entre el acero y el concreto en una estructura armada (José Rafael Yépez, 2019).
- Durabilidad del concreto: Capacidad del concreto para resistir condiciones ambientales adversas y mantener sus propiedades estructurales (Kosmatka et al., 2004).
- Compatibilidad de materiales: Propiedad que asegura que los materiales en contacto trabajen conjuntamente sin pérdida de capacidad estructural (José Rafael Yépez, 2019).

2.3.3. *Modelado y análisis en ANSYS*

- Geometría 3D: Representación tridimensional de un elemento estructural usada en simulaciones computacionales.
- Mallado: Dividir la geometría en elementos más pequeños para realizar el análisis numérico (Ansys, 2011).
- Condiciones de frontera: Restricciones aplicadas en los bordes o extremos de un modelo para simular su entorno (Ansys, 2011).
- Esfuerzos normales: Fuerzas internas perpendiculares a una sección transversal del material (Russell C. Hibbeler, 2010).
- Esfuerzos cortantes: Fuerzas internas que actúan tangencialmente a una sección transversal del material (Russell C. Hibbeler, 2010).
- Análisis estático: Evaluación de una estructura bajo cargas constantes en el tiempo (Chopra, 2014).
- Análisis dinámico: Evaluación de una estructura bajo cargas que varían con el tiempo (Chopra, 2014).
- Validación del modelo: Proceso de verificar que el modelo numérico representa adecuadamente el comportamiento real de la estructura (Mirlisenna, 2016).
- Resultados de simulación: Salida generada por el software que incluye datos como esfuerzos, deformaciones y vectores principales (Mirlisenna, 2016).
- Estadísticas del mallado: Medición de parámetros como el aspecto y la calidad de los elementos finitos para asegurar resultados fiables (Ansys, 2011).

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

El trabajo realizado se ceñirá a la siguiente hipótesis principal: Establecer una metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS mejora la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024.

3.1.2. Hipótesis específicas

- El encamisado es efectivo para la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS.
- Optimizar los parámetros de diseño del encamisado maximiza el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales.

3.2. Operacionalización de variables

3.2.1. Identificación de la variable independiente

Metodología de análisis numérico usando ANSYS.

- Indicadores:
 - Tipo de modelado de la estructura.
 - Tipo de análisis estructural.
- Escala de medición:
 - Nominal

3.2.2. Identificación de la variable dependiente

Refuerzo estructural de columnas de concreto armado.

- Indicadores:
 - Esfuerzos en el acero.
 - Esfuerzos en el concreto.
- Escala:
 - De razón

3.2.3. Operacionalización de variables

En la Tabla 1 a continuación, se aprecia la operacionalización tanto de la variable independiente como dependiente, aquí se hace mención con sus definiciones conceptuales y operacionales, dimensiones, indicadores y escalas, todo según Hernandez et al. (2014)

Tabla 1.*Operacionalización de las variables.*

<i>Variable</i>	<i>Definición Conceptual</i>	<i>Definición Operacional</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Escala</i>
<i>Metodología de análisis numérico usando ANSYS</i>	Proceso de simulación en ANSYS para modelar y analizar columnas de concreto reforzadas mediante encamisado.	Ejecución de los parámetros de modelado en ANSYS de acuerdo con la estructura, refuerzo y tipo de análisis usado.	Configuración del modelo en ANSYS	Tipo de modelado de la estructura	Nominal
				Tipo de análisis estructural	Nominal
<i>Refuerzo estructural de columnas de concreto armado</i>	Capacidad aumentada de la columna para resistir cargas mediante el proceso de encamisado.	Medición de los esfuerzos en el concreto y acero de la columna reforzada en ANSYS.	Análisis de fuerzas internas	Esfuerzos en el acero	De razón
				Esfuerzos en el concreto	De razón

3.3. Tipo de investigación

La presente investigación, según Hernández et al. (2014), será aplicada-descriptiva, de tipo cuantitativa.

Una investigación aplicada se orienta a resolver problemas prácticos mediante la implementación de conocimientos teóricos. En este caso, se busca desarrollar y validar una metodología que permita reforzar columnas de concreto armado utilizando el software ANSYS.

El enfoque descriptivo se centra en observar y analizar el comportamiento de las columnas reforzadas, en aspectos como esfuerzos internos, deformaciones y rigidez estructural.

El tipo cuantitativo implica la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos mediante simulaciones en ANSYS. Esto permite evaluar de manera objetiva y precisa el impacto del encamisado en la resistencia estructural.

3.4. Nivel de investigación

De acuerdo con Vizcaíno Zúñiga et al. (2023), esta investigación tiene un nivel investigativo aprehensivo.

El nivel aprehensivo busca comprender en profundidad el fenómeno estudiado, captando las interacciones y relaciones entre las variables. En esta investigación, se analiza cómo el encamisado y los parámetros de diseño influyen en el desempeño estructural de las columnas reforzadas.

3.5. Diseño de investigación

El diseño de este trabajo según Bernal (2016), es de tipo experimental-transversal.

El diseño experimental se caracteriza por la manipulación de la variable independiente (metodología en ANSYS) para medir su efecto en la variable dependiente (resistencia estructural de las columnas). Esto se realiza en un entorno controlado para garantizar la validez de los resultados.

Por ser transversal, la investigación se realiza en un periodo definido, evaluando los resultados en un momento específico sin un seguimiento a largo plazo. Esto permite obtener conclusiones relevantes en el marco del análisis planteado.

3.6. Ámbito y tiempo social de la investigación

La presente investigación se realiza en el año 2024, y en la literatura científica se han considerado las fuentes más actuales. Las técnicas de reforzamiento se siguen desarrollando y cada vez más investigadores están usando softwares de elementos finitos en 3D como Ansys para mejorar su comprensión sobre las estructuras existentes y reforzadas. Cabe mencionar que el presente trabajo se realizó en Perú.

3.7. Población y muestra

La población de esta investigación son todas las columnas de las diferentes edificaciones de Piura que requieren reforzamiento estructural para mejorar su desempeño ante cargas estáticas y dinámicas, específicamente se trata de columnas aisladas cuya función y comportamiento difiere de las columnas de amarre de los muros de albañilería.

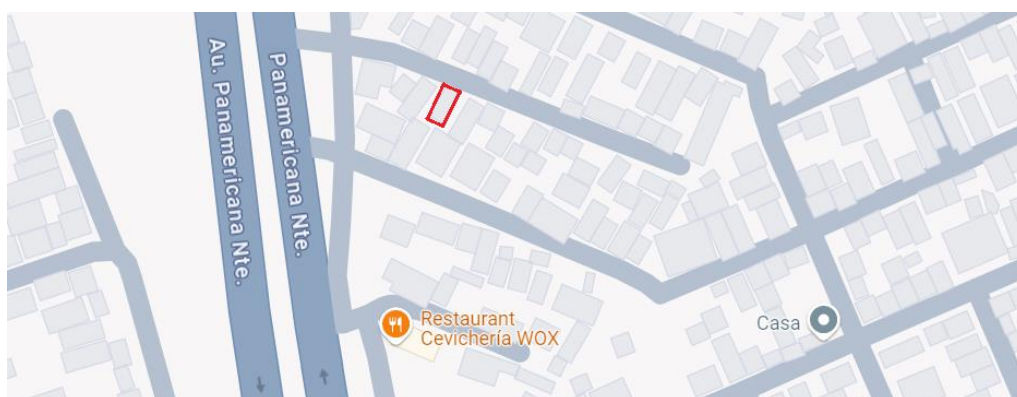
Debido a que la metodología en ANSYS es aplicable indistintamente a cualquier columna que requiera reforzamiento, se ha decidió tomar como muestra una columna de una edificación ubicada en la periferia de Piura, donde abunda la autoconstrucción, cabe destacar que dicha columna no cumple con las dimensiones mínimas de la NTP, y por su área de influencia y los niveles que debe soportar se presume deficiente para resistir las cargas que debe soportar.

3.8. Caso de estudio

La columna tomada como muestra para llevar a cabo la metodología es de una vivienda ubicada en el AA.HH. Villa La Luna Mz C1 lote 21, en el distrito de 26 de Octubre, ciudad de Piura. Los dueños de esta edificación han decidió permanecer en el anonimato y al ser una propiedad auto construida no cuenta con ningún registro municipal ni planos de ningún tipo, los dueños en conjunto con toda la comunidad se encuentran en proceso de obtener una constancia de posesión. Aunque en la ciudad de Piura existen diversas edificaciones con columnas por reforzar, lo propietarios suelen ser temerosos de que se realicen investigaciones pues temen multas o sanciones, sin embargo, los dueños de esta edificación se mostraron de acuerdo con ser parte de la investigación.

Figura 19.

Croquis de ubicación de la vivienda estudiada.



Nota. Tomado de Google Maps por el autor, 2024.

La Figura 19 muestra un croquis de la ubicación de dicha vivienda, la cual se ubica cerca de la Auxiliar Panamericana Norte en la vía de evitamiento a la provincia de Sullana, como se mencionó, esta zona pertenece al distrito de 26 de octubre y forma parte de un nuevo grupo de asentamientos humanos en la ciudad.

Con los permisos concedidos para poder hacer las mediciones respectivas de la vivienda, se procedió a concretar una fecha para la visita oficial y toma de datos.

Por el acuerdo verbal de confidencialidad no se mencionará el nombre de los dueños de la propiedad, pero en dicha visita el propietario que trabaja como sub contratista de encofrados comentó que aunque la edificación se haya construido como vivienda, el uso que le esta dando es básicamente de almacén para sus tablonos de madera, así como para su maquinaria de trabajo, también hizo hincapié en que la construcción final tendría 3 pisos, con el fin de tener una edificación multipropósito que permita habitabilidad y almacenamiento.

Figura 20.

Fachada de la edificación



Nota. Foto de la fachada tomada en la visita técnica.

Figura 21.

Uso de la edificación



Nota. Foto del interior tomada en la visita técnica.

La Figura 20 y Figura 21 muestran tanto el uso como la fachada de la edificación

3.8.1. Distribución arquitectónica

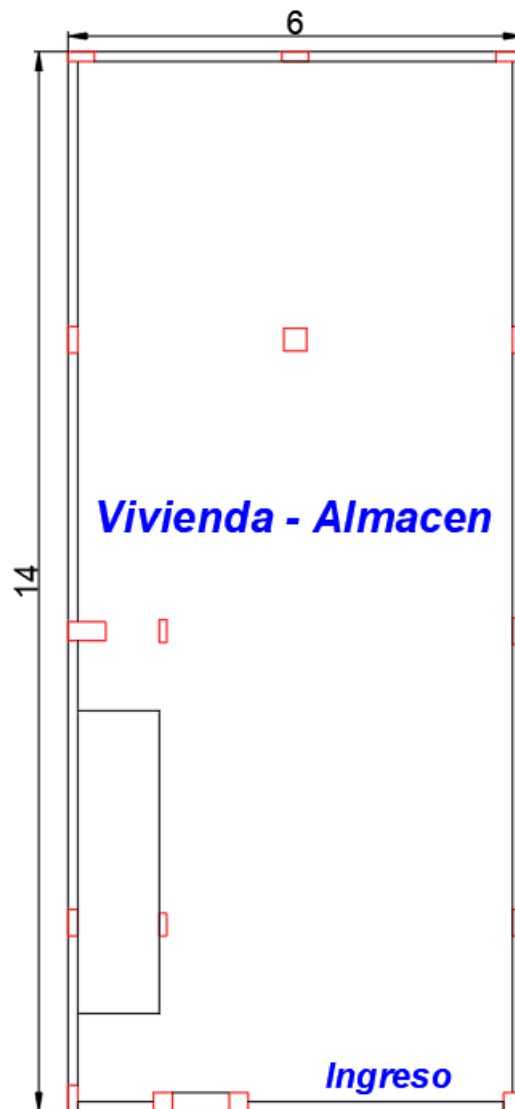
En la visita técnica realizada se tomaron medidas de la edificación, lo que dio como resultado el plano de la Figura 22, es también importante mencionar que el propietario indico que la vivienda estaba hecha para garantizar el máximo de almacenamiento posible y que, si en un futuro se requiere separar espacios, estos se delimitarían usando material no estructural como drywall. En la visita y como se aprecia en el plano, se tiene un mono ambiente con una escalera a un lado.

En la Figura 22 también es posible ver las dimensiones de esta construcción, las cuales son de 6 metros de fachada con 14 metros de largo, para un área total de

aproximadamente 84 m², lo cual ronda con el estándar de medidas para los terrenos en la ciudad de Piura. La altura de la vivienda es de 2.80 metros.

Figura 22.

Plano referencia de la propiedad.



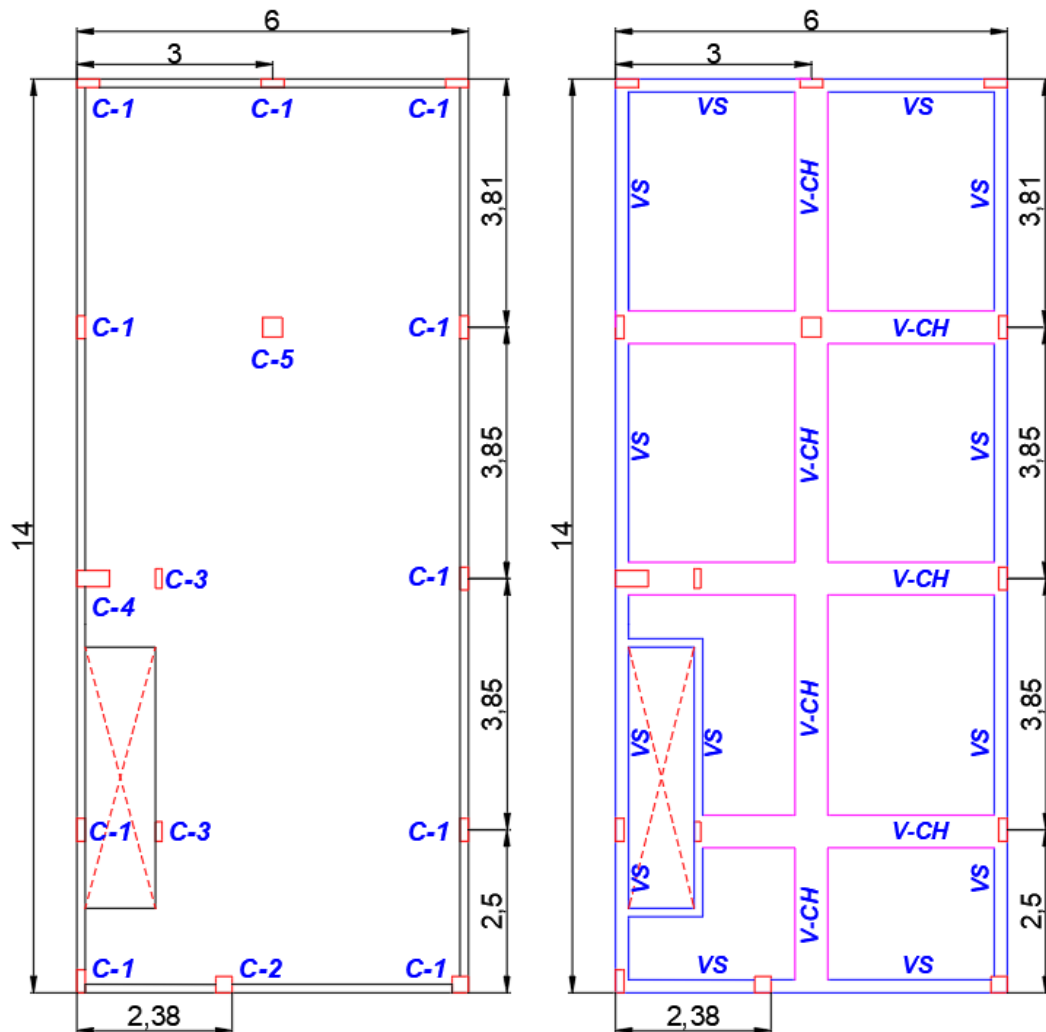
3.8.2. Sistema estructural

A simple vista el sistema estructural de la vivienda es el de muros de albañilería con algunas columnas aisladas distribuidas en la planta.

Como dato importante se observó la ausencia de vigas peraltadas en el techo que unan las columnas de los muros, esto considerando que las luces son de casi 6 metros en algunas zonas, esta ausencia esta sustituida por el uso de vigas chatas de 50 cm de ancho que no tienen la misma resistencia que las vigas peraltadas, este detalle tendrá efectos bastante perjudiciales cuando se analice la edificación en Etabs.

Figura 23.

Distribución estructural de la vivienda.



La Figura 23 muestra al lado izquierdo la distribución de las columnas y muros de la vivienda, mientras que del lado derecho se tiene el detalle de las vigas del techo, también se aprecia los espacios de luz libre que se tienen cubiertos por las vigas chatas. La Tabla 2 muestra las dimensiones de los distintos elementos estructurales.

Tabla 2.

Cuadro de dimensiones de los elementos estructurales.

Elemento	Dimensiones (cm)
C1	13 x 35
C2	25 x 25
C3	10 x 30
C4	25 x 40
C5	30 x 30
VS	20 x 20
V-CH	20 x 50

Para reforzar la comprensión del sistema estructural se tienen la Figura 24, Figura 25 y Figura 26.

Figura 24.

Detalle del sistema estructural 1.



Figura 25.

Detalle del sistema estructural 2.



Figura 26.

Columnas C3 y C4.



3.8.3. Elementos estructurales de interés

Al momento de realizar la visita se evaluaron las todas las columnas de la edificación y se optó por emplear la columna de tipo C3 para esta investigación, ya que es la columna con las dimensiones más deficientes y se encuentra básicamente aislada, de este tipo de columna existen dos elementos ubicados en los lados de la escalera, se decidió usar la que está al inicio de la escalera ya que en su circundancia no hay otro elemento estructural que alivie su área de influencia.

La Figura 27 muestra la columna C3 seleccionada para la investigación presente.

Figura 27.

Columna C3 del caso de estudio.



Figura 28.

Vista superior de la columna C3.



Tanto la Figura 27 , como la Figura 28, muestran a la columna de este caso de estudio y visualmente se aprecia que la columna está posicionada en una zona límite del techo, en el espacio donde se encuentra la escalera y en la segunda figura es perceptible que se consideró una longitud de traslape justa para un segundo nivel.

Por otro lado, la columna al estar posicionada en ese lugar hace prácticamente imposible un reforzamiento de encamisado tradicional que abrace toda la periferia de esta, porque en uno de sus lados no existiría continuidad en el

engrosamiento hacia la parte superior del techo, para esta situación en el siguiente capítulo se decidirá cuál es la mejor opción para el encamisado.

Figura 29.

Levantamiento de las medidas del acero de la columna C3.



Nota. Se empleó un pie de rey para mediciones precisas.

Finalmente, como se aprecia en la Figura 29, se realizó la medición del ancho del acero principal, la columna presentaba 4 varillas distribuidas en sus esquinas y todas eran de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, el propietario indico que los estribos eran de $\frac{3}{8}$ ", en la visita también se apreciaron algunos de estos por el piso.

El acero al estar expuesto ha presentado una capa superficial de oxidación, sin embargo, esta condición se trataría fácilmente con un cepillado y posterior tratamiento químico antióxido.

3.9. Procedimiento, técnica e instrumentos

3.9.1. Procedimiento de la investigación

La primera medida fue recopilar información a nivel de artículos científicos, revistas y tesis de postgrados sobre investigaciones de reforzamiento estructural de los elementos de concreto armado de diferentes edificaciones, como ya se ha visto en la literatura expuesta hay diversas investigaciones que concluyen una alta efectividad en los trabajos de reforzamiento y aparte nutren estos resultados con consejos prácticos aplicables para un mejor trabajo.

Establecida la información sobre los diferentes refuerzos estructurales aplicados a elementos de concreto armado, se procedió a recabar investigaciones puntuales sobre el uso del programa ANSYS en el análisis de estos refuerzos, aquí se encontraron diversas investigaciones que tocaban desde casuística real hasta ensayos por laboratorio, muchos de estos mencionados en los antecedentes de esta investigación.

Posteriormente se indagó también en los criterios normativos del reforzamiento de estructuras y en el modo de uso del programa ANSYS para garantizar una óptima metodología que conlleve a resultados fidedignos.

3.9.2. Técnica de recolección de datos

La investigación empleó dos técnicas para recolectar data:

- Mediante fuentes académicas: Las fuentes de mayor sesgo científicos como artículos científicos de revistas indexadas, diferentes tesis de postgrado enfocadas en el tema de reforzamiento, las normativas tanto nacionales como extranjeras y los manuales del uso del programa Ansys.

- Mediante fuentes no académicas: Tal es el caso de diversas revistas de productos usados en el reforzamiento, noticias e informes de medios de comunicación e incluso diferentes ponencias y tutoriales que se encuentran disponibles libremente.

3.9.3. Instrumentos utilizados

Para la extracción de información tanto académica se empleó el uso de los programas de Microsoft Office que permiten visualizar la información y poder manipular el contenido a favor de seleccionar las mejores ideas o resultados para enriquecer este trabajo.

Los instrumentos usados para recopilar la información no académica como revistas fueron también los de Microsoft Office, por otro lado, en el caso de noticias de diferentes medios de comunicación, y demás contenido audiovisual como ponencias y tutoriales se hizo uso de un navegador web para poder visualizar la información y poder recopilar la información.

Finalmente, en el caso específico de estudio se utilizó como herramientas de análisis los softwares Etabs (para determinar las condiciones del elemento estructural) y Ansys (para comprender lo que sucede dentro del elemento analizado).

CAPÍTULO 4

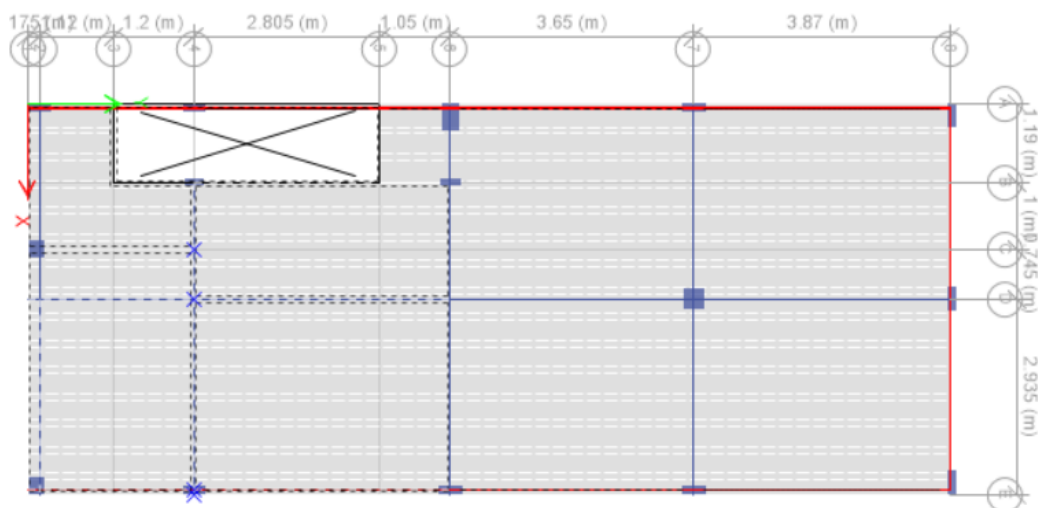
METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN DEL REFORZAMIENTO EN ANSYS

4.1. Análisis estructural de la edificación

Para continuar con el estudio de la vivienda y corroborar que el elemento estructural seleccionado para el reforzamiento necesite de verdad esta modificación, se empezó con evaluar el sistema estructural usando Etabs, con ayuda de las medidas obtenidas y los perfiles tomados este proceso llevó a la creación del siguiente modelo de la Figura 30.

Figura 30.

Modelo geométrico en Etabs.



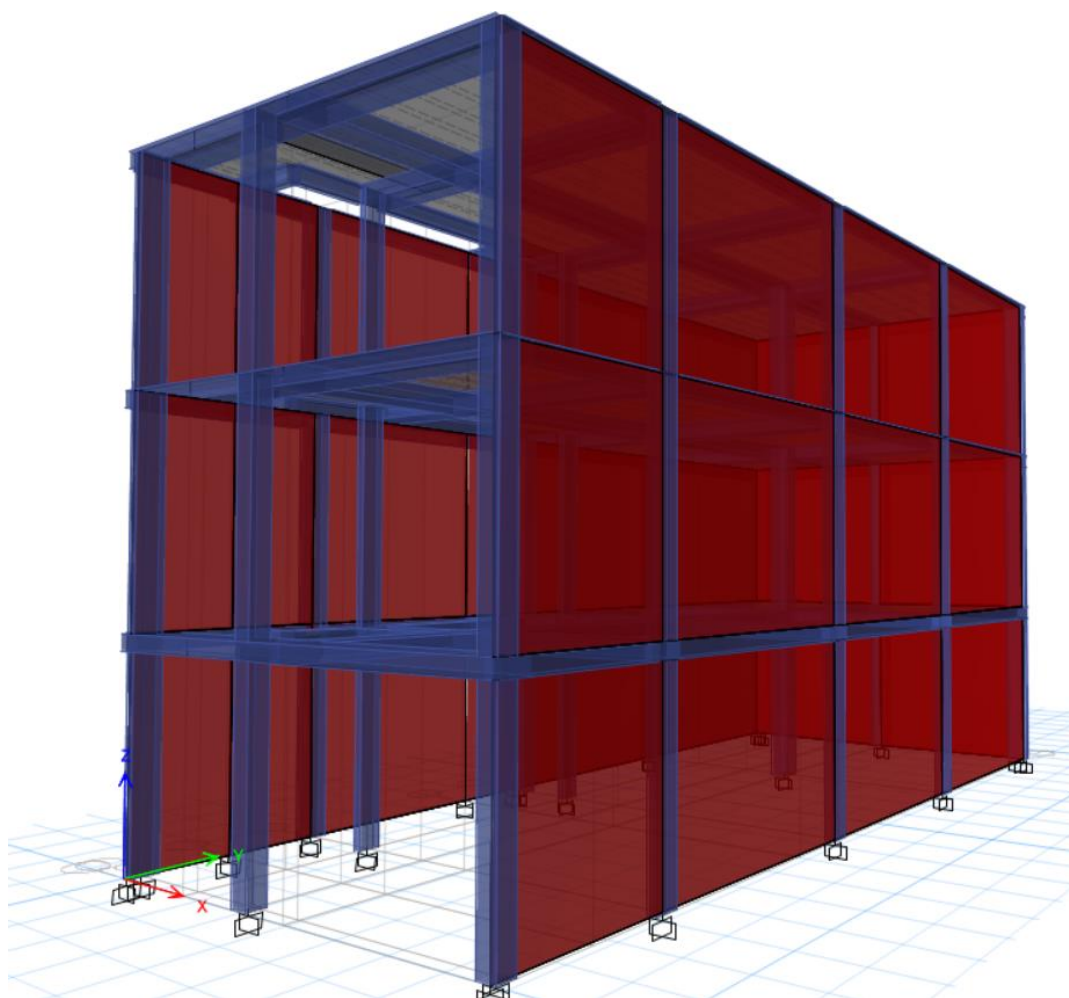
Nota. Fachada e ingreso por el lado izquierdo.

Ya que la edificación se proyectaba para albergar 3 pisos, se hizo la modelación en Etabs considerando el desempeño al término del proyecto y así poder determinar qué características de resistencia eran incumplidas por la columna

seleccionada, la Figura 31 muestra el resultado del dibujo estructural con elementos como vigas, columnas y muros en 3D, cabe destacar que para simplificar el análisis no se consideró la escalera.

Figura 31.

Modelo 3D en Etabs.



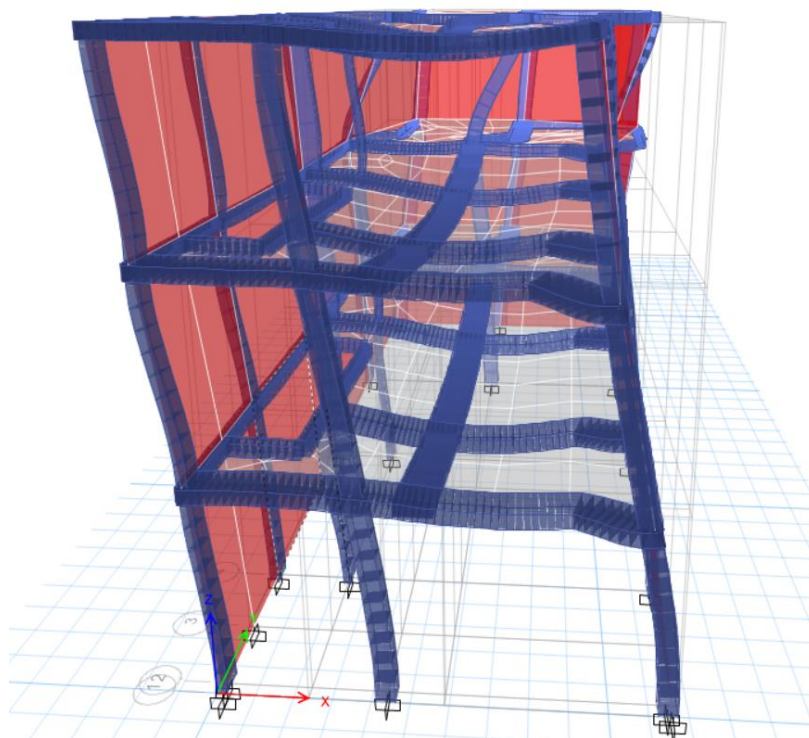
Para el análisis en Etabs se consideraron las normal E.020 de metrado de cargas, E.030 de diseño sismorresistente y la E0.60 de diseño de elementos de concreto armado, sobre todo por las consideraciones de las combinaciones de

diseño. Por otro lado, ya que el primer piso solo se utiliza de almacén, se consideró pertinente tomar el análisis como de una vivienda tradicional, puesto que la madera y equipos solo ocupan el espacio inferior y no es conveniente ni viable para el propietario almacenar estos objetos en niveles superiores.

El resultado de correr el Etabs de la vivienda dio en primera instancia lo que se aprecia en la Figura 32, donde es fácil notar la insuficiencia de elementos estructurales que aporten mayor rigidez en el movimiento de la dirección más corta. También es clara la deflexión del techo producida por la poca capacidad de las vigas chatas que básicamente son los únicos elementos de resistencia del techo.

Figura 32.

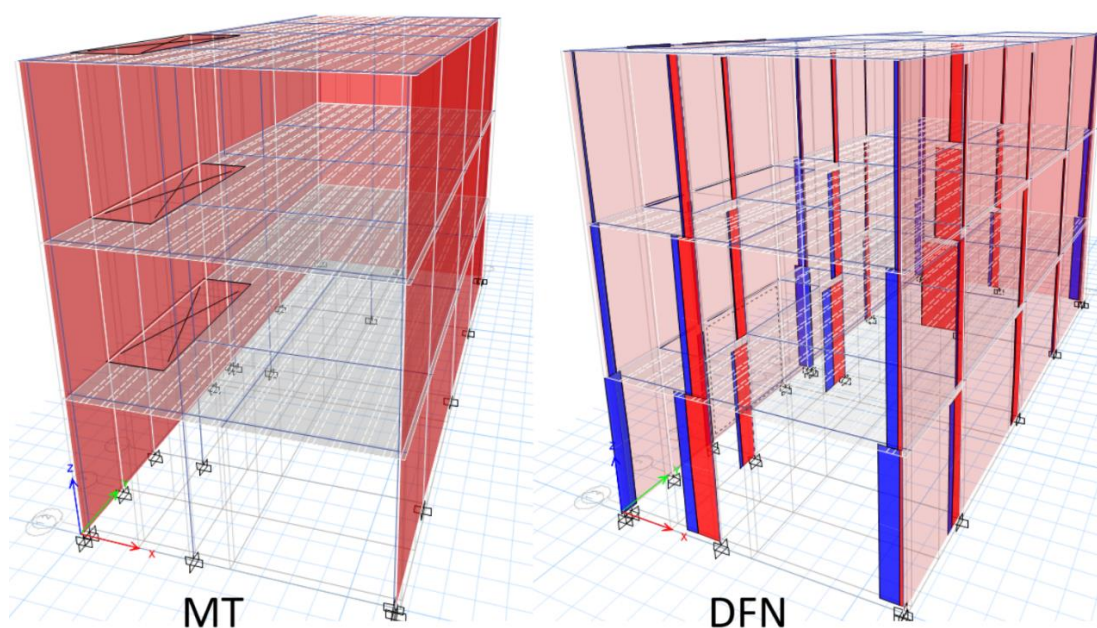
Resultado del modelado en Etabs.



Para finalizar este primer análisis se obtuvieron las imágenes correspondientes a los distintos diagramas de fuerzas de la estructura. De manera general, la Figura 33 muestra al Modelo terminado a la izquierda, y a su derecha el gráfico de fuerzas normales o axiales a las que está sujeta la edificación estudiada.

Figura 33.

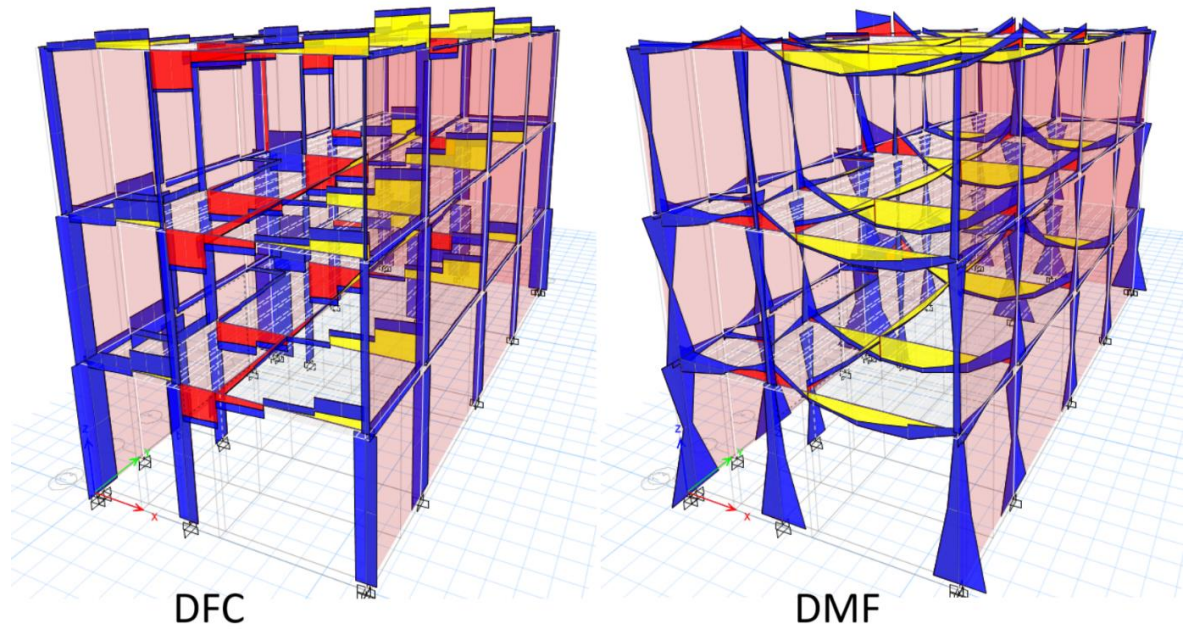
Modelo terminado y DFN.



Para complementar la comprensión del comportamiento de la vivienda también se extrajeron los gráficos de diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores, los cuales son visibles en la Figura 34.

Figura 34.

Resultados DFC y DMF.

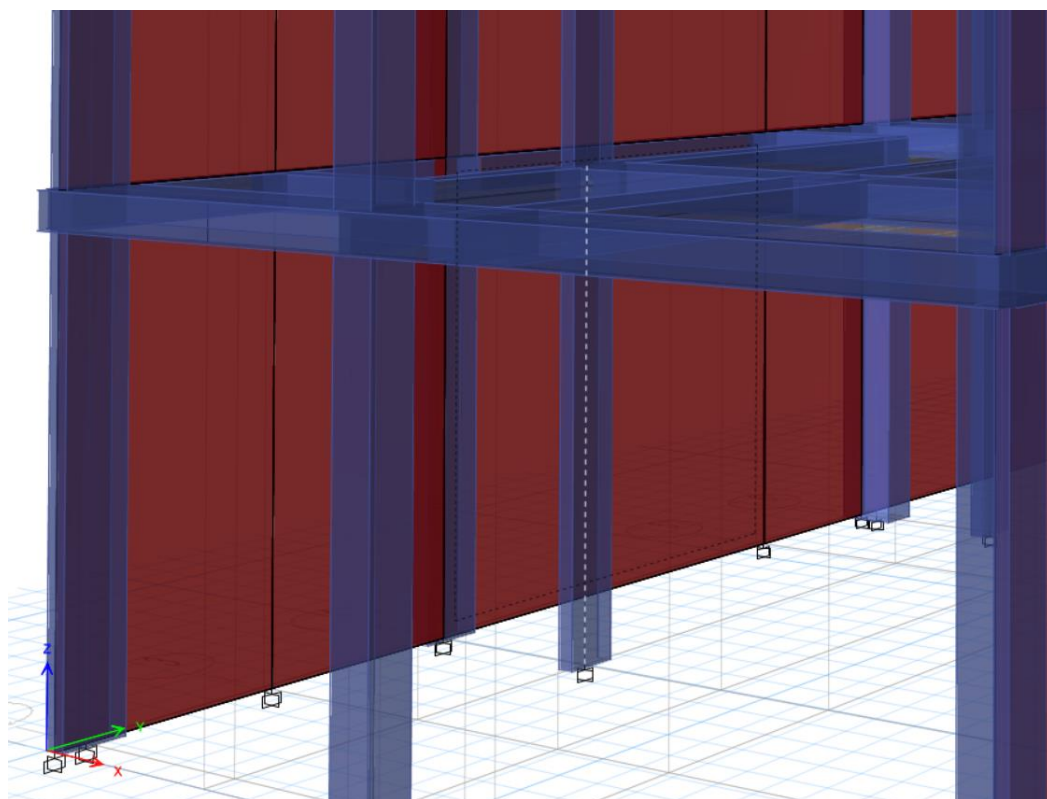


4.1.1. Cargas sobre la columna estudiada

Una vez corrido el análisis estructural, se extrajo la información de las cargas que actúan en la columna estudiada, la cual se muestra seleccionada en la Figura 35 a continuación. Como se mencionó en el anterior capítulo, esta columna de tipo C3 se ubica cerca de la entrada del ducto de la escalera y tiene unas dimensiones de 10 x 30 cm.

Figura 35.

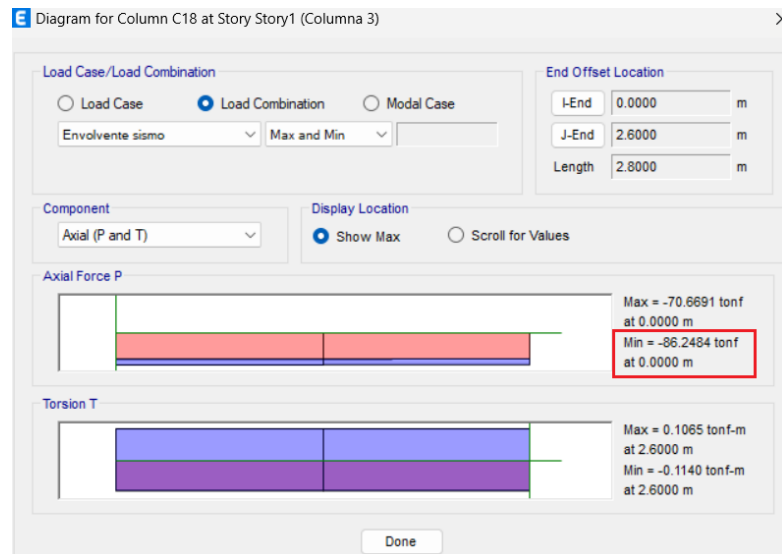
Elemento estructural de interés.



El primer dato de interés es la carga axial o normal a la que está sometida dicha columna, por lo que con las herramientas de gráficos del programa se procedió a extraer esta información, la cual se aprecia en la Figura 36. Dicha figura también ofrece información sobre la torsión a la que está sujeto el elemento estructural, pero para los fines de esta investigación y debido al bajo valor de esta carga, no se tomarán en cuenta.

Figura 36.

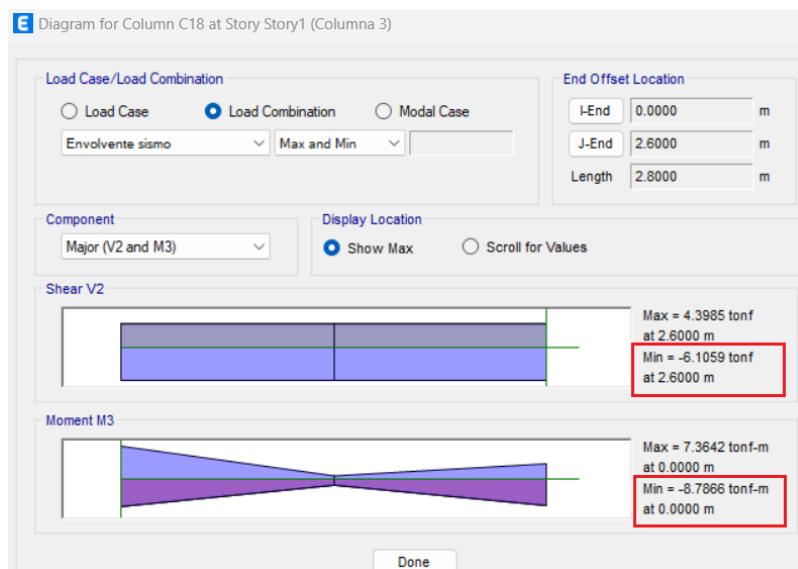
Carga axial en la columna C3.



Otros valores indispensables para el análisis de la capacidad de la columna son la fuerza cortante a la que se encuentra sometida y el momento flector que actúa sobre esta, ambos valores se obtienen de la Figura 37 mostrada a continuación.

Figura 37.

Fuerza cortante y momento flector en la columna C3.



4.1.2. Comprobación del diseño de la columna

Al considerar las propiedades de los materiales y las dimensiones de la columna, así como también la distribución de sus aceros principales y de cortante, se procedió a comprobar la capacidad resistente del elemento, el formato completo de este resultado se encuentra en el Anexo 1.

Precisamente la Figura 38 muestra parte del Anexo 1, aquí se aprecian las flaquezas del diseño en combinaciones sísmicas. Esta primera comprobación es por el diseño a flexo compresión biaxial donde en 3 de los 4 casos hay un fallo en el diseño y en el cuarto cumple básicamente rozando los límites, inclusive en el diagrama de interacción se aprecian puntos fuera de las zonas del diagrama. En el Anexo también se incorpora el análisis de diseño por fuerza cortante, pero en este caso básicamente no hay inconvenientes.

Figura 38.

Falla del diseño existente.

Combinaciones de Diseño	DIRECCION X-X				DIRECCION Y-Y			
	Pux (tn)	Mux (tn-m)	ex (m)	ϕP_{nx} (tn)	Puy (tn)	Muy (tn-m)	ey (m)	ϕP_{ny} (tn)
1.4m+1.7av	17.87	0.34	0.0192	26.00	17.87	0.35	0.0193	38.10
1.25(cm+av)+cs	16.17	0.73	0.0451	14.17	18.05	3.27	0.1812	17.00
1.25(cm+av)-cs	14.17	-0.15	-0.0107	16.17	12.29	-2.69	-0.2189	15.00
0.9m+cs	9.28	0.59	0.0632	9.28	11.16	3.13	0.2803	14.00
0.9m-cs	7.28	-0.29	-0.0403	13.00	5.40	-2.83	-0.5245	5.00

Combinaciones de Diseño	ϕP_u (tn)	ϕP_{nx} (tn)	ϕP_{ny} (tn)	ϕP_{no} (tn)	1 / ϕP_u (1/tn)	<>	Suma (1/tn)	Condicion
1.4m+1.7av	12.51	26.00	38.10	38.10	0.0799	>	0.0385	ok
1.25(cm+av)+cs	11.32	14.17	17.00	38.10	0.0884	<	0.1031	Fail
1.25(cm+av)-cs	9.92	16.17	15.00	38.10	0.1008	<	0.1023	Fail
0.9m+cs	6.50	9.28	14.00	38.10	0.1539	>	0.1529	ok
0.9m-cs	5.10	13.00	5.00	38.10	0.1962	<	0.2507	Fail

Ya que se ha probado que el elemento estructural no cumple satisfactoriamente las condiciones de carga para las que debe estar diseñado se puede aseverar completamente la necesidad de reforzar dicha columna con el fin de incrementar sus capacidades de carga y de esta manera salvaguardar la integridad

de la estructura y mantener seguros a sus posibles ocupantes. Este proceso se verá a continuación.

4.2. Cálculo del refuerzo por encamisado

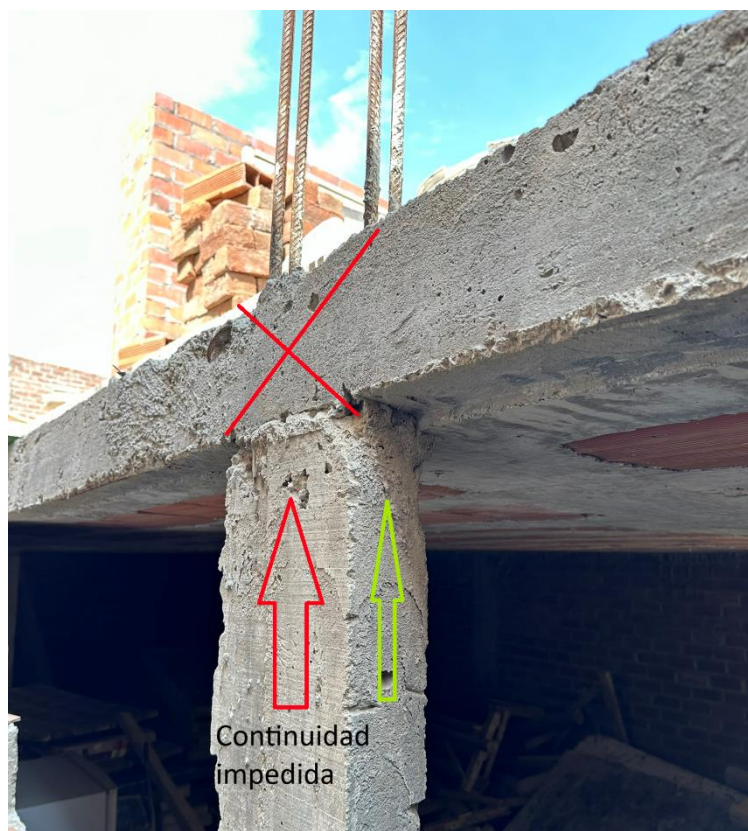
En la normativa peruana de diseño, así como en la mayoría de países, no existe un manual detallado del cálculo del reforzamiento de estructuras, sin embargo guías como el FEMA 547 dan una idea de cómo se puede proceder en el refuerzo de ciertos componentes estructurales, otro documento interesante de revisar es el ACI 546R, sobre todo cuando la infraestructura se encuentra en estados de deterioro y desprendimientos, como complemento a este código está el ACI 562, que vela por garantizar los requisitos mínimos para la ejecución de estas reparaciones.

Ya que en el Perú no existe una normativa vigente que aborde este tema, el criterio del reforzamiento depende básicamente del ingeniero a cargo del diseño, que, apoyado con los códigos internacionales y la experiencia personal, pueda proponer un criterio de reforzamiento con viabilidad de aplicación y que cumpla como requisito mínimo con la NTP E.060 para elementos de concreto armado para su comprobación.

Como se especificó en capítulos anteriores, el encamisado en esta situación solo tiene cabida en 3 de las 4 caras de la columna, esto es porque una de estas caras se encuentra al extremo del ducto de la escalera, y dicha zona también acaba con una viga de amarre del techo, por lo que la continuidad vertical se ve restringida e imposibilita la retransmisión de cargas. La Figura 39 refleja este inconveniente y da más luces sobre el detalle.

Figura 39.

Consideraciones dimensionales del encamisado.



Debido a esta situación lo que se plantea en esta investigación es añadir un refuerzo lateral pero solo en una de las caras, la cara opuesta a aquella que da con el ducto, de esta forma se incrementa el ancho de 10 cm que tiene en ese lado, esto también facilitaría los trabajos de encofrado, vaciado y armado del nuevo acero de refuerzo, como por ejemplo la forma de los estribos.

4.2.1. Criterio de las propiedades de materiales

El primer tipo de análisis que se puede hacer para tantear un reforzamiento es apoyarse sobre las propiedades mecánicas de los materiales que componen la estructura, en este caso estos son el concreto y el acero.

Como primer paso y de acuerdo con el ACI 318 (2019), en cuanto al análisis de la capacidad axial nominal de columnas se tiene la siguiente formula:

$$P_n = 0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s$$

Donde:

- f'_c : Resistencia del concreto existente (kg/cm²).
- A_g : Área bruta de la sección de concreto existente (cm²).
- A_s : Área del refuerzo longitudinal existente (cm²).
- f_y : Resistencia del acero (kg/cm²).

Del primer caso sin reforzamiento se tienen los siguientes datos:

- Dimensiones: 10 cm x 30 cm
- Resistencia del concreto f'_c : 210 kgf/cm²
- Área bruta A_g : 10×30=300 cm²
- Refuerzo longitudinal existente A_s : 4 barras de 1/2" = 5.08 cm²
- Esfuerzo de fluencia del acero f_y : 4,200 kgf/ cm²
- Carga axial actuante P_u : 86.3 tonf

De realizar el cálculo de la capacidad axial nominal o P_n se obtiene el siguiente valor:

$$P_n = 74.04 \text{ tonf}$$

Al comparar la capacidad nominal con la carga actuante se aprecia que la resistencia que ofrece la columna es menor en comparación con la requerida, siendo esta excedida por aproximadamente 12.26 tonf.

Como se mencionó anteriormente, se procederá a incrementar el área en la cara interna más larga, este incremento será de 10 cm, lo cual duplicaría el ancho de la columna y básicamente también se duplicaría el área, ya que se pasa de 10 x 30 cm a 20 x 30 cm.

Aunque el concreto de la columna haya sido categorizado como de una resistencia de 210 kgf/cm², en esta investigación se ha establecido que el concreto añadido al encamisado será su consiguiente en términos de resistencia, teniendo este nuevo concreto 280 kgf/cm².

Debido a que el concreto de la columna a reforzar no presenta deterioro y es una edificación relativamente joven, se ha decidido que se usará el aporte de resistencia del concreto existente en conjunción con el concreto añadido del encamisado, lo cual en promedio por las áreas da una resistencia de 245 kgf/cm².

Con la nueva sección y el nuevo valor de resistencia promedio se procederá a recalculer la nueva capacidad axial nominal y a verificar si cumple con la carga actuante.

- Nuevas dimensiones: 20 cm x 30 cm
- Resistencia del concreto f'_c : 245 kgf/cm²
- Área bruta A_g : 20×30=600 cm²
- Refuerzo longitudinal existente A_s : 4 barras de 1/2" = 5.08 cm²
- Esfuerzo de fluencia del acero f_y : 4,200 kgf/ cm²

El resultado es el siguiente:

$$P_n = 145.23 \text{ tonf}$$

Como es de esperar, la nueva capacidad axial nominal al tener el doble de área a casi duplicado, pero hay que tener en cuenta lo siguiente: primero, se podría reducir el área de concreto añadido, sin embargo, estos dificultarían mucho los trabajos de puesta en obra como el encofrado y el vaciado del concreto, por esta razón se mantendrán los 10 centímetros de encamisado lateral.

Visto lo anterior bastaría solo añadir concreto a la columna, sin embargo, esto no garantiza la transmisión correcta de las fuerzas y al no tener sujeción podría básicamente desmoronarse al menor movimiento lateral, por eso se optará por añadir concreto y 02 barras de refuerzo adicionales (ya que no se consideraron en el cálculo de la nueva capacidad axial).

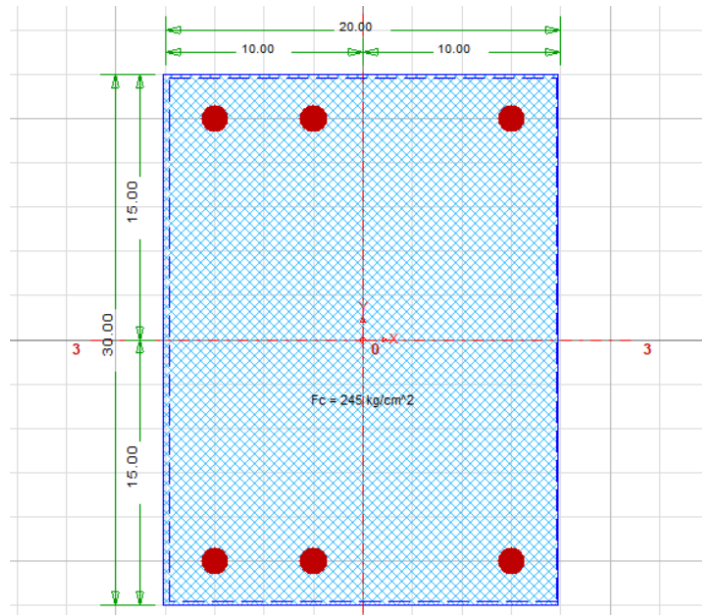
4.2.2. Rediseño mediante flexo-compresión biaxial

Con la nueva información de secciones y capacidad general de resistencia del concreto, así como la nueva distribución del acero de refuerzo, se procedió a comprobar el nuevo diseño reforzado, esta comprobación realizada en una hoja de cálculo y mostrada en el Anexo 02, indica que el elemento reforzado cumple plenamente todos los criterios de diseño y que es apto para la edificación.

Es interesante observar que en este Anexo 02, en uno de los diagramas de interacción, la curva es asimétrica, esto es debido a la forma de la nueva distribución del acero, la cual se puede apreciar en la Figura 40 a continuación.

Figura 40.

Perfil del encamisado en CSI Column.



Los valores de los diagramas de interacción fueron tomados del programa CSI Column y corresponden al nuevo perfil de la columna reforzada.

Para tener un detalle de lo que el Anexo 02 indica, la Figura 41 muestra la confirmación del diseño del encamisado bajo el criterio de flexo compresión biaxial.

Figura 41.

Comprobación del diseño por encamisado.

Combinaciones de Diseño	DIRECCION X-X				DIRECCION Y-Y			
	Pux (tn)	Mux (tn-m)	ex (m)	ϕP_{nx} (tn)	Puy (tn)	Muy (tn-m)	ey (m)	ϕP_{ny} (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	0.34	0.0192	80.23	17.87	0.35	0.0193	80.23
1.25(cm+cv)+cs	16.17	0.73	0.0451	60.52	18.05	3.27	0.1812	36.54
1.25(cm+cv)-cs	14.17	-0.15	-0.0107	80.23	12.29	-2.69	-0.2189	31.67
0.9cm+cs	9.28	0.59	0.0632	48.22	11.16	3.13	0.2803	22.14
0.9cm-cs	7.28	-0.29	-0.0403	58.36	5.40	-2.83	-0.5245	9.27

Combinaciones de Diseño	ϕP_u (tn)	ϕP_{nx} (tn)	ϕP_{ny} (tn)	ϕP_{no} (tn)	1 / ϕP_u (1/tn)	<>	Suma (1/tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	12.51	80.23	80.23	80.24	0.0799	>	0.0125	ok
1.25(cm+cv)+cs	11.32	60.52	36.54	80.24	0.0884	>	0.0314	ok
1.25(cm+cv)-cs	9.92	80.23	31.67	80.24	0.1008	>	0.0316	ok
0.9cm+cs	6.50	48.22	22.14	80.24	0.1539	>	0.0534	ok
0.9cm-cs	5.10	58.36	9.27	80.24	0.1962	>	0.1125	ok

Con base en la información estructural de la columna existente y del tipo de reforzamiento, se empezará a desarrollar la metodología para lo cual se trabajó en primera instancia el modelado geométrico 3D de los elementos, tanto para el primer caso como para el segundo, esta modelación se realizó con el uso del software AutoCAD por su mejor interfaz de dibujo, y posteriormente se exportó a la interfaz geométrica de Ansys en donde se prosiguió con el modelado estructural general.

4.3. Definición de la geometría de trabajo

Al contar con la geometría importada en Ansys, el primer paso que se debe hacer es determinar los materiales a los que les corresponde cada geometría del elemento estructural, en este caso los principales materiales usados y sus propiedades son los de la Tabla 3:

Tabla 3.

Materiales utilizados y propiedades.

<i>Material</i>	<i>Resistencia</i>	<i>Módulo de Elasticidad</i>	<i>Módulo de Corte</i>
<i>Concreto 210</i>	21 MPa	21.3 GPa	8.88 GPa
<i>Concreto 280</i>	28 MPa	24.6 GPa	10.25 GPa
<i>Acero estructural</i>	420 MPa	200 GPa	76.92 GPa

Es importante mencionar estos materiales ya se encontraban dentro de la amplia base de datos del programa, y que, en el caso de los concretos, el Ratio de Poisson es de 0.2, mientras que, en el acero de refuerzo, este valor es de 0.3.

4.3.1. Geometría de la columna existente

Como ya se vio en capítulos anteriores, la columna existente tiene unas dimensiones de 30 x 10 cm en su sección transversal y mide 2.8 m de alto, dentro posee 4 varillas de ½” en sus 4 esquinas, alrededor de los aceros principales se acoplaron estribos de 3/8” mismos que seguían la distribución de la Tabla 4.

Tabla 4.

Distribución de estribos en la columna.

<i>Cantidad</i>	<i>Distribución</i>
2	@ 5 cm.
5	@ 10 cm.
<i>Resto</i>	@ 15 cm.

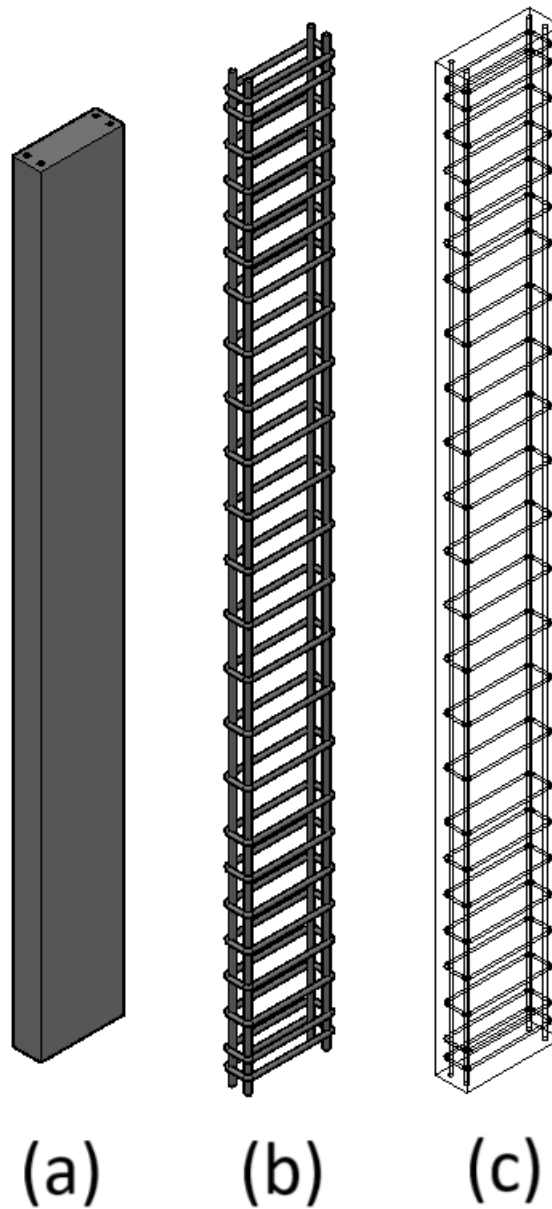
Considerado lo anterior se terminó de armar el modelo tridimensional del armazón de acero el cual se puede apreciar en la Figura 42 B. Después de tener este volumen de acero, se procedió a recrear el concreto con la sección mencionada y restarle el volumen interior del acero ya creado, a fin de tener un volumen de concreto puro, este volumen se aprecia (en sus exteriores) en la misma figura apartado A.

Para finalizar con el detalle interior, se acoplaron ambos volúmenes tanto del interior del armazón de acero como del exterior del concreto existente en un elemento de volumen compuesto comprendido por dos volúmenes como se aprecia en el apartado C de la figura mencionada.

Al armazón se le asigno el material de Acero estructural y al concreto se le asigno el material de Concreto 210, ambos de la anterior Tabla 3.

Figura 42.

Modelo tridimensional de la columna existente.



4.3.2. Geometría de la columna reforzada

Para reforzar la columna, como se mencionó antes por la ubicación de esta, el refuerzo se ubicará solo en uno de sus lados laterales, incrementando 10 cm en el lado más corto, añadiendo básicamente un área de 10 x 30 cm, para al final tener

una sección completa de 20 x 30 cm. Esta nueva sección de concreto tiene una resistencia superior a la del concreto ya existente, siendo esta añadidura de 280 kg/cm², un 33% más resistente a cargas de compresión, y cumpliendo como se mencionó en capítulos anteriores de no tener una divergencia demasiado significativa entre las resistencias de los concretos.

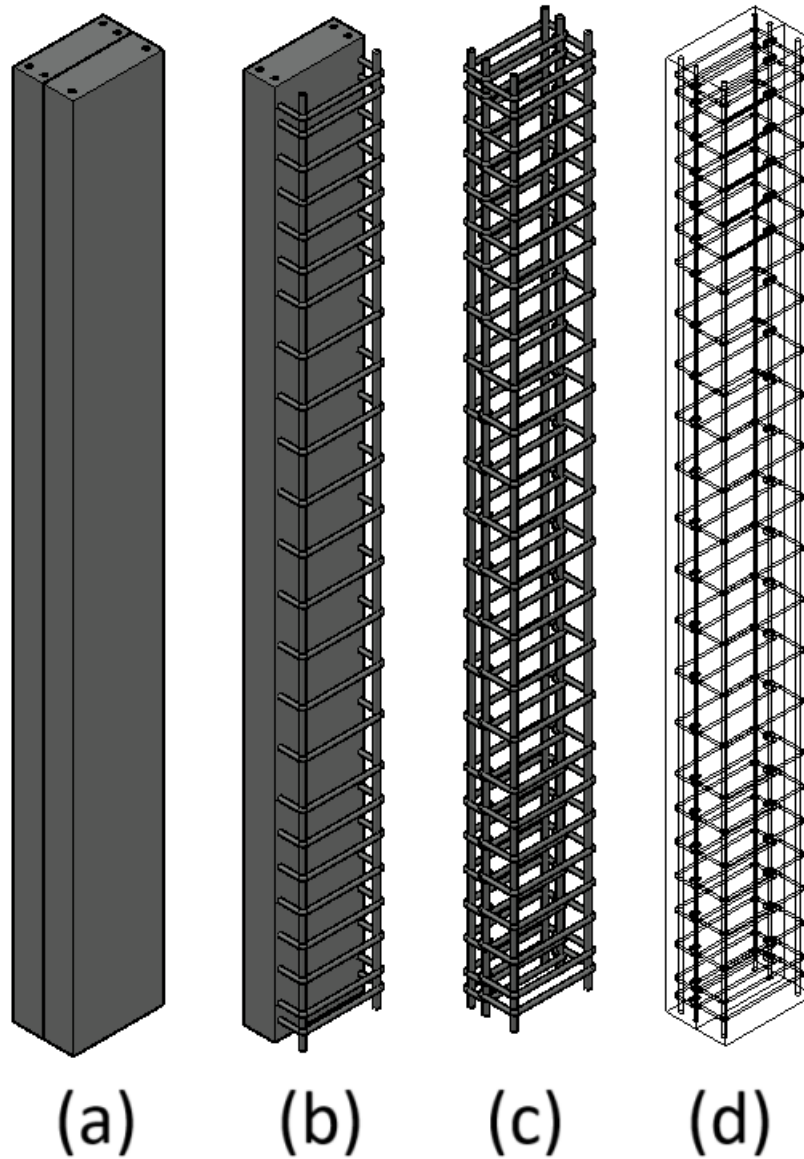
Por otro lado, al armazón del acero de refuerzo se le añadieron dos aceros principales de ½” en las nuevas esquinas, así como estribos que seguían el mismo espaciamiento y que se ubicaban a la misma altura que los estribos anteriores, solo que ligeramente por debajo para evitar la superposición de los espacios, de esta forma los estribos se encontraban amarrados por la columna existente en la zona de intersección de sus estribos con el acero principal y al otro extremo con los nuevos aceros de refuerzo, estos estribos también son de 3/8” y siguieron, como se mencionó, con la misma distribución de la Tabla 4.

Cabe mencionar que, según los cálculos mostrados de la sección de criterios de refuerzo por las propiedades de los materiales, la sección a reforzar solo requería una ampliación del área de concreto, pero debido a la naturaleza del comportamiento del material en las distintas sollicitaciones de carga y con el fin de mejorar la adherencia entre ambas secciones, se optó por añadir también el nuevo armazón de acero.

La Figura 43 muestra en su apartado “A” las dos secciones de concreto, la primera del lado izquierdo (antigua) y la añadida por el reforzamiento (derecha), el siguiente apartado “b” grafica como el nuevo armazón de acero se añade a la columna de concreto armado, por otro lado, el armazón detallado se aprecia en el apartado “c”, donde se puede puntualizar la distribución de estribos, finalmente en la sección “d” se aprecia el volumen completo y sus zonas interiores.

Figura 43.

Modelo tridimensional de la columna encamisada.



De la misma manera que en el caso sin reforzar, aquí al concreto antiguo se le asigno el material de Concreto 210, al nuevo concreto el material de Concreto 280 y al acero tanto antiguo como nuevo, las propiedades del Acero estructural. Todas estas propiedades fueron previamente establecidas.

4.4. Mallado del modelo 3D

Después de establecer la geometría del modelo y de aplicar las características de los materiales a los distintos volúmenes se prosiguió a realizar el mallado de la geometría, este mallado es un proceso clave pues dependiendo de la calidad de la malla se pueden obtener resultados más próximos a la realidad y que reflejen una mayor fiabilidad.

Es preciso mencionar que el mallado es un proceso que involucra un sin número de pruebas que lo que buscan es tener un número de elementos subdivididos que no sean muy pocos (porque presentarían muchas imprecisiones en los cálculos) ni demasiados (ya que incrementarían enormemente el tiempo de procesamiento de la información). A raíz de esto, se debe mencionar que la calidad de la malla no se mide por el número de sus elementos sino por algunos parámetros estadísticos que dan cierta garantía del correcto funcionamiento de la malla en cuestión.

A continuación, se verán los resultados del proceso de mallado de ambos casos y de las divergencias entre los tipos de mallado realizados.

4.4.1. Malla de la columna existente

La columna existente presenta dos volúmenes diferentes, el primer volumen es el del concreto de 21 PSI y el otro es el volumen del armazón. El volumen del concreto es básicamente un rectángulo extruido al que se le descontó el volumen interior del acero de refuerzo, y justamente la dificultad del mallado es el volumen de este acero de refuerzo, que presenta áreas bastante delgadas que requieren que la malla sea cada vez más pequeña para poder cubrir con la mejor precisión los espacios del volumen.

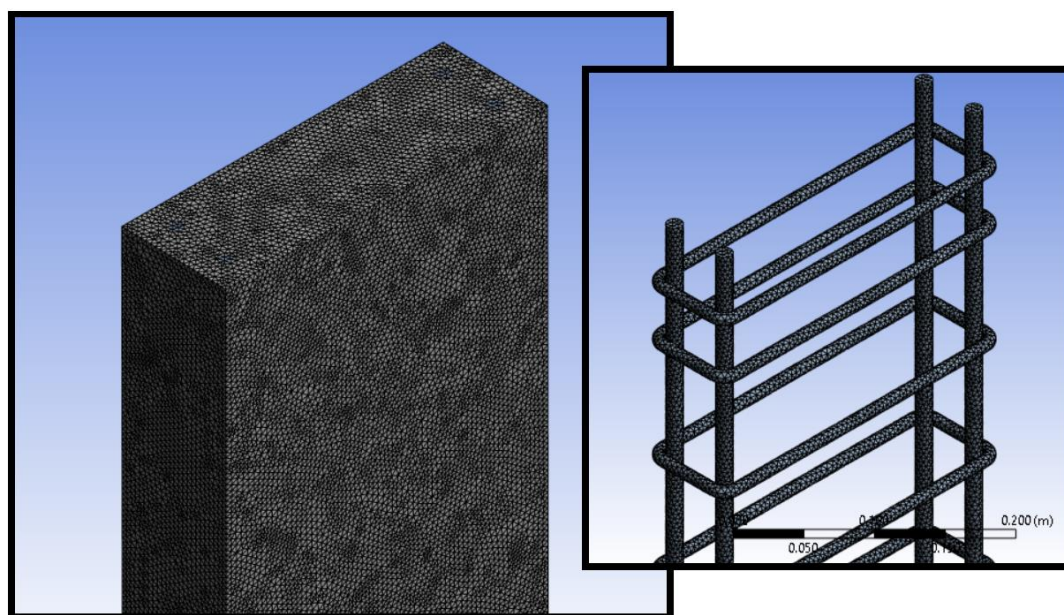
Por otro lado, también se debe considerar que el mallado del concreto tiene zonas sensibles ya que al ser un sólido al que se le extrajo un volumen, este presenta

zonas muy pequeñas como las puntas donde se intersectan los estribos con el acero principal.

La Figura 44 muestra el mallado realizado al concreto y al acero del primer caso, como se puede notar existen miles de subdivisiones del volumen principal en micro volúmenes que son los que le dan la forma a la malla total, en este caso las propiedades de la malla son las mismas para ambos volúmenes.

Figura 44.

Mallado del concreto y acero de la columna existente.



Como se menciono anteriormente al inicio de esta sección, la malla calidad dela malla no se mide por su numero de elementos, ya que existen desventajas tanto si el numero de esos es reducido como cuando es exagerado. Para evaluar una malla cuando se trabaja con elementos finitios en Ansys se suelen considerar 3 parametros principales que dan un indicio de cuan fiable es el mallado como para que converja en resultados fiables, estos parametros y sus valores recomendados y límite se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5.

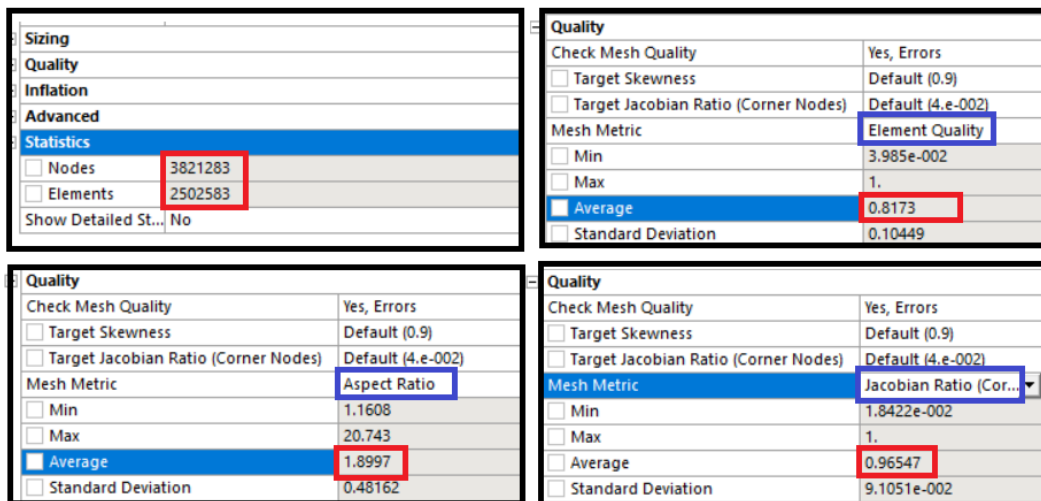
Parámetros de evaluación de calidad de malla.

Parametro	Valor recomendado	Valor límite
Element Quality	≈ 1.0	< 0.1
Jacobian Ratio	≈ 1.0	< 20
Aspect Ratio	≈ 1.0	< 10

En la Figura 45 se aprecian las características estadísticas de la malla del elemento no reforzado, el primer recuadro muestra el número de elementos que se han creado para esta simulación, en este caso un valor cercano a los 2.5 millones de subdivisiones y un total aproximado de 3.8 millones de uniones entre estos elementos, conocidos como nodos.

Figura 45.

Calidad de la malla de la columna sin reforzar.



Por otro lado, al observar los demás recuadros captados de la simulación de la malla se aprecia que los 3 parámetros estadísticos mantienen valores muy positivos y cercanos a los valores recomendados por el programa, con base en eso

se puede decir que la calidad de la malla es bastante optima y los resultados que se obtendrán a partir de esta serán fiables.

Es interesante mencionar que en cuanto al mallado, todas las mallas tienen un margen de mejora, sin embargo es muy usual que esta mejora de la malla se realice de forma manual lado por lado, lo que involucra una cantidad cuantiosa de tiempo que quizás no logre incrementar de manera diferenciada la calidad del mallado, por eso en esta investigación se utilizó el refinamiento de la malla automático del programa, haciendo hincapié en algunos detalles de los tamaños mínimos y los criterios de incremento de volumen de elementos.

4.4.2. Malla de la columna reforzada

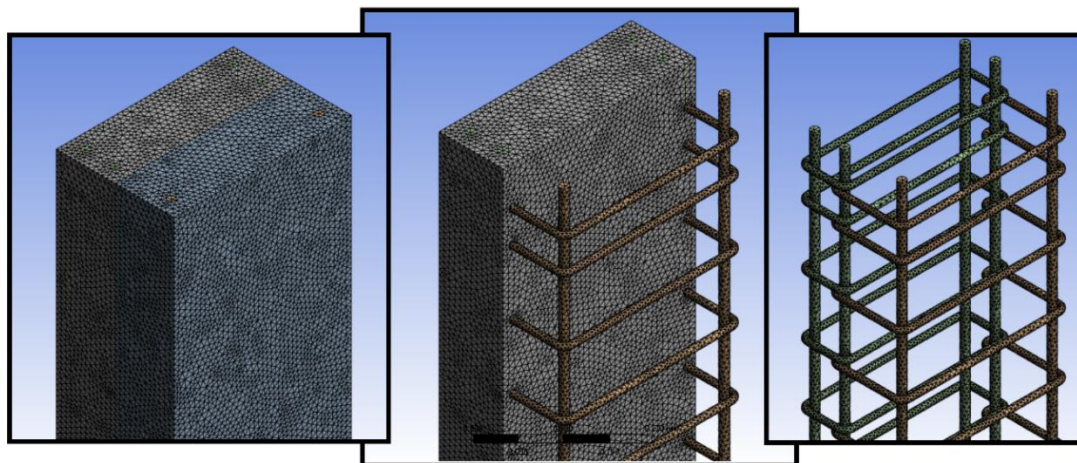
La malla de la columna reforzada presenta en este caso 3 volúmenes, 2 con los concretos mencionados anteriormente de 21 y 28 PSI y el volumen del armazón que incluye al acero existente y al adicionado.

Como se explicó anteriormente, el problema del mallado recae en las zonas más delgadas y estrechas de los volúmenes, en este caso una nueva zona a tomar en cuenta era la entrada o protuberancia en forma de “v” entre el estribo existente y el de refuerzo tanto para el armazón como para el concreto ahuecado en las diferentes zonas de los estribos.

La Figura 46 a continuación denota al lado izquierdo el mallado de los volúmenes del concreto tanto 21 PSI (tono grisáceo) y 28 PSI (tono azulado), en el lado derecho se aprecia el mallado del armazón de acero existente y reforzado, y al centro, se aprecia la interacción de la malla del concreto antiguo y el acero añadido como refuerzo.

Figura 46.

Mallado del concreto y acero de la columna encamisada.



Existe un detalle que no es tan perceptible a primera vista en la Figura 46, que es la densidad de los elementos de la malla, en este caso y a diferencia de la Figura 44 del caso si refuerzo, se aprecia menor densidad de estos elementos, a continuación, se explicará el porqué de este suceso.

La Figura 47 muestra la data estadística de este nuevo mallado del caso reforzado, como es sabido, se ha incrementado el volumen de concreto y de acero, lo que incremento el volumen total de la malla, sin embargo, si se revisa el número de elementos, estos son poco más de 1.98 millones y los nodos cercanos a 3 millones. Este caso particular tiene la explicación en la forma del refinamiento de la malla, si se usaban los mismos parámetros del caso anterior la malla hubiera resultado mucho más complicada de analizar y hubiera tomado hasta el triple de tiempo de procesamiento de datos; es por eso que para reducir el número de elementos sin hacer refinamientos manuales, se decidió cambiar un parámetro llamado ratio de crecimiento de los volúmenes, aumentando ligeramente este valor las subdivisiones del volumen podrían crecer y ser un poco más grandes en las zonas donde no se requiere que sean pequeñas, como en los volúmenes del concreto, sobre

todo en las zonas entre los estribos, de este modo se logró reducir el número de elementos sin comprometer la calidad de la malla ni incrementar exageradamente los tiempos del procesamiento.

En la misma Figura 47 también se nota que el mallado del caso reforzado, al igual que el caso anterior, cumple los estándares de calidad de la Tabla 5 de forma óptima, lo que también garantizará buenos resultados en esta investigación.

Figura 47.

Calidad de la malla de la columna reforzada.

<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Quality</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Check Mesh Quality Yes, Errors</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Skewness</td> <td>Default (0.9)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)</td> <td>Default (4.e-002)</td> </tr> <tr> <td>Mesh Metric</td> <td>Element Quality</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Min</td> <td>2.7456e-002</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Max</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Average</td> <td>0.81253</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td> <td>0.11238</td> </tr> </tbody> </table>	Quality		Check Mesh Quality Yes, Errors		<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)	<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)	Mesh Metric	Element Quality	<input type="checkbox"/> Min	2.7456e-002	<input type="checkbox"/> Max	1.	<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.81253	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11238	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Quality</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Check Mesh Quality Yes, Errors</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Skewness</td> <td>Default (0.9)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)</td> <td>Default (4.e-002)</td> </tr> <tr> <td>Mesh Metric</td> <td>Aspect Ratio</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Min</td> <td>1.1606</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Max</td> <td>33.851</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Average</td> <td>1.8883</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td> <td>0.54362</td> </tr> </tbody> </table>	Quality		Check Mesh Quality Yes, Errors		<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)	<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)	Mesh Metric	Aspect Ratio	<input type="checkbox"/> Min	1.1606	<input type="checkbox"/> Max	33.851	<input checked="" type="checkbox"/> Average	1.8883	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.54362
Quality																																					
Check Mesh Quality Yes, Errors																																					
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)																																				
<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)																																				
Mesh Metric	Element Quality																																				
<input type="checkbox"/> Min	2.7456e-002																																				
<input type="checkbox"/> Max	1.																																				
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.81253																																				
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11238																																				
Quality																																					
Check Mesh Quality Yes, Errors																																					
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)																																				
<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)																																				
Mesh Metric	Aspect Ratio																																				
<input type="checkbox"/> Min	1.1606																																				
<input type="checkbox"/> Max	33.851																																				
<input checked="" type="checkbox"/> Average	1.8883																																				
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.54362																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Quality</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Check Mesh Quality Yes, Errors</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Skewness</td> <td>Default (0.9)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)</td> <td>Default (4.e-002)</td> </tr> <tr> <td>Mesh Metric</td> <td>Jacobian Ratio (Corner Nodes)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Min</td> <td>7.9079e-003</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Max</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Average</td> <td>0.94563</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td> <td>0.12205</td> </tr> </tbody> </table>	Quality		Check Mesh Quality Yes, Errors		<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)	<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)	Mesh Metric	Jacobian Ratio (Corner Nodes)	<input type="checkbox"/> Min	7.9079e-003	<input type="checkbox"/> Max	1.	<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.94563	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12205	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Quality</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Check Mesh Quality Yes, Errors</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Skewness</td> <td>Default (0.9)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)</td> <td>Default (4.e-002)</td> </tr> <tr> <td>Mesh Metric</td> <td>Jacobian Ratio (Corner Nodes)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Min</td> <td>7.9079e-003</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Max</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Average</td> <td>0.94563</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td> <td>0.12205</td> </tr> </tbody> </table>	Quality		Check Mesh Quality Yes, Errors		<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)	<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)	Mesh Metric	Jacobian Ratio (Corner Nodes)	<input type="checkbox"/> Min	7.9079e-003	<input type="checkbox"/> Max	1.	<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.94563	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12205
Quality																																					
Check Mesh Quality Yes, Errors																																					
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)																																				
<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)																																				
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Corner Nodes)																																				
<input type="checkbox"/> Min	7.9079e-003																																				
<input type="checkbox"/> Max	1.																																				
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.94563																																				
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12205																																				
Quality																																					
Check Mesh Quality Yes, Errors																																					
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)																																				
<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (4.e-002)																																				
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Corner Nodes)																																				
<input type="checkbox"/> Min	7.9079e-003																																				
<input type="checkbox"/> Max	1.																																				
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0.94563																																				
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12205																																				

4.5. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera (o condiciones de contorno) en ANSYS, y en cualquier software de simulación basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF), son restricciones que se aplican a los modelos para simular cómo una estructura interactúa con su realidad. Estas condiciones definen cómo se comporta la estructura en sus límites o bordes y son fundamentales para obtener resultados precisos en un análisis.

Las principales condiciones de frontera de este estudio son la condición de desplazamiento por los empotramientos y la condición de carga, por las distintas fuerzas actuantes sobre la estructura.

4.5.1. Condiciones de la columna existente

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo 3, después de realizar el análisis estructural de la edificación, se procedió a establecer las condiciones de frontera del primer caso, siendo estas las expuestas en la Tabla 6 a continuación.

Tabla 6.

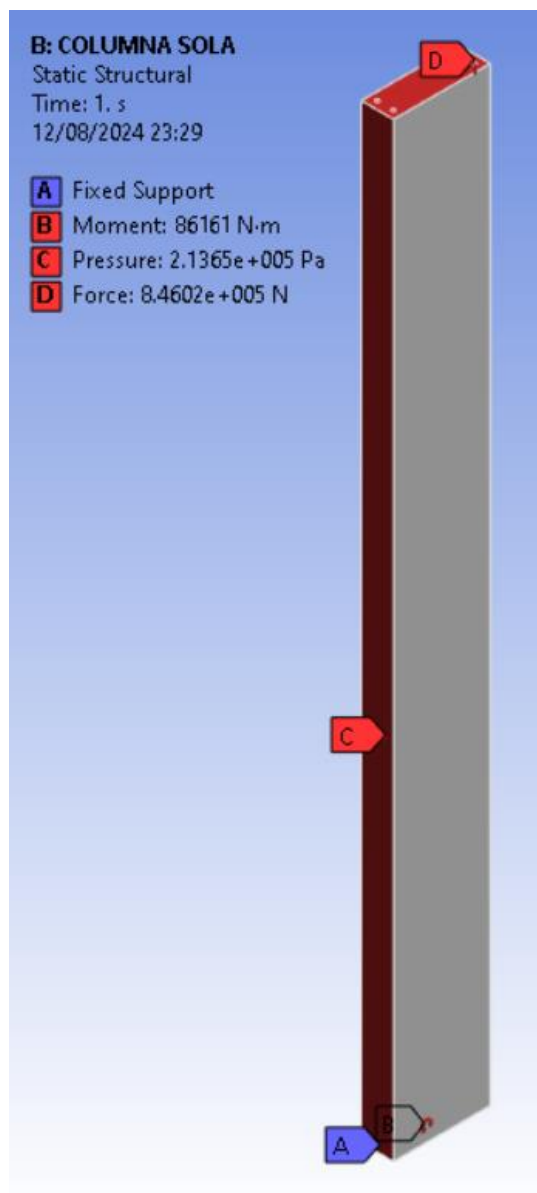
Condiciones de frontera de la columna existente.

<i>Condición de frontera</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Valor</i>
<i>Empotramiento</i>	Base y cima de la columna (A)	No aplica
<i>Fuerza axial</i>	Cara superior (D)	846 kN
<i>Presión lateral</i>	Lado izquierdo (C)	214 kPa
<i>Momento Flector</i>	Base de la columna (B)	86.16 kN.m

Los resultados del programa Etabs son para elementos lineales, y ya que en esta investigación se trabaja con sólidos en 3D se tuvieron que tomar algunas consideraciones para someter a la columna existente en ANSYS al mismo nivel de esfuerzo que la columna del análisis estructural. Primero la fuerza axial se mantiene igual, en su dirección, pero ahora actúa sobre una superficie en la cara superior, por otro la fuerza cortante ha sido transformada en una presión lateral a lo largo de toda la superficie que la recibe en el lado izquierdo, en cuanto al momento flector y la condición de empotramiento, estos se han puntualizado en la misma cara donde trabajan.

Figura 48.

Condiciones de frontera del caso sin reforzar.



La Figura 48 muestra la ubicación de estas condiciones de frontera, misma que ha sido letrada de la A, a la D, por las 4 condiciones propuestas. También se puede observar los valores numéricos y dimensionales de estas condiciones en la parte superior.

4.5.2. Condiciones de la columna reforzada

Para este segundo caso, con el reforzamiento realizado mediante el incremento del área de sección del concreto y de la cuantía del acero, al igual que el caso anterior se deben considerar las mismas condiciones de frontera, ya que el elemento está ubicado en la misma posición y mantiene las solicitaciones de carga correspondientes, por lo que en este caso lo que varía es la distribución de estas condiciones de frontera en el nuevo volumen de la columna reforzada a estudiar

Como se mencionó, aunque las cargas sean las mismas a pesar del reforzamiento, hay una variación en el valor de la fuerza cortante que se distribuye en un área mayor, lo que conlleva a la reducción de esta magnitud, los demás valores de las condiciones de frontera se mantienen inalterados, esto se ve en la Tabla 7.

Tabla 7.

Condiciones de frontera de la columna reforzada.

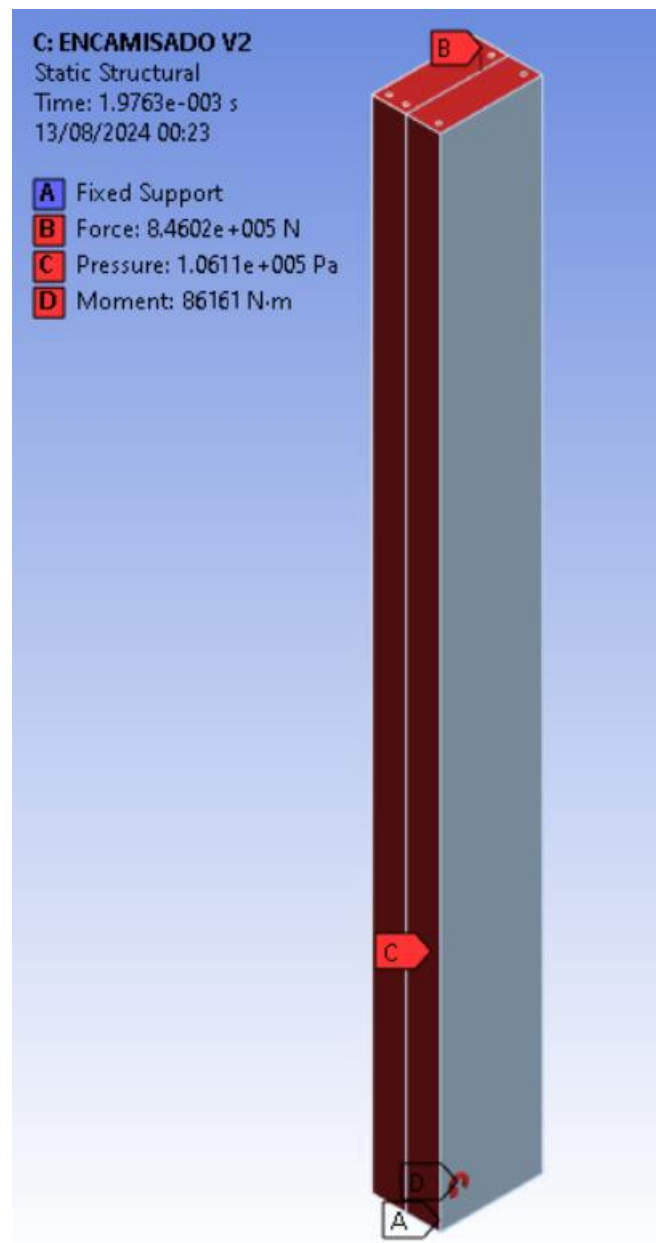
<i>Condición de frontera</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Valor</i>
<i>Empotramiento</i>	Base y cima de la columna (A)	No aplica
<i>Fuerza axial</i>	Cara superior (B)	846 kN
<i>Presión lateral</i>	Lado izquierdo (C)	107 kPa
<i>Momento Flector</i>	Base de la columna (D)	86.16 kN.m

La Figura 49 a continuación, ilustra las condiciones de frontera del caso reforzado, se aprecia la diferencia entre los volúmenes de los distintos concretos, y la ubicación de las cargas. Como se mencionó anteriormente, la carga lateral en términos de presión se ha reducido por el incremento del área del concreto de

refuerzo, también las caras donde actúan las fuerzas axiales y de momento ahora incluyen a las zonas del concreto nuevo.

Figura 49.

Condiciones de frontera del caso reforzado.

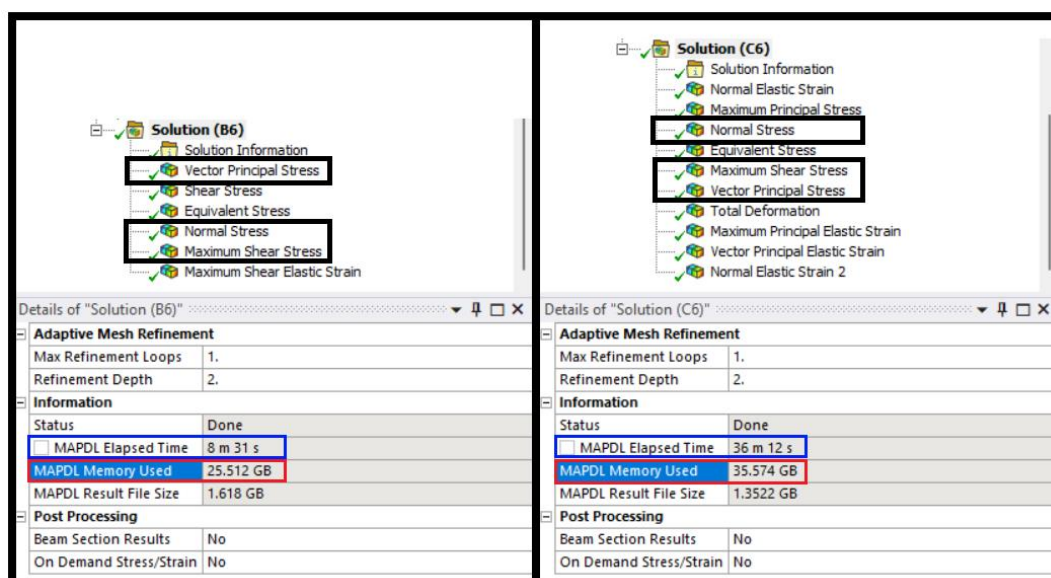


4.6. Análisis del solucionador

Con la malla realizada y con las condiciones de frontera impuestas en cada caso, ahora solo queda pendiente correr la simulación en el programa, hecho esto para ambos casos se obtuvo la siguiente información de la Figura 50.

Figura 50.

Detalle del análisis del solucionador de ambos casos.



El lado izquierdo corresponde a la simulación del estado de la columna sin refuerzo y en la parte baja donde se aprecian las estadísticas se denota que el tiempo que se demoró el programa en procesar la información fue de poco menos de 10 minutos, en cuanto al uso de la memoria RAM, fue de poco más de 25 GB. Por el lado derecho se tienen los gráficos estadísticos de la simulación del caso reforzado, aquí el tiempo de procesamiento de los datos fue de 36 minutos y la memoria usada superó los 35 GB.

Es interesante resaltar que el segundo caso, que tenía una malla más pequeña en número de elementos tiene tiempos de procesamiento hasta 5 veces más grandes

y usa casi un 40% más de la memoria RAM. Esto podría sonar contradictorio, pero tiene su explicación en la complejidad del uso de los materiales, ya que hay dos volúmenes diferentes de concreto y que el acero está inmiscuido en ambos, también el volumen es considerablemente más grande en este caso y para finalizar el número de nodos no se redujo drásticamente.

Finalmente, en la misma Figura 50, en las zonas superiores se aprecia que han sido demarcados algunos tipos de análisis, estos 3 tipos de resultados corresponden al esfuerzo normal, esfuerzo constante máximo y vector principal de esfuerzos. También se aprecian otro tipo de resultados como algunas deformaciones u otro tipo de esfuerzos, pero para fines de esta investigación se ha considerado usar estos tres casos principales para observar el comportamiento de la columna reforzada y sin reforzar.

En el siguiente capítulo se ahondará en la explicación de cada resultado y el análisis realizado en cada caso considerando el aporte del concreto, como del acero y de la conjunción de ambos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1. Esfuerzos normales

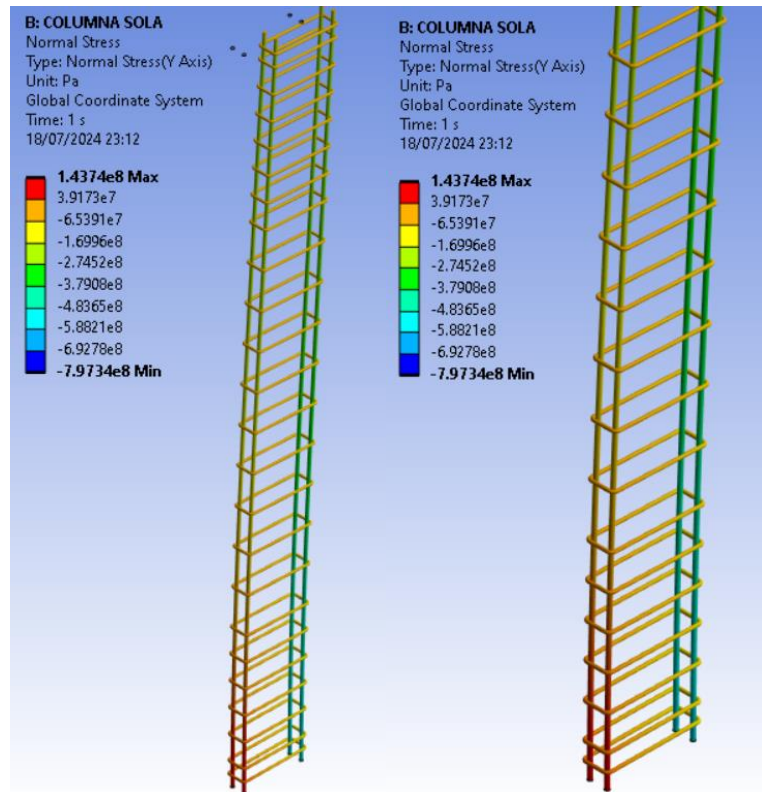
En el análisis de estructuras mediante el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) realizado en ANSYS, las gráficas de los esfuerzos normales son esenciales para comprender la distribución de los efectos de tensión o compresión en el elemento analizado. El uso de esta herramienta permite visualizar el comportamiento de estos esfuerzos normales a lo largo de la estructura, proporcionando detalles precisos sobre la contribución de esfuerzo que resisten el concreto y el acero de forma detallada.

5.1.1. Detalle en la estructura antigua

Se empezará con el análisis de resultados con la Figura 51 que muestra los esfuerzos normales en el acero de refuerzo interior de la columna sin encamisar, esta vez en la dirección del eje Y. Según la leyenda de colores del gráfico, los valores de esfuerzo varían significativamente, con un pico de esfuerzo normal en tracción de 1.4374×10^8 Pa (aproximadamente 1465.93 kg/cm^2). En el gráfico, los valores más altos (en rojo y amarillo) indican las áreas de mayor tensión, mientras que los valores más bajos (de verde y acercándose al azul) indican las áreas de mayor compresión, en el caso de la base, los aceros extremos de la derecha de coloración verde presentan un esfuerzo de compresión de alrededor de 5.00×10^8 (cercano a 5000 kg/cm^2); el valor promedio de estos esfuerzos es de 2500 kg/cm^2 en compresión, en la Figura 52 se puede apreciar mejor como estos esfuerzos se distribuyen mejor a lo largo del acero de la columna, esto brinda una comprensión detallada de las cargas a las que está sometida esta parte de la estructura.

Figura 51

Esfuerzos normales en el acero de la columna sin reforzar.

**Figura 52.**

Detalle de los esfuerzos normales en el acero de la columna sin reforzar.

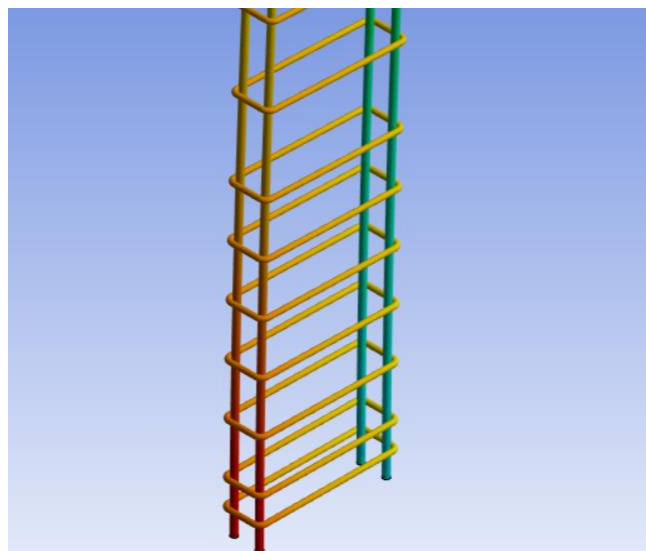
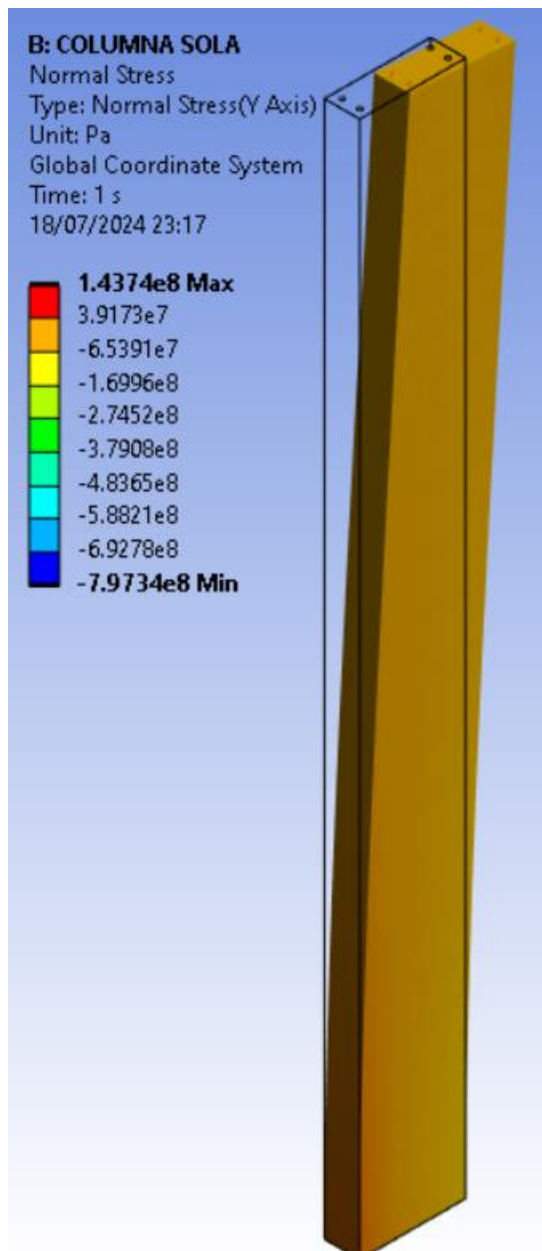


Figura 53.

Esfuerzos normales en el concreto de la columna sin reforzar.



Por otro lado, si se consideran los esfuerzos normales en el concreto de la columna en su estado previo al reforzamiento, se tendría lo que muestra la Figura 53. En la mayor parte del volumen, el elemento estructural presenta una coloración naranja, lo que equivale a aproximadamente $-2.62e7$ Pa (alrededor de -267 kg/cm²).

Adicionalmente, como se prevé en estos casos, en el extremo izquierdo se pueden observar ciertas zonas que se acercan ligeramente a la tracción, pero de forma muy leve. La coloración predominante y casi uniforme en toda la zona de la columna nos lleva a la conclusión de que está siendo sometida a un fuerte aplastamiento.

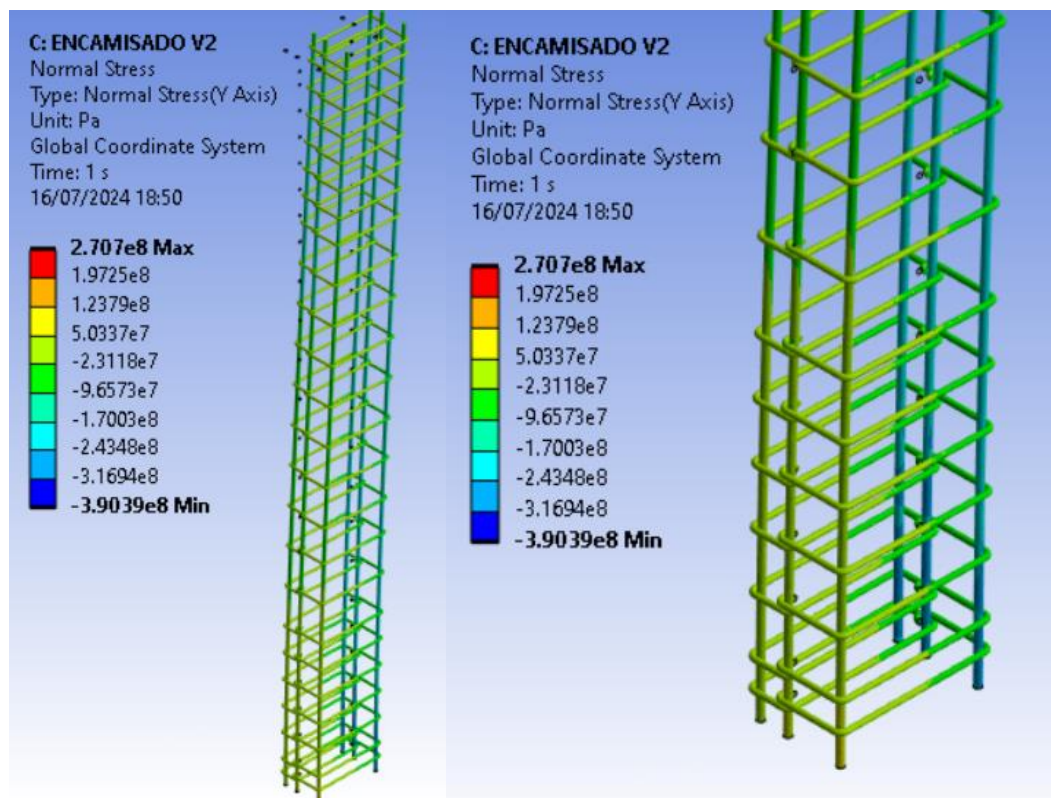
Además, es importante recalcar que, como se mencionó anteriormente, la columna existente aún no soporta la carga completa de la edificación, ya que esta aún no se ha completado definitivamente, sino que se ha avanzado solo una primera etapa. En el capítulo sobre el criterio del encamisado, se demostró mediante cálculos que el área del concreto era insuficiente para la carga admitida. En la Figura 53 se puede apreciar claramente esta insuficiencia, pues los tonos naranjas indican un esfuerzo de alrededor de 260 kg/cm^2 , mientras que el concreto utilizado en la columna tiene una resistencia de solo 210 kg/cm^2 . Esta discrepancia confirma la necesidad de reforzar la columna para que pueda soportar la carga completa de la edificación una vez finalizada.

5.1.2. Detalle en la estructura reforzada

Por otro lado, después de reforzar la estructura con la adición de dos aceros de $\frac{1}{2}$ pulgada y 10 cm más de concreto con una resistencia de 280 kg/cm^2 hacia el lado más corto, se han obtenido los siguientes resultados. En primera instancia, revisando los efectos de la carga en el acero de refuerzo, se puede observar en la Figura 54 que, según la distribución de colores de la leyenda, el acero interior tiene un aporte a la carga más balanceado. Esto se debe precisamente a que, al añadir más cuantía de refuerzo, la contribución de las cargas a la estructura se distribuye de manera más uniforme.

Figura 54.

Esfuerzos normales en el acero de la columna reforzada.



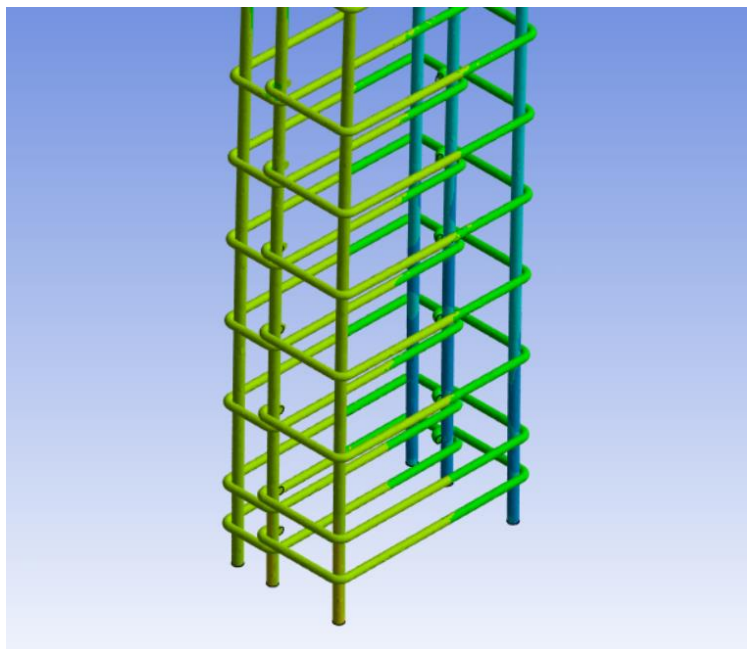
En comparación con la anterior Figura 51, donde la coloración cambiaba abruptamente de una zona a otra, en este caso, los esfuerzos se presentan de manera más armónica. Los valores de los esfuerzos en el acero de refuerzo van desde aproximadamente $-6.00e7$ Pa (alrededor de -612 kg/cm²) en las zonas de compresión, hasta aproximadamente $3.50e7$ Pa (alrededor de 357 kg/cm²) en las zonas de tracción. Esta mejora en la distribución de los esfuerzos indica que el refuerzo adicional ha logrado equilibrar mejor las cargas, aumentando la capacidad de resistencia y estabilidad de la columna reforzada.

La Figura 55 mostrada a continuación resalta los efectos de los esfuerzos y su manera de actuar en la zona baja de la columna, donde comienza a nacer el acero interior. Como se mencionó antes, la coloración que representa el grado de esfuerzo

es notoriamente más gradual, indicando una distribución más uniforme y equilibrada de los esfuerzos en esta área crítica de la estructura.

Figura 55.

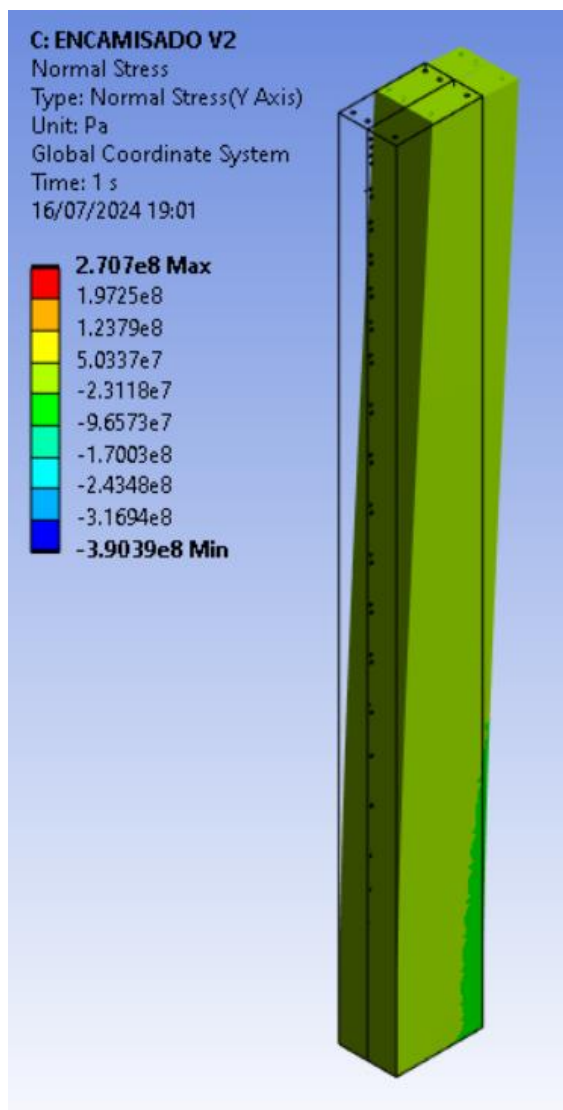
Detalle de los esfuerzos normales en el acero de la columna reforzada.



En otra instancia, en la Figura 56 al analizar el resultado del reforzamiento enfocado en el concreto, se puede observar que el esfuerzo generalizado a lo largo de toda la columna encamisada varía entre 130 a 140 kg/cm² en compresión. Esta variación es significativa si se consideran los resultados previos de la Figura 53, donde se registraban alrededor de 260 kg/cm². El rango mencionado, menor a 150 kg/cm², es preponderante según la coloración del gráfico. Sin embargo, también se pueden ver zonas ligeramente más oscuras (verde oscuro) donde la compresión alcanza valores cercanos a 200 kg/cm², especialmente en la base de la columna, hacia el extremo. Este análisis confirma que el reforzamiento ha reducido los esfuerzos máximos en el concreto, distribuyendo mejor las cargas y mejorando la capacidad estructural de la columna.

Figura 56.

Esfuerzos normales en el concreto de la columna reforzada.

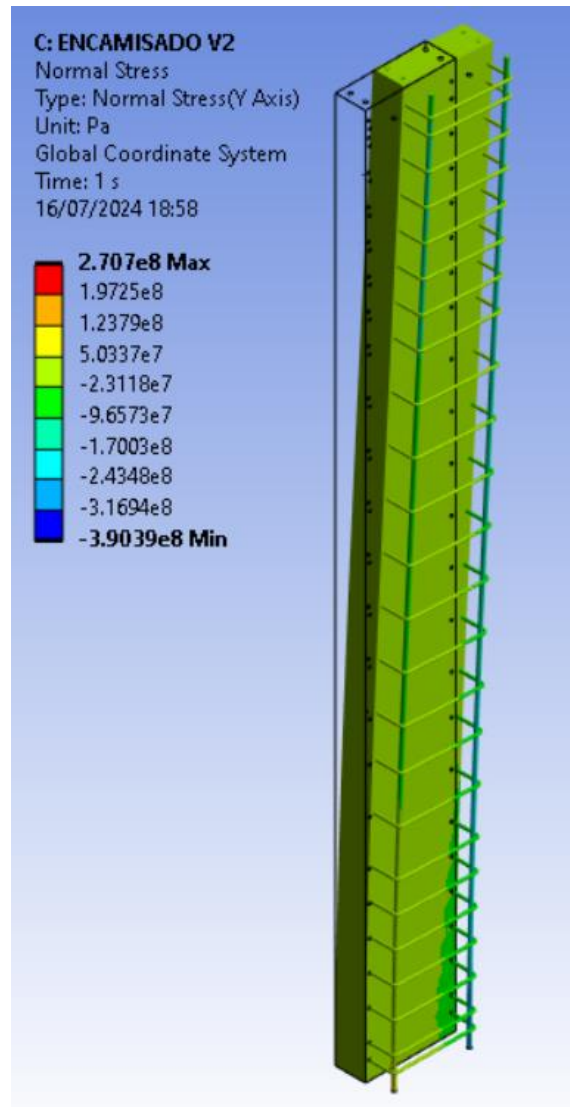


Como detalle adicional, se ha obtenido la Figura 57, que muestra la interacción entre el concreto existente y el acero de reforzamiento adicional. En esta figura, se aprecia una relación bastante dinámica en cuanto a cómo se distribuyen los esfuerzos en las diversas zonas. Es evidente que el acero longitudinal vertical aporta significativamente a la resistencia, ya que estos elementos, al ser de menor envergadura, concentran más estos esfuerzos. Además, vale mencionar que el acero de los estribos trabaja casi como el concreto en este caso de esfuerzos normales,

permitiendo una mejor distribución de la carga vertical. Esta interacción entre el concreto y el acero de refuerzo mejora notablemente la capacidad estructural de la columna, distribuyendo las cargas de manera más uniforme y eficiente.

Figura 57.

Esfuerzos normales en la interacción concreto existente y acero añadido.



5.2. Esfuerzos cortantes

En el análisis realizado en Ansys, las gráficas de los esfuerzos cortantes permiten observar cómo se distribuyen estos esfuerzos a lo largo de la estructura. Esta visualización es fundamental para evaluar la capacidad de la estructura para resistir cargas transversales. Los esfuerzos cortantes ayudan a identificar áreas críticas donde se concentran, proporcionando información detallada sobre la contribución del concreto y el acero en la resistencia a las fuerzas de corte. Este análisis es esencial para garantizar la integridad estructural, comprender su comportamiento y diseñar mejoras que optimicen el desempeño de la estructura frente a cargas dinámicas y estáticas.

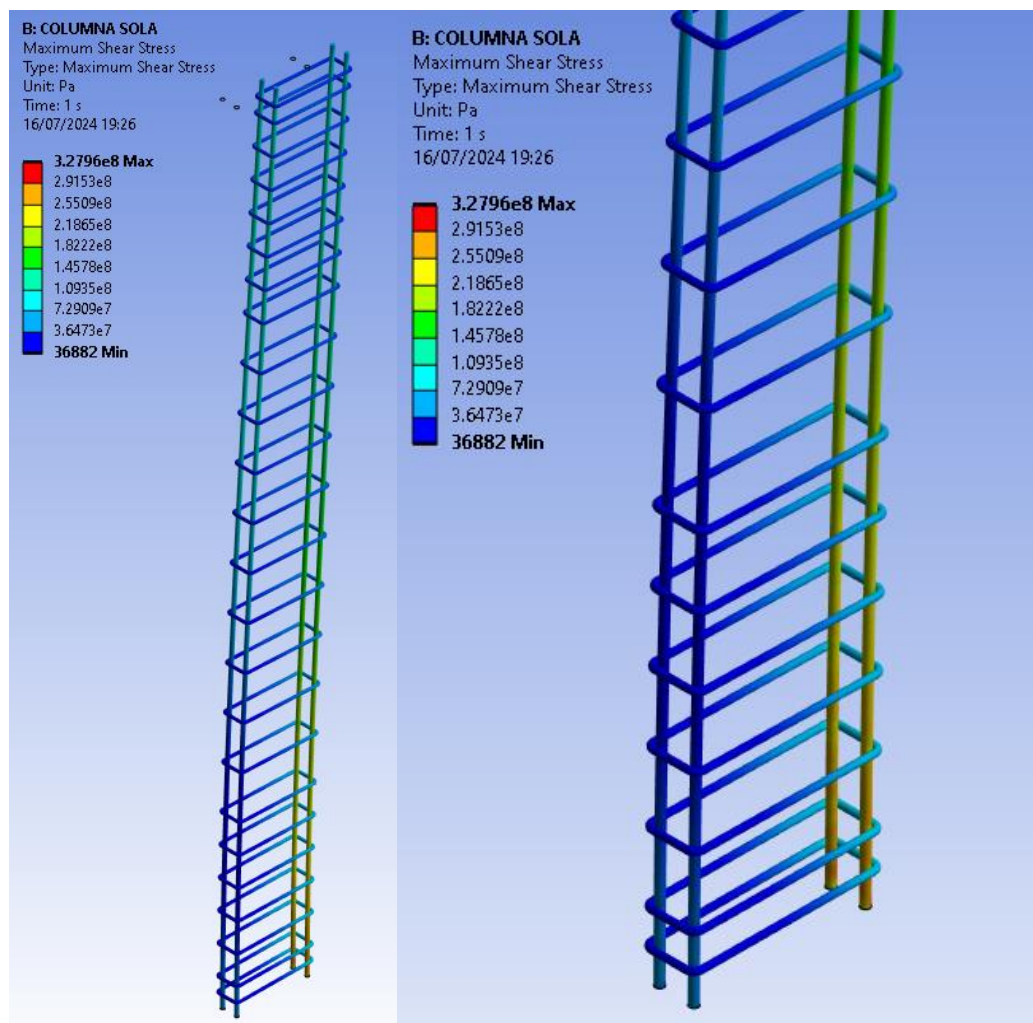
5.2.1. *Detalle en la estructura antigua*

Para evaluar los esfuerzos cortantes en el acero de refuerzo de la columna existente, se empleó el análisis de la data del máximo esfuerzo cortante de todos los elementos. Como resultado, en la Figura 58 se puede observar la distribución de dichos esfuerzos, su variación a lo largo del elemento y las zonas más críticas del análisis. La figura muestra que el acero tiene su zona crítica en la parte inferior trasera del elemento (donde llega a superar los 2600 kg/cm²). En esta zona, se puede apreciar también el trabajo del acero de los estribos (donde alcanzan ligeramente más de 650 kg/cm²), y que contribuyen significativamente en esta primera sección. Conforme se avanza hacia arriba, se observa un cambio en los esfuerzos principales, que pasan de estar concentrados en la zona inferior a distribuirse casi uniformemente en la zona superior. En esta sección superior, el acero de los estribos reduce su porcentaje de participación en la resistencia de la estructura, lo que indica una mejor distribución de los esfuerzos cortantes a lo largo de la columna.

Estas graficas corresponden al comportamiento típico y esperable en una columna estándar.

Figura 58.

Esfuerzos cortantes en el acero de la columna sin reforzar.

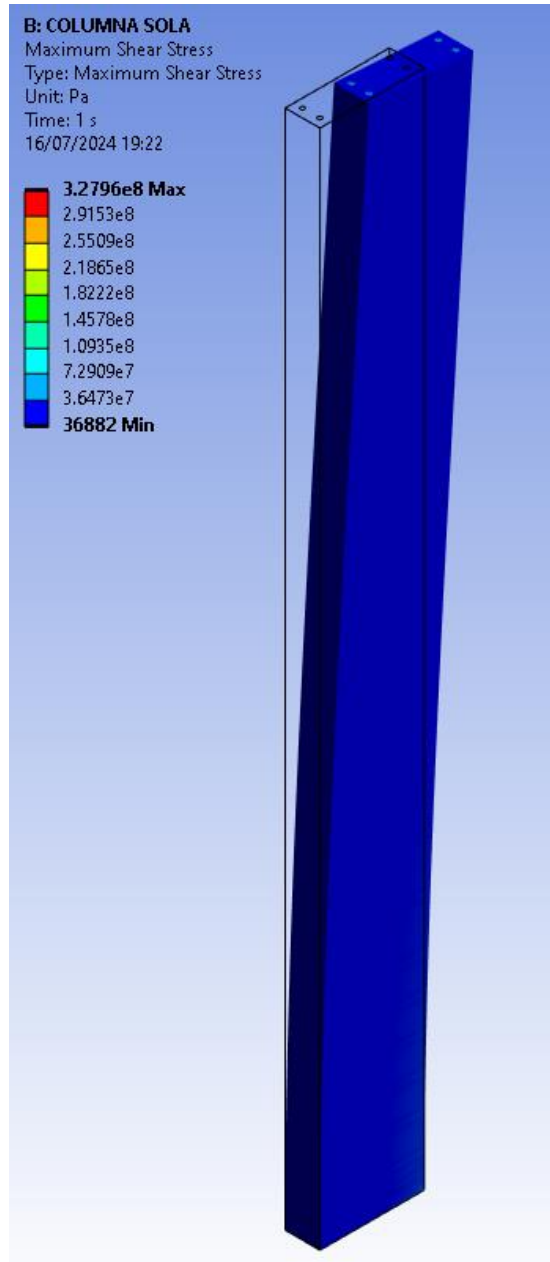


Por otro lado, al revisar los resultados obtenidos del concreto, la

Figura 59 muestra una distribución prácticamente uniforme a lo largo de todo el elemento. Esto coincide también con los resultados obtenidos en Etabs para el diagrama de fuerza cortante. Aunque la coloración es básicamente uniforme, al realizar la extracción de datos de los esfuerzos en distintas zonas se encuentra que el esfuerzo cortante máximo varía en un rango de 130 a 170 kg/cm², dependiendo del lugar donde se analice. Este análisis detallado comprueba el correcto comportamiento de cómo se distribuyen las cargas en el concreto.

Figura 59.

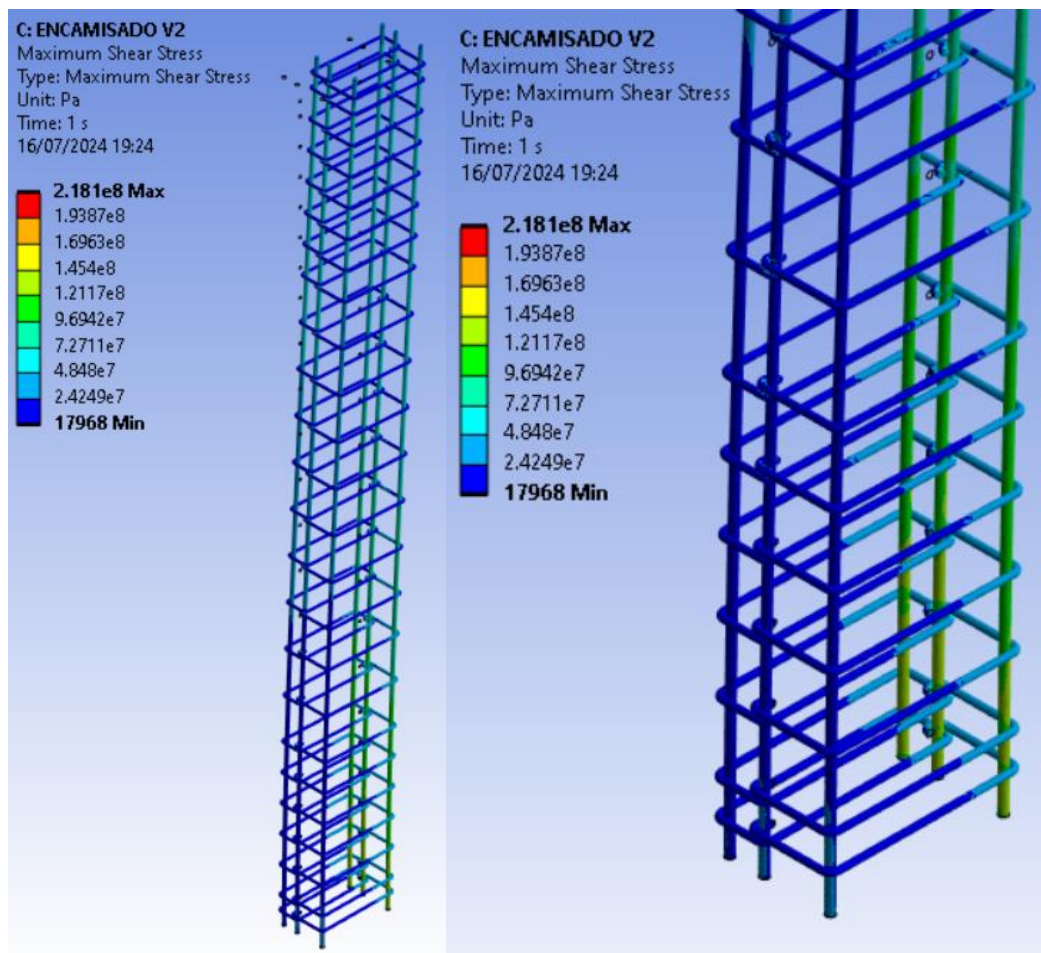
Esfuerzos cortantes en el concreto de la columna sin reforzar.



5.2.2. Detalle en la estructura reforzada

Figura 60.

Esfuerzos cortantes en el acero de la columna reforzada.



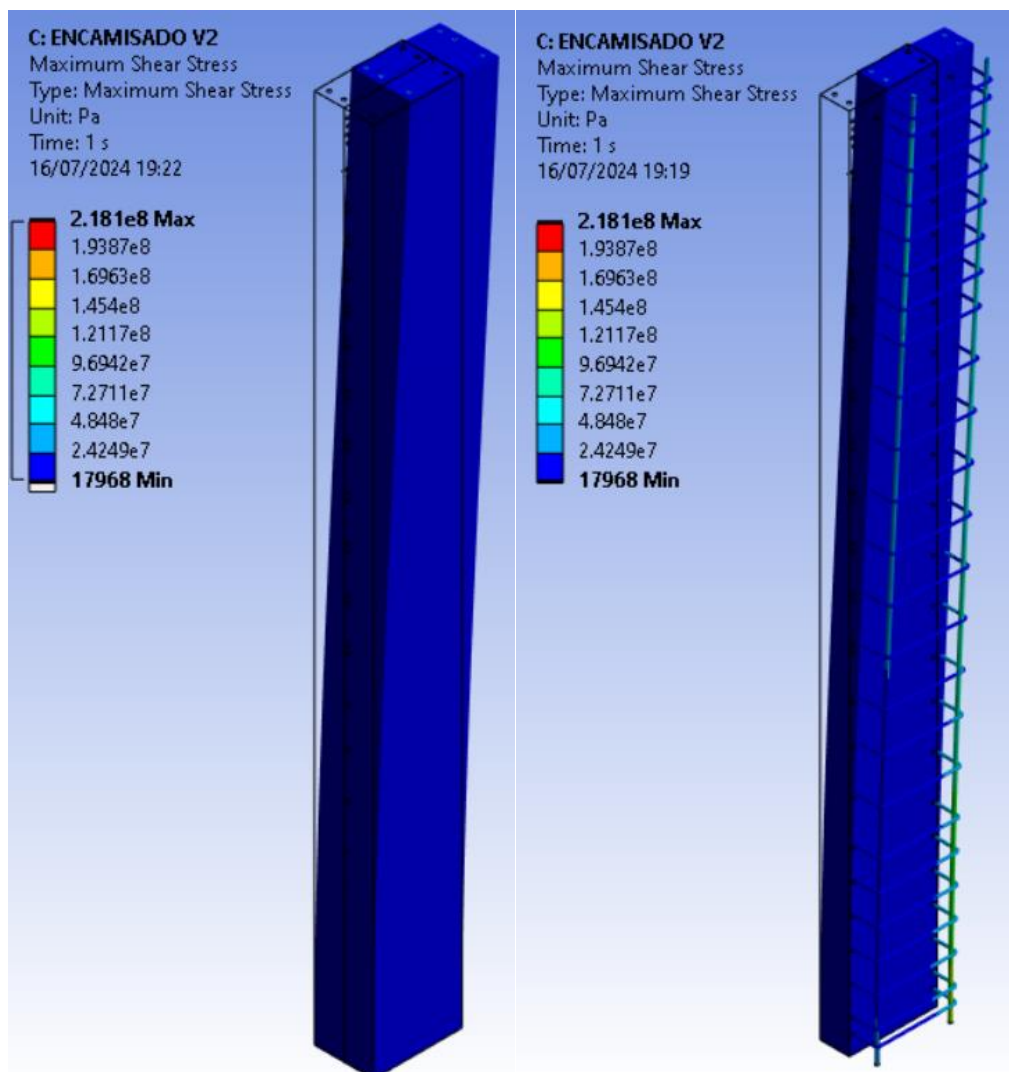
Después del proceso de reforzamiento y con el acero añadido tanto lateral como longitudinalmente, podemos apreciar los esfuerzos cortantes en todo el armazón. La Figura 60 muestra el detalle de estos esfuerzos, tanto del área completa como de la zona más crítica. Mientras que, en el caso sin refuerzo, el acero principal sobrepasaba los 2600 kg/cm², después del refuerzo el estrés de las varillas en las zonas críticas ronda los 1200 kg/cm², una reducción considerable y visualmente notoria en los colores de la leyenda. En cuanto a los estribos, estos también

presentan una reducción de carga debido a la mejor distribución de esta, con valores de 300 kg/cm^2 en la zona crítica. Esta información evidencia que el reforzamiento cumple su propósito, mejorando significativamente la distribución de los esfuerzos y la capacidad de resistencia de la estructura.

En general, y en similitud con el caso sin reforzamiento, el comportamiento del elemento es básicamente el esperado para estos casos.

Figura 61.

Esfuerzos cortantes en el concreto de la columna reforzada y detalle adicional.



Finalmente, al obtener las gráficas del concreto bajo los efectos de la fuerza cortante, notamos en la Figura 61 que, al igual que en el caso sin reforzar, la distribución de estos esfuerzos es prácticamente uniforme a lo largo de toda la estructura. Al revisar los elementos, se observa que dichos esfuerzos varían entre 40 y 70 kg/cm², valores que son aproximadamente la mitad de los obtenidos en el caso sin refuerzo.

Del lado derecho de la Figura 61 también se puede apreciar la interacción del acero del encamisado lateral con el concreto antiguo. Esta imagen muestra la capacidad de resistencia de estos dos elementos de forma directa, con el acero brindando una mayor contribución al resistir el esfuerzo cortante.

5.3. Vector principal de esfuerzos

Para reforzar el entendimiento del comportamiento del elemento estructural tipo columna, tanto en su condición libre (sin refuerzo) como en su condición encamisada (reforzada), se ha propuesto utilizar gráficos de tipo "vector principal del esfuerzo". Estos gráficos indican, mediante vectores coloreados, la dirección y magnitud de los esfuerzos principales en cualquier punto de la malla analizada. En el análisis tridimensional, se consideran tres tipos de esfuerzos principales: máximo, intermedio y mínimo.

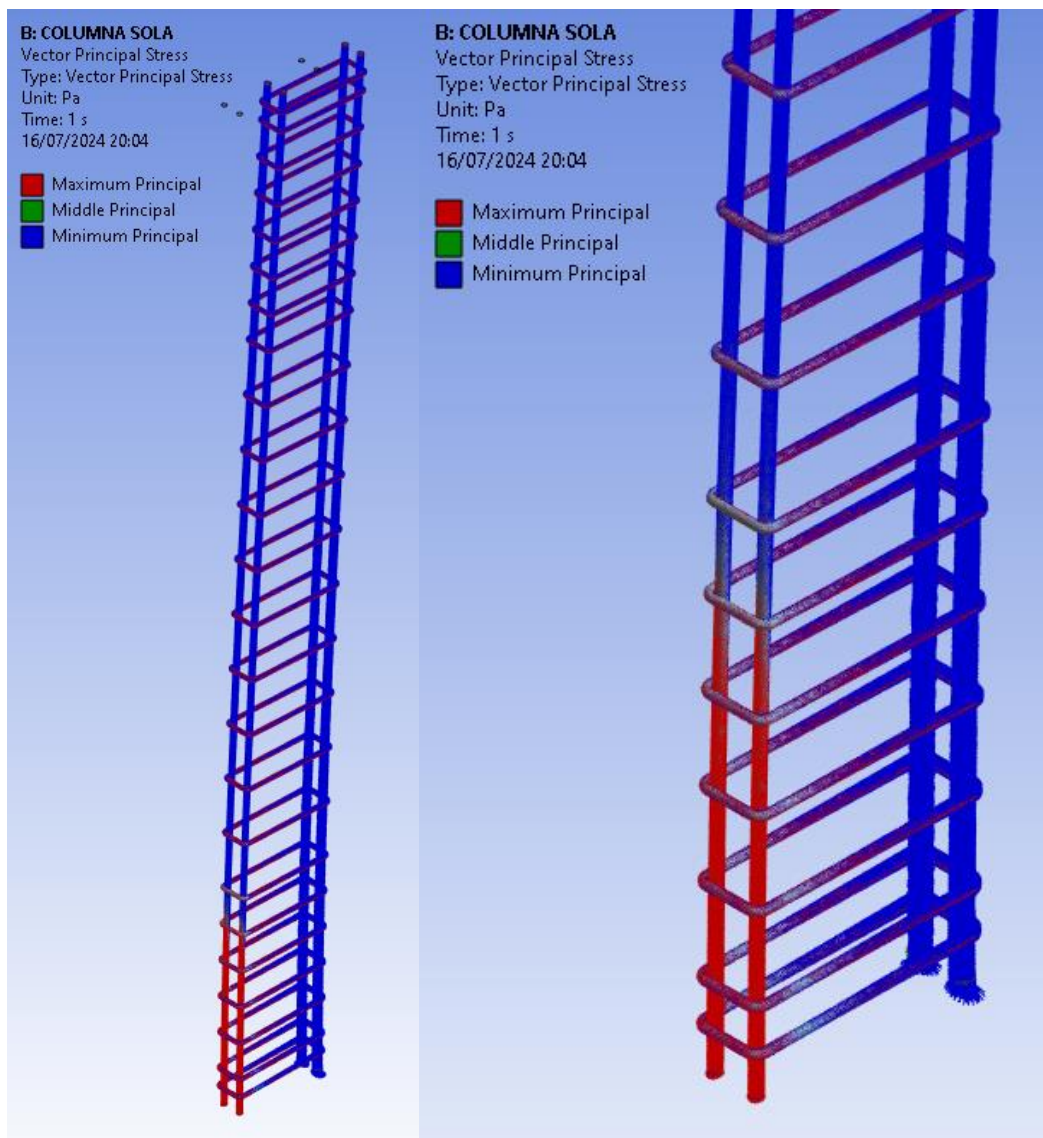
Estos tres tipos de esfuerzos principales son mutuamente perpendiculares, siendo uno de ellos predominante en cada punto de la malla. Cuando el esfuerzo principal se colorea de rojo, indica una mayor presencia de tensión en la malla y se le denomina "Máximo". Por otro lado, cuando el esfuerzo principal toma una coloración azul, denota efectos predominantes de compresión en la malla y se le denomina "Mínimo". Este término no debe confundirse con un valor mínimo cercano a cero, sino que se refiere al sentido negativo de la compresión. Los esfuerzos "intermedios" sirven para mantener la ortogonalidad entre los esfuerzos máximos y mínimos y no tienen una representación específica en estos gráficos.

Este tipo de imágenes es útil para corroborar el comportamiento de la estructura en su totalidad, proporcionando una visión clara y detallada de cómo se distribuyen y orientan los esfuerzos principales en la columna.

5.3.1. Detalle en la estructura antigua

Figura 62.

Vectores principales de esfuerzo en el acero de la columna sin reforzar.



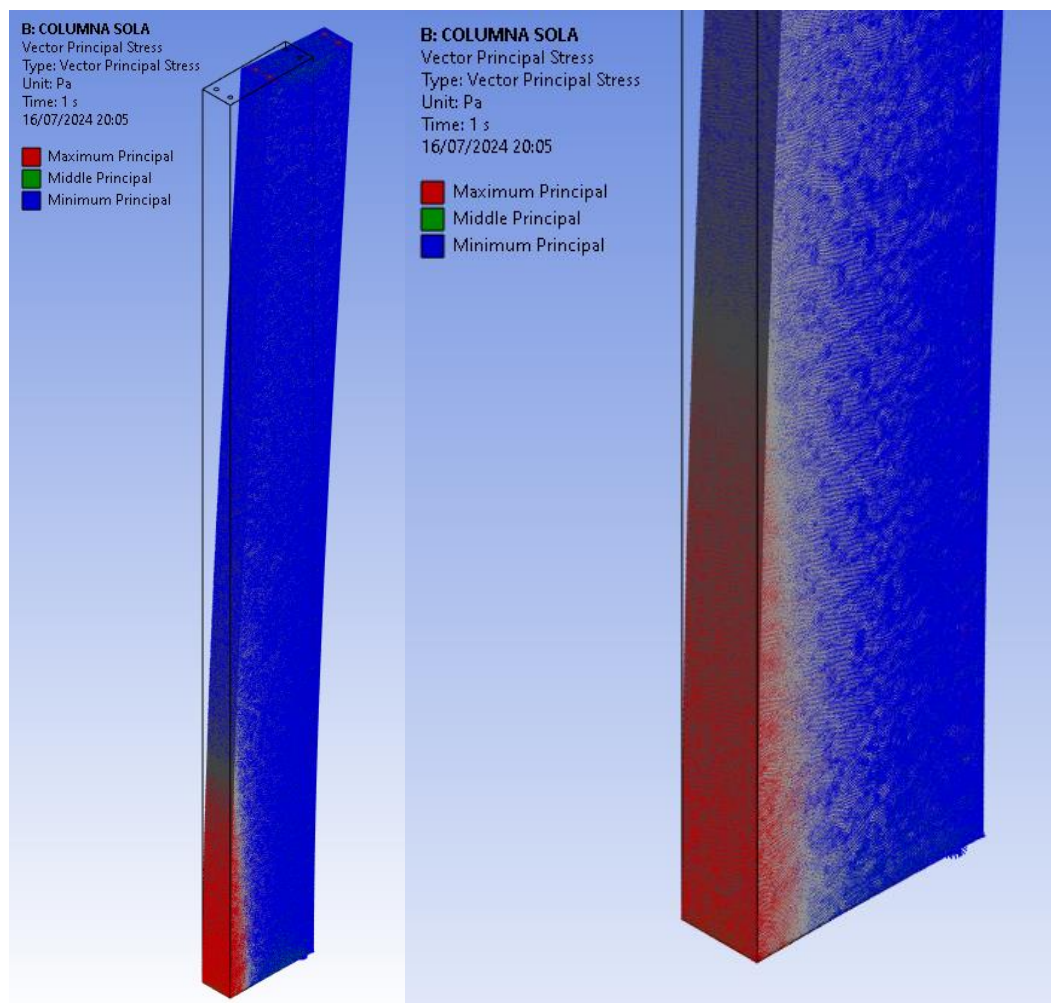
Al revisar la Figura 62, se presenta el acero de refuerzo de la estructura sin intervención, en su estado natural. Basándonos en la coloración de los vectores de esfuerzo principales, podemos afirmar lo siguiente: la zona del empotramiento principal, cercana a la base, es la que presenta mayor acumulación de vectores, tanto máximos en la zona de tracción como mínimos en el área comprimida. Esta acumulación se correlaciona con el comportamiento observado en una deformada típica.

La coloración en el acero principal es bastante definida, al igual que la densidad de vectores debido a los efectos de las cargas. Sin embargo, al revisar los estribos, se denota un comportamiento mixto donde conviven vectores máximos y mínimos. Estas zonas pueden considerarse críticas. La interpretación que se le da es que el acero de corte, al estar amarrando al principal, se somete a cargas de tensión que evitan el desencaje del acero principal. Simultáneamente, al estar al límite de la zona confinada del concreto, se presentan en algunas áreas vectores de esfuerzo mínimos. Esto indica una interacción compleja entre los esfuerzos de tensión y compresión, resaltando la importancia de los estribos en la distribución y resistencia a las cargas.

Al adentrarse en el comportamiento del elemento completo, considerando tanto el concreto como el acero, la Figura 63 muestra los resultados del análisis de los vectores principales de esfuerzo. En este caso, los comportamientos se corresponden con los observados en la figura anterior. Aquí también se aprecia una zona más cercana a la tracción en la base, mientras que el resto de las áreas están sometidas a compresión. Al hacer un acercamiento a la imagen, se observa claramente una zona de transición de vectores donde el tamaño de sus módulos se reduce (sin tonos rojos o azules), creando una brecha perceptible entre las diferentes zonas de compresión y tensión. Como es de suponer, el elemento de esta figura está más propenso a la compresión, ya que se trata de un bloque de concreto puro.

Figura 63.

Vectores principales de esfuerzo en el concreto de la columna sin reforzar.



5.3.2. *Detalle en la estructura reforzada*

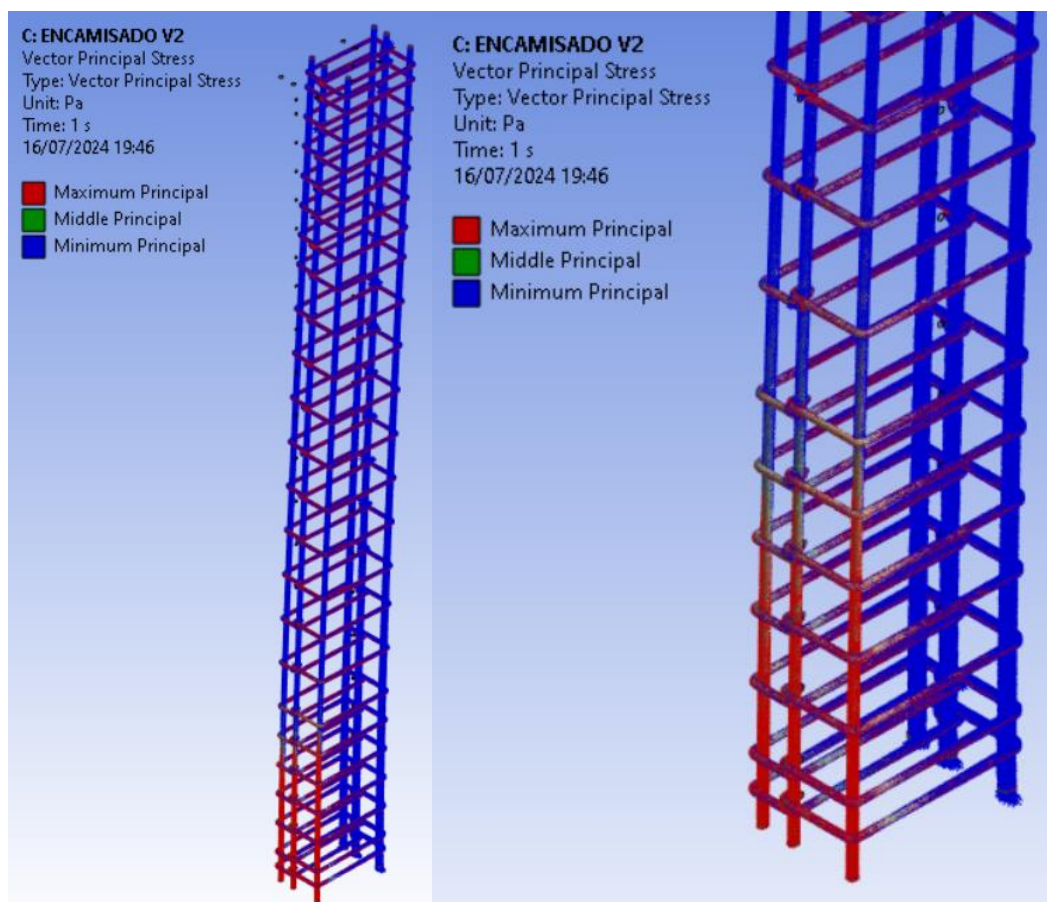
La nueva distribución del acero en la columna encamisada, según el análisis de los vectores principales de esfuerzo, ha favorecido la distribución de los aportes de resistencia (Figura 64). Esto ha resultado en una reducción de los esfuerzos en el acero principal, especialmente en la zona más sometida a tracción (cerca de la base). Como se puede apreciar, la magnitud de estos esfuerzos en la columna reforzada se ha reducido notablemente hasta la altura del cuarto estribo. En cambio,

en la columna sin reforzar, estos valores pico se presentaban hasta la altura del sexto estribo, contando desde la base.

En cuanto a los estribos, al igual que en el caso sin reforzar, presentan zonas críticas con esfuerzos de tracción y ligera compresión debido a los fenómenos previamente explicados. Aunque los esfuerzos en los estribos no representan un cambio significativo en el comportamiento de la columna reforzada por sí mismos, han sido esenciales para la correcta fijación del acero principal antiguo con el nuevo. Además, han contribuido a aumentar la zona de confinamiento, mejorando la capacidad de resistencia y estabilidad de la columna.

Figura 64.

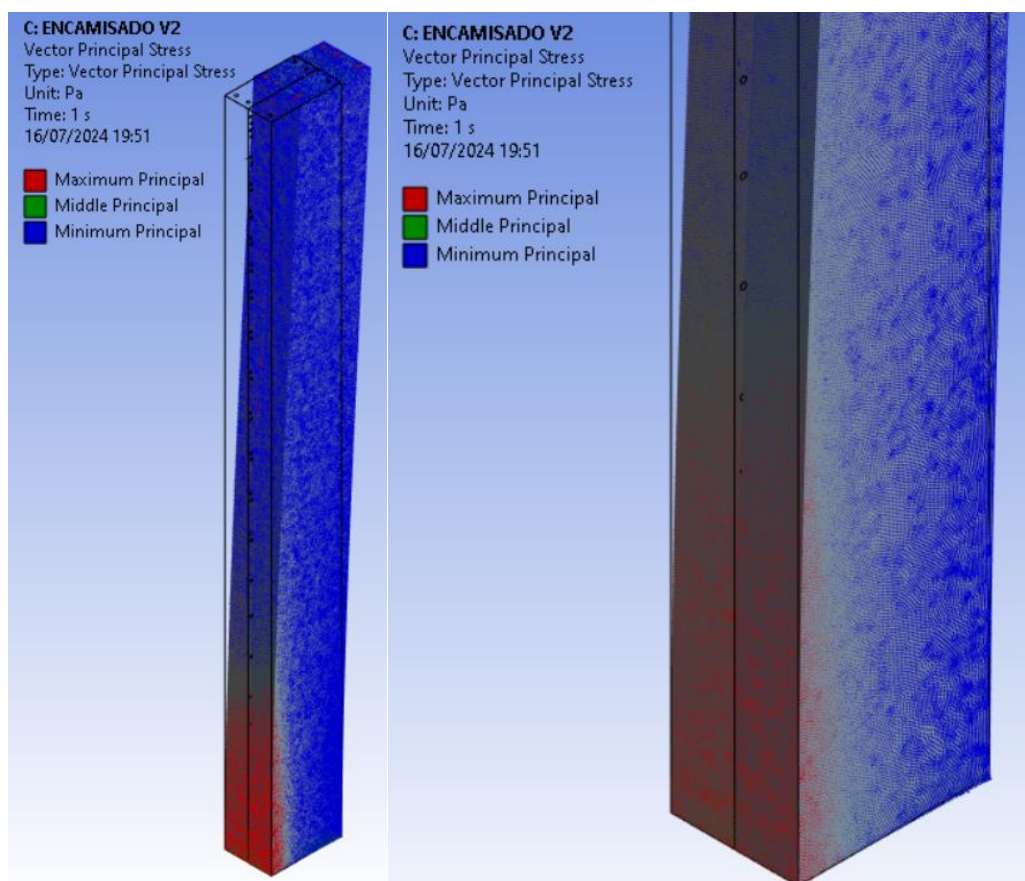
Vectores principales de esfuerzo en el acero de la columna reforzada.



Por otro lado, al revisar la columna encamisada desde el exterior, incorporando el concreto, se puede apreciar en la Figura 65 cómo se ha logrado reducir el efecto de los esfuerzos de tracción en la base, lo que beneficia al concreto, que es más susceptible a este tipo de esfuerzos. La reducción es bastante notoria en comparación con el caso sin reforzar mostrado en la Figura 63, aquí los módulos de los vectores se aplacan de forma más rápida. Esto hace que la franja de transición de esfuerzos mencionada en el caso sin reforzar tenga una sección más reducida, ya que los efectos de tracción están siendo mejor mitigados por el conjunto de la columna reforzada.

Figura 65.

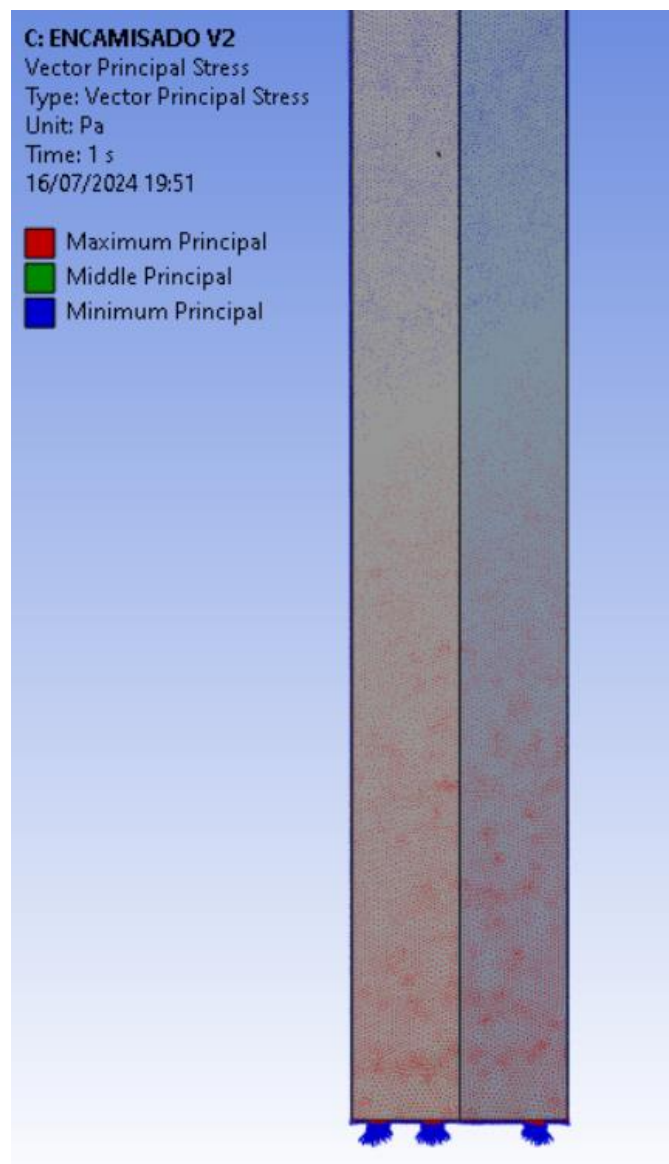
Vectores principales de esfuerzo en el concreto de la columna reforzada.



De manera similar, los esfuerzos son principalmente de compresión a lo largo de todo el bloque de la columna encamisada. Sin embargo, debido a la diferencia en la resistencia de los concretos, se puede apreciar que, aunque la colorimetría correspondiente a los efectos de tracción y compresión en el mismo nivel (de la zona existente y la reforzada), hay una tendencia en el lado reforzado que indica un comportamiento más puntual.

Figura 66.

Vista lateral de los vectores principales de esfuerzo del concreto del caso reforzado.



Precisamente este comportamiento es el que observamos en la Figura 66, donde se presenta una vista lateral de la columna reforzada. Aquí, la coloración de los vectores indica que el concreto de la zona reforzada está soportando más esfuerzo de compresión que el concreto antiguo de la columna. Esto se debe a la diferencia en la capacidad de resistencia entre ambos concretos (280 kg/cm² contra 210 kg/cm²).

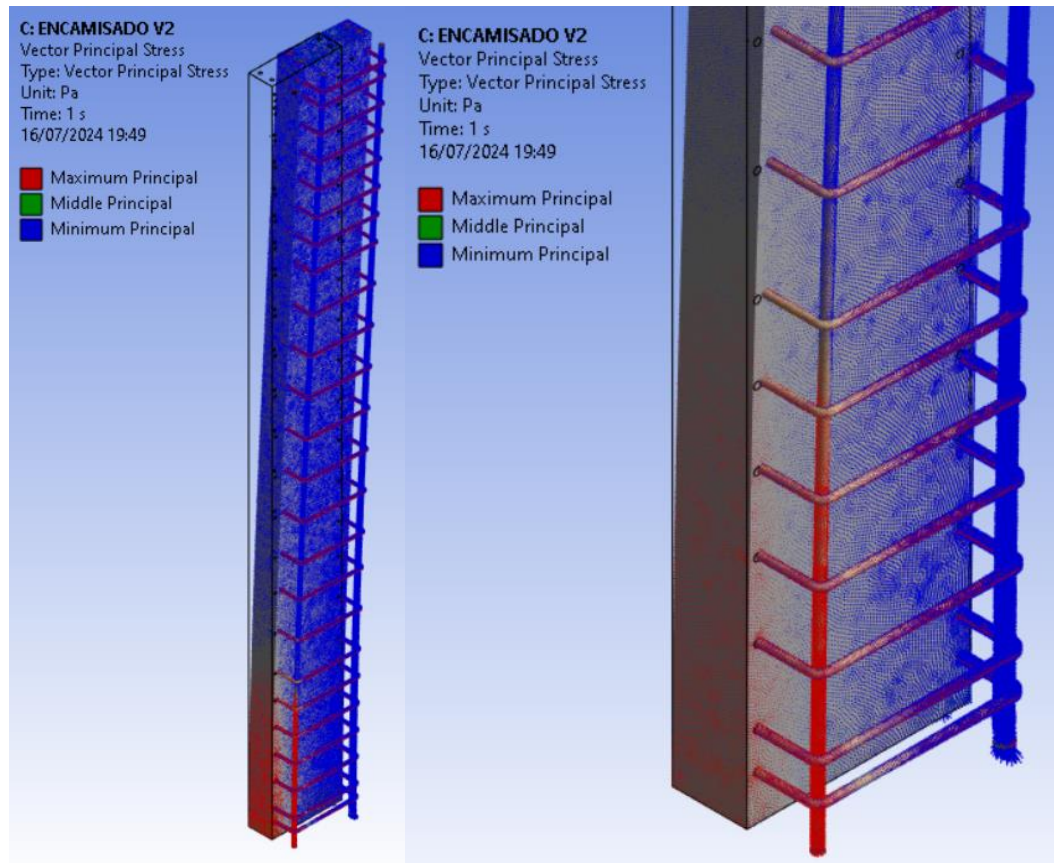
Si se retoma lo visto en la Figura 65, que representa los esfuerzos normales, la coloración azul sugiere que aparentemente se soporta el mismo esfuerzo normal en todo el elemento. Sin embargo, esta coloración está regida por una leyenda que considera desde los esfuerzos más grandes hasta los más pequeños. Los esfuerzos más grandes los recibe el acero, y debido a que estos son de una escala considerablemente mayor, no se logra apreciar la diferencia en resistencias a la compresión entre los concretos nuevo y antiguo porque la coloración abarca un espectro amplio de resistencias en el que se encuentran ambos valores.

En el caso de la gráfica de los vectores principales de esfuerzo, es más notorio este aporte de resistencia entre ambos concretos, ya que la magnitud del vector hace una diferencia más visual en cuanto a la densidad del color azul que representa la compresión. Esto resalta el mayor aporte de resistencia que brinda la zona reforzada.

Finalmente, en la Figura 67 se aprecia el comportamiento conjunto del concreto de la columna existente y el acero de refuerzo del encamisado. Se observa cómo los vectores de esfuerzo principal tienen una correlación mutua en las zonas de tracción y compresión. En el lado derecho de la figura, se nota que el concreto en compresión sufre un mayor aplastamiento en la zona donde se encuentran los estribos, debido a que el acero es más resistente.

Figura 67.

Interacción de los vectores principales del concreto existente y acero añadido.



Como comentario final, esta figura muestra una coloración de vectores menos tumultuosa en comparación con la Figura 63, donde no hay refuerzos que puedan generar una mejor redistribución de la carga y aliviar el esfuerzo general de la estructura. Esto destaca la efectividad del encamisado en mejorar la distribución de los esfuerzos y aumentar la capacidad de resistencia de la columna.

5.4. Comprobación de hipótesis

Conforme a los resultados obtenidos en el presente capítulo se procederá a comprobar la veracidad de las hipótesis establecidas al inicio de esta investigación, los detalles se encuentran en la Tabla a continuación:

Tabla 8.*Verificación de las hipótesis*

Hipótesis	Verificación	Detalles adicionales
<i>General</i>		
Establecer una metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS mejora la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024.	Comprobada	La metodología desarrollada con ANSYS permitió un análisis detallado y preciso del comportamiento estructural de columnas reforzadas mediante encamisado. Este software, gracias a su modelado tridimensional y mallado avanzado (hasta 2.5 millones de elementos), mostró cómo el encamisado mejora significativamente la resistencia estructural, redistribuye los esfuerzos internos y aumenta la rigidez, logrando una comprensión más profunda que otros softwares como SAP2000 y Etabs. Estos resultados confirman que la metodología propuesta mejora efectivamente la comprensión del reforzamiento estructural en columnas con déficits de resistencia.
<i>Específicas</i>		
El encamisado es efectivo para la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS.	Comprobada	La hipótesis se valida con los resultados de ANSYS, que evidencian cómo el encamisado mejora significativamente la resistencia estructural de las columnas. Los esfuerzos normales en el acero se redujeron hasta un 75% y en el concreto hasta un 47%, mientras que los esfuerzos cortantes también disminuyeron notablemente. Estas reducciones confirman la efectividad del encamisado para redistribuir las tensiones internas y mejorar la capacidad de carga de las columnas reforzadas, validando su utilidad como técnica de reforzamiento.

<p>Optimizar los parámetros de diseño del encamisado maximiza el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales.</p>	<p>Comprobada</p>	<p>La optimización de los parámetros de diseño del encamisado, como la compatibilidad entre concretos (210 kg/cm² y 280 kg/cm²) y la configuración de estribos, se validó mediante los análisis en ANSYS. Los resultados mostraron un comportamiento casi monolítico de las columnas reforzadas, mayor rigidez y un desempeño estructural superior bajo condiciones de carga aumentada. Además, la metodología demostró ser efectiva incluso cuando el refuerzo se aplicó únicamente en uno de los lados de la columna, destacando la adaptabilidad del encamisado para escenarios con restricciones espaciales. Estas mejoras confirman que optimizar el diseño del encamisado maximiza su eficacia y permite su aplicación en condiciones prácticas desafiantes, cumpliendo plenamente la hipótesis planteada.</p>
---	--------------------------	--

CONCLUSIONES

Conforme al objetivo general de la investigación, como de los específicos, se concluye lo siguiente:

- La metodología numérica implementada con el software de elementos finitos volumétricos ANSYS proporciona una herramienta avanzada para analizar el comportamiento estructural de columnas de concreto reforzadas mediante encamisado. A diferencia de softwares como SAP2000 y Etabs, que utilizan elementos finitos lineales y simplificados, ANSYS permite un análisis tridimensional detallado mediante un mallado con millones de elementos (2.5 millones y 2 millones en este estudio), capturando con precisión la interacción entre el concreto y el acero tanto en su estado inicial como reforzado. Esto permite determinar con claridad los esfuerzos más importantes y su distribución, consolidando esta metodología como un enfoque preciso y efectivo para comprender el impacto del reforzamiento estructural
- El encamisado estructural ha demostrado ser efectivo en la redistribución de los esfuerzos internos y en la mejora de la resistencia de las columnas de concreto armado. Los análisis realizados en ANSYS evidencian que el encamisado permite disminuir los esfuerzos normales a compresión en el acero hasta en un 75% (de 2500 kg/cm² a 620 kg/cm²) y en el concreto en un 47% (de 260 kg/cm² a 140 kg/cm²). De manera similar, los esfuerzos cortantes se redujeron significativamente: en el acero, de 2600 kg/cm² a 1200 kg/cm² (55%), y en el concreto, de 150 kg/cm² a 60 kg/cm² (60%). Estos resultados destacan que el encamisado no solo alivia los esfuerzos internos, sino que también incrementa la rigidez y robustez del elemento estructural, validando

su efectividad como método de reforzamiento. Adicionalmente, se debe destacar que el análisis numérico es una idealización simplificada; por ello, en la práctica constructiva se deben seguir las recomendaciones de diseño descritas detalladamente en el capítulo II, como el adecuado anclaje del acero, la forma de los estribos, el vaciado del concreto, y especialmente el tratamiento de la conexión entre los concretos, el curado adecuado y el apuntalamiento para evitar sobre deformaciones.

- Los parámetros de diseño del encamisado, como el uso de concretos con resistencias poco divergentes (210 kg/cm^2 para el concreto existente y 280 kg/cm^2 para el encamisado), favorecen un comportamiento conjunto casi monolítico. Este diseño incrementa la resistencia ante cargas de gravedad y laterales, y al ser modelado en ANSYS, se evidenció su flexibilidad para adaptarse a diversas configuraciones de reforzamiento, ya sea completo o como se ha visto en este estudio, de manera parcial (a un solo lado de la columna reforzada). Además, el análisis numérico destacó los vectores principales de esfuerzo como indicadores clave para evaluar el desempeño de las columnas, simplificando la comparación entre casos reforzados y no reforzados. Esto consolida el encamisado como una técnica versátil y eficiente para mejorar tanto los elementos individuales como la estructura principal que los contiene.

RECOMENDACIONES

- A los investigadores y profesionales en ingeniería estructural se les recomienda profundizar en el uso de ANSYS para modelar y analizar el reforzamiento de columnas de concreto mediante encamisado. Este software permite un análisis detallado de millones de elementos finitos, lo cual es ideal para proyectos con condiciones estructurales complejas o en edificaciones históricas donde es necesario evaluar la compatibilidad entre materiales antiguos y modernos. ANSYS brinda una visualización precisa de la distribución de esfuerzos y del comportamiento estructural bajo carga aumentada, consolidándose como una herramienta avanzada para comprender el impacto de las técnicas de reforzamiento.
- A las entidades reguladoras y de conservación de patrimonio se les recomienda considerar el uso de ANSYS como herramienta de validación en proyectos de reforzamiento estructural, especialmente en construcciones patrimoniales y en estructuras con déficits de resistencia. Las entidades pueden utilizar este software para verificar la eficacia de metodologías de encamisado o similares, dado que permite simular con exactitud la interacción entre concreto y refuerzos adicionales. Este análisis numérico puede respaldar la creación de normativas que garanticen intervenciones seguras y optimizadas en edificaciones antiguas y vulnerables.

- A las empresas y especialistas en construcción se les sugiere que los profesionales encargados de la implementación del encamisado sigan las recomendaciones de construcción detalladas en el capítulo II, incluyendo el anclaje, la forma de los estribos, el vaciado y curado del concreto. Dado que el análisis numérico es una idealización, la construcción debe ser precisa para reflejar los resultados obtenidos en programas de modelado como ANSYS. Además, es fundamental que los modeladores en ANSYS garanticen la compatibilidad de la malla de elementos finitos, evitando superposiciones en la geometría 3D para asegurar la validez y confiabilidad de los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 318. (2019). Aci 318 - 19. In *American Concrete Institute*.
- Aguilar, G. (2017). (99+) *LA AUTOCONSTRUCCIÓN EN EL PERÚ* | *LinkedIn*.
<https://www.linkedin.com/pulse/la-autoconstrucción-en-el-perú-gianfranco-aguilar/?originalSubdomain=es>
- Al-Amin, S., & Ahsan, R. (2012). Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Column under Monotonic Lateral Loads. *International Journal of Computer Applications*, 42(3). <https://doi.org/10.5120/5676-6412>
- Alanazi, A., Upton, G., Adegoke, M., Shokouhian, M., & Head, M. (2019). Experimental Investigation of Residual Compressive Strength of Partially Confined Concrete Column Retrofitted Using CFRP Wrap. *Structures Congress 2019: Buildings and Natural Disasters - Selected Papers from the Structures Congress 2019*. <https://doi.org/10.1061/9780784482223.022>
- Al-Rousan, R. Z., & Alkhawaldeh, A. (2021). Numerical simulation of the influence of bond strength degradation on the behavior of reinforced concrete beam-column joints externally strengthened with FRP sheets. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00567. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00567>
- American Society of Civil Engineers. (2002). *Cargas de diseño en estructuras durante su construcción (37-02)*.
- Amulya, V. (2017). Behaviour of RCC Column Strengthened using Steel Jacketing. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, V(IX). <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.9200>
- Ansys, Inc. (2011). *ANSYS FLUENT Theory Guide (14.0)*.
- Barour, S., & Zergua, A. (2021). Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear using carbon fiber reinforced polymer materials. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 19(2), 339–357. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2020-0099>
- Bernal, C. (2016). Metodología de la investigación. In *Pearson* (Vol. 4).

- B.G. Charalambidi, T. C. R. & A. I. K. (2012). Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Columns Seismically Strengthened Through Partial FRP Jacketing. *15Wcee*.
- Caglar, N., Sichko, A., Sezen, H., Bicici, E., Demir, A., & Farah, A. F. (2020). *Interface slip model for reinforced concrete columns strengthened with concrete jacketing*. <https://doi.org/10.7764/RDLC.19.2.180>
- Chopra, A. K. (2014). DINÁMICA DE ESTRUCTURAS. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 4).
- Duarte, H. S., Barbosa, M., & Farias, B. M. de. (2021). Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Estudo de Caso. In *Engenharia na prática: construção e inovação vol.3*. <https://doi.org/10.47879/ed.ep.2021250p41>
- Espinosa, E. (2017). Capeco: El 70% de viviendas en Lima son informales y vulnerables a un terremoto. *Presidente de CAPECO, Fuente:And*.
- Hernández, Fernández, & Baptista. (2014). Metodología de la investigación: Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y Pilar Baptista Lucio (6a. ed). *McGraw-Hill*.
- Horseen. (2023). *Refuerzo sísmico con tejido de fibra de carbono*. <https://es.horseen.com/index/solution/content/id/442?page=3>
- INEI. (2014). *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/en-mas-de-3-millones-de-viviendas-predominan-paredes-de-materiales-vulnerables-a-movimientos-teluricos-7583/>
- José Rafael Yépez. (2019). *COMPORTAMIENTO DE COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS MEDIANTE EL INCREMENTO DE SU SECCIÓN TRANSVERSAL*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Júlio, E. N. B. S., Branco, F. A. B., & Silva, V. D. (2005). Reinforced concrete jacketing - Interface influence on monotonic loading response. *ACI Structural Journal*, 102(2).
- Júlio, E. S., Branco, F., & Silva, V. D. (2003). Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/pse.140>

- Kim, C.-G., Park, H.-G., & Eom, T.-S. (2019). Cyclic Load Test and Shear Strength Degradation Model for Columns with Limited Ductility Tie Details. *Journal of Structural Engineering*, 145(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002254](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002254)
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. In *Portland Cement Association: Vol. Primera Ed.*
- La República. (2023). *Trujillo: voraz incendio reduce a cenizas chifa y afecta áreas de un gimnasio LRND | Sociedad | La República.* <https://larepublica.pe/sociedad/2023/04/14/trujillo-voraz-incendio-reduce-a-cenizas-chifa-y-afecta-areas-de-un-gimnasio-lrnd-291606>
- Laguna, E. (2016). *Análisis de materiales y técnicas de reforzamiento estructural aplicados sobre bienes culturales.* https://www.academia.edu/34808494/An%C3%A1lisis_de_materiales_y_t%C3%A9cnicas_de_reforzamiento_estructural_aplicados_sobre_bienes_culturales
- Mahmud, R., & Ahmed, K. S. (2017). Interface dependency of reinforced concrete jacketing for column strengthening. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 173(1). <https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00124>
- Metwally, K. (2019). *Effect of confinement with lateral reinforcement on normal & high strength concrete columns.*
- Mirlisenna, G. (2016). Método de elementos finitos: ¿qué es? 2016-01-22, 1.
- MVCS. (2018). Norma E.030 Diseño Sismorresistente. In *El Peruano.*
- Najafgholipour, M. A., Dehghan, S. M., Dooshabi, A., & Niroomandi, A. (2017). Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections with Governing Joint Shear Failure Mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(7), 1200–1225. <https://doi.org/10.1590/1679-78253682>
- Naji, A. J., Al-Jelawy, H. M., Saadon, S. A., & Ejel, A. T. (2021). Rehabilitation and strengthening techniques for reinforced concrete columns: Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1895(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012049>

- Nasersaeed, H. (2011). Evaluation of Behavior and Seismic Retrofitting of RC Structures by Concrete Jacket. *Asian Journal of Applied Sciences*, 4, 211–228. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2011.211.228>
- Necevska-Cvetanovska, G., Roshi, A., & Bojadjieva, J. (2019). SEISMIC STRENGTHENING OF EXISTING RC BUILDINGS STRUCTURES USING CONCRETE JACKETING AND FRP MATERIALS. *Elektronički Časopis Građevinskog Fakulteta Osijek*, 10, 68–80. <https://doi.org/10.13167/2019.19.7>
- OCDE. (2023). *Estudios Económicos de la OCDE: Perú 2023*. OECD. <https://doi.org/10.1787/f67c8432-es>
- Ong, K. C. G., Kog, Y. C., Yu, C. H., & Sreekanth, A. P. V. (2004). Jacketing of reinforced concrete columns subjected to axial load. *Magazine of Concrete Research*, 56(2). <https://doi.org/10.1680/macr.2004.56.2.89>
- Pawar, V. S., & Pawar, P. M. (2016). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Column with ANSYS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(6).
- Rahman, H., Donchev, T., & Petkova, D. (2019). Modelling the behaviour of concrete shear walls with BFRP reinforcement. *MATEC Web of Conferences*, 289, 09002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928909002>
- Raza, S., Khan, M. K. I., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L. (2019). Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: State-of-the-art review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/su11113208>
- Russell C. Hibbeler. (2010). ESTÁTICA. In *Ingeniería mecánica estática* (Vol. 12).
- Serquen., Ing. W. R. (2018). Ingeniería Geotécnica, Suelos y Cimentaciones. In *Patología Estructural y Funcional*.
- Sika Colombia S.A.S. (2017). *Reforzamiento de estructuras de concreto (técnicas y materiales)*.

- Srihari, P., Premalatha, J., & Vengadeshwari, R. S. (2017). Finite element modeling and analysis of RC beams with GFRP and steel bars. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(9).
- Tumialan, G. (2014, December 6). *Seminario ACI 562 Nueva norma para la evaluación, reparación y rehabilitación de edificaciones de concreto*.
- Valdivia, G. (2023). *Desafíos y oportunidades para la construcción en el Perú - Infobae*. <https://www.infobae.com/america/opinion/2022/06/01/desafios-y-oportunidades-para-la-construccion-en-el-peru/>
- Vizcaíno Zúñiga, P. I., Cedeño Cedeño, R. J., & Maldonado Palacios, I. A. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658
- Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J. (2016). Fundamental Principles That Govern Retrofitting of Reinforced Concrete Columns by Steel and FRP Jacketing: *Http://Dx.Doi.Org/10.1260/136943306778812769*, 9(4), 507–532. <https://doi.org/10.1260/136943306778812769>

ANEXOS

Anexo 01

Comprobación del diseño estructural de la columna sin reforzamiento

ANÁLISIS Y DISEÑO DE COLUMNAS POR FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL

01. DISEÑO POR FLEXOCOMPRESIÓN

a. DATOS DE DISEÑO

Codigo =	CRF	Descrip. =	COLUMNA SIN REFORZAR
b =	10.00 cm	Ag =	300.00 cm ²
d =	30.00 cm	Ae =	5.05 cm ²
factor =	1.00	Ae(f) =	3.30 cm ²
h =	2.50 m	fc =	210.00 kg/cm ²
rec. =	2.00 cm	fy =	4200.00 kg/cm ²

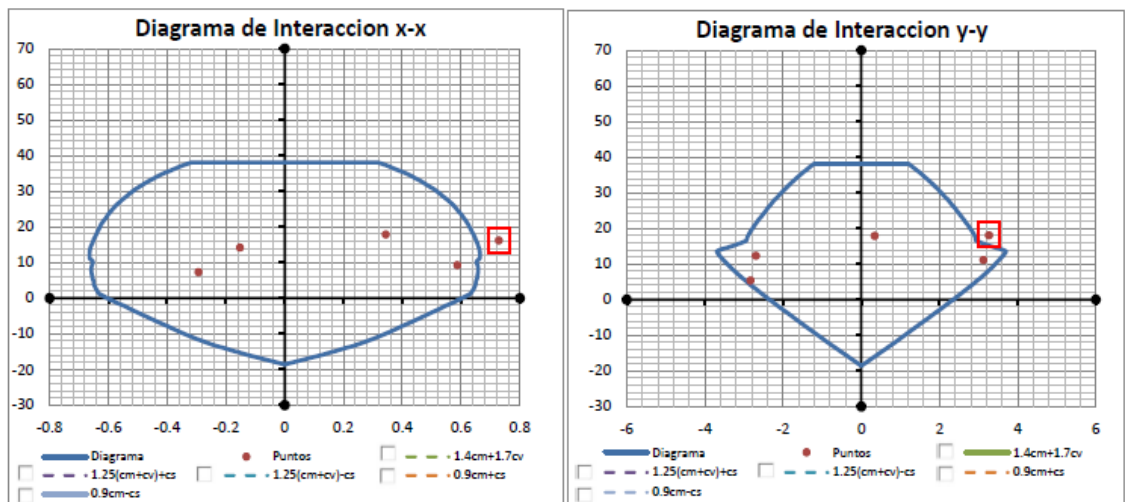
b. CARGAS ACTUANTES EN LA COLUMNA

DIRECCION X-X			DIRECCION Y-Y		
P _{cm} =	9.20 tn		P _{cm} =	9.20 tn	
P _{cv} =	2.94 tn		P _{cv} =	2.94 tn	
P _{ce} =	1.00 tn		P _{ce} =	2.55 tn	
M _{cm} =	0.16 tn-m		M _{cm} =	0.16 tn-m	
M _{cv} =	0.07 tn-m		M _{cv} =	0.07 tn-m	
M _{ce} =	0.44 tn-m		M _{ce} =	2.95 tn-m	
V _{cm} =	0.10 tn		V _{cm} =	0.94 tn	
V _{cv} =	0.04 tn		V _{cv} =	0.04 tn	
V _{ce} =	0.31 tn		V _{ce} =	1.94 tn	

c. COMBINACIONES DE DISEÑO

Combinaciones de Diseño	DIRECCION X-X			DIRECCION Y-Y		
	P _{ux} (tn)	M _{ux} (tn-m)	V _{ux} (tn)	P _{uy} (tn)	M _{uy} (tn-m)	V _{uy} (tn)
1.4cm+1.7cv	17.57	0.34	0.21	17.57	0.35	1.37
1.25(cm+cv)+cs	16.17	0.73	0.49	15.05	3.27	3.16
1.25(cm+cv)-cs	14.17	-0.15	-0.13	12.29	-2.69	-0.72
0.9cm+cs	9.25	0.59	0.40	11.16	3.13	2.75
0.9cm-cs	7.25	-0.29	-0.22	5.40	-2.83	-1.10

d. DIAGRAMA DE INTERACCION DE LA COLUMNA DIRECCION X-Y



e. DISEÑO POR FLEXOCOMPRESION BIAXIAL

De acuerdo a las recomendaciones del Capítulo 10.18. Flexión Biaxial - EOGO - RNE. Alternativamente se podrá usar la siguiente ecuación aproximada, aplicable a columnas cuadradas o rectangulares con armadura longitudinal simétrica.

$$\frac{1}{F_n} = \frac{1}{F_{nx}} + \frac{1}{F_{ny}} - \frac{1}{F_{no}}$$

Combinaciones de Diseño	DIRECCION X-X				DIRECCION Y-Y			
	Fux (tn)	Mux (tn-m)	ex (m)	φFnx (tn)	Fuy (tn)	Muy (tn-m)	ey (m)	φFny (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	0.34	0.0192	26.00	17.87	0.35	0.0193	38.10
1.25(cm+cv)+cs	16.17	0.73	0.0451	14.17	18.05	3.27	0.1812	17.00
1.25(cm+cv)-cs	14.17	-0.15	-0.0107	16.17	12.29	-2.69	-0.2189	15.00
0.9cm+cs	9.28	0.59	0.0632	9.28	11.16	3.13	0.2803	14.00
0.9cm-cs	7.28	-0.29	-0.0403	13.00	5.40	-2.83	-0.5245	5.00

Combinaciones de Diseño	φFu (tn)	φFnx (tn)	φFny (tn)	φFno (tn)	1 / φFu (1/tn)	<>	Suma (1/tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	12.51	26.00	38.10	38.10	0.0799	>	0.0385	ok
1.25(cm+cv)+cs	11.32	14.17	17.00	38.10	0.0884	<	0.1031	Fail
1.25(cm+cv)-cs	9.92	16.17	15.00	38.10	0.1008	<	0.1023	Fail
0.9cm+cs	6.50	9.28	14.00	38.10	0.1539	>	0.1529	ok
0.9cm-cs	5.10	13.00	5.00	38.10	0.1962	<	0.2507	Fail

02. DISEÑO POR FUERZA CORTANTE

a. Verificación de diseño por fuerza cortante en la dirección x-x

Combinaciones de Diseño	Fu (tn)	Nu/Ag (kg/cm2)	<>	fc / 20 (kg/cm2)	Vc (tn)	Vu max (tn)	<>	Vux (tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	17.87	59.57	>	10.50	3.28	7.37	>	0.21	ok
1.25(cm+cv)+cs	16.17	53.90	>	10.50	3.19	7.37	>	0.49	ok
1.25(cm+cv)-cs	14.17	47.23	>	10.50	3.08	7.37	>	0.13	ok
0.9cm+cs	9.28	30.93	>	10.50	2.81	7.37	>	0.40	ok
0.9cm-cs	7.28	24.27	>	10.50	2.70	7.37	>	0.22	ok

Combinaciones de Diseño	Vs (tn)	Nº de Estribos	Av (cm2)	Separac. (cm)
1.4cm+1.7cv	4.08	1 φ3/8"	1.42	40.89
1.25(cm+cv)+cs	4.18	1 φ3/8"	1.42	39.98
1.25(cm+cv)-cs	4.29	1 φ3/8"	1.42	38.95
0.9cm+cs	4.56	1 φ3/8"	1.42	36.66
0.9cm-cs	4.66	1 φ3/8"	1.42	35.80

b. Verificación de diseño por fuerza cortante en la dirección y-y

Combinaciones de Diseño	Fu (tn)	Nu/Ag (kg/cm2)	<>	fc / 20 (kg/cm2)	Vc (tn)	Vu max (tn)	<>	Vuy (tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	17.87	59.57	>	10.50	3.28	7.37	>	1.37	ok
1.25(cm+cv)+cs	18.05	60.16	>	10.50	3.29	7.37	>	3.16	ok
1.25(cm+cv)-cs	12.29	40.96	>	10.50	2.98	7.37	>	0.72	ok
0.9cm+cs	11.16	37.20	>	10.50	2.92	7.37	>	2.78	ok
0.9cm-cs	5.40	18.00	>	10.50	2.60	7.37	>	1.10	ok

Combinaciones de Diseño	Vs (tn)	Nº de Estribos	Av (cm2)	Separac. (cm)
1.4cm+1.7cv	4.08	1 φ3/8"	1.42	40.89
1.25(cm+cv)+cs	4.07	1 φ3/8"	1.42	40.99

03. DISEÑO POR CAPACIDAD

a. Verificación de diseño por capacidad en la dirección x-x

Combinaciones de Diseño	Pu (tn)	ϕMn (tn-m)	Mn (tn-m)	Mpr (tn-m)	Vpr (tn)	Nu/Ag (kg/cm ²)	<>	fc / 20 (kg/cm ²)	Vc (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	0.64	0.91	1.14	0.82	59.57	>	10.50	3.28
1.25(cm+cv)+cs	16.17	0.64	0.91	1.14	0.82	53.90	>	10.50	3.19
1.25(cm+cv)-cs	14.17	0.65	0.93	1.16	0.83	47.23	>	10.50	3.08
0.9cm+cs	9.28	0.59	0.84	1.05	0.75	30.93	>	10.50	2.81
0.9cm-cs	7.28	0.65	0.93	1.16	0.83	24.27	>	10.50	2.70

Combinaciones de Diseño	Vu max (tn)	<>	Vpr (tn)	Condicion	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (m)
1.4cm+1.7cv	7.37	>	0.82	ok	4.08	1 ϕ 3/8"	1.42	40.89
1.25(cm+cv)+cs	7.37	>	0.82	ok	4.18	1 ϕ 3/8"	1.42	39.98
1.25(cm+cv)-cs	7.37	>	0.83	ok	4.29	1 ϕ 3/8"	1.42	38.95
0.9cm+cs	7.37	>	0.75	ok	4.56	1 ϕ 3/8"	1.42	36.66
0.9cm-cs	7.37	>	0.83	ok	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	35.80

Ubicación de los Estribos	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (cm)
Parte superior	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050
Parte sup-cent	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte central	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	Rto@0.15
Parte inf-cent	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte inferior	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050

b. Verificación de diseño por capacidad en la dirección y-y

Combinaciones de Diseño	Pu (tn)	ϕMn (tn-m)	Mn (tn-m)	Mpr (tn-m)	Vpr (tn)	Nu/Ag (kg/cm ²)	<>	fc / 20 (kg/cm ²)	Vc (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	2.92	4.17	5.21	3.72	59.57	>	10.50	3.28
1.25(cm+cv)+cs	18.05	2.85	4.07	5.09	3.64	60.16	>	10.50	3.29
1.25(cm+cv)-cs	12.29	3.59	5.13	6.41	4.58	40.96	>	10.50	2.98
0.9cm+cs	11.16	3.13	4.47	5.59	3.99	37.20	>	10.50	2.92
0.9cm-cs	5.40	2.83	4.04	5.05	3.61	18.00	>	10.50	2.60

Combinaciones de Diseño	Vu max (tn)	<>	Vpr (tn)	Condicion	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (m)
1.4cm+1.7cv	7.37	>	3.72	ok	4.08	1 ϕ 3/8"	1.42	40.89
1.25(cm+cv)+cs	7.37	>	3.64	ok	4.07	1 ϕ 3/8"	1.42	40.99
1.25(cm+cv)-cs	7.37	>	4.58	ok	4.39	1 ϕ 3/8"	1.42	38.04
0.9cm+cs	7.37	>	3.99	ok	4.45	1 ϕ 3/8"	1.42	37.51
0.9cm-cs	7.37	>	3.61	ok	4.77	1 ϕ 3/8"	1.42	35.02

Ubicación de los Estribos	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (cm)
Parte superior	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050
Parte sup-cent	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte central	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	Rto@0.15
Parte inf-cent	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte inferior	4.66	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050

Anexo 02

Comprobación del diseño estructural de la columna reforzada

ANÁLISIS Y DISEÑO DE COLUMNAS POR FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL

01. DISEÑO POR FLEXOCOMPRESIÓN

a. DATOS DE DISEÑO

Codigo =	ORF	Descrip. =	COLUMNA REFORZADA
b =	20.00 cm	A _g =	600.00 cm ²
d =	30.00 cm	A _s =	7.62 cm ²
factor =	1.00	A _{s(f)} =	4.95 cm ²
h =	2.80 m	f _c =	245.00 kg/cm ²
rec. =	2.50 cm	f _y =	4200.00 kg/cm ²

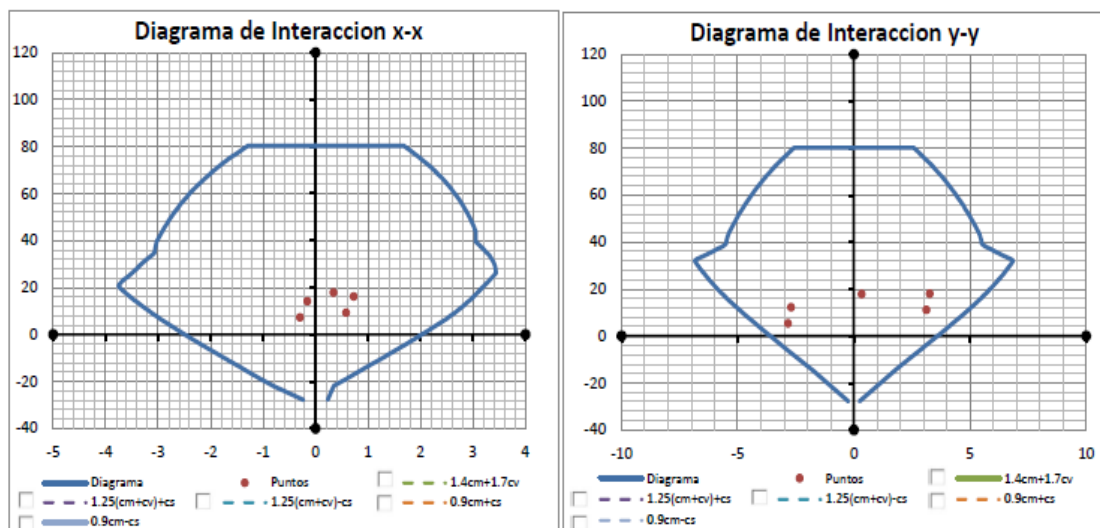
b. CARGAS ACTUANTES EN LA COLUMNA

DIRECCION X-X			DIRECCION Y-Y		
F _{cm} =	9.20 tn		F _{cm} =	9.20 tn	
F _{cv} =	2.94 tn		F _{cv} =	2.94 tn	
F _{cs} =	1.00 tn		F _{cs} =	2.55 tn	
M _{cm} =	0.16 tn-m		M _{cm} =	0.16 tn-m	
M _{cv} =	0.07 tn-m		M _{cv} =	0.07 tn-m	
M _{cs} =	0.44 tn-m		M _{cs} =	2.95 tn-m	
V _{cm} =	0.10 tn		V _{cm} =	0.94 tn	
V _{cv} =	0.04 tn		V _{cv} =	0.04 tn	
V _{cs} =	0.31 tn		V _{cs} =	1.94 tn	

c. COMBINACIONES DE DISEÑO

Combinaciones de Diseño	DIRECCION X-X			DIRECCION Y-Y		
	F _{ux} (tn)	M _{ux} (tn-m)	V _{ux} (tn)	F _{uy} (tn)	M _{uy} (tn-m)	V _{uy} (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	0.34	0.21	17.87	0.35	1.37
1.25(cm+cv)+cs	16.17	0.73	0.49	18.05	3.27	3.16
1.25(cm+cv)-cs	14.17	-0.15	-0.13	12.29	-2.69	-0.72
0.9cm+cs	9.25	0.59	0.40	11.16	3.13	2.75
0.9cm-cs	7.25	-0.29	-0.22	5.40	-2.53	-1.10

d. DIAGRAMA DE INTERACCION DE LA COLUMNA DIRECCION X-Y



e. DISEÑO POR FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL

De acuerdo a las recomendaciones del Capítulo 10.18. Flexión Biaxial - EOGO - RNE. Alternativamente se podrá usar la siguiente ecuación aproximada, aplicable a columnas cuadradas o rectangulares con armadura longitudinal simétrica.

$$\frac{1}{F_n} = \frac{1}{F_{nx}} + \frac{1}{F_{ny}} - \frac{1}{F_{no}}$$

Combinaciones de Diseño	DIRECCION X-X				DIRECCION Y-Y			
	F _{ux} (tn)	M _{ux} (tn-m)	e _x (m)	φF _{nx} (tn)	F _{uy} (tn)	M _{uy} (tn-m)	e _y (m)	φF _{ny} (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	0.34	0.0192	80.23	17.87	0.35	0.0193	80.23
1.25(cm+cv)+cs	16.17	0.73	0.0451	60.52	18.05	3.27	0.1812	36.54
1.25(cm+cv)-cs	14.17	-0.15	-0.0107	80.23	12.29	-2.69	-0.2189	31.67
0.9cm+cs	9.28	0.59	0.0632	48.22	11.16	3.13	0.2803	22.14
0.9cm-cs	7.28	-0.29	-0.0403	58.36	5.40	-2.83	-0.5245	9.27

Combinaciones de Diseño	φF _u (tn)	φF _{nx} (tn)	φF _{ny} (tn)	φF _{no} (tn)	1 / φF _u (1/tn)	<>	Suma (1/tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	12.51	80.23	80.23	80.24	0.0799	>	0.0125	ok
1.25(cm+cv)+cs	11.32	60.52	36.54	80.24	0.0884	>	0.0314	ok
1.25(cm+cv)-cs	9.92	80.23	31.67	80.24	0.1008	>	0.0316	ok
0.9cm+cs	6.50	48.22	22.14	80.24	0.1539	>	0.0534	ok
0.9cm-cs	5.10	58.36	9.27	80.24	0.1962	>	0.1125	ok

02. DISEÑO POR FUERZA CORTANTE

a. Verificación de diseño por fuerza cortante en la dirección x-x

Combinaciones de Diseño	F _u (tn)	Nu/Ag (kg/cm ²)	<>	f _c / 20 (kg/cm ²)	V _c (tn)	V _u max (tn)	<>	V _{ux} (tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	17.87	29.78	>	12.25	6.04	14.78	>	0.21	ok
1.25(cm+cv)+cs	16.17	26.95	>	12.25	5.94	14.78	>	0.49	ok
1.25(cm+cv)-cs	14.17	23.61	>	12.25	5.82	14.78	>	0.13	ok
0.9cm+cs	9.28	15.47	>	12.25	5.53	14.78	>	0.40	ok
0.9cm-cs	7.28	12.13	<	12.25	5.41	14.78	>	0.22	ok

Combinaciones de Diseño	V _s (tn)	Nº de Estribos	Á _v (cm ²)	Separac. (cm)
1.4cm+1.7cv	8.74	1φ3/8"	1.42	18.77
1.25(cm+cv)+cs	8.84	1φ3/8"	1.42	18.55
1.25(cm+cv)-cs	8.96	1φ3/8"	1.42	18.31
0.9cm+cs	9.25	1φ3/8"	1.42	17.73
0.9cm-cs	9.37	1φ3/8"	1.42	17.51

b. Verificación de diseño por fuerza cortante en la dirección y-y

Combinaciones de Diseño	F _u (tn)	Nu/Ag (kg/cm ²)	<>	f _c / 20 (kg/cm ²)	V _c (tn)	V _u max (tn)	<>	V _{uy} (tn)	Condicion
1.4cm+1.7cv	17.87	29.78	>	12.25	6.04	14.78	>	1.37	ok
1.25(cm+cv)+cs	18.05	30.08	>	12.25	6.05	14.78	>	3.16	ok
1.25(cm+cv)-cs	12.29	20.48	>	12.25	5.71	14.78	>	0.72	ok
0.9cm+cs	11.16	18.60	>	12.25	5.64	14.78	>	2.78	ok
0.9cm-cs	5.40	9.00	<	12.25	5.30	14.78	>	1.10	ok

Combinaciones de Diseño	V _s (tn)	Nº de Estribos	Á _v (cm ²)	Separac. (cm)
1.4cm+1.7cv	8.74	1φ3/8"	1.42	18.77
1.25(cm+cv)+cs	8.73	1φ3/8"	1.42	18.79

1.25(cm+av)-cs	9.07	1 ϕ 3/8"	1.42	18.08
0.9cm+cs	9.14	1 ϕ 3/8"	1.42	17.95
0.9cm-cs	9.48	1 ϕ 3/8"	1.42	17.30

03. DISEÑO POR CAPACIDAD

a. Verificación de diseño por capacidad en la dirección x-x

Combinaciones de Diseño	Pu (tn)	ϕ Mn (tn-m)	Mn (tn-m)	Mpr (tn-m)	Vpr (tn)	Nu/Ag (kg/cm ²)	<>	Fc / 20 (kg/cm ²)	Vc (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	3.18	4.54	5.68	4.06	29.78	>	12.25	6.04
1.25(cm+av)+cs	16.17	2.96	4.23	5.29	3.78	26.95	>	12.25	5.94
1.25(cm+av)-cs	14.17	3.38	4.83	6.04	4.31	23.61	>	12.25	5.82
0.9cm+cs	9.28	3.00	4.29	5.36	3.83	15.47	>	12.25	5.53
0.9cm-cs	7.28	2.95	4.21	5.27	3.76	12.13	<	12.25	5.41

Combinaciones de Diseño	Vu max (tn)	<>	Vpr (tn)	Condicion	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (m)
1.4cm+1.7cv	14.78	>	4.06	ok	8.74	1 ϕ 3/8"	1.42	18.77
1.25(cm+av)+cs	14.78	>	3.78	ok	8.84	1 ϕ 3/8"	1.42	18.55
1.25(cm+av)-cs	14.78	>	4.31	ok	8.96	1 ϕ 3/8"	1.42	18.31
0.9cm+cs	14.78	>	3.83	ok	9.25	1 ϕ 3/8"	1.42	17.73
0.9cm-cs	14.78	>	3.76	ok	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	17.51

Ubicación de los Estribos	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (cm)
Parte superior	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050
Parte sup-cent	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte central	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	Rto@0.15
Parte inf-cent	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte inferior	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050

b. Verificación de diseño por capacidad en la dirección y-y

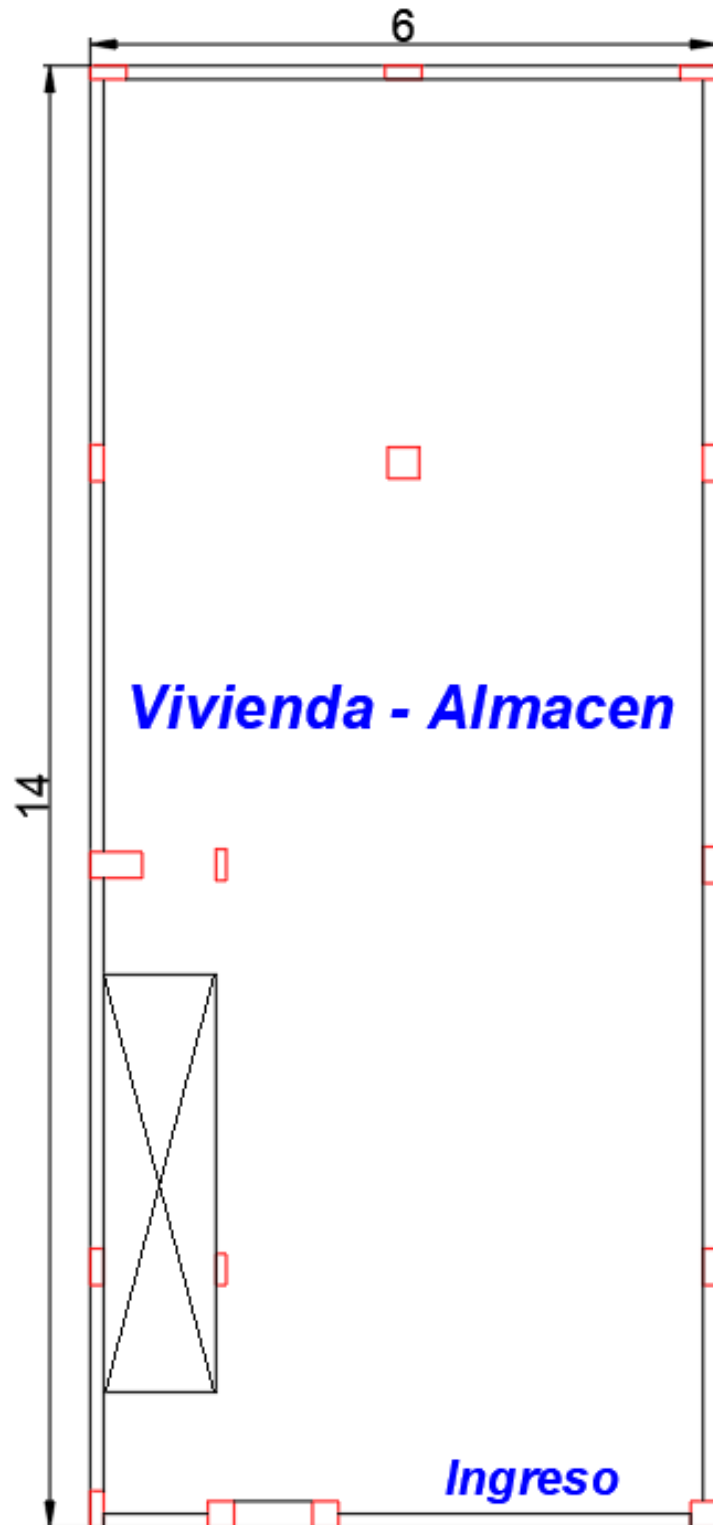
Combinaciones de Diseño	Pu (tn)	ϕ Mn (tn-m)	Mn (tn-m)	Mpr (tn-m)	Vpr (tn)	Nu/Ag (kg/cm ²)	<>	Fc / 20 (kg/cm ²)	Vc (tn)
1.4cm+1.7cv	17.87	5.73	8.19	10.23	7.31	29.78	>	12.25	6.04
1.25(cm+av)+cs	18.08	5.83	8.33	10.41	7.44	30.08	>	12.25	6.05
1.25(cm+av)-cs	12.29	5.12	7.31	9.14	6.53	20.48	>	12.25	5.71
0.9cm+cs	11.16	4.95	7.07	8.84	6.31	18.60	>	12.25	5.64
0.9cm-cs	5.40	4.21	6.01	7.52	5.37	9.00	<	12.25	5.30

Combinaciones de Diseño	Vu max (tn)	<>	Vpr (tn)	Condicion	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (m)
1.4cm+1.7cv	14.78	>	7.31	ok	8.74	1 ϕ 3/8"	1.42	18.77
1.25(cm+av)+cs	14.78	>	7.44	ok	8.73	1 ϕ 3/8"	1.42	18.79
1.25(cm+av)-cs	14.78	>	6.53	ok	9.07	1 ϕ 3/8"	1.42	18.08
0.9cm+cs	14.78	>	6.31	ok	9.14	1 ϕ 3/8"	1.42	17.95
0.9cm-cs	14.78	>	5.37	ok	9.48	1 ϕ 3/8"	1.42	17.30

Ubicación de los Estribos	Vs (tn)	N° de Estribos	Av (cm ²)	Separac. (cm)
Parte superior	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050
Parte sup-cent	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte central	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	Rto@0.15
Parte inf-cent	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	3@0.100
Parte inferior	9.37	1 ϕ 3/8"	1.42	1@0.050

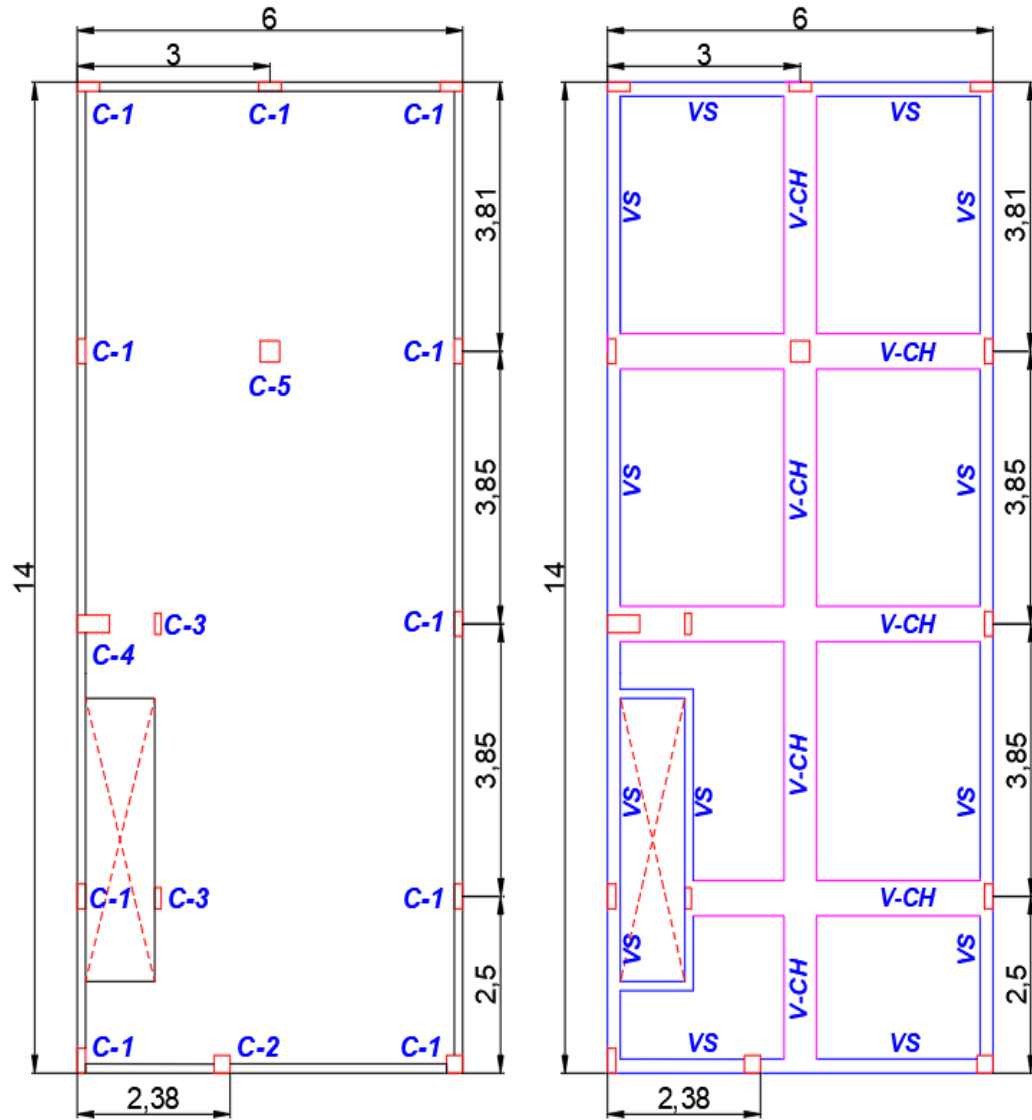
Anexo 03

Plano de arquitectura de la edificación.



Anexo 04

Planos de elementos estructurales de la edificación.



Anexo 05

Puntualización de limitaciones.

1. Sobre las propiedades mecánicas de los materiales, módulo de elasticidad del concreto, la no realización de ensayos, por ser una tesis de reforzamiento de estructura real.

Aunque existen fórmulas para aproximar el módulo de elasticidad del concreto, en esta investigación se ha considerado pertinente utilizar la base estadística proporcionada por el software ANSYS. Este programa integra datos empíricos obtenidos a partir de diversos ensayos específicos con materiales, lo que permite obtener resultados más cercanos a los valores reales y, a su vez, alineados con los valores sugeridos por las fórmulas de cálculo más comúnmente utilizadas.

La resistencia estimada del concreto existente es de 210 kg/cm², un valor que representa el estándar habitual en las construcciones de la región y del país. Si bien sería ideal contar con muestras de núcleos extraídos (diamantinas) para determinar con precisión la resistencia, las dimensiones de la columna dificultan esta opción. Una diamantina requiere un diámetro mínimo de 5 cm y una longitud de 10 cm, y su extracción comprometería la integridad de la columna, que ya presenta un área reducida de 10 x 20 cm. Además, para obtener un valor estadísticamente confiable, se necesitarían múltiples muestras, lo cual agravaría el impacto sobre la estructura ya deficiente.

En cuanto al uso del esclerómetro como alternativa, en la región de Piura, donde se realiza la investigación, no se han encontrado empresas ni laboratorios que ofrezcan el servicio de alquiler de este equipo. Por lo tanto, aunque el valor exacto de la resistencia a compresión no se pueda determinar experimentalmente, se asume que no debería desviarse significativamente del valor estimado de 210 kg/cm².

2. En cuanto a la doblez de los ganchos de los estribos empleados para reforzamiento, en concordancia con la norma E.060 y ACI 318.

En cuanto a la situación de los estribos, en la presente investigación estos han sido modelados en 3D considerando un área de contacto mínima con el acero principal de refuerzo, excluyendo las mechas. Esta aproximación se planteó con el propósito de minimizar posibles problemas en el mallado del modelo, ya que superficies más complejas, como las generadas por las mechas anguladas dentro del concreto, incrementan significativamente el riesgo de errores en la malla.

Por otro lado, aunque algunos estudios han explorado el uso de dobleces no convencionales fuera de los estándares normativos con resultados prometedores (Necevska-Cvetanovska et al., 2019), lo más recomendable es que, en los procesos de ejecución de trabajos de reforzamiento, se sigan las disposiciones de la NTP E.060 y el ACI 318-19. Estas normativas especifican que las mechas deben tener un ángulo de 135° y una longitud recta mínima equivalente a 6 veces el diámetro de la barra. El cumplimiento de estas especificaciones no solo garantiza el buen comportamiento del estribo, sino que también asegura la correcta colocación del concreto, evitando defectos como las cangrejas.

APÉNDICE

I. *Matriz de consistencia cuantitativa*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS
<p>1. INTERROGANTE PRINCIPAL</p> <p>¿De qué manera la metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS puede mejorar la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024?</p> <p>2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS</p> <p>a) ¿Se puede validar la efectividad del encamisado en la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS?</p> <p>b) ¿Cómo optimizar los parámetros de diseño del encamisado para maximizar el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales?</p>	<p>1. OBJETIVO GENERAL</p> <p>Establecer una metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS puede mejorar la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024.</p> <p>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>a) Validar la efectividad del encamisado en la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS.</p> <p>b) Optimizar los parámetros de diseño del encamisado para maximizar el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales.</p>	<p>1. HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>Establecer una metodología de análisis con el software de elementos finitos ANSYS mejora la comprensión estructural del reforzamiento por encamisado de columnas de concreto armado con déficits de resistencia por el aumento de las solicitaciones de carga en la ciudad de Piura, 2024.</p> <p>2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>a) El encamisado es efectivo para la mejora de la resistencia estructural de columnas de concreto armado mediante el análisis de los principales esfuerzos internos con el modelado numérico en ANSYS.</p> <p>b) Optimizar los parámetros de diseño del encamisado maximiza el desempeño estructural de las columnas en condiciones de carga aumentada, considerando las limitaciones derivadas de la ubicación de los elementos estructurales.</p>

VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA	RECOMENDACIONES
<p>1. VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Metodología de análisis numérico usando ANSYS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indicadores: -Tipo de modelado de la estructura. -Tipo de análisis estructural. •Escala de medición: Nominal <p>2. VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Refuerzo estructural de columnas de concreto armado.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indicadores: -Esfuerzos en el acero. -Esfuerzos en el concreto. •Escala de medición: De razón. 	<ul style="list-style-type: none"> - TIPO DE INVESTIGACIÓN Cuantitativa. - DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Descriptiva. - ÁMBITO DE ESTUDIO Reforzamiento de estructuras de concreto armado. - POBLACIÓN Columnas de concreto armado en edificaciones con necesidad de reforzamiento estructural. - MUESTRA Columna de vivienda con déficit de resistencia en la ciudad de Piura. - TÉCNICAS DE RECOLECCION DE DATOS Tesis relacionadas, artículos científicos y repositorios online. - INSTRUMENTOS ANSYS, Etabs, Microsoft Office. 	<p>-A los investigadores y profesionales en ingeniería estructural, utilizar ANSYS como herramienta principal para el análisis de elementos estructurales complejos, especialmente en situaciones de reforzamiento no convencionales o en edificaciones históricas. Este software permite modelar con alta precisión la interacción entre materiales, identificar la distribución de esfuerzos y optimizar las soluciones de diseño.</p> <p>-A las entidades reguladoras y de conservación patrimonial, incorporar el análisis numérico basado en ANSYS en normativas y proyectos de reforzamiento estructural. Esto garantizará que las metodologías utilizadas en estructuras vulnerables sean validadas mediante simulaciones avanzadas, promoviendo intervenciones seguras, adaptables y basadas en evidencia técnica.</p> <p>-A las empresas y especialistas en construcción, seguir estrictamente las recomendaciones constructivas para el encamisado, como el adecuado anclaje, la disposición de estribos, el vaciado y curado del concreto, y el apuntalamiento de la estructura. Estas prácticas son clave para reflejar los resultados del análisis numérico en la ejecución real y evitar problemas estructurales durante el proceso de reforzamiento.</p>
<p>Relevancia de la investigación CONTRIBUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN AL LOGRO DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS): Industria, innovación e infraestructuras (9), Ciudades y comunidades sostenibles (11)</p>		