

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Análisis comparativo entre el encamisado de concreto armado y el uso de CFRP como métodos de reforzamiento estructural en columnas

Tesis para obtener el título profesional de INGENIERO CIVIL

AUTOR

Marcell Hasser Tudela Laura

ASESOR

Dr. Luis Miguel Morán Yáñez

Lima, octubre 2022

Declaración jurada de autenticidad

Yo, LUIS MIGUEL MORAN YAÑEZ, docente de la Facultad de CIENCIAS E INGENIERIA de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL ENCAMISADO DE CONCRETO ARMADO Y EL USO DE CFRP COMO MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN COLUMNAS, del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) MARCELL HASSER TUDELA LAURA, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 13/12/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y confirmo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio alguno.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 13 de diciembre del 2022

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Morán Yáñez, Luis Miguel</u>	
DNI: 06118148	Firma
ORCID: 0000-0003-0695-8829	



Resumen

Actualmente, es común encontrar obras de reforzamiento y ampliación en el sector construcción, tales obras requieren de una gama de reforzamientos para los diversos elementos estructurales que se tenga. En particular, el encamisado de concreto armado es el tipo de reforzamiento más usual cuando se requiere prolongar la vida útil de una columna, pues esta alternativa se considera la opción más viable y práctica. Sin embargo, existen otros métodos de reforzamiento como por ejemplo el polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP), el cual viene siendo un método bastante utilizado en los últimos años en el Perú. El presente trabajo de investigación realizó la comparación estructural, técnica y económica de estos dos métodos de reforzamiento en columnas, a fin de tener un respaldo cuando se decida optar por uno de estos tipos de reforzamiento, concluyendo que el CFRP presenta más ventajas en cuanto al proceso constructivo y tiempo de ejecución, mientras que el encamisado de concreto armado otorga una mayor resistencia a la sección que refuerza. El costo de reforzar una columna con CFRP resultó 1.45 veces mayor que reforzarla con un encamisado, pero se justifica su precio en las propiedades que otorga (tiempo, constructibilidad y facilidad de ejecución).

Dedicatoria

A Miriam Virginia Laura Castillo, por su amor incondicional como madre.



Agradecimientos

A mi padre, el Dr. Tudela por todo el apoyo durante mi formación profesional. A mi hermano Mauricio por su apoyo y comprensión en toda mi etapa universitaria. A toda mi familia por ser partícipes de este paso profesional en mi vida. A mi asesor de tesis, el Dr. Morán por su constante apoyo en la elaboración del presente trabajo de investigación.

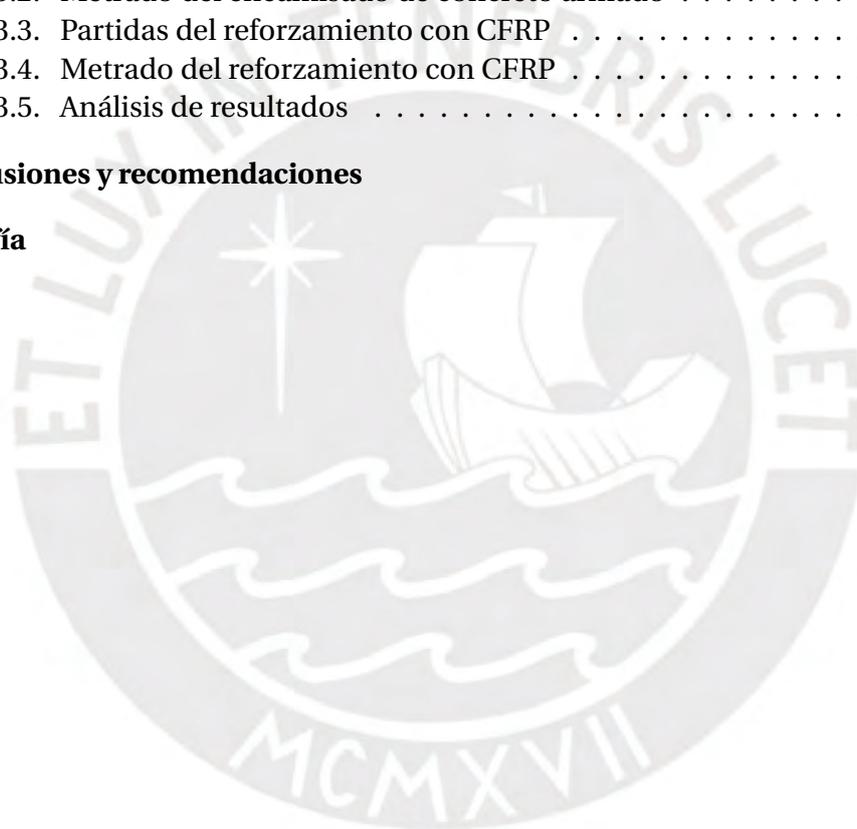


Tabla de contenidos

Resumen	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Tabla de contenidos	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	X
I. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.1. Pregunta general	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Alcances y limitaciones	4
II. Marco teórico	5
2.1. Columna de concreto armado	5
2.1.1. Definición	5
2.1.2. Tipos de columnas	6
2.2. Resistencia a compresión del concreto	7
2.2.1. Modelos para el concreto en compresión	8
2.3. Resistencia a tracción del acero	10
2.4. Ductilidad de una sección	12
2.5. Parámetros de diseño para una columna	12
2.5.1. Cuantía de acero mínima y máxima	12
2.5.2. Resistencia nominal en compresión	13

2.5.3. Diagrama de interacción	14
2.6. Reforzamiento estructural	16
2.6.1. Desempeño sísmico	17
2.6.2. Reforzamiento de columnas	19
2.6.3. Diagnóstico previo a reforzar columnas	20
2.7. Encamisado de concreto armado	22
2.7.1. Definición	22
2.7.2. Proceso constructivo	23
2.7.3. Diseño del encamisado de concreto armado	26
2.7.4. Antecedentes internacionales	29
2.7.5. Antecedentes locales	29
2.7.6. Aporte de resistencia teórica y real	30
2.8. Refuerzo de columnas de concreto armado con CFRP	31
2.8.1. Uso de CFRP como reforzamiento	31
2.8.2. Proceso constructivo	33
2.8.3. Diseño del reforzamiento con CFRP	35
2.8.4. Límites del reforzamiento	40
2.8.5. Resistencia al fuego	40
2.8.6. Errores habituales en el diseño del reforzamiento	41
2.8.7. Antecedentes internacionales	42
2.8.8. Antecedentes nacionales	44
III. Metodología	46
3.1. Verificación del modelo estructural	49
3.2. Obtención de la resistencia a flexo-compresión teórica	49
3.2.1. Encamisado de concreto armado	49
3.2.2. Obtención del diagrama de interacción utilizando el software ETABS	50
3.2.3. Refuerzo con CFRP	51
3.2.4. Uso del software Sika®Carbodur® para diseño de reforzamiento con CFRP	52
3.3. Parámetros de comparación en el proceso constructivo de ambos reforzamientos	53
3.4. Parámetros de comparación en el costo de ambos reforzamientos	54
IV. Resultados	55
4.1. Análisis teórico de la resistencia a flexo-compresión de ambos reforzamientos	55
4.1.1. Modelo estructural del proyecto utilizado como referencia	55
4.1.2. Análisis sismoresistente dinámico	58
4.1.3. Resultados de interés del análisis dinámico sismoresistente	60
4.1.4. Diseño del reforzamiento con encamisado de concreto armado	64
4.1.5. Refuerzo de cimentación con el encamisado de concreto armado	70
4.1.6. Control de derivas con el encamisado	72
4.1.7. Diseño del reforzamiento con CFRP	76
4.1.8. Control de derivas con el CFRP	82

4.1.9. Diseño adicional de las placas incorporadas	84
4.1.10. Peso adicionado a la estructura	91
4.1.11. Análisis de resultados obtenidos	94
4.2. Comparación entre los procesos constructivos de ambos reforzamientos	95
4.2.1. Materiales para cada reforzamiento	95
4.2.2. Ejecución de cada reforzamiento	97
4.2.3. Experiencias previas con cada reforzamiento	99
4.2.4. Análisis de resultados	102
4.3. Comparación entre el costo de ambos reforzamientos	103
4.3.1. Partidas del encamisado de concreto armado	104
4.3.2. Metrado del encamisado de concreto armado	104
4.3.3. Partidas del reforzamiento con CFRP	106
4.3.4. Metrado del reforzamiento con CFRP	107
4.3.5. Análisis de resultados	108
V. Conclusiones y recomendaciones	110
Bibliografía	113



Índice de figuras

2.1. Columnas de concreto armado	6
2.2. Curvas esfuerzo-deformación para el concreto	7
2.3. Modelo de Hognestad	8
2.4. Modelo de Tedesnichi	9
2.5. Modelo CEB	10
2.6. Curva esfuerzo-deformación para acero de refuerzo	11
2.7. Diagrama de interacción típico para una columna con estribos	15
2.8. Puntos notables en un diagrama de interacción	15
2.9. Niveles de desempeño relacionado con la capacidad de demanda	19
2.10. Extracción de núcleos de concreto de una columna	21
2.11. Detector de campo magnético y detector de radar utilizados para verificar el acero existente en una columna	21
2.12. Encamisado de concreto armado	22
2.13. Secuencia de aplicación del aditivo epóxico en el anclado de refuerzo	24
2.14. Refuerzo de una zapata existente debido a la ejecución de un encamisado de concreto armado	26
2.15. Encamisado de concreto armado	27
2.16. Sistema de ensayo de las columnas reforzadas con encamisado de concreto parcial	31
2.17. Tejido de fibra de carbono	32
2.18. Columna reforzada con CFRP	34
2.19. Distribución mundial de normativa simplificada para CFRP	35
2.20. Área efectiva de una sección no rectangular confinada con FRP	37
2.21. Diagrama de interacción de una sección reforzada con FRP	39
2.22. Errores frecuentes utilizando reforzamiento con CFRP	42
2.23. Curvas experimentales tensión deformación axial para concreto armado con- finado con tubos reforzados con fibras de carbono (CFRP)	43
2.24. Columnas de un almacén reforzadas con CFRP	44
2.25. Columna reforzada con bandas de CFRP	45
3.1. Metodología para el presente trabajo de investigación	47
3.2. Fachada principal del proyecto de reforzamiento en la UNA-PUNO	48
3.3. Planta del proyecto de reforzamiento en la UNA-PUNO	48

3.4. Diagrama de interacción utilizando ETABS 2019	51
3.5. Interfaz de diseño en Carbodur®	53
4.1. Modelo del proyecto de reforzamiento previo a ser reforzado	57
4.2. Carga muerta modelada en elementos frame	58
4.3. Carga viva modelada en elementos shell	58
4.4. Espectro de diseño	60
4.5. Derivas de entrepiso para el modelo sin reforzamiento	61
4.6. Columna C-13 con la mayor carga de acuerdo al modelo estructural	62
4.7. Diagrama de interacción C-13	64
4.8. Sección de encamisado propuesta para C-13	67
4.9. Diagrama de interacción C-13 reforzada con 14 barras de 5/8"	67
4.10. Valor de fuerza cortante para la columna C-13 en el primer nivel	68
4.11. Detalle de la sección C-13 reforzada con encamisado de concreto armado . . .	70
4.12. Planta de cimentación del proyecto de referencia	71
4.13. Disposición de refuerzo para zapatas	72
4.14. Planta del modelo reforzado con encamisados de concreto armado	73
4.15. Derivas de entrepiso para el modelo con encamisados de concreto armado . .	73
4.16. Planta del modelo reforzado con encamisados de concreto armado y la adición de placas	74
4.17. Derivas de entrepiso para el modelo con encamisados de concreto armado y con la adición de placas	75
4.18. Variación de las derivas de entrepiso en la dirección X	75
4.19. Variación de las derivas de entrepiso en la dirección Y	76
4.20. Cargas previstas y combinaciones en SikaDur®	77
4.21. Sección de columna C-13 reforzada con CFRP	81
4.22. Planta del modelo reforzado con CFRP	83
4.23. Derivas de entrepiso para el modelo con CFRP	83
4.24. Ubicación de la placa mas cargada del modelo estructural con encamisados . .	84
4.25. Distribución de acero prevista para la placa PL-02, primera propuesta de refor- zamiento	85
4.26. Diagrama de interacción para la placa PL-02, primera propuesta de reforza- miento	86
4.27. Detalle final de las placas añadidas, primera propuesta de reforzamiento	87
4.28. Ubicación de la placa mas cargada del modelo estructural con CFRP	87
4.29. Distribución de acero prevista para la placa PL-01, segunda propuesta de re- forzamiento	88
4.30. Diagrama de interacción para la placa PL-01, segunda propuesta de reforza- miento	89
4.31. Detalle final de la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento	90
4.32. Detalle final de la placa PL-02, segunda propuesta de reforzamiento	90
4.33. Detalle final de la placa PL-03 y PL-04, segunda propuesta de reforzamiento . .	90

4.34. Diagrama de interacción de la sección de encamisado de concreto armado con las cargas re-calculadas	93
4.35. Incremento de resistencia de fuerza axial para ambos tipos de reforzamiento .	94
4.36. Comparación del peso de cada estructura modelada con encamisados y CFRP	95
4.37. SikaWrap @600C WV-50cm	97
4.38. Reforzamiento de columnas y placas con encamisados de concreto armado . .	100
4.39. Refuerzo de columnas a confinamiento con SikaWrap @600C y Anclaje de FRP.	101
4.40. Comparación del costo de cada reforzamiento en soles	108



Índice de tablas

2.1. Calidades del acero de refuerzo (ASTM)	11
2.2. Comparación de límites de deriva entre piso (Adaptado de Martel, 2004)	17
2.3. Niveles de desempeño sísmico (Adaptado de Muñoz, 2011)	18
2.4. Niveles de desempeño sísmico (Adaptado de Muñoz, 2011)	19
2.5. Comportamiento a tracción de distintos sistemas FRP	33
4.1. Momentos de inercia para secciones agrietadas (Adaptado del código ACI 318-19, 2019)	56
4.2. Secciones modeladas	56
4.3. Parámetros ZUCS para diseño sismoresistente	59
4.4. Columnas más cargadas según el modelo estructural	62
4.5. Combinación de cargas en X	63
4.6. Combinación de cargas en Y	63
4.7. Aporte de resistencia en porcentaje para el encamisado de concreto armado	68
4.8. Diseño por cortante para el encamisado de concreto armado C-13	69
4.9. Secciones reforzadas con encamisados para cada tipo de columna	70
4.10. Secciones de zapatas del proyecto de referencia	71
4.11. Aporte de resistencia axial en porcentaje para el reforzamiento con 3 capas de CRFP	81
4.12. Secciones reforzadas con laminado CFRP para cada tipo de columna	82
4.13. Cargas obtenidas para la placa PL-02, primera propuesta de reforzamiento	85
4.14. Combinaciones de diseño en X para la placa PL-02, primera propuesta de reforzamiento	85
4.15. Cargas obtenidas para la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento	88
4.16. Combinaciones de diseño en X para la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento	88
4.17. Peso de la estructura inicial junto con las reforzadas	91
4.18. Cargas re-calculadas para la columna C-13	92
4.19. Combinaciones de diseño en X re-calculadas para la columna C-13	92
4.20. Comparación entre las características de cada reforzamiento en su proceso constructivo	102
4.21. Partidas utilizadas en la primera propuesta de reforzamiento	104

4.22. Metrado de las partidas para la primera propuesta de reforzamiento con encamisados	105
4.23. Presupuesto de la primera propuesta de reforzamiento	106
4.24. Partidas utilizadas en la segunda propuesta de reforzamiento	106
4.25. Metrado de las partidas para la segunda propuesta de reforzamiento con encamisados	107
4.26. Presupuesto de la primera propuesta de reforzamiento	107
4.27. Ratio Costo CFRP/Encamisado para refuerzo estructural en columnas	109



Capítulo I

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

En el Perú son bastante comunes las obras de reforzamiento y ampliación, siendo diversos los motivos por los cuales se requiere reforzar los distintos elementos estructurales que conformen una edificación, por ejemplo : el paso del tiempo, un evento sísmico reciente, etc. En particular, las columnas son uno de los elementos estructurales de mayor importancia cuando se requiere reforzar una construcción, pues son los elementos estructurales que, en general, aportan rigidez lateral y soporte a las cargas verticales, por lo tanto deben ser los últimos en fallar.

Al momento de decidir un método de reforzamiento para las columnas, el encamisado de concreto armado resulta la primera opción para la mayoría de los constructores, debido a que utiliza materiales convencionales como concreto y acero, además de ser el método más empleado en nuestro medio. Sin embargo, existen otros métodos de reforzamiento, como por ejemplo el polímero con fibras de carbono (CFRP), el cual viene siendo un método bastante utilizado en los últimos años.

Teniendo en consideración una amplia variedad de opciones como las mencionadas, el

constructor debe optar por un tipo de reforzamiento para columnas, por lo que debe analizar cual método resulta mas viable realizar, considerando factores como el proceso constructivo, el aporte de resistencia que otorgue el reforzamiento, el costo, etc.

1.1.1. Pregunta general

¿Cuál de los siguientes métodos de reforzamiento, el encamisado de concreto armado y el CFRP, resulta la mejor opción para reforzar columnas de concreto armado?

1.2. Hipótesis

El encamisado de concreto armado resulta la mejor opción para reforzar columnas debido a que aporta una resistencia a compresión considerable a la sección que refuerza, mejora su comportamiento estructural y resulta la opción mas económica .

1.3. Justificación

En términos generales, las estructuras de concreto armado son consideradas permanentes; no obstante, estas presentan problemas patológicos a lo largo de su vida útil (Silva et al., 2019). Por ejemplo, una columna de concreto armado puede tener un comportamiento no deseado con el paso del tiempo debido a muchas causantes, entre las cuales destacan: una mala compactación, juntas mal realizadas, o utilizar concreto por debajo de la resistencia de diseño (Rao et al.,2016) . Por tal motivo, resulta fundamental pensar en un modo de reforzar este elemento estructural.

El encamisado de concreto armado resulta la opción más viable y práctica de reforzar una columna (Gomes y Appleton, 1997) debido a su método sencillo de realizarse, puesto que solo requiere la ampliación de la sección de concreto junto con una nueva cuantía de

acero. Es necesario mencionar que, al realizar este procedimiento de refuerzo, se debe tomar precauciones al momento de picar el concreto antiguo, puesto que se descubre el acero y el elemento está sujeto a perder su capacidad resistente.

Por otro lado, es cada vez más común optar por otros métodos de reforzamiento con materiales compuestos, como por ejemplo el CFRP (polímero reforzado con fibra de carbono). Para utilizar este método de reforzamiento en una columna, se encamisado su sección con una lámina que contiene tejidos de fibra de carbono, confinando la columna y otorgando una resistencia a tracción elevada, mejorando también el comportamiento a flexión del elemento que refuerce.

El presente trabajo de investigación tendrá como eje principal la comparación entre ambos métodos de reforzamiento para columnas, analizando parámetros como el aporte de resistencia de ambas opciones, su proceso constructivo, su costo y viabilidad de acuerdo con la naturaleza del proyecto de reforzamiento.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar y comparar el encamisado de concreto armado y el CFRP como métodos de reforzamiento estructural para columnas.

1.4.2. Objetivos específicos

- Comparar teóricamente la resistencia a flexo-compresión de una columna reforzada con un encamisado de concreto armado con la de una columna reforzada con CFRP.
- Comparar el proceso constructivo de ambos métodos de reforzamiento para colum-

nas.

- Comparar casos de proyectos en Perú donde previamente se han utilizado los métodos de reforzamiento mencionados.
- Comparar el costo de realizar ambos métodos de reforzamiento.
- Describir las ventajas y desventajas de cada método de reforzamiento para columnas.

1.5. Alcances y limitaciones

- El presente trabajo de investigación se limitará a estudiar 2 métodos de reforzamiento (encamisados y reforzamiento con CFRP) para columnas de concreto armado.
- En el análisis teórico del encamisado de concreto armado se supondrá un comportamiento monolítico entre el elemento a reforzar junto con el reforzamiento.
- En el análisis del reforzamiento con CFRP, se utilizará un determinado material para el análisis del reforzamiento, siendo el SikaWrap®600C WV-50cm. el material escogido para el análisis. Esto debido a que se cuenta con un software de diseño para el reforzamiento con el material mencionado. También, se emplearan valores físicos y mecánicos dados por los fabricantes de CFRP.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Columna de concreto armado

2.1.1. Definición

Los elementos verticales que soportan carga axial y flexocompresión son denominados columnas. Es necesario mencionar que otros elementos estructurales también pueden trabajar en flexocompresión, por ejemplo las placas, los muros de corte o vigas aisladas (Ottazzi, 2016).

Las columnas son las encargadas de transmitir las cargas de una estructura desde los niveles superiores hasta su cimentación, por lo que se dice a menudo que son los elementos que “sostienen” a un edificio. Estos elementos son de suma importancia en cualquier proyecto de construcción, por lo que su proceso constructivo debe ser el adecuado para garantizar su funcionamiento. Ante un eventual sismo, estos elementos deben ser los últimos en fallar. En la figura 2.1 se pueden apreciar columnas de concreto armado.



Figura 2.1: Columnas de concreto armado
(Revista Cimientos, 2019)

2.1.2. Tipos de columnas

Existen muchas clasificaciones para las columnas, la presente investigación hará énfasis en las siguientes:

Por la forma y el tipo de refuerzo transversal

a. Columnas con estribos

Son las más usuales en nuestro medio, se caracterizan por la disposición de estribos independientes a lo largo de la columna. Los espaciamientos entre estribos son más cortos cuando se construye en una zona sísmica, debido a efectos de corte y confinamiento (Ottazzi, 2016).

b. Columnas con espirales

Este tipo de columna corresponde generalmente a secciones circulares, y suele emplearse cuando se requiere una ductilidad alta y/o en presencia de cargas axiales prominentes

(Ottazzi, 2016).

De acuerdo con la esbeltez de la columna

a. Columnas cortas

Esta clasificación corresponde a columnas en las cuales su esbeltez no influye de manera importante en su comportamiento estructural.

b. Columnas esbeltas

Son aquellas en las que, debido a su altura, el efecto de su esbeltez no puede despreciarse.

2.2. Resistencia a compresión del concreto

El valor de f'_c es el parámetro utilizado para cuantificar la resistencia a compresión del concreto, este valor generalmente indica la calidad del concreto. Se muestra a continuación en la figura 2.2 curvas que relacionan el esfuerzo de compresión axial con la deformación unitaria para concreto.

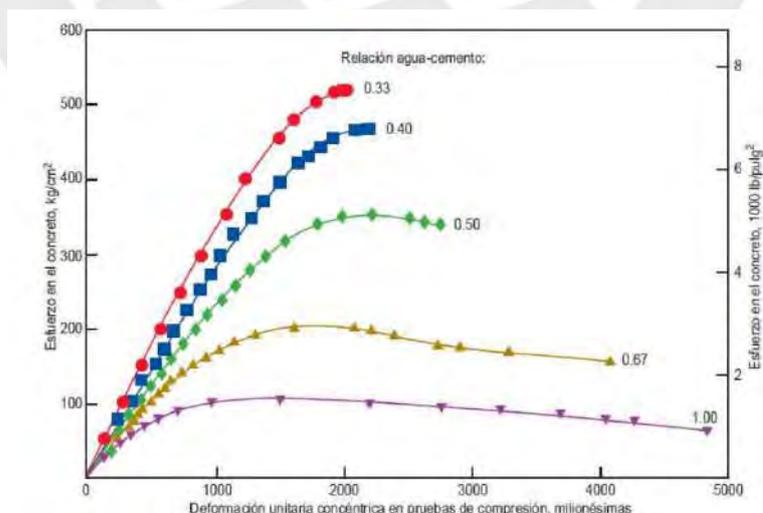


Figura 2.2: Curvas esfuerzo-deformación para el concreto (Portland Cement Association et al., 2004)

Al momento de realizar una construcción, se debe verificar que el concreto utilizado en campo cumpla el valor de $f'c$ especificado en el diseño, por lo que se realizan ensayos de calidad del concreto, en los que se somete probetas hechas con el concreto utilizado en obra a un esfuerzo de compresión axial.

2.2.1. Modelos para el concreto en compresión

La curva presentada en la figura 2.2 ha sido tema de muchas investigaciones donde se busca representar la naturaleza del comportamiento del concreto sometido a un esfuerzo de compresión. Se presenta a continuación 3 modelos que relacionan mediante ecuaciones la resistencia a compresión del concreto ($f'c$) con la deformación unitaria (ϵ_c).

a. Modelo de Hognestad

Este modelo fue propuesto en 1955 en base a investigaciones experimentales. Este modelo consta de una parte curvilínea descrita por una parábola que termina cuando el concreto alcanza la resistencia de compresión máxima ($f'c$), luego tiene una disminución lineal hasta la falla (Villagrán, Vera, y Posada, 2013).

$$f_c = \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \cdot f'c$$

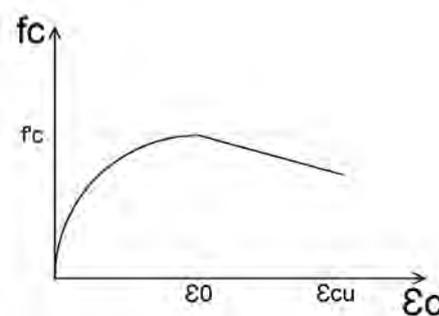


Figura 2.3: Modelo de Hognestad (Villagrán et al., 2013)

b. Modelo de Todesnichi

En 1964 se propuso este modelo en el cual se asocia el comportamiento del concreto a una sola parábola determinada por una sola ecuación.

$$f_c = \frac{2(\varepsilon_o/\varepsilon_c)}{1 + 2(\varepsilon_o/\varepsilon_c)^2} \cdot f'_c$$

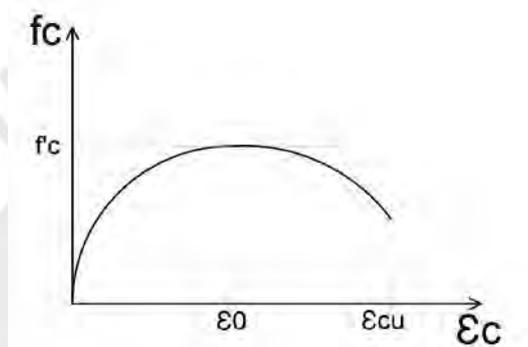


Figura 2.4: Modelo de Todesnichi
(Villagrán et al., 2013)

c. Modelo del CEB

Este modelo reemplaza el bloque curvilíneo de esfuerzos al momento que el concreto alcanza su f'_c , por otro rectangular equivalente que tenga un esfuerzo constante con una profundidad igual a $c \beta_1$, donde c es la profundidad del eje neutro y el coeficiente β_1 es determinado por la siguiente relación:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85, & \text{si } f'_c \leq 280 \text{ kg/cm}^2, \\ 1.05 - \frac{f'_c}{140} \geq 0.65, & \text{si } f'_c > 280 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

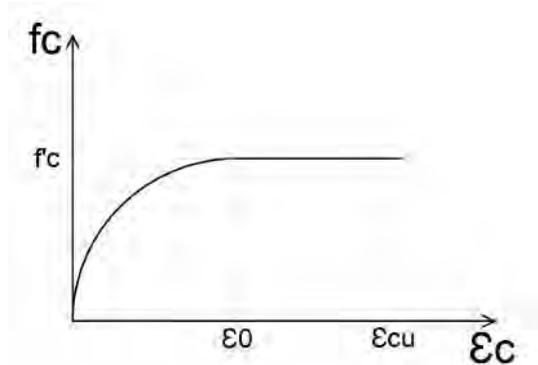


Figura 2.5: Modelo CEB
(Villagrán et al., 2013)

2.3. Resistencia a tracción del acero

Debido a que el concreto no tiene un buen comportamiento en tracción, se refuerza la sección de concreto con acero, material que sí tiene un buen comportamiento frente a esfuerzos de tracción. El acero se distribuye generalmente en varillas a lo largo de elementos estructurales como vigas, columnas, losas y demás. Tales varillas deben ser corrugadas para mejorar la adherencia con el concreto (Ottazzi, 2016).

En el Perú se deben cumplir con ciertos estándares de calidad para la fabricación de acero. Entre las normas más importantes que rigen estos estándares de calidad se tiene la Norma Peruana NTP 341.031 y la Norma ASTM A615. En la tabla 2.1 se puede apreciar las calidades de acero que cubre la Norma ASTM para acero de refuerzo. Así también, se indica el esfuerzo de fluencia mínimo y máximo ($f_y \text{ min}, f_y \text{ max}$) así como el esfuerzo último mínimo (f_u).

Tabla 2.1: Calidades del acero de refuerzo (ASTM)

Grado	ASTM	fy min(kg/cm ²)	fy max(kg/cm ²)	fu min(kg/cm ²)	fu/fy min
40	A615	2800	-	4200	-
60	A615	4200	-	6300	-
75	A615	5300	-	7000	-
80	A615	5600	-	7400	-
60	A706	4200	5500	5600	1.25
80	A706	5600	6900	7000	1.25

En el Perú, se usa casi en su totalidad el acero grado 60, empresas como Aceros Arequipa S.A. fabrican acero de este grado que se ajusta a la norma ASTM 615 (Ottazzi, 2016). Un parámetro importante para el acero de refuerzo es el valor de fluencia (f_y), valor que para acero grado 60 es 4200 kg/cm². Se muestra a continuación en la figura 2.6 las curvas típicas que relacionan la resistencia a tracción con la deformación unitaria para algunas variedades de acero de refuerzo:

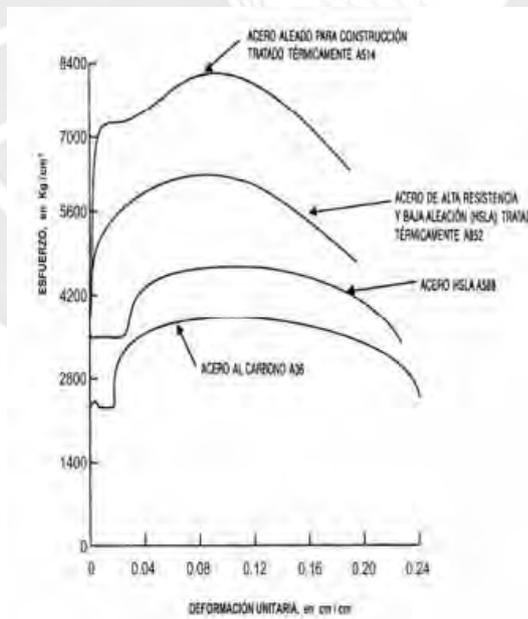


Figura 2.6: Curva esfuerzo-deformación para acero de refuerzo (Prieto, 1991)

2.4. Ductilidad de una sección

Se define a la ductilidad de un elemento estructural como la capacidad de deformarse más allá del rango elástico sin reducir de manera significativa su rigidez (Nakano et al., 1995). Por tanto, se debe proveer a una estructura la capacidad de poder deformarse en un rango considerable, siendo el acero el material encargado de proveer ductilidad a una columna de concreto armado.

Esta propiedad es de suma importancia para que una columna pueda tener un comportamiento adecuado frente a cargas externas, el ACI controla la ductilidad al especificar una cuantía mínima de acero de reforzamiento para el diseño en concreto armado.

2.5. Parámetros de diseño para una columna

2.5.1. Cuantía de acero mínima y máxima

Se define la cuantía de acero como el porcentaje de área de acero refuerzo de una sección respecto a su área total.

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} \quad (2.1)$$

Donde:

A_{st} = Área del acero de refuerzo

A_g = Área total de la sección

La norma peruana exige que el porcentaje mínimo de cuantía de acero sea 1% y el porcentaje máximo sea 6%. Por otro lado, el ACI permite un máximo de 8%, limitando a 6% los elementos con responsabilidad sísmica (Ottazzi, 2016). Al momento de seleccionar una

cuantía de acero, es importante tener en cuenta la congestión del refuerzo; es decir, el acero no debe ser un obstáculo para llevar a cabo un correcto vibrado al momento del vaciado.

2.5.2. Resistencia nominal en compresión

Este valor puede determinarse si la columna sufre efectos de compresión pura; suponiendo una perfecta adherencia entre el concreto y el acero, la resistencia a compresión se obtiene como la suma de la resistencia del concreto más la resistencia del acero (Ottazzi, 2016).

Si el acero se encuentra en fluencia cuando el concreto alcanza su resistencia máxima, se puede expresar la resistencia nominal a compresión de una columna de la siguiente manera:

$$P_n = A_{st} \cdot f_y + f'_c \cdot (A_g - A_{st}) \quad (2.2)$$

Donde:

A_{st} = Área del acero de refuerzo

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero

f'_c = Esfuerzo de compresión del concreto

A_g = Área total de la sección

Sin embargo, el aporte del concreto se ve reducido por un factor, cuyo valor adoptado por norma es 0.85, con lo cual la ecuación se modifica:

$$P_n = A_{st} \cdot f_y + 0.85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) \quad (2.3)$$

Debido a que este valor se obtiene suponiendo condiciones perfectas en la elaboración de la columna, es raro que el elemento alcance esta resistencia, por lo que se debe multiplicar la ecuación anterior por los siguientes parámetros: α y ϕ , los cuales son establecidos por

norma y dependen si la columna es diseñada con estribos o espirales:

Columna con estribos: $\alpha=0.85$, $\phi=0.70$

Columna con espirales: $\alpha=0.90$, $\phi=0.75$

2.5.3. Diagrama de interacción

Un diagrama de interacción es la curva que relaciona los valores de fuerza axial y momento aceptables para una determinada sección (García y Heredia, 2013). Para la determinación del diagrama de interacción se utilizan las siguientes hipótesis básicas para elementos sometidos a efectos de flexocompresión:

- Las secciones planas permanecen planas.
- Se desprecia la resistencia a tracción del concreto.
- Se considera la deformación última del concreto como 0.003.
- El bloque de esfuerzos en el concreto se considera como rectangular.
- Se satisface tanto el equilibrio como la compatibilidad de deformaciones.
- Existe perfecta adherencia entre concreto y acero.

Para una sección en particular, dada su geometría y su cuantía de acero, se puede obtener el diagrama de interacción variando la posición de su eje neutro y aplicando equilibrio y compatibilidad en cada una de estas posiciones. Se muestra en la figura 2.7 un diagrama de interacción típico para una columna con estribos:

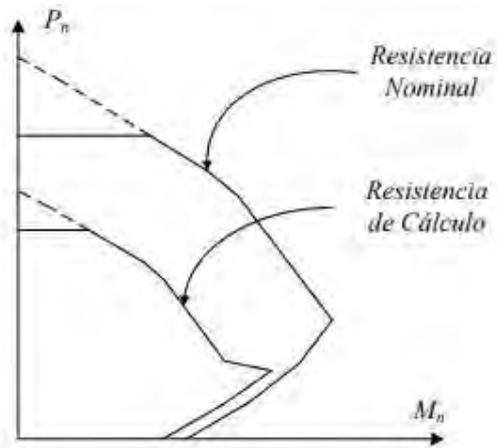


Figura 2.7: Diagrama de interacción típico para una columna con estribos (García y Heredia, 2013)

Puntos notables del diagrama de interacción

Se puede identificar algunos puntos de interés dentro del diagrama de interacción, como se puede apreciar en la figura 2.8.

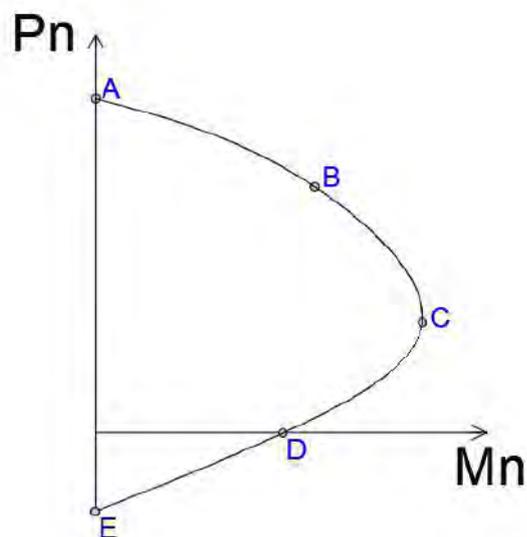


Figura 2.8: Puntos notables en un diagrama de interacción

- Punto asociado a la falla en compresión pura (A)

- Punto asociado a la fisuración incipiente (B)
- Punto asociado a la falla balanceada (C)
- Punto asociado a flexión pura (D)
- Punto asociado a tracción pura (E)

2.6. Reforzamiento estructural

El reforzamiento estructural permite aumentar la capacidad resistente original de una edificación, ya sea de manera local (reforzando los diferentes elementos de una estructura) o global (desempeño general de la estructura) para ofrecer una mejor respuesta estructural (Villafuerte y Arellano, 2021). Una de las causas más frecuentes para reforzar una edificación es el paso del tiempo; comúnmente, en varias partes del mundo, los edificios que fueron construidos antes de los años 70 poseen deficiencias significativas en su configuración estructural y en su detallado (Soto, 2008). En el caso de la normativa peruana, antes del año 1997 la norma restringía el desplazamiento lateral de una estructura limitando la deriva de entrepiso a 0.010 como valor máximo permitido para estructuras de concreto armado puesto que se utilizaba la normativa del año 1977. Se presenta en la tabla 2.2 una comparativa entre los valores permitidos de la deriva de entrepiso con la norma del año 1977 y la norma actual (E 0.30).

Tabla 2.2: Comparación de límites de deriva entrepiso (Adaptado de Martel, 2004)

Norma	N-77	Actual(E 0.30)	Variación
Material Predominante	Δ/hi	Δ/hi	(%)
Concreto armado	0.010	0.0070	43.00%
Acero	0.015	0.0100	50.00%
Albañilería	0.010	0.0050	100.00%
Madera	0.010	0.0100	0.00%

Las estructuras antiguas permiten un desplazamiento mayor lo cual puede influir en su posterior comportamiento estructural ante alguna sollicitación externa, como por ejemplo el efecto de un sismo. Por otro lado, los efectos derivados de un erróneo proceso constructivo, tales como una mala compactación, juntas mal realizadas, o utilizar concreto por debajo de la resistencia de diseño pueden ser causantes de un deterioro de la capacidad estructural de muchos elementos y por ende, requerir de un reforzamiento (Rao et al.,2016) .

2.6.1. Desempeño sísmico

Para determinar si una edificación obtuvo un buen desempeño frente a movimientos sísmicos, se debe analizar no solo los daños ocasionados por este evento, sino también los ocurridos posteriores a este (Villafuerte y Arellano, 2021). Por tanto, es importante conocer el estado de daño sufrido en un sistema estructural, a fin de poder determinar si puede realizarse una intervención y mantener la estructura vigente por un margen de tiempo adicional. *The Structural Engineers Association of California (SEAOC)* plantea 5 niveles de desempeño sísmico, los cuales pueden apreciarse en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Niveles de desempeño sísmico (Adaptado de Muñoz, 2011)

Nivel de desempeño	Descripción
Completamente operativo	No hay daño. El edificio es seguro. Todas las instalaciones y servicios operan normalmente. La estructura conserva su rigidez y resistencia. No es necesario hacer reparaciones.
Operativo	Daño reducido en componentes no estructurales sin compromiso para la seguridad de los ocupantes. Daño muy reducido en elementos estructurales sin compromiso de la seguridad general. La estructura mantiene casi íntegramente su resistencia y rigidez. Luego del sismo, las instalaciones y servicios están operativos o podrían estar parcialmente interrumpidos, pero podrían ser fácilmente recuperados.
Resguardo a la vida	Daño estructural y no estructural moderado. La estructura ha perdido una parte importante de su rigidez y resistencia, pero conserva un margen de seguridad contra el colapso. Luego del sismo, es baja la probabilidad de derrumbes. Los ascensores podrían estar fuera de servicio, pero las rutas de evacuación están seguras. El edificio podría repararse, aunque no siempre resulte económicamente aconsejable.
Cerca al colapso	Daño importante y extendido. La estructura ha sido seriamente afectada en su capacidad de resistir acciones laterales y cargas de gravedad, pero aún conserva un pequeño margen contra el colapso. Componentes no estructurales desplomadas o en peligro reparar el edificio. Las réplicas podrían ocasionar el colapso.
Colapso	La estructura no puede ya resistir acciones laterales y ha perdido su competencia para cargas de gravedad. Pérdida de verticalidad y problemas de inestabilidad. Colapso parcial o total. No es posible reparar la edificación.

Tales niveles de desempeño pueden relacionarse con los conceptos de fuerza y desplazamiento. La figura 2.9 permite visualizar una curva de capacidad donde se ubica cada nivel de desempeño acorde al incremento de la cortante basal y el desplazamiento lateral de una estructura. La norma vigente de diseño sísmoresistente peruana (E 0.30) brinda parámetros de diseño acorde al uso de la edificación que se quiere diseñar, así como la intensidad del sismo de diseño acorde a su periodo de retorno. Lo mencionado puede visualizarse mejor en la tabla 2.4 donde se muestra el nivel de desempeño para los 3 tipos de edificaciones: edificios comunes, esenciales y de seguridad crítica.



Figura 2.9: Niveles de desempeño relacionado con la capacidad de demanda (Adaptado de Muñoz, 2011)

Tabla 2.4: Niveles de desempeño sísmico (Adaptado de Muñoz, 2011)

		Nivel de desempeño			
		Completamente operativo	Operativo	Resguardo a la vida	Cerca al colapso
Sismo de diseño	Sismo frecuente (45 años)				
	Sismo ocasional (75 años)				
	Sismo raro (475 años)				
	Sismo muy raro (970 años)				
		Edificación común	Edificación esencial	Edificación de seguridad crítica	

2.6.2. Reforzamiento de columnas

El principal objetivo de reforzar una columna es mejorar su comportamiento frente a las solicitaciones de carga que se presentan en su vida útil, el refuerzo se puede realizar envolviendo al elemento existente dentro de una sección con mayor resistencia, que puede ser enfundado de concreto (encamisado de concreto armado) armado o materiales compuestos

(CFRP) (Estrada, 2018) .

Al incrementar la sección mediante cualquiera de los métodos de reforzamiento se logra un mayor confinamiento, mejorando así la resistencia y ductilidad. Así también, al reforzar una columna, la resistencia a flexo-compresión se incrementa, permitiendo al concreto alcanzar mayores deformaciones.

2.6.3. Diagnóstico previo a reforzar columnas

Antes de proceder a diseñar cualquier método de reforzamiento, es necesario realizar un diagnóstico de la estructura que se desea reforzar. Esto con el fin de evaluar cuan dañados se encuentran los elementos estructurales como vigas o columnas. En particular, para las columnas se debe considerar el tipo de grietas que pueden hallarse en las mismas, así como cualquier evidencia de fallo por corte, pandeo, etc.

En caso de no tener información respecto a las propiedades de los materiales en la estructura existente, se utilizan ensayos destructivos como la extracción de núcleos diamantinos. Este tipo de ensayo permite obtener la resistencia del concreto, así como para identificar diferentes patologías que puedan haber afectado la durabilidad del concreto en su vida útil, como la humedad del concreto, la adherencia con el acero, la carbonatación que ha sufrido, etc. (Damazo, 2006)



Figura 2.10: Extracción de núcleos de concreto de una columna
(Damazo, 2006)

También se realizan ensayos no-destructivos como el método de número de rebote en concreto endurecido, el cual permite por ejemplo identificar la uniformidad del concreto e identificar zonas para realizar otros ensayos como la extracción de núcleos diamantinos (Damazo, 2006). En la figura 2.11 se puede apreciar un martillo metálico, conocido como Martillo Schmidt, el cual permite realizar este tipo de ensayo no destructivo.



Figura 2.11: Detector de campo magnético y detector de radar utilizados para verificar el acero existente en una columna

(Helal et al, 2015)

Con toda la información necesaria se debe definir el modelo estructural mas realista posible con cargas actuantes según el tipo de proyecto que se tenga. Posterior a ello, se realiza el análisis estructural para obtener los desplazamientos de interés, esfuerzos, deformaciones, etc.

2.7. Encamisado de concreto armado

2.7.1. Definición

Se define el encamisado de concreto armado como el método de reforzamiento estructural donde se envuelve el elemento que se desea reforzar con una sección adicional de concreto armado, mejorando de este modo su comportamiento frente a esfuerzos de compresión, flexión y cortante. En la figura 2.12 se puede apreciar una columna encamisada en un proyecto de reforzamiento en Puno, correspondiente al año 2019.



Figura 2.12: Encamisado de concreto armado

Este tipo de reforzamiento no incorpora algún elemento nuevo, sino consiste en incrementar la sección mediante la unión de concreto armado viejo con concreto armado nuevo, generalmente mediante un adhesivo epóxico (Gomes y Appleton, 1997), por lo que resulta una opción práctica y de rápida ejecución para reforzar estructuralmente una columna.

2.7.2. Proceso constructivo

Se enumera a continuación los principales pasos para realizar un encamisado de concreto armado:

- 1.- Escarificado de la columna a reforzar; es decir, picar la columna eliminando la capa exterior de concreto hasta encontrar el refuerzo del acero.
- 2.- Limpieza de la sección picada. El concreto debe encontrarse limpio, libre de polvo, partes sueltas o mal adheridas, sin impregnaciones de aceite, grasa, pintura, entre otros. Debe estar firme y sano con respecto a sus resistencias mecánicas. La superficie a unir debe quedar rugosa.
- 3.- Colocación de un adhesivo epóxico en toda la sección de concreto antiguo. Un ejemplo de aditivo epóxico utilizado para el puente de unión entre concreto viejo y nuevo es el es el Sikadur®32 GEL, cuya presentación es en gel y es de fácil acceso en cualquier distribuidora de materiales de construcción.
- 4.- Perforación del acero a la superficie donde ancle el acero, para este paso se requiere utilizar un aditivo epóxico dentro de las perforaciones realizadas. El adhesivo debe inyectarse hasta 1/2 de la perforación (aproximadamente), y se debe evitar la inclusión de aire con el adhesivo. Una vez limpia la barra a anclar, se aplica un poco de adhesivo sobre la superficie de la barra que penetrara, se la introduce girándola lentamente hasta que esta toque el fondo de la perforación de tal forma que el adhesivo epóxico se desplace

a la superficie para garantizar que este ocupe la totalidad de la longitud del anclaje. Un ejemplo de aditivo epóxico utilizado para el anclaje de refuerzo es el Sikadur®31 HMG.

Se muestra en la figura 2.13 la secuencia necesaria para aplicar el aditivo epóxico en las perforaciones realizadas para el uso del aditivo epóxico en el anclado de refuerzos.

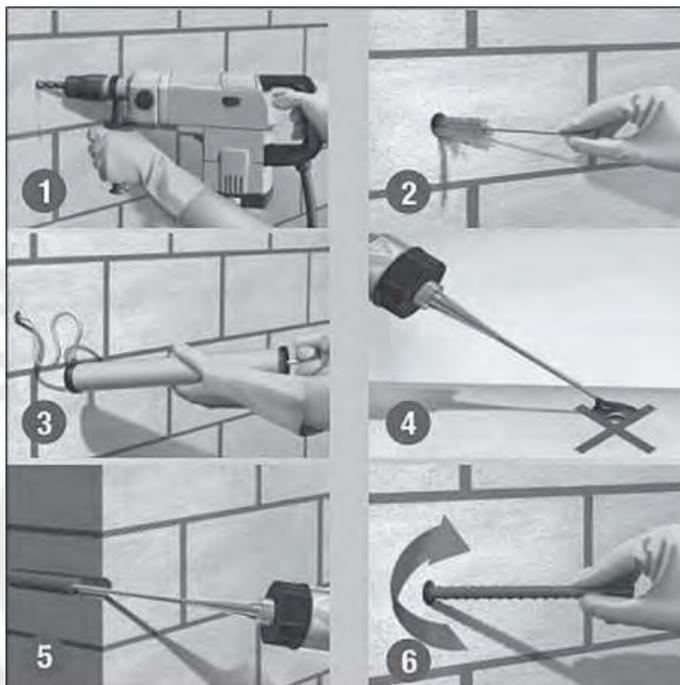


Figura 2.13: Secuencia de aplicación del aditivo epóxico en el anclado de refuerzo

- 5.- Colocación del acero de refuerzo longitudinal.
- 6.- Colocación de los estribos (confinamiento).
- 7.- En caso se requiera, colocación de ganchos tipo L para asegurar la armadura.
- 8.- Encofrado del reforzamiento.
- 9.- Vaceado del concreto nuevo.

Consideraciones

Para que el encamisado de concreto armado cumpla su función de reforzamiento estructural, es necesario tener mucho cuidado en su proceso constructivo. Si bien el método parece sencillo de realizar, al momento de picar el concreto viejo se expone la armadura inicial de acero, para lo cual debe haber un adecuado picado a fin de no dañar esta armadura.

Luego del picado, se debe contar con una superficie rugosa, a fin de preparar el elemento para el puente entre concreto viejo y nuevo. Se debe limpiar también el elemento viejo picado para no tener rastros de aceite, pintura, grasa, entre otros al momento de vacear el concreto del reforzamiento.

Monolitismo

Se sugiere utilizar un concreto de resistencia mayor ($f'c$) que el concreto viejo para el concreto nuevo del encamisado. La sección debe trabajar como una sola, es decir que debe existir una adherencia alta entre el concreto del elemento antiguo y el concreto del elemento nuevo. Por lo tanto, es necesario la inclusión de un adhesivo epóxico que permita la adherencia entre el concreto del reforzamiento colocado y el concreto antiguo del elemento picado. Uno de los adhesivos más utilizados es el Sikadur®32 GEL, cuya presentación viene en gel y se aplica a la sección picada como si fuera pintura, generando una capa de adhesivo antes de proceder con el vaciado de concreto nuevo.

Refuerzo de cimentación

En el primer nivel el encamisado de concreto debe anclar en la cimentación existente, por lo que se debe excavar hasta encontrar su nivel de profundidad para poder anclar el nuevo acero de refuerzo con adhesivo epóxico. Por otro lado, el aumento de peso genera un cambio en la carga que soporta la zapata, por lo que se debe reforzar la cimentación. Un

modo de reforzar las zapatas se muestra en la figura 2.14 donde se puede observar que se agrega una losa de cimentación a modo de encamisado en la zapata existente. Debajo de esta losa se coloca un enrocado simulando una falsa zapata.



Figura 2.14: Refuerzo de una zapata existente debido a la ejecución de un encamisado de concreto armado

2.7.3. Diseño del encamisado de concreto armado

El concreto que se añade a la sección existente debe resistir como mínimo la mitad de la resistencia axial, por lo tanto se presenta la siguiente ecuación:

$$\frac{Pn}{2} = 0.85 \cdot f'_{cc} \cdot A_b \quad (2.4)$$

Donde:

P_n = Resistencia axial nominal

f'_{cc} = Esfuerzo de compresión del concreto nuevo

A_b = Área bruta de la sección de encamisado

Se presenta en la figura 2.15 una sección rectangular de columna reforzada con un encamisado de concreto armado de espesor “e”.

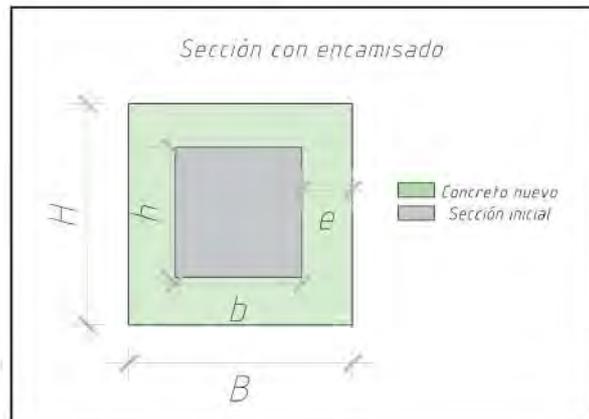


Figura 2.15: Encamisado de concreto armado

De la figura 2.15 se puede obtener las siguientes expresiones para determinar el espesor a utilizar para la sección encamisada, siendo A_b el área bruta de la sección añadida para el encamisado :

$$A_b = (B \cdot H) - (b \cdot h) \quad (2.5)$$

$$A_b = 4 \cdot e^2 + 2 \cdot e \cdot (b + h) \quad (2.6)$$

Reemplazando la ecuación 2.6 en la ecuación 2.4 se tiene

$$P_n = 0.85 \cdot f'_{cc} \cdot (4e^2 + 2e \cdot (b + h)) \quad (2.7)$$

Para calcular el acero se utiliza la ecuación tradicional para calcular la resistencia axial en una columna, punto también correspondiente a la falla por compresión en el diagrama de interacción.

$$P_n = A_{st} \cdot f_y + 0.85 \cdot f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) \quad (2.8)$$

Las ecuaciones presentadas en esta sección permiten obtener un resultado inicial para las dimensiones del reforzamiento, sin embargo se debe cumplir también con la cuantía mínima de refuerzo con acero para la sección total, es decir como mínimo el 1%. Así también, se debe corroborar que todas las combinaciones de cargas que indica la norma E 0.30 deben estar dentro del diagrama de interacción de la columna diseñada.

Diseño por cortante

Para el diseño por cortante en el concreto se utiliza el mismo procedimiento que en una columna tradicional. La resistencia de diseño al corte del concreto se calcula con la siguiente ecuación:

$$\phi V_c = 0.85 \cdot 0.53 \cdot \sqrt{f'_{cc}} \cdot B \cdot d \quad (2.9)$$

Donde:

ϕV_c = Resistencia de diseño al corte del concreto

B = Ancho de la sección

d = Peralte efectivo de la sección

f'_{cc} = Resistencia a la compresión del concreto nuevo

Para la resistencia del acero transversal se utiliza la siguiente ecuación:

$$\phi V_s = \frac{\phi A_g \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (2.10)$$

Donde:

ϕV_s = Resistencia de diseño al corte del acero transversal

A_g = Resistencia a la compresión del concreto

f_y = Resistencia a tracción del acero

d = Peralte efectivo de la sección

s = Separación de los estribos

2.7.4. Antecedentes internacionales

En México, se han llevado a cabo distintas investigaciones acerca de este reforzamiento, por ejemplo: Thermou, Papanikolaou, Kappos (2014) realizan un análisis numérico del comportamiento del encamisado de concreto armado, haciendo énfasis en los factores de diseño que luego repercuten en la resistencia del elemento. También Soto (2008), describe las técnicas más conocidas en ese momento para reparar y/o reforzar estructuras de concreto armado, enfatizando su trabajo de investigación en el encamisado de columnas, comparando y analizando estudios previamente realizados del tema.

2.7.5. Antecedentes locales

El manual de referencia para diseño en concreto armado es el ACI 318, donde se incluye un capítulo entero dedicado al tema de reforzamiento estructural, dando pautas generales a todos los constructores sobre espaciamientos mínimos, empalmes, desarrollo de esfuerzos, etc. La norma oficial peruana que se asemeja al ACI 318 es la E 0.60, la cual incluye el detalle para el reforzamiento estructural en concreto armado.

También, se han desarrollado tesis enfocadas en realizar ensayos que permitan cuantificar la resistencia mecánica que aporta este refuerzo. Por ejemplo, Quispe (2018) compara mediante ensayos a compresión, la resistencia de una sección de columna sin reforzar frente a otra sección con un encamisado de concreto armado, concluyendo que la resistencia hallada en laboratorio a compresión pura es 10.01 % menor que la resistencia teórica .

Finalmente, es necesario mencionar que el encamisado de concreto armado es el método más usual al momento de reforzar una edificación. Inclusive, existen casos donde se han rehabilitado viviendas de una manera informal, utilizando este método de reforzamiento,

donde el maestro de obra amplía la sección de una columna bajo su criterio sin apoyo técnico de profesionales y con la aplicación de normas de diseño que tienen niveles de exigencia más bajos que las vigentes (Estrada, 2018). Lo mencionado se debe a que el reforzamiento como tal no requiere de materiales ajenos a obra (concreto o acero), salvo quizá el adhesivo epóxico, el cual se puede encontrar fácilmente en cualquier distribuidor de materiales.

2.7.6. Aporte de resistencia teórica y real

Como se mencionó anteriormente, se han llevado a cabo ensayos que sometieron probetas de concreto armado reforzadas con encamisados de concreto armado frente a esfuerzos de compresión, obteniendo valores de resistencia a compresión menores a los que se esperaban según el diseño teórico; lo cual se debe a que no se puede predecir exactamente el comportamiento de una sección de concreto armado reforzada debido a que intervienen muchos factores a considerar como por ejemplo: la calidad del concreto con la cual se realiza el reforzamiento, el adhesivo epóxico utilizado para la junta entre concreto nuevo y viejo, etc.

Según los ensayos descritos, se concluyó que existe un porcentaje de diferencia entre el aporte de resistencia teórico del encamisado de concreto armado frente al real. Quispe (2018), obtiene un porcentaje de 10.01 %. Los ensayos realizados para obtener ese porcentaje fueron de compresión pura y se realizaron en Cajamarca.

También, se han realizado ensayos con encamisados parciales, es decir solo reforzando algunas caras de la sección inicial de concreto armado. La revista ALCONPAT (2018), publicó los resultados de un trabajo de investigación donde se ensayaron seis columnas a flexo-compresión con sección inicial (12 x 20) cm², sección final (20 x 20) cm² y altura de 1.60 m. Todas las columnas fueron monitoreadas por extensómetros eléctricos de resistencia, colocados longitudinalmente a la columna para registrar la deformación del concreto y del acero.

Relojes comparadores digitales fueron utilizados para monitorear los desplazamientos (Oliveira et al., 2018) . Se concluyó que existe un porcentaje del orden de 15-20% de variación respecto a los momentos y axiales teóricos frente a los reales que se obtuvieron ensayando los especímenes de columnas. Se puede apreciar en la figura 2.16 el modelo de ensayo realizado.

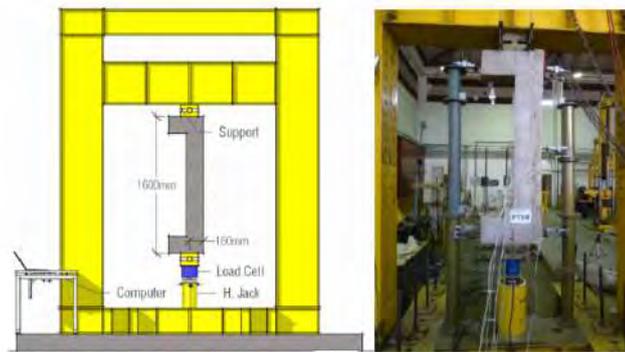


Figura 2.16: Sistema de ensayo de las columnas reforzadas con encamisado de concreto parcial

(Oliveira, Damasceno, y Branco, 2018)

2.8. Refuerzo de columnas de concreto armado con CFRP

2.8.1. Uso de CFRP como reforzamiento

El uso de fibras de carbono como material compuesto tiene su origen en los años 70's y 80's, cuando diversas empresas japonesas comenzaron a utilizar las fibras de carbono para producir productos como neumáticos, equipos de protección personal, chalecos antibalas, etc. En la figura número 2.17 se puede apreciar de cerca el detalle del tejido de fibra de carbono.

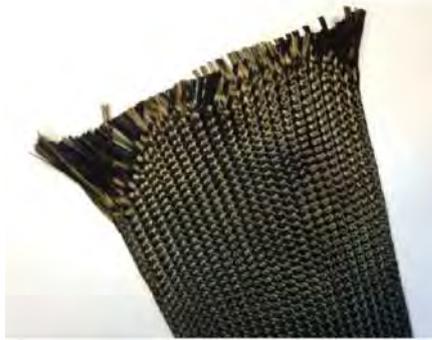


Figura 2.17: Tejido de fibra de carbono
(SIKA, 2018)

Hoy en día es común utilizar materiales de CFRP en obras de reforzamiento para edificios. Existen tanto platinas de reforzamiento como laminados, los cuales se incorporan a los elementos que se deseen reforzar. El presente trabajo de investigación utilizará el laminado como opción de refuerzo con CFRP, debido principalmente al software que se tiene en el mercado para diseñar reforzamiento con laminado CFRP.

Algunas propiedades que ofrece el CFRP frente a otros materiales convencionales son las siguientes:

- El CFRP tiene una densidad 5 veces menor que el acero convencional.
- El CFRP posee una buena resistencia frente a agentes alcalinos, por lo que se comporta mejor frente a efectos de corrosión.
- El CFRP presenta una conductividad térmica elevada.
- El CFRP presenta una alta resistencia a la tensión.

También, es necesario mencionar que las propiedades de los sistemas de FRP dependen de la resina de fibra utilizado para la elaboración del material, por lo que ciertas propiedades pueden variar de acuerdo con el tipo de fibra que se utilice. Se muestra a continuación la

tabla 2.5 que resume el comportamiento a tracción de diferentes sistemas de FRP, la cual se encuentra en la norma ACI 440.

Tabla 2.5: Comportamiento a tracción de distintos sistemas FRP

(ACI 440 Committee, 2019)

Fiber type	Elastic modulus		Ultimate strength		Rupture strain, minimum, %
	10 ³ ksi	GPa	ksi	MPa	
Carbon					
General purpose	32 to 34	220 to 240	300 to 550	2050 to 3790	1.2
High-strength	32 to 34	220 to 240	550 to 700	3790 to 4820	1.4
Ultra-high-strength	32 to 34	220 to 240	700 to 900	4820 to 6200	1.5
High-modulus	50 to 75	340 to 520	250 to 450	1720 to 3100	0.5
Ultra-high-modulus	75 to 100	520 to 690	200 to 350	1380 to 2400	0.2
Glass					
E-glass	10 to 10.5	69 to 72	270 to 390	1860 to 2680	4.5
S-glass	12.5 to 13	86 to 90	500 to 700	3440 to 4140	5.4
Aramid					
General purpose	10 to 12	69 to 83	500 to 600	3440 to 4140	2.5
High-performance	16 to 18	110 to 124	500 to 600	3440 to 4140	1.6

Comportamiento a tracción de materiales con CFRP

El principal aporte que brinda el uso de CFRP es aumentar la resistencia a tracción al elemento que acompañe. El comportamiento a tracción del CFRP se caracteriza por una relación tensión- deformación elástica lineal hasta producirse la falla. El tipo de fibra, la orientación de las fibras, la cantidad de fibras y las condiciones en las que se produce el material compuesto afectan las propiedades de tracción del material CFRP. (Guillermo La Torre y Silva, 2019)

2.8.2. Proceso constructivo

Para reforzar columnas con CFRP se procede a confinar columnas con camisas de CFRP, las cuales generalmente se consiguen en láminas de tejidos de fibras de carbono; de este modo, se aumenta el confinamiento de la sección que rodee el reforzamiento. Reforzar co-

lumnas de este modo es mucho mas efectivo en secciones circulares, debido a que la presión de confinamiento afecta a la totalidad de la sección, para secciones rectangulares se debe dar una curvatura a las esquinas a fin de no cortar la lámina de CFRP. En la figura 2.18 se puede observar un encuentro de vigas y columna, donde se reforzó con láminas de fibra de carbono, y se puede apreciar la curvatura descrita en la esquina de la columna.



Figura 2.18: Columna reforzada con CFRP
(SIKA, 2018)

Se enumera a continuación los principales pasos reforzar columnas con CFRP :

- 1.- Limpieza de la superficie de la sección que se desea reforzar, a fin de eliminar cualquier impureza, grasa u otro elemento que dificulte la posterior unión con la fibra de carbono.
- 2.- Redondeo de las esquinas en caso sea una sección rectangular.
- 3.- Aplicación del imprimador y saturante, que son el puente adhesivo para posteriormente aplicar las láminas de fibra de carbono.
- 4.- Colocación de la primera capa con láminas de fibra de carbono.

- 5.- Aplanado de las láminas de fibra de carbono con espátulas plásticas y rodillos acanala- dos.
- 6.- Proceder de este modo cuantas capas sean necesarias (de acuerdo al cálculo obtenido en el diseño).
- 7.- Recubrimiento final de la columna con mortero u otro modo de acabado según se dis- ponga.

2.8.3. Diseño del reforzamiento con CFRP

La base de cálculo del reforzamiento con CFRP depende de la normativa que se aplique. La figura 2.19 muestra de manera simplificada los códigos de diseño utilizados en los dife- rentes países del mundo. Los códigos europeos tienen un código propio de diseño, el FIB Bulletin 14/ TR55. En la zona americana es utilizado el manual del ACI 440.2R.



Figura 2.19: Distribución mundial de normativa simplificada para CFRP (SIKA, 2018)

El manual 440.2R del ACI contiene el sustento teórico necesario para el diseño de ele- mentos FRP en el Perú. En tal manual, se encuentra las especificaciones para poder diseñar

los refuerzos de acuerdo a la fibra que se requiera en elementos como vigas o columnas.

En particular, para el caso de un aumento de resistencia axial (para un caso de carga donde la excentricidad sea menor a 0.1 h) el manual presenta el procedimiento para realizar un diseño de estas características, el cual parte de conocer las propiedades del material de fibra de carbono que se este utilizando en el diseño. Los valores de interés del material a utilizar en el diseño son:

- El espesor del laminado de fibra de carbono t_f
- La resistencia última a tracción f'_{fu}
- La deformación última de ruptura ϵ'_{fu}
- El módulo de elasticidad E_f

Los valores de resistencia última f'_{fu} y deformación última ϵ'_{fu} se ajustan con el coeficiente presentado en la tabla 2.5, un valor recomendado es $C_E = 0.95$.

$$f_{fu} = C_E \cdot f'_{fu} \quad (2.11)$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \cdot \epsilon'_{fu} \quad (2.12)$$

Luego se determina la resistencia a compresión necesaria para el concreto confinado f'_{cc} .

$$f'_{cc} = \frac{1}{0.85 \cdot (A_t - A_{st})} \cdot \left(\frac{\phi P n}{0.80 \cdot \phi} - f_y \cdot A_{st} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

- A_t = Área total de la sección
- A_{st} = Área de acero

- ϕP_n = Carga axial nominal solicitada (P_u)
- ϕ = Factor de reducción para compresión
- f_y = Resistencia a tracción del acero

En las ecuaciones donde se involucre utilizar el área de una sección rectangular confinada, se debe considerar el área efectiva del refuerzo. Tal área es un círculo con con diámetro D igual a $\sqrt{b^2 + h^2}$, como se puede apreciar en la figura 2.20.

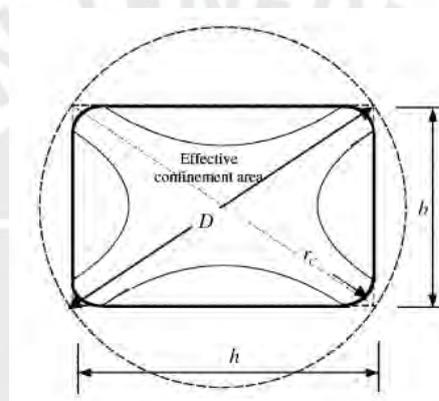


Figura 2.20: Área efectiva de una sección no rectangular confinada con FRP (ACI 440 Committee, 2019)

K_a y K_b son factores de forma para la sección equivalente de diseño.

$$K_a = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (2.14)$$

$$K_b = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} \quad (2.15)$$

A_e/A_c es la relación entre el área efectiva de la sección confinada por FRP y el área de la sección sometida a compresión y se calcula con la ecuación (2.16).

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\frac{b}{h} \cdot (h - 2rc)^2 + \frac{h}{b} \cdot (h - 2rc)^2}{3A_g} - \rho g}{1 - \rho g} \quad (2.16)$$

Donde:

- A_g = Área bruta de la sección
- r_c = Radio de curvatura de la sección circular equivalente (área efectiva del refuerzo)
- ρ_g = Cuantía del acero de refuerzo

La presión máxima de confinamiento f_l se calcula con la ecuación (2.17).

$$f_l = \frac{f'_{cc}}{3.3 \cdot K_a} \quad (2.17)$$

La deformación efectiva del material FRP en la falla ϵ_{fe} se determina con la ecuación (2.18), donde “ke” corresponde al factor de eficiencia para la falla del material FRP, para fines de diseño suele utilizarse un valor de 0.55.

$$\epsilon_{fe} = k_e \cdot \epsilon_{fu} \quad (2.18)$$

El número de capas necesarias “n” para el reforzamiento se calcula con la ecuación (2.19). Se ha incluido un factor de reducción Ψ que el comité ACI 440.2R recomienda sea 0.95 para las ecuaciones de diseño.

$$n = \frac{f_l \cdot \sqrt{b^2 + h^2}}{\Psi \cdot 2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}} \quad (2.19)$$

Debe comprobarse que se cumpla el radio mínimo de confinamiento:

$$\frac{f_l}{f'_c} \geq 0.08 \quad (2.20)$$

La deformación máxima del concreto confinado ϵ_{ccu} debe resultar menor a 0.01 y se calcula con la ecuación (2.21). El valor de ϵ'_c es la deformación efectiva para concreto confinado, la

norma recomienda utilizar un valor de 0.002.

$$\epsilon_{ccu} = \epsilon'_c \cdot (1.50 + 12Kb \cdot \frac{fl}{f'_c} \cdot (\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon'_c})^{0.45}) \quad (2.21)$$

En caso que la excentricidad sea mayor a 0.1 h, en el manual 440.2R del ACI se encuentra las especificaciones para obtener el diagrama de interacción de una sección reforzada con FRP, que por simplicidad se reduce a una curva bilineal que se obtiene con 3 puntos, los cuales unidos forman el diagrama de interacción (ACI 440 Committee, 2019). La figura 2.21 muestra el diagrama de interacción inicial y su incremento de resistencia cuando se confina la sección.

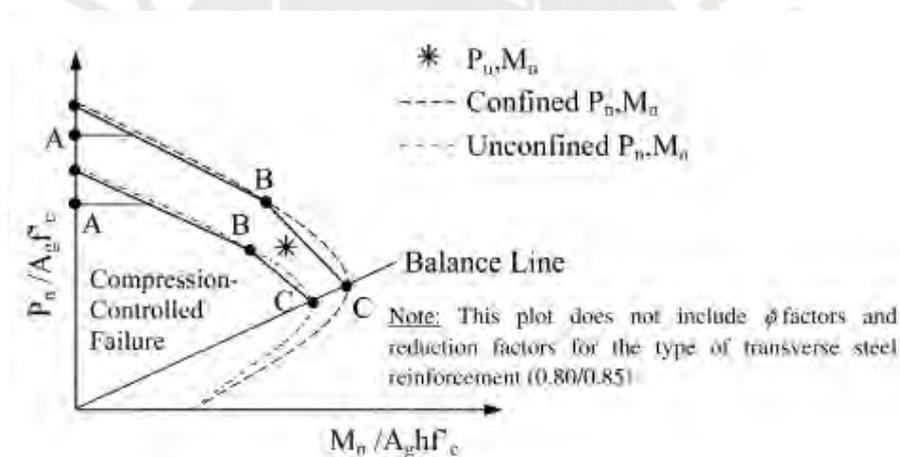


Figura 2.21: Diagrama de interacción de una sección reforzada con FRP (ACI 440 Committee, 2019)

- Punto A, asociado a la falla en compresión pura
- Punto B, asociado a una distribución de deformaciones donde se tiene una deformación igual a cero en la capa de acero longitudinal más alejada y una deformación de compresión ϵ_{ccu} en la cara en compresión.
- Punto C, asociado a la falla balanceada.

- Punto D, asociado a flexión pura.

2.8.4. Límites del reforzamiento

La norma ACI 440.2R-19 impone límites en el diseño del reforzamiento con CFRP para evitar el colapso de la estructura por despegue u otro fallo del sistema CFRP debido a vandalismo, daños u otras causas. En el caso hipotético que el reforzamiento con CFRP falle, la estructura debe ser capaz de soportar una mínima combinación de cargas sin colapsar (SIKA, 2018) .

$$\phi Rn(existente) \geq 1.1S_{dl} + 0.75S_{ll}(nuevo) \quad (2.22)$$

Donde :

ϕ = Factor de reducción de resistencia.

Rn = Resistencia nominal de una sección de concreto armado.

S_{dl} = Solicitación de peso propio.

S_{ll} = Solicitación de sobrecarga

Si la carga viva predominante en el elemento está presente durante periodos prolongados de tiempo, como en almacenes o zonas de acopio de mercancías, se debe considerar lo mencionado en el diseño. Por tanto, la combinación de carga que debe soportar el elemento sin reforzar es :

$$\phi Rn(existente) \geq 1.1S_{dl} + S_{ll}(nuevo) \quad (2.23)$$

2.8.5. Resistencia al fuego

Las resinas de los polímeros usados en los sistemas CFRP de aplicación en húmedo y pre-impregnados así como los adhesivos epóxicos utilizados en los sistemas CFRP pierden integridad estructural a temperaturas elevadas. Debido a esto y la baja resistencia a la tem-

peratura del sistema CFRP, el sistema FRP no tiene capacidad de resistir fuego por un periodo considerable de tiempo (Navarrete, 2017).

Pese a que el sistema CFRP por sí mismo tiene una baja resistencia al fuego, la combinación del sistema CFRP con una estructura de concreto armado existente puede aún tener un adecuado nivel de resistencia. Esto se debe a la resistencia inherente de la sola estructura de hormigón existente a altas temperaturas. En lo que respecta a la resistencia al fuego de la estructura de hormigón reforzada con CFRP, es importante reconocer que la resistencia de las estructuras de hormigón reforzadas con métodos tradicionales (encamisado de concreto armado) es también un tanto reducida, durante la exposición a temperaturas elevadas (Navarrete, 2017).

Una verificación para la resistencia nominal del elemento sin reforzar en caso de incendio viene dada por la siguiente relación, la cual se encuentra en la mayoría de softwares de diseño con CFRP.

$$\phi Rn(existente) \geq S_{dI} + S_{dII}(nuevo) \quad (2.24)$$

2.8.6. Errores habituales en el diseño del reforzamiento

Existen algunos casos en los que no es posible realizar el reforzamiento utilizando CFRP. De acuerdo a la ubicación de la columna que se desee reforzar, el confinamiento puede no cumplir su función como se puede observar en los dos primeros casos en la imagen 2.22. Por otro lado, si la geometría de la sección de la columna es irregular, el reforzamiento con CFRP no tendrá mucho efecto en el aumento de resistencia a la columna, esto se puede observar en los últimos casos presentados en la figura 2.22.

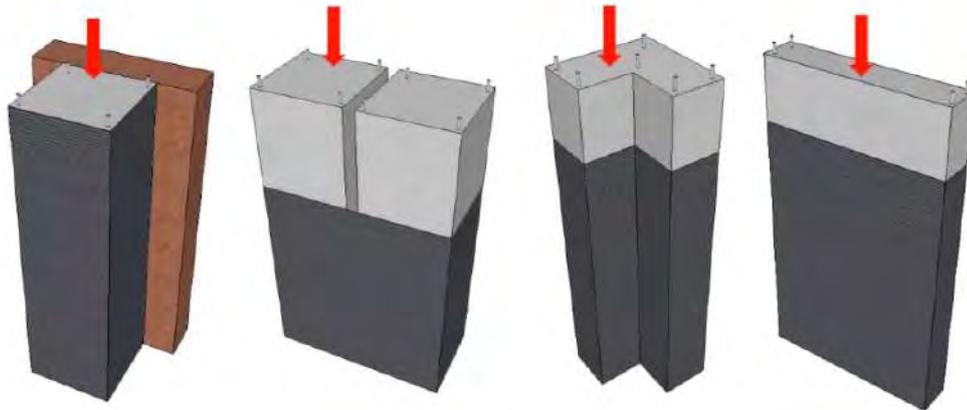


Figura 2.22: Errores frecuentes utilizando reforzamiento con CFRP (SIKA, 2018)

2.8.7. Antecedentes internacionales

En un inicio el uso de CFRP en el sector construcción estaba derivado para arquitectura, pasando luego a tener un uso estructural, específicamente en la reparación de elementos estructurales como vigas o columnas. Diversos estudios experimentales realizados en Estados Unidos han comprobado que el confinamiento con láminas de FRP alrededor del perímetro de columnas circulares y rectangulares de concreto armado, mejora su resistencia y ductilidad (Rougier, 2003).

En particular, se han llevado a cabo ensayos en laboratorio para poder obtener curvas teóricas que permitan describir el comportamiento de este reforzamiento en columnas de concreto armado, se muestra a continuación en la figura 2.23 las curvas experimentales obtenidas por Untiveros (2002), curvas que fueron obtenidas al ensayar un grupo de probetas confinadas con tubos de CFRP.

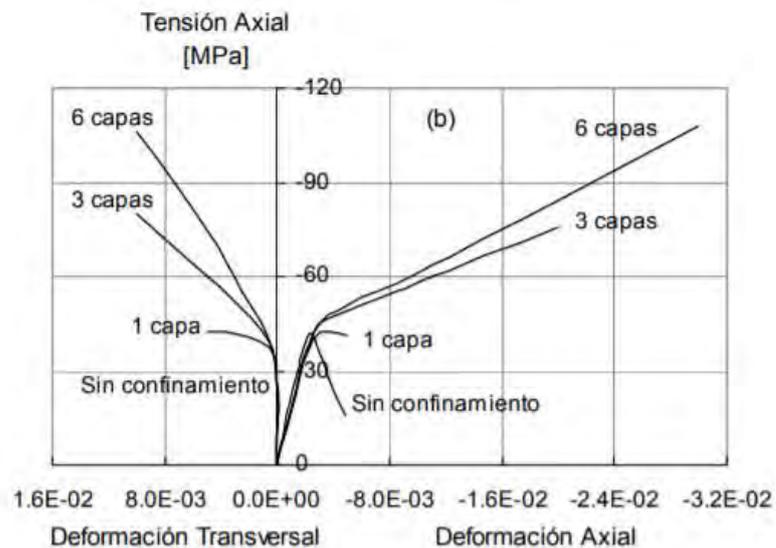


Figura 2.23: Curvas experimentales tensión deformación axial para concreto armado confinado con tubos reforzados con fibras de carbono (CFRP) (Untiveros, 2007)

Como se puede observar, las curvas obtenidas reflejan una significativa mejora en la resistencia y ductilidad del concreto conforme aumenta el número de capas de confinamiento. Conforme se incrementan las fisuras, el volumen del concreto comienza a incrementarse, activando de este modo el mecanismo del confinamiento con CFRP. El tubo de CFRP comienza a mostrar una contracción volumétrica, evidenciado en un punto notorio en las curvas previamente presentadas. Tal punto es llamado por algunos autores punto de transición (Mirmiran y Shahawy, 1997) e indica un comportamiento pseudo-plástico del concreto confinado con CFRP. (Rougier, 2003).

Por otro lado, son bastantes las experiencias positivas en cuanto al uso del CFRP como método de reforzamiento. Se ha podido concluir que el sistema FRP aporta resistencia y ductilidad al elemento que confina, no solamente mediante ensayos en laboratorio, sino en construcciones reales donde se ha utilizado este método de reforzamiento. Se muestra en la figura 2.24 columnas reforzadas con CFRP, tales elementos fueron reforzados tanto en el

primer nivel como en el segundo.



Figura 2.24: Columnas de un almacén reforzadas con CFRP (Masterbreace, 2020)

2.8.8. Antecedentes nacionales

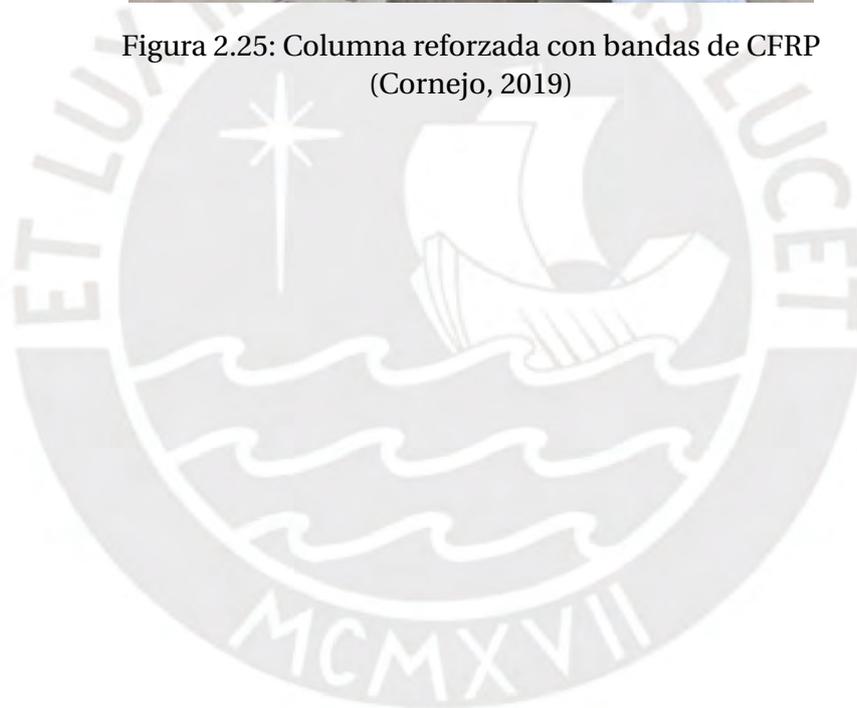
En los últimos años han sido cada vez mas constantes las investigaciones acerca del CFRP como material de reforzamiento. Por ejemplo, Cornejo (2019) estudia el comportamiento mecánico de una columna corta, reforzada con bandas de fibra de carbono (CFRP) sometida a carga lateral cíclica, mediante ensayos experimentales realizados en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, concluyendo que el CFRP incrementó en un 39% la resistencia a carga lateral, así como permitió controlar las deriva permitida por norma (0.007).

También, Alegre (2017) , estudia el efecto de reforzar vigas de concreto armado con CFRP, teniendo como objetivo analizar el estado elástico e inelástico del comportamiento de vigas reforzadas con este método de reforzamiento. Siguiendo esta línea de investigación, Samaniego (2021) realizó ensayos de vigas reforzadas con bandas de CFRP bajo carga cíclica en los extremos de sus voladizos. Se logró controlar el proceso de agrietamiento, e incrementar la resistencia de la carga máxima en 35%. Se presenta en la figura 2.25 los especímenes de

las vigas ensayadas en vertical, con las bandas de CFRP.



Figura 2.25: Columna reforzada con bandas de CFRP
(Cornejo, 2019)



Capítulo III

Metodología

La presente investigación tiene por finalidad comparar el encamisado de concreto armado y el CFRP en laminado como reforzamientos estructurales en columnas, para lo cual se realizará un análisis teórico de la resistencia que aportan ambos reforzamientos, seguido de una comparación entre sus procesos constructivos y finalmente un cotejo entre el costo que tendría ejecutar cada una de las alternativas de reforzamiento en el Perú. Se presenta a continuación en la figura 3.1 el flujograma que resume la metodología a utilizar en el presente trabajo de investigación:

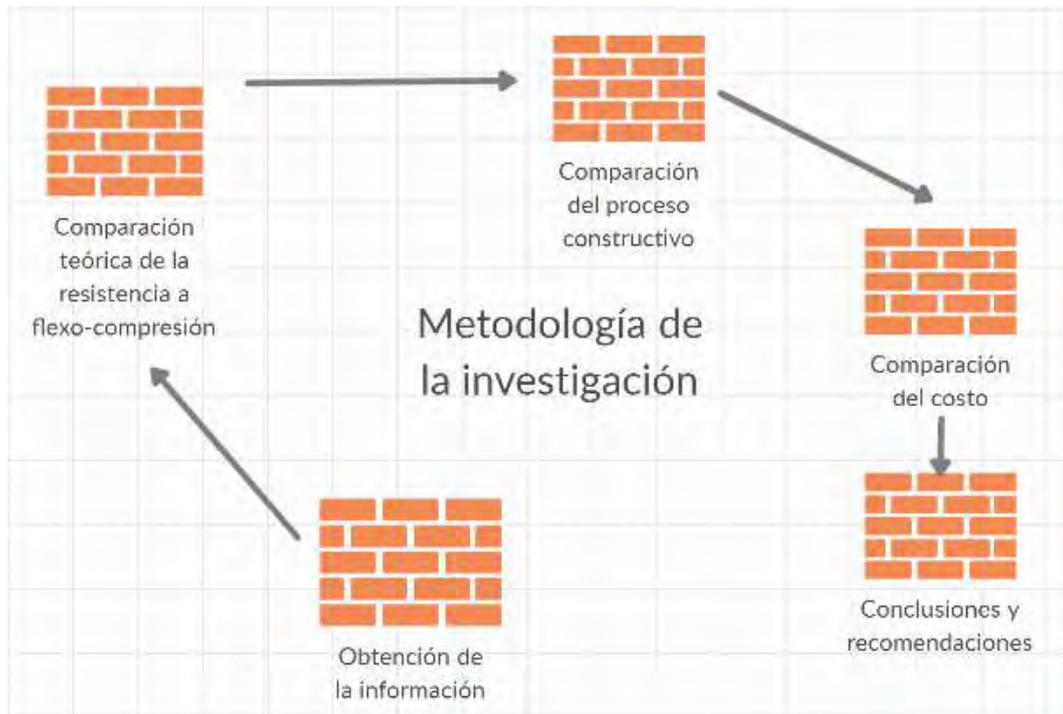


Figura 3.1: Metodología para el presente trabajo de investigación

El análisis teórico tendrá como objetivo comparar la resistencia a flexo-compresión que otorga cada uno de los reforzamientos, para lo cual se realizará el modelo estructural de un proyecto de reforzamiento realizado en el año 2019 en la ciudad de Puno. El proyecto consta de un módulo correspondiente a un pabellón de aulas en la Universidad Nacional Del Altiplano (Puno), el cual se construyó hace 30 años sin seguir la normativa actual correspondiente al diseño sismoresistente. Se puede apreciar en la figura 3.2 la proyección del edificio reforzado. En la figura 3.3 se presenta la planta típica de la estructura proyectada.



Figura 3.2: Fachada principal del proyecto de reforzamiento en la UNA-PUNO

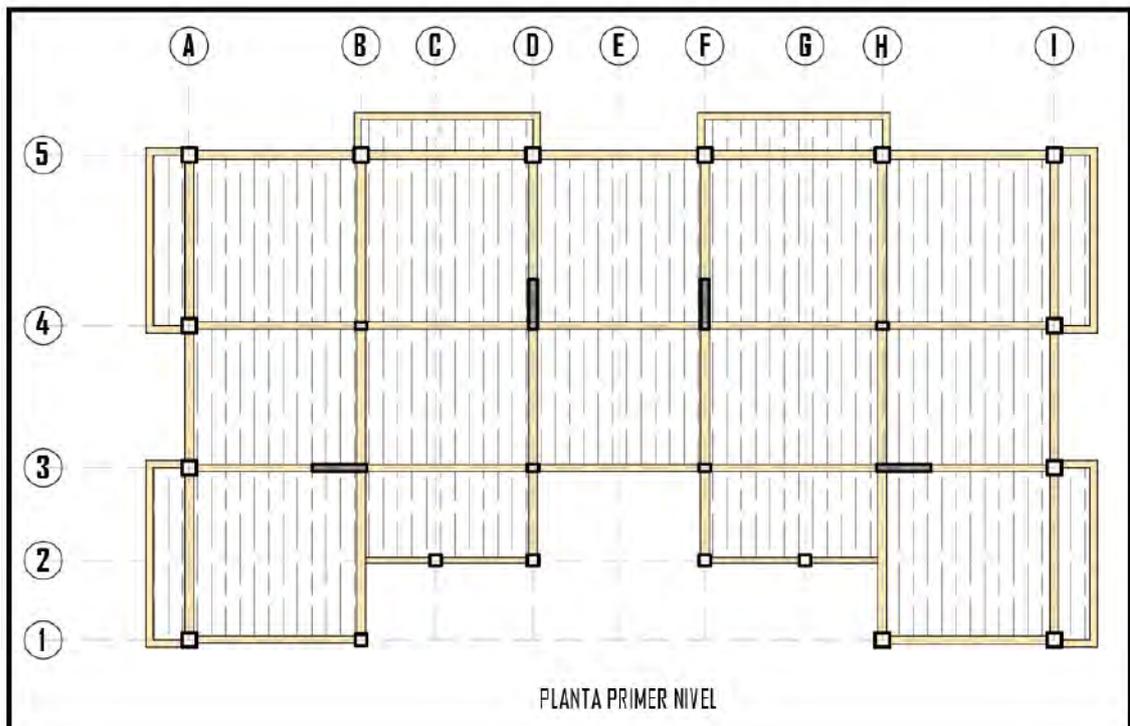


Figura 3.3: Planta del proyecto de reforzamiento en la UNA-PUNO

Se tomará como referencia este proyecto para realizar el modelo con las cargas correspondientes a la normativa peruana actual, de este modo se obtendrá la representación más cercana a la realidad. El fin de realizar el modelo es poder apreciar el incumplimiento de la norma de diseño actual para las columnas construidas en el proyecto. Luego de ello, se propondrán 2 soluciones de reforzamiento estructural: la primera opción será encamisar las columnas con concreto armado y la segunda opción será confinarlas con material CFRP.

3.1. Verificación del modelo estructural

Con el modelo estructural realizado, se realizará un análisis dinámico con el respectivo sismo de diseño, utilizando las combinaciones de carga que describe la norma sismoresistente E 0.30. Se verificará si las derivas de entrepiso cumplen con el límite para estructuras de concreto armado (0.007), finalmente se obtendrán las cargas que actúan a nivel global de la estructura y a nivel local en los distintos elementos estructurales como vigas y columnas.

3.2. Obtención de la resistencia a flexo-compresión teórica

Se realizará dos propuestas de reforzamiento para las columnas de la estructura. La primera será incrementando su sección de concreto y añadiendo acero de refuerzo (encamisado de concreto armado) y la segunda propuesta consistirá en confinar la sección con CFRP (fibra de polímero de carbono).

3.2.1. Encamisado de concreto armado

- Para la primera propuesta se ampliará la sección de concreto y se añadirá acero de refuerzo siguiendo los parámetros de diseño de una columna convencional, es decir

respetando la cuantía mínima de acero, las distancias de recubrimiento, la resistencia específica del concreto utilizado ($f'c$) , etc.

- Con la sección del reforzamiento definida se procederá a calcular el diagrama de interacción de la manera convencional, es decir variando la posición del eje neutro de la sección definida y obteniendo uno a uno los puntos representativos del diagrama de interacción.
- En la práctica profesional, es común no considerar el acero existente en la columna que se desea reforzar para fines de cálculo estructural; es decir, que para obtener el diagrama de interacción solo se considera el acero nuevo del reforzamiento planteado. Esto con el fin de ser conservadores en el diseño, ya que en el acero existente suele tener un tiempo de vida útil y con los años pierde capacidad de resistencia.
- Para obtener un resultado confiable se hará uso del software ETABS 2019, que permite realizar las iteraciones correspondientes para finalmente tener el gráfico del diagrama de interacción para la primera propuesta de reforzamiento.

3.2.2. Obtención del diagrama de interacción utilizando el software ETABS

Como se mencionó anteriormente, el software permite realizar la rutina de cálculo de una manera rápida y precisa. Utilizando el comando “Interaction Surface” se puede obtener el diagrama de interacción de cualquier sección dibujada en el software.

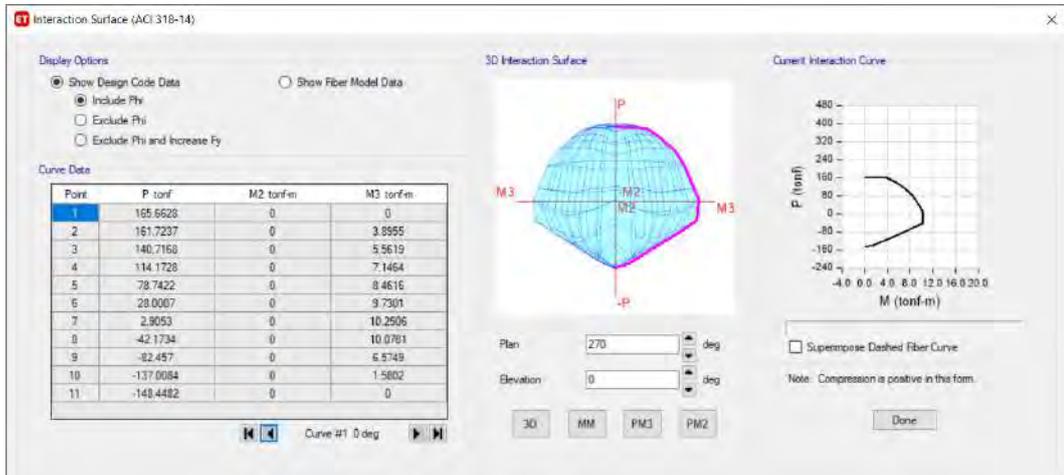


Figura 3.4: Diagrama de interacción utilizando ETABS 2019

3.2.3. Refuerzo con CFRP

- Para la segunda propuesta se confinará la sección inicial con láminas de fibra de carbono (CFRP), teniendo en consideración la geometría de la sección (circular o rectangular) y demás parámetros descritos anteriormente.
- Se definirá el tipo de fibra a utilizar para el reforzamiento, considerando un material disponible en el medio (Perú), para de este modo contar con las especificaciones técnicas que son requeridas para el cálculo de resistencia posterior.
- Con el material del reforzamiento definido, se procederá a calcular la resistencia a flexocompresión que aporta el CFRP a la sección reforzada utilizando el software Carbo-dur® para obtener resultados confiables y validando estos resultados con una hoja de cálculo que utilice las ecuaciones de la norma ACI 440.2R.

3.2.4. Uso del software Sika®Carbodur® para diseño de reforzamiento con CFRP

El software Sika®Carbodur® es una herramienta de diseño cuyo objetivo es proporcionar la asistencia necesaria en el dimensionamiento de reforzamiento mediante CFRP, para lograr un refuerzo a flexión, refuerzo a cortante y confinamiento de columnas (SIKA, 2018). Los procedimientos de cálculo que emplea este software están basados en la norma ACI440.2R-08 *“Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente, para el refuerzo de estructuras de concreto”*. Por lo mencionado anteriormente, este software resulta una opción práctica para poder obtener los diagramas de interacción de columnas reforzadas con CFRP.

La plataforma de diseño permite incorporar materiales de refuerzo propios de Sika®, como por ejemplo SikaWrap®600, de 300c y 600c. De este modo, se tienen los parámetros definidos para poder diseñar de manera rápida y eficaz un reforzamiento con CFRP para columnas. Luego de definir el refuerzo necesario para que la sección cumpla las exigencias de la norma (información que se encuentra en la base de datos del software), se obtiene la información necesaria para justificar el diseño del reforzamiento, así como las especificaciones técnicas del material utilizado para las capas de refuerzo. En la figura 3.5 se puede visualizar la interfaz de diseño del software Sika®Carbodur®. Los resultados de este software se validarán utilizando las ecuaciones de la norma ACI 440.2R en una hoja de cálculo, la cual se presenta en el anexo A.

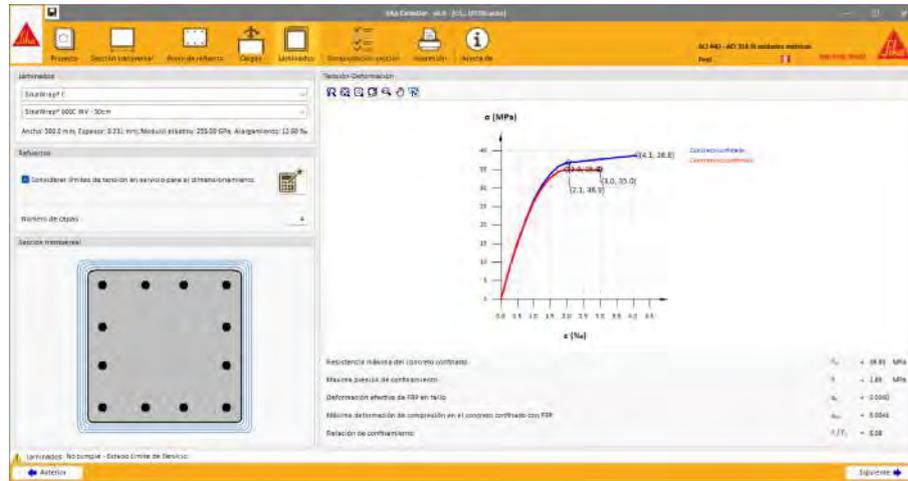


Figura 3.5: Interfaz de diseño en Carbodur®

3.3. Parámetros de comparación en el proceso constructivo de ambos reforzamientos

Materiales para el reforzamiento

En este punto, se analizará los materiales necesarios para poder ejecutar cada uno de los métodos de reforzamiento planteados. Se comparará la disponibilidad de materiales de acuerdo a la naturaleza del proyecto de ampliación o reforzamiento en el cual se pretenda utilizar los reforzamientos.

Modo de construcción

Luego de tener definido los materiales necesarios para realizar los reforzamientos planteados, se procederá a comparar el modo de ejecución detallado de cada uno de los métodos de reforzamiento, teniendo en consideración las herramientas necesarias para poder efectuarlos, el tipo de técnico que debe estar a cargo de realizar el reforzamiento y las etapas que involucra realizar cada reforzamiento.

Tiempo de ejecución

Después, se comparará el tiempo de ejecución estándar de cada método de reforzamiento, considerando la naturaleza del proyecto donde se pretende utilizar los reforzamientos y los posibles problemas que puedan presentarse al momento de la ejecución, teniendo como consecuencia el retardo del plazo que se tenía previsto para culminar el reforzamiento.

Experiencias previas con cada método de reforzamiento

Finalmente, se realizará una revisión breve de casos reales donde se hayan ejecutado estos dos métodos de reforzamiento, comparando la efectividad en el tiempo del reforzamiento planteado y los problemas que pudieron haberse presentado al momento de reforzar las columnas, teniendo de este modo la información necesaria para poder concluir si el método de reforzamiento utilizado en cada caso cumplió o no su función estructural.

3.4. Parámetros de comparación en el costo de ambos reforzamientos

Presupuesto de cada propuesta de reforzamiento

Se procederá a obtener los precios en el mercado de cada insumo necesario para ejecutar cada propuesta de reforzamiento, de este modo se elaborará un análisis de precio unitario (APU) para cada partida necesaria en ambas propuestas. Es necesario mencionar que se utilizará como referencia los precios acorde a la fecha actual, por lo que estos pueden variar.

Metrado de cada propuesta de reforzamiento

Se medirá cada propuesta para finalmente obtener el costo de realizar cada método de reforzamiento. Para el caso del encamisado de concreto armado se debe tener en consideración partidas que no están directamente relacionadas con la ejecución del reforzamiento, pero son necesarias para realizar el encamisado como el transporte de materiales, limpieza de elementos, etc.

Capítulo IV

Resultados

4.1. Análisis teórico de la resistencia a flexo-compresión de ambos reforzamientos

4.1.1. Modelo estructural del proyecto utilizado como referencia

Se realizó el modelo estructural del proyecto de reforzamiento : "MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE LABORATORIOS EN LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO", utilizando los parámetros de la norma sismoresistente actual E.030. Se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se realizó el modelo con las columnas que tenía el pabellón antes de ser reforzado, esto con el fin de proponer un reforzamiento distinto al que se ejecutó.
- Se modeló la estructura con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, valor justificado en la memoria de cálculo del proyecto.
- Para considerar los efectos del paso de tiempo y la acción de algún sismo leve, se utilizará sección agrietada para el modelado de las vigas y columnas. De este modo se

castigará la inercia de las secciones según la tabla 4.1

Tabla 4.1: Momentos de inercia para secciones agrietadas (Adaptado del código ACI 318-19, 2019)

Elemento	Momento de Inercia
Columnas	0.70.Ig
Vigas	0.35.Ig

- Se modeló los elementos estructurales sin reforzar, se muestra en la tabla 4.2 las secciones consideradas.

Tabla 4.2: Secciones modeladas

Elemento	Secciones (cm)
Columnas	C40X40, C25X40
Vigas	V30X60, V30X50, VCH20X30
Losa	Aligerado e=20cm
Placa	e=25cm

Carga muerta considerada

- Piso terminado = 100 kg/m²
- Losa aligerada de 20cm = 300 kg/m²
- Peso de muro de cabeza (25cm) h=3.20 m + acabados = 1382.4 kg/m + 320.0 kg/m = 1702.4 kg/m
- Peso de muro de sogá (15cm) h=3.20 m + acabados = 748.8 kg/m + 320.0 kg/m = 1068.8 kg/m
- Peso de muro de cabeza (25cm) h=1.13 m + acabados + ventana = 488.2 kg/m + 113.0 kg/m + 22.6 kg/m = 623.8 kg/m

- Peso de muro de soga (15cm) $h=1.00$ m + acabados + ventana = 234.0 kg/m + 100.0 kg/m + 34.3 kg/m + 26.3 kg/m = 394.6 kg/m

Carga viva considerada

- Corredores y escaleras = 400 kg/m²
- Aulas = 250 kg/m²
- Laboratorios = 300 kg/m²
- Baños = 300 kg/m²
- Azotea = 150 kg/m²

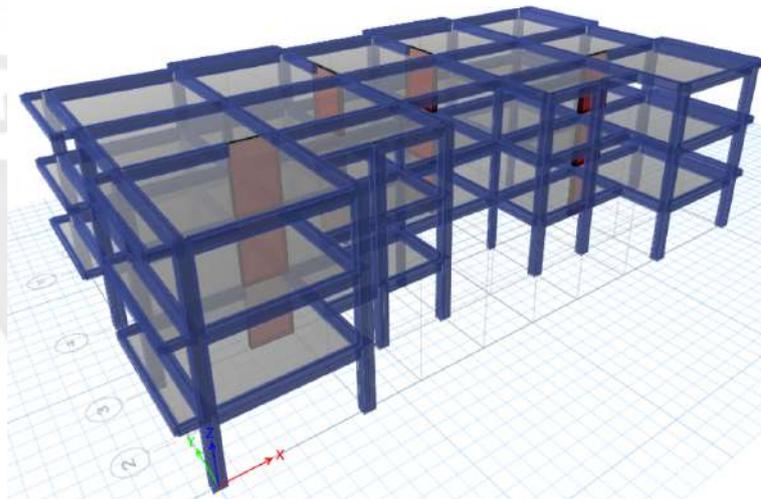


Figura 4.1: Modelo del proyecto de reforzamiento previo a ser reforzado

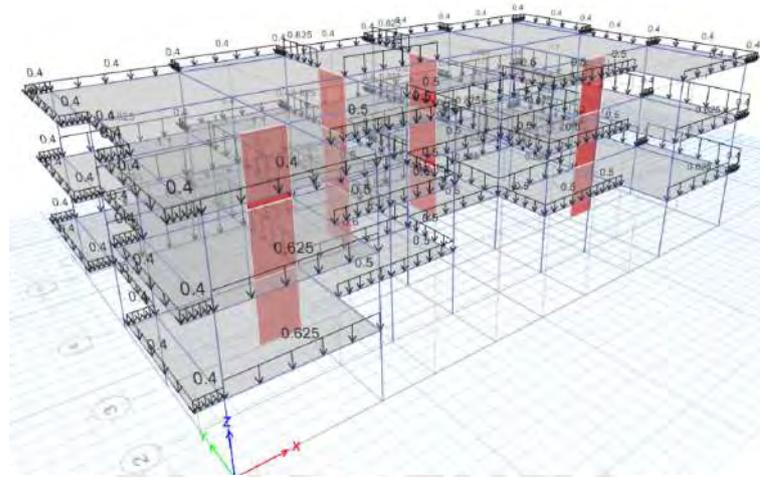


Figura 4.2: Carga muerta modelada en elementos frame

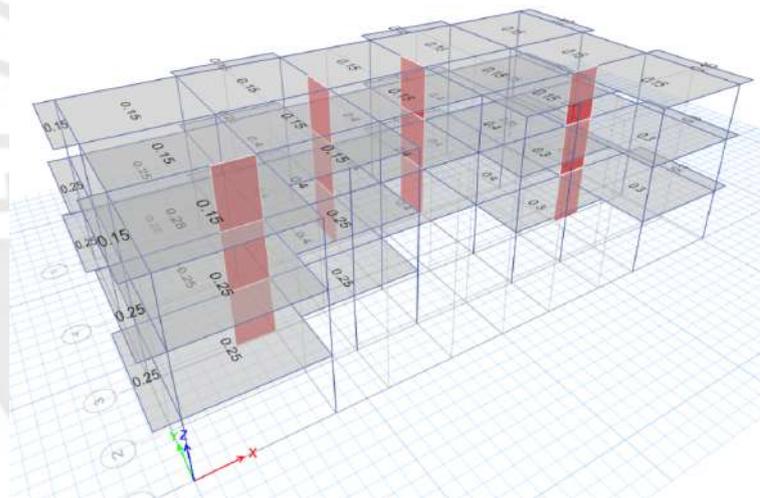


Figura 4.3: Carga viva modelada en elementos shell

4.1.2. Análisis sismoresistente dinámico

Parámetros ZUCS

Se obtuvo los parámetros sísmicos de la memoria de cálculo correspondiente al proyecto de reforzamiento.

Tabla 4.3: Parámetros ZUCS para diseño sismoresistente

Parámetros	Valor
Factor de zona (Z)	0.35
Factor de uso (U)	1.5
Factor de suelo (S)	1.20
Factor de amplificación sísmica (C)	2.50

Condiciones geotécnicas: factor S y factor Tp

La Norma NTE-E.030 considera cinco perfiles típicos, a los cuales les asocia un factor de amplificación S y parámetros TP y TL. El suelo sobre el cual está cimentado el proyecto, corresponde a una clasificación S3, con un valor Tp= 1.0 y Tl= 1.6.

Factores de Irregularidad (Ia, Ip)

Se consideró una factor Ia=1 y un factor Ip=0.85 debido a que se cuenta con la irregularidad de discontinuidad de diafragma en planta. Al ser una edificación esencial de importancia A2, la norma actual exige no tener ninguna irregularidad ni en planta ni en altura, lo cual evidencia el incumplimiento de este ítem de la norma cuando se diseñó la edificación.

Sistemas estructurales, coeficiente básico de reducción de la fuerza sísmica: Ro

El proyecto de reforzamiento presenta el valor de Ro = 8 en ambos sentidos, correspondiente a una estructura de pórticos.

Espectro de diseño

Se calculó el espectro de diseño de acuerdo a la siguientes relaciones:

$$R = Ro \cdot Ia \cdot Ip$$

$$Sa = \frac{ZUCS \cdot g}{R}$$

La gráfica de tal espectro se puede apreciar en la figura 4.4, en unidades de aceleración entre gravedad (Sa/g).

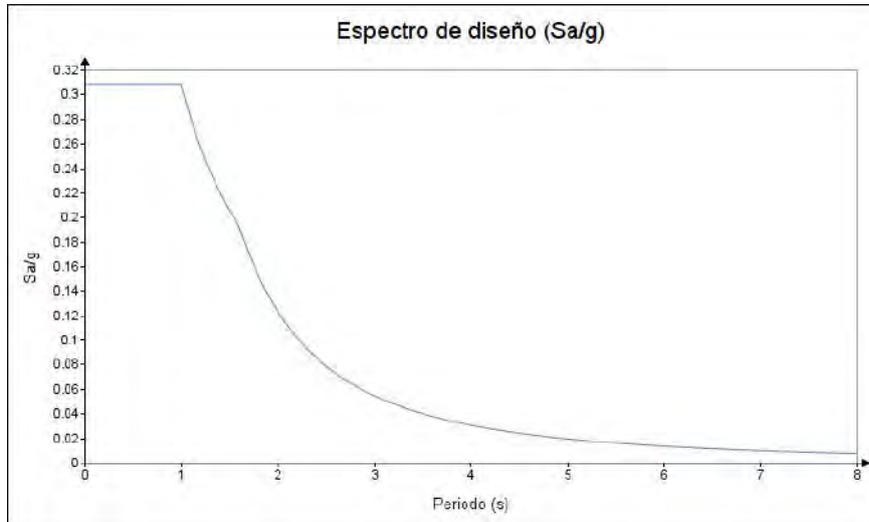


Figura 4.4: Espectro de diseño

Envolvente de diseño

La norma establece una serie de combinaciones de carga, asociadas a factores de ampliación, para determinar las cargas últimas de diseño. Con los máximos valores obtenidos de cada combinación se elabora la envolvente de diseño, con la cual se procede a diseñar por flexión, verificando luego por cortante y en caso se requiera, por capacidad.

$$U = 1.4CM + 1.7CV$$

$$U = 1.25(CM + CV) \pm CS$$

$$U = 0.9CM \pm CS$$

4.1.3. Resultados de interés del análisis dinámico sismoresistente

Derivas de entrepiso

Se presenta en la figura 4.5 las derivas de entrepiso determinadas en el modelo estructural sin reforzamiento.

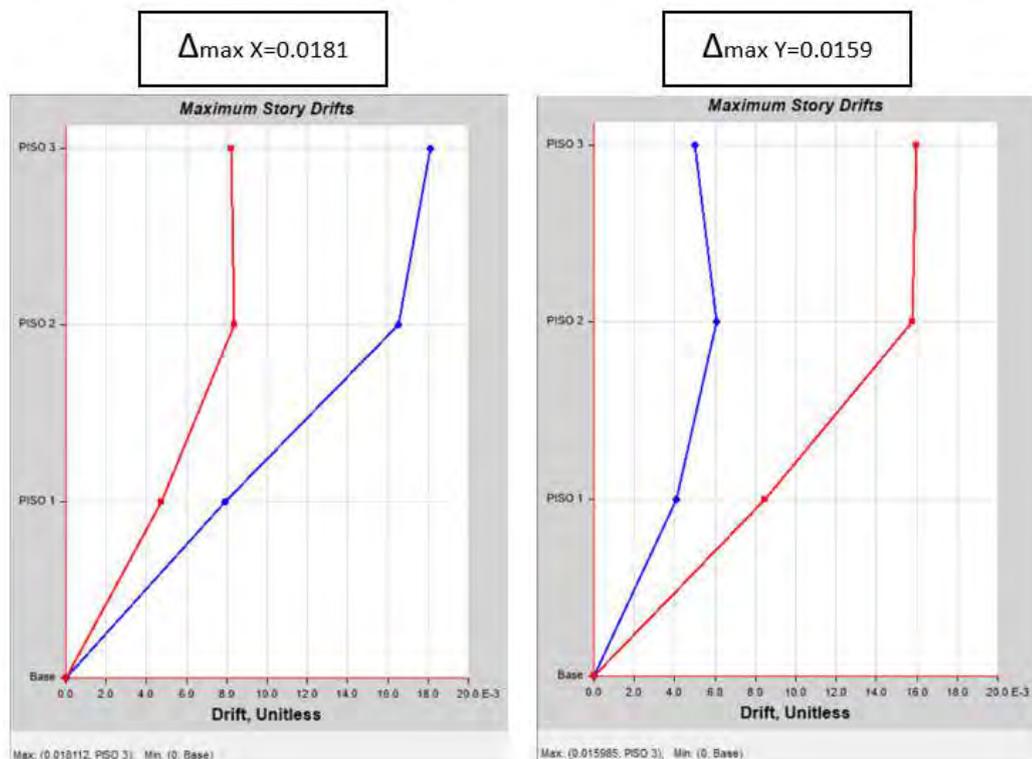


Figura 4.5: Derivas de entrepiso para el modelo sin reforzamiento

En la dirección X se obtuvo una deriva de 0.0181 y en la dirección Y 0.0159. Estos resultados evidencian la normativa antigua utilizada en el diseño de la estructura, ya que el pabellón universitario fue construido antes del año 1997. Un aspecto importante del reforzamiento estructural es poder controlar estas derivas de entrepiso, por lo que luego de diseñar las alternativas de reforzamiento, se debe modelar y analizar nuevamente la estructura.

Cargas obtenidas luego del análisis sísmico

Luego de realizado el análisis sísmico, se obtiene las cargas que actúan en cada elemento estructural. Para la presente tesis son de interés las cargas actuantes en las columnas, en la tabla 4.4 se puede observar las cargas actuantes en las columnas más cargadas. Se resaltó en rojo la columna C-13, debido a que presenta la mayor carga axial tanto para carga muerta y viva, los cuales son los valores de carga mas incidentes para el diseño de columnas.

Tabla 4.4: Columnas más cargadas según el modelo estructural

NIVEL	COLUMNA	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
PISO 1	C2	-58.4153	-0.0137	1.1056
PISO 1	C2	-17.6787	-0.1938	-0.138
PISO 1	C2	9.2782	6.7654	12.9125
PISO 1	C2	6.1068	6.6642	5.7503
PISO 1	C13	-80.2111	-0.3133	0.4989
PISO 1	C13	-23.4207	-0.0819	-0.4647
PISO 1	C13	5.8546	2.9916	6.2098
PISO 1	C13	2.6304	3.1379	1.9339
PISO 1	C4	-75.446	-0.3141	0.0719
PISO 1	C4	-27.7321	-0.0827	0.4846
PISO 1	C4	6.2071	3.1366	6.1745
PISO 1	C4	2.2956	2.8549	1.9065

La columna C-13 (25cmx40cm con 6 varillas de 5/8”) es una columna central del modelo estructural realizado, será el elemento al cual se diseñarán dos opciones de reforzamiento. Se puede observar la ubicación de la columna en la imagen 4.6

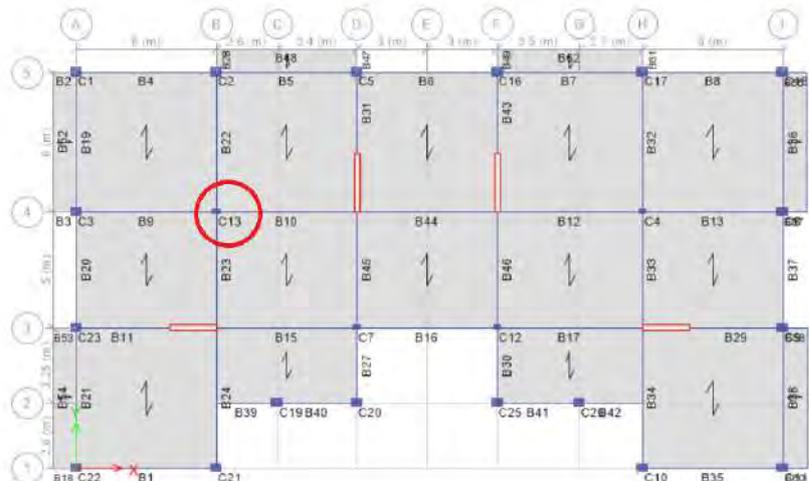


Figura 4.6: Columna C-13 con la mayor carga de acuerdo al modelo estructural

Combinaciones de cargas

Una vez obtenidas las cargas del modelo estructural se procede a realizar las combinaciones de diseño, con el fin de ubicar los puntos correspondientes a estas combinaciones dentro del diagrama de interacción de la sección de columna.

Tabla 4.5: Combinación de cargas en X

SISMO EN XX			
COMBINACIÓN	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
1.4CM + 1.7CV	152.11073	-0.57785	-0.09153
1.25CM+1.25CV+SX	135.39435	2.4976	6.25255
1.25CM+1.25CV-SX	123.68515	-3.4856	-6.16705
0.9CM + SX	78.04459	2.70963	6.65881
0.9CM - SX	66.33539	-3.27357	-5.76079

Tabla 4.6: Combinación de cargas en Y

SISMO EN YY			
COMBINACIÓN	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
1.4CM + 1.7CV	152.11073	-0.57785	-0.09153
1.25CM+1.25CV+SY	132.17015	2.6439	1.97665
1.25CM+1.25CV-SY	126.90935	-3.6319	-1.89115
0.9CM + SY	74.82039	2.85593	2.38291
0.9CM - SY	69.55959	-3.41987	-1.48489

Se puede apreciar en la figura 4.7 que los puntos de cargas últimas se encuentran fuera del diagrama de interacción más crítico correspondiente a la sección de columna C-13 sin reforzar. Es necesario señalar que estos diagramas corresponden a situaciones ideales, es decir asumiendo que el elemento estructural trabaja al 100% lo cual no es cierto. Las columnas modeladas tienen varios años de antigüedad por lo que han agotado su capacidad de resistir esfuerzos producidos por flexo-compresión. Por otro lado, no se sabe si las columnas

se construyeron siguiendo un correcto proceso constructivo, lo cual genera cierta incertidumbre respecto a cuanto pueden resistir. Todo lo mencionado evidencia la necesidad de reforzar las columnas.

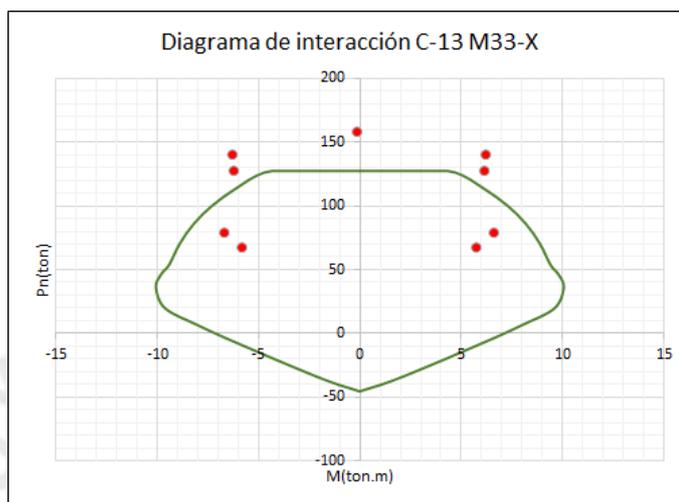


Figura 4.7: Diagrama de interacción C-13

4.1.4. Diseño del reforzamiento con encamisado de concreto armado

Para la primera propuesta de reforzamiento de la columna C-13 (de dimensiones 25cm x 40cm) se calculó las dimensiones del encamisado utilizando la ecuación 2.4 y 2.7 presentada en el acápite anterior. La carga de diseño debe cumplir el principio de diseño por resistencia:

$$\phi P_n \geq P_u$$

El valor de ϕ para elementos sometidos a compresión es de 0.7, así mismo la carga $P_u = 212.61$ ton se obtiene de la combinación mayor de carga axial, la cual se puede visualizar en

la tabla 4.5.

$$0.7 \cdot Pn \geq 157.21 \text{ ton}$$

$$Pn \geq 224.59 \text{ ton}$$

Reemplazando en la ecuación 2.4 se obtiene:

$$\frac{224.59 \cdot 1000}{2} = 0.85 \cdot 210 \cdot Ac$$
$$Ac = 629.09 \text{ cm}^2$$

Reemplazando este valor en la ecuación 2.7 se obtiene:

$$Ac = 4 \cdot e^2 + 2 \cdot e \cdot (b + h)$$
$$629.09 = 4 \cdot e^2 + 2 \cdot e \cdot (25 + 40)$$
$$e = 4.28 \text{ cm}$$

Entonces, se debe incrementar como mínimo un espesor de 4.07 cm de concreto a cada lado de la sección inicial. En la práctica profesionales se recomienda como mínimo que este valor sea de 7.5 cm a 10 cm por un tema de proceso constructivo, por lo tanto se tomará el valor mas conservador y se expandirá la sección en 10 cm a cada lado, obteniendo una sección final de 45 cm x 60 cm. Se calcula el área total de esta nueva sección encamisada:

$$At = 45 \times 60$$

$$At = 2700 \text{ cm}^2$$

Como se ha decidido por incrementar la sección de columna casi al doble del espesor mínimo requerido por diseño, se calcula el acero de refuerzo utilizando la cuantía mínima exigida por norma (0.001).

$$\rho_{min} = 0.01 \cdot At$$

$$\rho_{min} = 0.01 \cdot 2700$$

$$\rho_{min} = 27cm^2$$

Como se mencionó previamente, no se suele considerar el acero viejo para el diseño de las secciones reforzadas. Esto debido a la incertidumbre del estado en el cual se encuentre el acero, debido al tiempo desde el momento que se construyó o un erróneo proceso constructivo, el acero no trabaja del mismo modo que en una situación ideal. Por tanto, para el diseño final se opta por utilizar 14 varillas de 5/8" que cumplen con el acero calculado.

$$14\phi 5/8'' = 28cm^2$$

Se puede apreciar la sección final reforzada en la figura 4.8. Una limitación del presente análisis será suponer que el concreto nuevo trabajará conjuntamente con el concreto viejo, lo cual es un supuesto ya que se trata de un caso ideal. La eficacia del encamisado de concreto armado radica en la unión de ambos concretos mediante un adhesivo epóxico; sin embargo, los ensayos en laboratorio han demostrado que el encamisado de concreto armado aporta una resistencia cercana al 90% del valor teórico. Teniendo en consideración lo anterior, los diagramas de interacción de los encamisados de concreto armado se multiplicaran por un factor de 0.9 para obtener un valor mas cercano a la realidad.

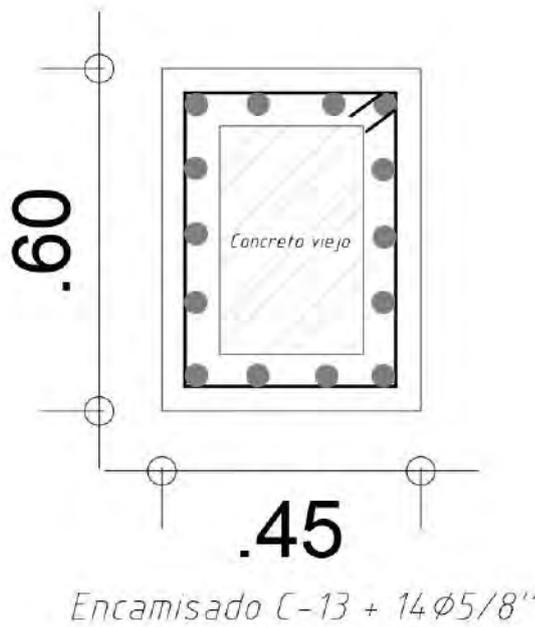


Figura 4.8: Sección de encamisado propuesta para C-13

Se presenta a continuación en la figura 4.9 el diagrama de interacción de la sección de C-13 reforzada con encamisado de concreto armado.

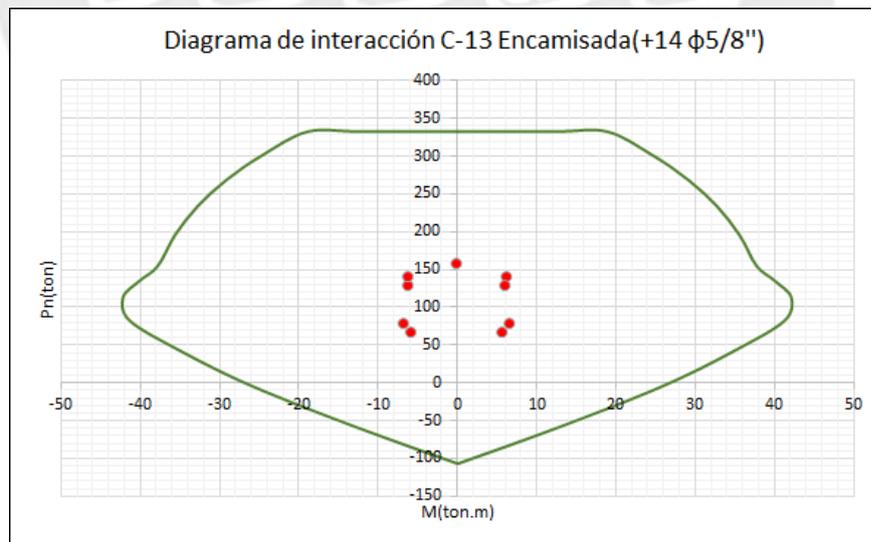


Figura 4.9: Diagrama de interacción C-13 reforzada con 14 barras de 5/8"

Se presenta en la tabla 4.7 los valores máximos de fuerza axial nominal y momento flector

nominal para los reforzamientos diseñados con encamisados de concreto armado, así como el aporte de resistencia en porcentaje para cada valor máximo.

Tabla 4.7: Aporte de resistencia en porcentaje para el encamisado de concreto armado

	Pnmax(ton)	Mmax(ton.m)
Sección inicial	127.11	5.76
ECA C-13	333.24 +162 %	31.62 +448 %

Diseño por cortante

Para determinar la cantidad necesaria de estribos se utilizará la cortante obtenida del modelo estructural. En la figura 4.8 se puede observar los valores de fuerza cortante para la columna C-13.



Figura 4.10: Valor de fuerza cortante para la columna C-13 en el primer nivel

Con este valor se procedió a calcular la sollicitación por cortante utilizando las ecuaciones 2.9 y 2.10, presentadas en el acápite 2.

$$\phi V_c = 0.85 \cdot 0.53 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot B \cdot d$$

$$\phi V_s = \frac{0.85 \cdot A_g \cdot f_y \cdot d}{s}$$

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s)$$

Tabla 4.8: Diseño por cortante para el encamisado de concreto armado C-13

Datos de entrada		Espaciamiento utilizado				
		<i>d(m)</i>	0.54	<i>Area estribo</i>	<i>#Capas</i>	
<i>B(m)</i>	0.45			3/8	0.713	2
<i>H(m)</i>	0.6					
<i>recubr.(m)</i>	0.06					
<i>f'c(kg/cm²)</i>	210					
<i>f_y(kg/cm²)</i>	4200					
<i>V_u(ton)</i>	3					
<i>V_u(ton)</i>	<i>s(cm)</i>	<i>V_s</i>	<i>V_c</i>	ϕV_n	$\phi V_n > V_u?$	
0	10	32.32	18.66	43.34	OK	
1	15	21.55	18.66	34.18	OK	
2	25	12.93	18.66	26.85	OK	
3	30	10.77	18.66	25.02	OK	

Como se puede apreciar el espaciamiento mínimo sera suficiente para cumplir el diseño por cortante. Por tanto, se predispuso el primer estribo a 5 cm, en la zona de confinamiento cada 15 cm y finalmente cada 25 cm en el resto de su longitud, siendo este un valor conservador.

$$\text{Estribo}(3/8'') \rightarrow 1@0.05, 5@0.15, \text{resto}@0.25$$

Finalmente, la sección C-13 reforzada se muestra detallada en la figura 4.11. Debido al proceso constructivo es necesario utilizar 2 estribos de 3/8" junto con ganchos estándar, los cuales deben tener 10cm de longitud de anclaje. Así mismo, se debe escarificar 2cm a la columna existente para una mejor adherencia entre el concreto viejo y el concreto nuevo.

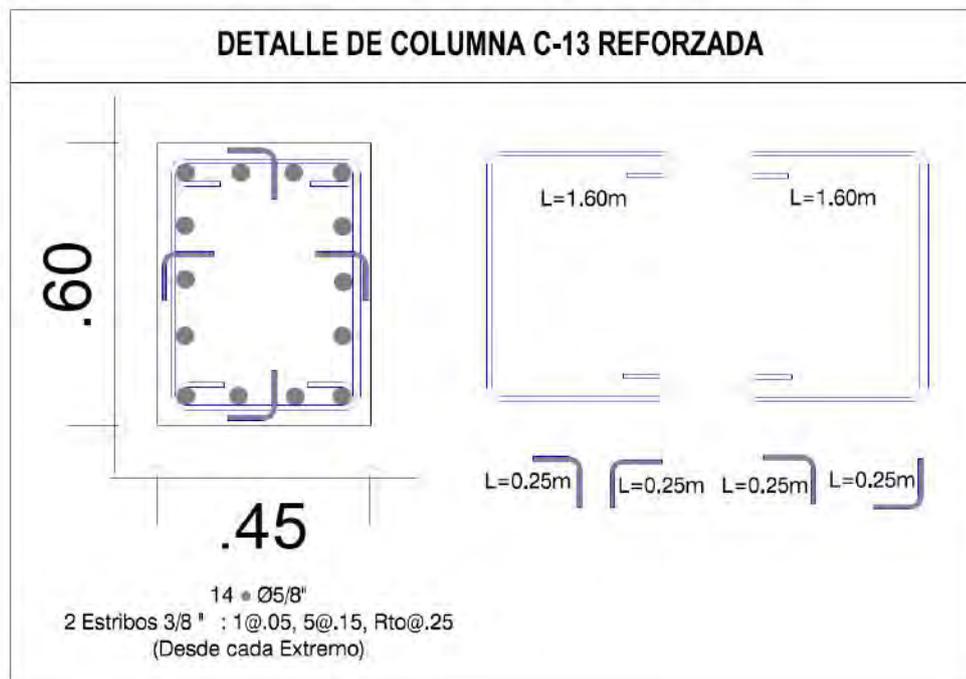


Figura 4.11: Detalle de la sección C-13 reforzada con encamisado de concreto armado

Del mismo modo se realizó el diseño para las demás columnas, obteniendo las siguientes secciones de encamisado para cada tipo de columna que se pueden observar en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Secciones reforzadas con encamisados para cada tipo de columna

	Sección (cm)	Sección encamisada (cm)
TIPO 1	25X40	45X60
TIPO 2	40X40	60X60

4.1.5. Refuerzo de cimentación con el encamisado de concreto armado

Como se mencionó previamente se requiere excavar hasta localizar la cimentación existente para poder anclar el nuevo acero de refuerzo del encamisado para las columnas. Así también, se debe reforzar la cimentación existente, ya que se está agregando un peso extra producto del acero y concreto incorporado a la sección vieja de columna. Se puede apre-

ciar en la figura 4.12 la planta de cimentación del proyecto utilizado como referencia para el modelo estructural.

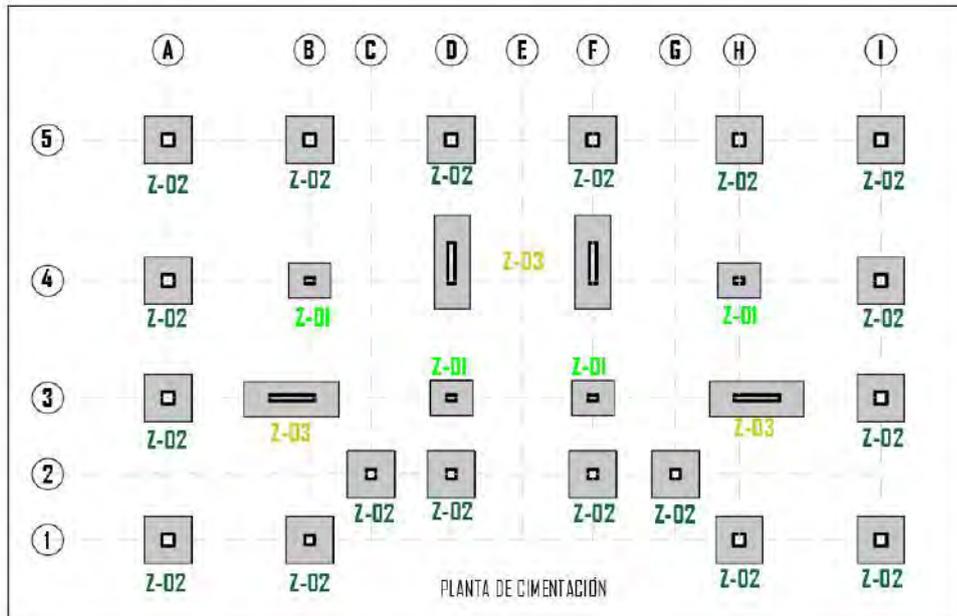


Figura 4.12: Planta de cimentación del proyecto de referencia

Las secciones de las zapatas se presenta en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Secciones de zapatas del proyecto de referencia

Zapata	Sección	Peralte
Z-01	1.80m x 1.50m	55cm
Z-02	1.80m x 1.80m	55cm
Z-03	1.50m x 4.0m	55cm

Para el caso de las columnas reforzadas con encamisados, sus cimentaciones corresponden a las zapatas Z-01 y Z-02. Por tanto, se deberá reforzar estas cimentaciones como se mostró en la figura 2.14 en el acápite de marco teórico. Para los bordes de la zapata existente se deberá utilizar un enrocado de 80cm en sus 4 lados y encima una losa cimentación con el acero mínimo para un peralte de 55cm (varillas de 5/8" cada 20cm), la disposición de

elementos se presenta en la figura 4.13.

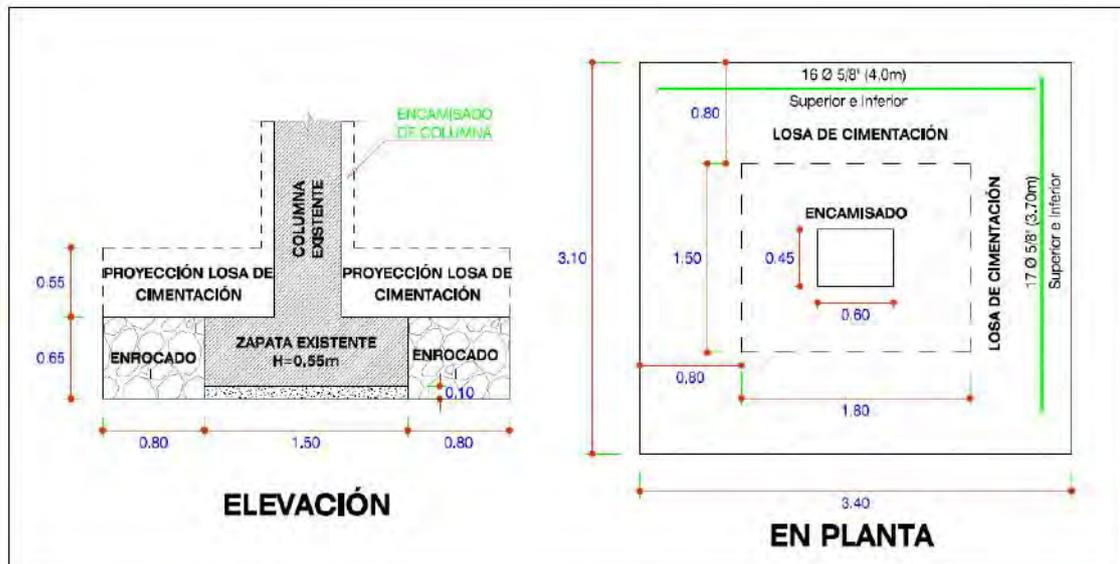


Figura 4.13: Disposición de refuerzo para zapatas

4.1.6. Control de derivas con el encamisado

Con las secciones de reforzamiento definidas, se procede a modelar la estructura considerando las columnas reforzadas y verificar si la estructura cumple las derivas de entrepiso permitidas por la normativa de diseño actual E 0.30.

Reforzamiento con encamisados de concreto armado

Para el primer caso se modeló la estructura con las columnas encamisadas con las secciones presentadas en la tabla 4.9. Cuando se realizó el análisis estructural las derivas se redujeron un un porcentaje bajo, debido a ello la estructura general seguía sin cumplir la limitación exigida por norma (0.007). Por tanto, la solución propuesta fue añadir placas de concreto armado para poder cumplir el control de derivas acorde a la normativa actual. Se presenta en la figura 4.14 el modelo en planta realizado:

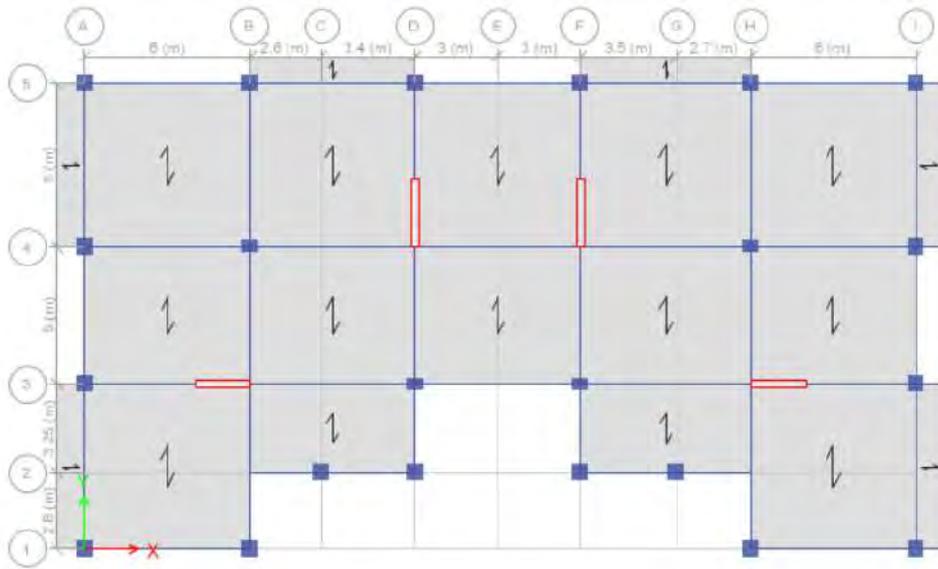


Figura 4.14: Planta del modelo reforzado con encamisados de concreto armado

Se presenta en la figura 4.15 las derivas halladas en este primer modelo.

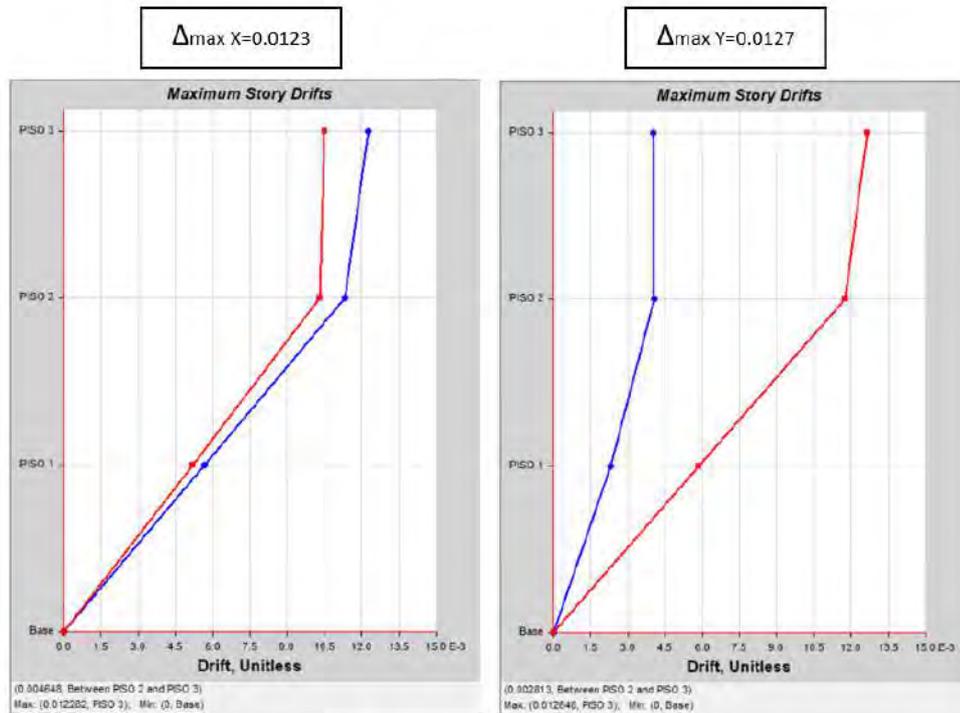


Figura 4.15: Derivas de entrepiso para el modelo con encamisados de concreto armado

Como se puede apreciar en la figura 4.15 se pudo reducir las derivas de entrepiso respecto a la estructura modelada sin reforzamiento, sin embargo no se pudo obtener una deriva menor a 0.007 como limita la norma E 0.30. Se puede incrementar mas las secciones de columna, pero no resultaría una opción viable, ya que se estaría quitando mas espacio en los ambientes y no tendría sentido seguir reforzando las columnas para que resistan mas allá de su carga solicitada. Por tanto, una opción para poder controlar las derivas es añadir placas de concreto para que estos elementos tomen la cortante solicitante. En la figura 4.16 se puede observar la planta del modelo con 4 placas de 25 cm de espesor incorporadas al modelo con encamisados, 2 en la dirección X con longitud de 1.75m y de la misma manera 2 placas en la dirección Y de 1.75m de longitud.

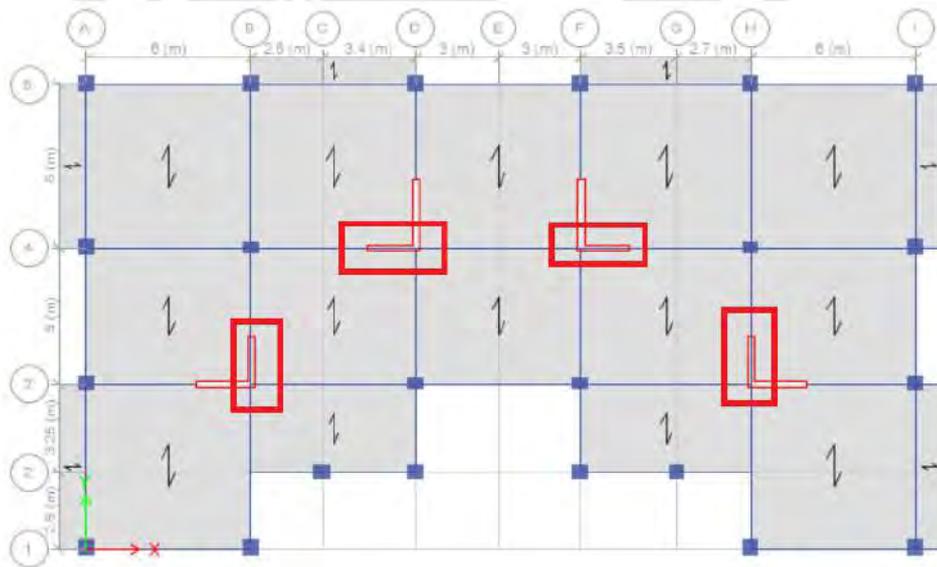


Figura 4.16: Planta del modelo reforzado con encamisados de concreto armado y la adición de placas

Con estas placas se realizó el análisis estructural permitiendo reducir las derivas de entrepiso a valores menores a 0.007 como se puede observar en la figura 4.17.

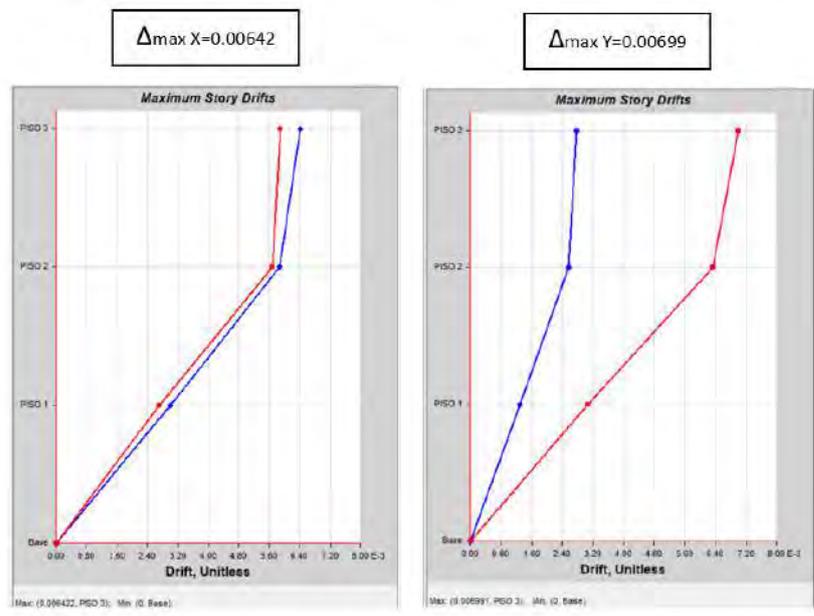


Figura 4.17: Derivas de entrepiso para el modelo con encamisados de concreto armado y con la adición de placas

Los resultados obtenidos pueden visualizarse mejor en las figuras 4.18 y 4.19, donde se observa como varió la deriva en ambas direcciones conforme se incorporaron los encamisados al modelo estructural y con la adición final de placas.

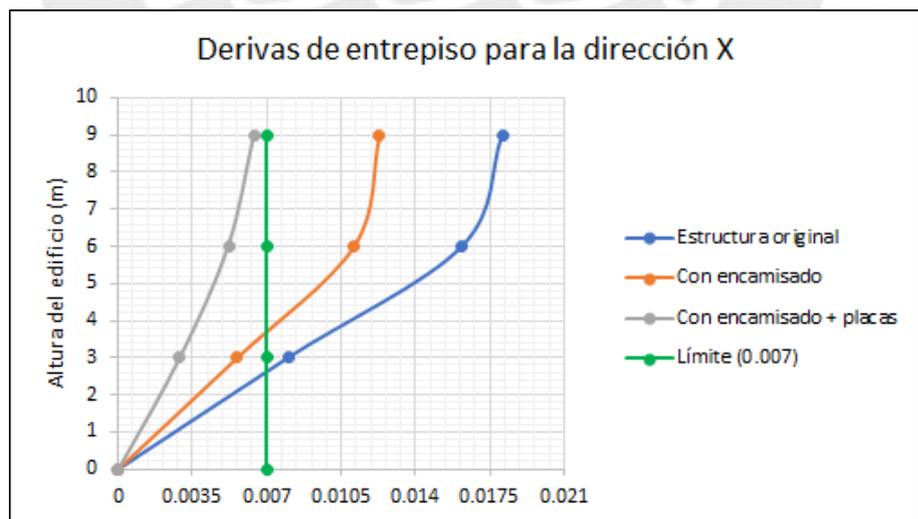


Figura 4.18: Variación de las derivas de entrepiso en la dirección X



Figura 4.19: Variación de las derivas de entrepiso en la dirección Y

4.1.7. Diseño del reforzamiento con CFRP

Para la segunda propuesta de reforzamiento se utilizará SikaWrap®600C WV-50cm, el cual es un tejido unidireccional de fibra de carbono que se puede obtener en cualquier distribuidor autorizado de Sika®. Para el diseño del refuerzo con este material se utilizará el software Sikadur®, descrito anteriormente, considerando capas de SikaWrap®600C WV-50cm.

Así también, en los cálculos a realizar se debe considerar una reducción de resistencia tal como indica la norma ACI 440.2R. El software Sikadur® tiene incorporado este sustento teórico.

Otro aspecto importante es la representación de las cargas dentro del diagrama de interacción de una sección confinada con CFRP. Como se mencionó previamente, la norma ACI 440.2R menciona los límites de reforzamiento, cargas previstas, estados límite de servicio y el estado límite en caso de incendio. El software Sikadur® permite obtener estas combinaciones según la normativa actual, la figura 4.20 muestra las combinaciones de diseño para el reforzamiento con CFRP, las cuales se encuentran por defecto dentro del software utilizado.

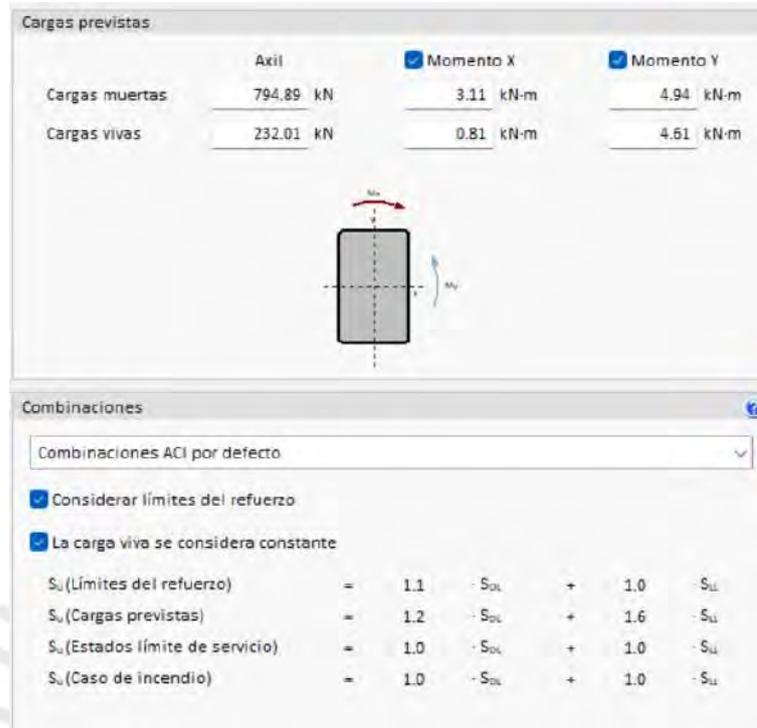


Figura 4.20: Cargas previstas y combinaciones en SikaDur®

Las combinaciones de carga que se aprecian en la figura 4.20 solo consideran cargas de gravedad, de este modo las solicitaciones últimas para la columna C-13 son:

$$S_u = 1.2S_{dl} + 1.6S_{ll}$$

$$P_u = 1.2 \times 794.89 + 1.6 \times 232.01 = 1325.08 \text{ kN} = 135.070 \text{ ton}$$

$$M_{ux} = 1.2 \times 3.11 + 1.6 \times 0.81 = 5.028 \text{ kN.m} = 0.513 \text{ ton.m}$$

$$M_{uy} = 1.2 \times 4.94 + 1.6 \times 4.61 = 31.304 \text{ kN.m} = 3.191 \text{ ton.m}$$

Para la columna C-13, el cálculo del software SikaDur® determinó que serán requeridas 3 capas de CFRP, en este caso SikaWrap®600 WV de 50cm. La memoria de cálculo que realiza el software se presenta en el anexo B. Se validará este diseño utilizando las ecuaciones de la norma ACI 440.2R. Para efectos de comparar ambos métodos de diseño, se utilizará el factor

de reducción $\phi = 0.65$ brindado por la norma ACI 440.2R para diseño por compresión.

Las propiedades del material de diseño (SikaWrap®600 WV de 50cm) son las siguientes:

- El espesor del laminado de fibra de carbono $t_f = 0.331\text{ mm}$
- La deformación última de ruptura $\epsilon'_{fu} = 0.0126$
- El módulo de elasticidad $E_f = 235000\text{ MPa}$

Se calcula la excentricidad producto de las cargas resultantes en la columna C-13.

$$e_x = \frac{0.513}{135.07} = 0.0038\text{ m}$$

$$e_y = \frac{3.191}{135.07} = 0.0236\text{ m}$$

$$0.1 \cdot 0.25 = 0.025\text{ m}$$

Como la excentricidad resulta menor a 0.025 se utilizará el diseño para aumentar la resistencia axial de la columna. Así también, se ajustó el valor de la deformación última del material FRP con un valor de 0.95.

$$\epsilon_{fu} = 0.95 \cdot 0.0126 = 0.012\text{ mm/mm}$$

Se determina la resistencia a compresión necesaria para el concreto confinado f'_{cc} con la ecuación 2.11.

$$\phi P_n = 133.542\text{ ton}$$

$$f'_{cc} = \frac{1}{0.85 \cdot (1000 - 11.913)} \cdot \left(\frac{1309.6}{0.80 \cdot 0.65} - 4200 \cdot 1000 \right)$$

$$f'_{cc} = 248.523\text{ kg/cm}^2$$

Con este valor se puede determinar la presión máxima de confinamiento f_l con la ecuación 2.14.

$$\frac{Ae}{Ac} = \frac{1 - \frac{25}{40} \cdot (h - 2.25)^2 + \frac{25}{40} \cdot (h - 2.25)^2}{3.1000} - 0.012 = 0.526$$

$$Ka = 0.526 \cdot \left(\frac{25}{40}\right)^2$$

$$Ka = 0.205$$

$$f_l = \frac{248.523 - 210}{3.3 \cdot 0.205}$$

$$f_l = 50.726 \text{ kg/cm}^2$$

El número de capas se calcula con la ecuación 2.17.

$$n = \frac{50.726 \cdot \sqrt{25^2 + 40^2}}{0.95 \cdot 2 \cdot 235000 \cdot 0.331 \cdot 0.0126}$$

$$n = 2.412$$

$$n_f = 3$$

Debe comprobarse que se cumpla el radio mínimo de confinamiento:

$$\frac{50.726}{210} = 0.237 \geq 0.08$$

La deformación máxima del concreto confinado debe resultar menor a 0.01

$$Kb = 0.526 \cdot \left(\frac{40}{25}\right)^{0.5}$$

$$kb = 0.665$$

$$\epsilon'_c = 0.002$$

$$\epsilon_{ccu} = 0.002 \cdot (1.50 + 12.0.665 \cdot \frac{50.726}{210} \cdot (\frac{0.007}{0.002})^{0.45})$$

$$\epsilon_{ccu} = 0.009 \leq 0.01$$

La resistencia axial final calculada con el número final de capas será:

$$f l_f = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}}$$

$$f l_f = \frac{2 \cdot 235000 \cdot 3 \cdot 0.331 \cdot 0.007}{\sqrt{25^2 + 40^2}}$$

$$f l_f = 66.423 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{cc} = f'_c + 0.95 \cdot 3.3 \cdot K_a \cdot f l_f$$

$$f'_{cc} = 210 + 0.95 \cdot 3.3 \cdot 0.205 \cdot 66.423$$

$$f'_{cc} = 256.911 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi P n_f = 0.80 \cdot \phi (f'_{cc} \cdot 0.85 \cdot (A_t - A_s) + f_y \cdot A_s)$$

$$\phi P n_f = 138.733 \text{ ton}$$

Se presenta el diseño final para el reforzamiento de la columna C-13 con 3 capas de CFRP en la figura 4.21.



Figura 4.21: Sección de columna C-13 reforzada con CFRP

El refuerzo con 3 capas de CFRP SikaWrap permitió incrementar la sollicitación axial hasta lograr que la sollicitación última obtenida de la combinación de cargas S_u . Se presenta el incremento de la resistencia axial en porcentaje en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Aporte de resistencia axial en porcentaje para el reforzamiento con 3 capas de CFRP

	P_nmax(ton)
Sección inicial	119.98
CFRP 3 capas	138.73 +15.63%

Debido a la excentricidad menor a $0.1 \times h$, no se consideró el aumento de momento flector, debido a que la sollicitación mayor fue en la resistencia por compresión axial. El manual del ACI 440.2R no ofrece un método para analizar el efecto de los momentos actuantes para esta condición de la excentricidad, debido a que su efecto es mínimo en comparación con la carga axial incrementada gracias al refuerzo con CFRP.

Finalmente, se realizó el diseño para las demás columnas reforzadas con laminado CFRP

para cada tipo de columna, las cuales que se pueden observar en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Secciones reforzadas con laminado CFRP para cada tipo de columna

	Sección (cm)	Capas de CFRP (und)
TIPO 1	25X40	3
TIPO 2	40X40	2

4.1.8. Control de derivas con el CFRP

Reforzamiento con laminado CFRP

Para el segundo caso de reforzamiento se modeló las columnas de la estructura con una resistencia $f'c$ para las columnas igual al $f'cc = 256.11 \text{ kg/cm}^2$ determinado para concreto confinado. De este modo las columnas resisten una mayor compresión. Sin embargo, reforzar de este modo no permite controlar las derivas de entrepiso, ya que si bien las columnas reforzadas se diseñan para resistir las cargas de sus solicitaciones, en el ámbito global la estructura sigue comportándose de una manera flexible. Por tanto, para este caso también será necesario incluir muros cortantes. En la figura 4.22 se puede observar la planta del modelo con 4 placas de 25cm de espesor incorporadas al modelo con encamisados: 2 placas en la dirección X con longitud de 2.75m y 2.5m y 2 placas en la dirección Y con 2m de longitud.

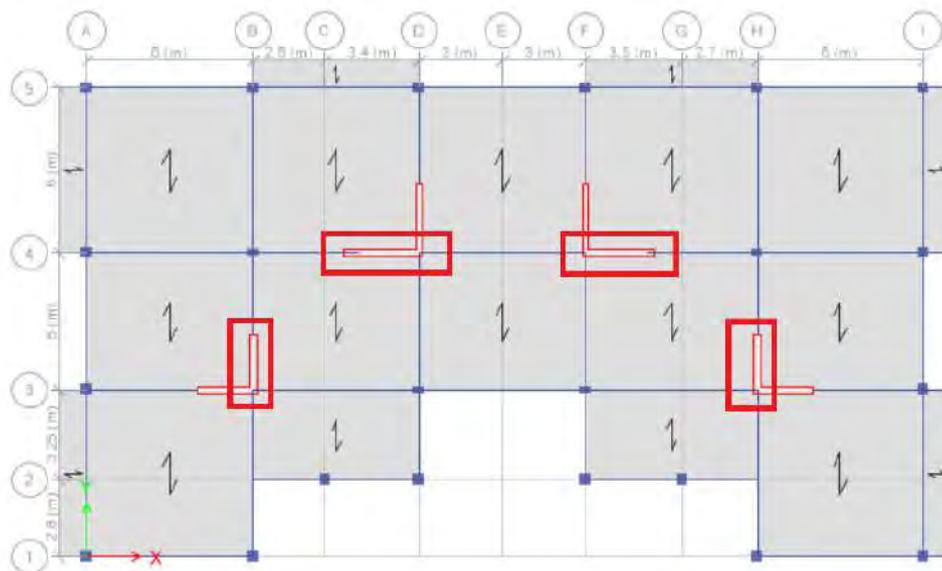


Figura 4.22: Planta del modelo reforzado con CFRP

Se presenta en la figura 4.23 las derivas halladas en este segundo modelo.

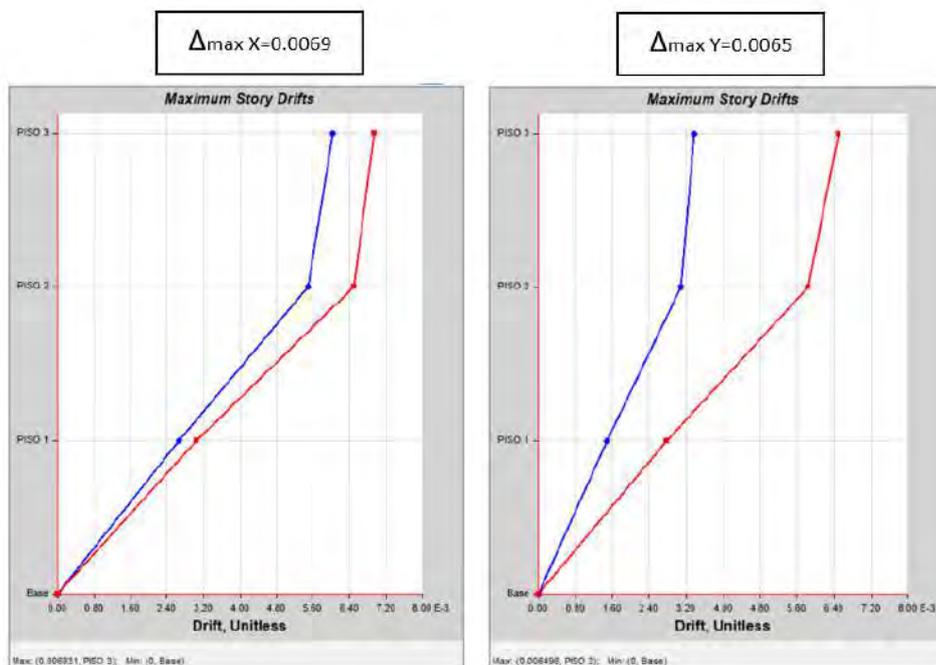


Figura 4.23: Derivas de entrepiso para el modelo con CFRP

En ambos casos del reforzamiento fue necesario incluir placas para poder controlar los desplazamientos de entrepiso. En el caso del modelo con CFRP se necesitó mayor longitud de placas debido a que no se contaba con los encamisados para aportar rigidez extra a la estructura.

4.1.9. Diseño adicional de las placas incorporadas

Primera propuesta de reforzamiento

Debido a que fue necesario incluir placas de concreto armado para el control de derivas, es necesario detallar el diseño de estos elementos, ya que serán los que reciban la mayor parte de la sollicitación de carga por sismo. Se realizará el diseño para la placa mas cargada, que en este caso es la placa PL-02 la cual puede visualizarse en la figura 4.24.

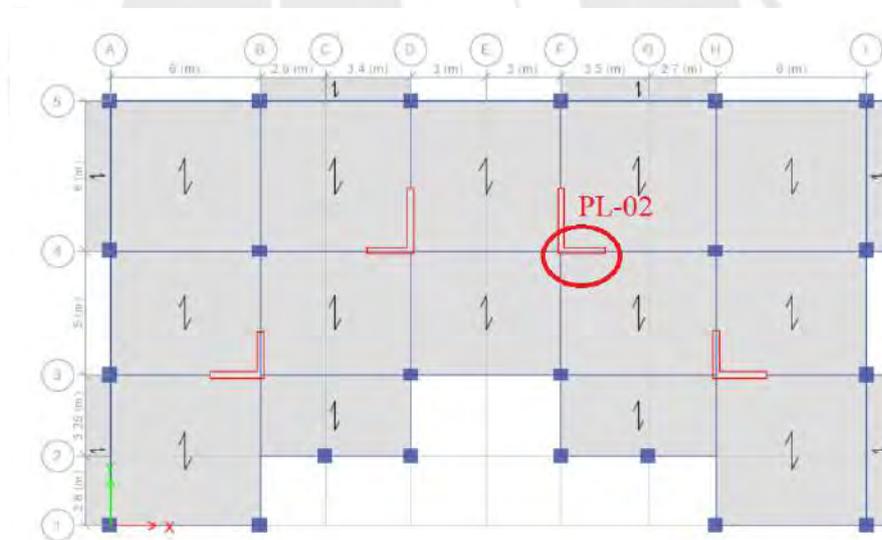


Figura 4.24: Ubicación de la placa mas cargada del modelo estructural con encamisados

Se presenta en la tabla 4.13 las cargas obtenidas para la placa PL-02 luego del análisis estructural.

Tabla 4.13: Cargas obtenidas para la placa PL-02, primera propuesta de reforzamiento

NIVEL	PLACA	CASO DE CARGA	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
PISO 1	PL-02	Dead	-34.719	0.0049	-2.2394
PISO 1	PL-02	Live	-8.3466	0.0066	-2.1974
PISO 1	PL-02	SISMODISEÑOXX	62.89572	0.8451	91.1103
PISO 1	PL-02	SISMODISEÑOYY	42.09933	0.2261	141.676125

En la tablas 4.14 puede visualizarse las combinaciones de carga para el diseño de la placa PL-02 para el caso más crítico (en la dirección X).

Tabla 4.14: Combinaciones de diseño en X para la placa PL-02, primera propuesta de reforzamiento

SISMO EN XX			
COMBINACIÓN	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
1.4CM + 1.7CV	62.79582	0.01808	-6.87074
1.25CM+1.25CV+SX	116.72772	0.859475	85.5643
1.25CM+1.25CV-SX	-9.06372	-0.830725	-96.6563
0.9CM + SX	94.14282	0.84951	89.09484
0.9CM - SX	-31.64862	-0.84069	-93.12576

Para el diseño de la placa se considerará dos núcleos confinados en los extremos de la placa, y una distribución de acero a doble enmallado para la sección central. Se puede visualizar esta distribución en la figura 4.25.

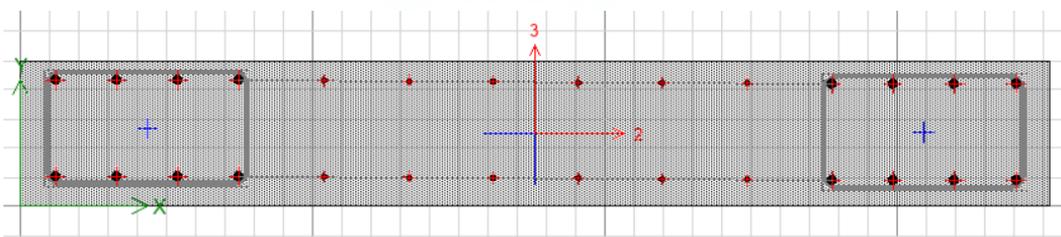


Figura 4.25: Distribución de acero prevista para la placa PL-02, primera propuesta de reforzamiento

Se propuso utilizar dos núcleos confinados con 8 varillas de 5/8", así como una doble malla con varillas de 3/8" espaciadas cada 15 cm para la parte central de la placa, de este modo se pudo cumplir con las solicitaciones de carga presentadas en la tabla 4.14. Se presenta en la figura 4.26 el diagrama de interacción de la sección planteada, verificando de este modo el diseño de la placa PL-02.

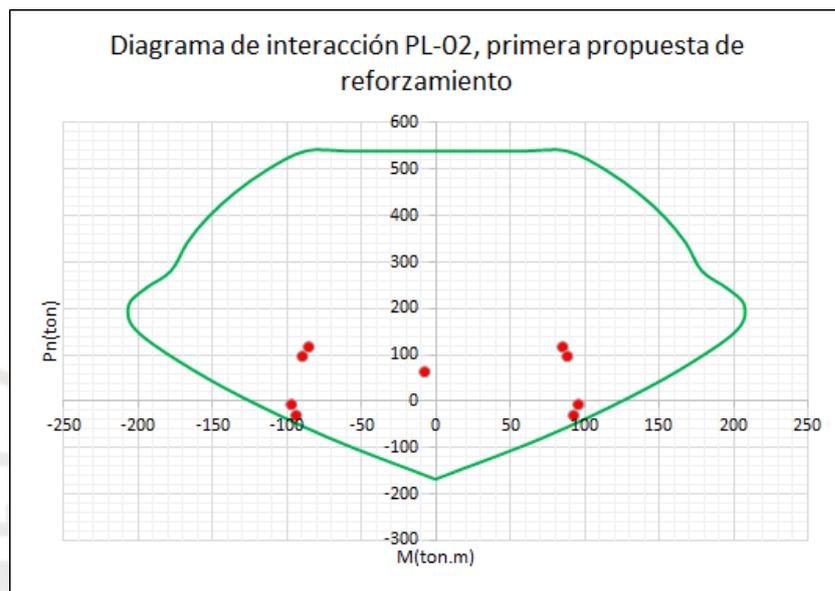


Figura 4.26: Diagrama de interacción para la placa PL-02, primera propuesta de reforzamiento

Se repetirá el diseño de esta placa para las demás placas PL-01, PL-03 Y PL-04. De este modo las secciones finales de placas se presentan en la figura 4.27.

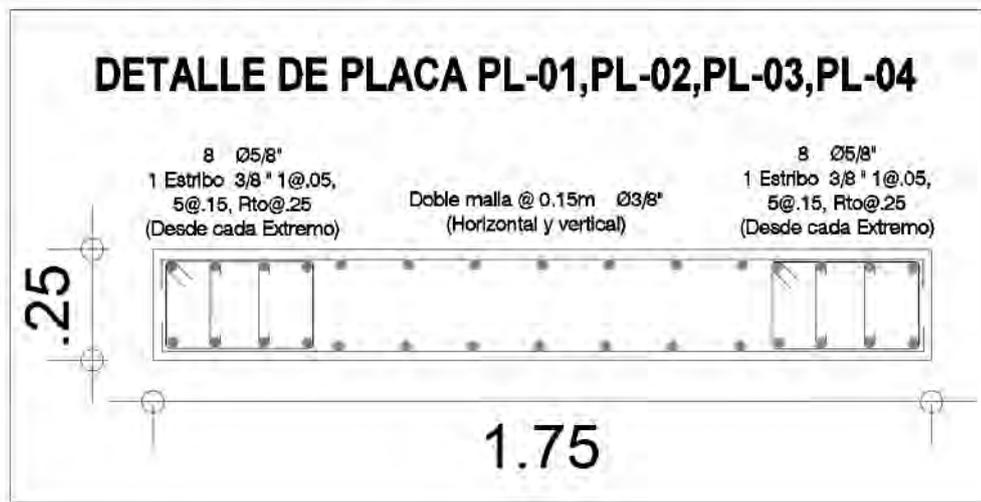


Figura 4.27: Detalle final de las placas añadidas, primera propuesta de reforzamiento

Segunda propuesta de reforzamiento

Del mismo modo se procedió a realizar el diseño para la placa PL-01 presentada en la figura 4.28 con del análisis estructural del modelo reforzado con CFRP. Las cargas se presentan en la tabla 4.15.

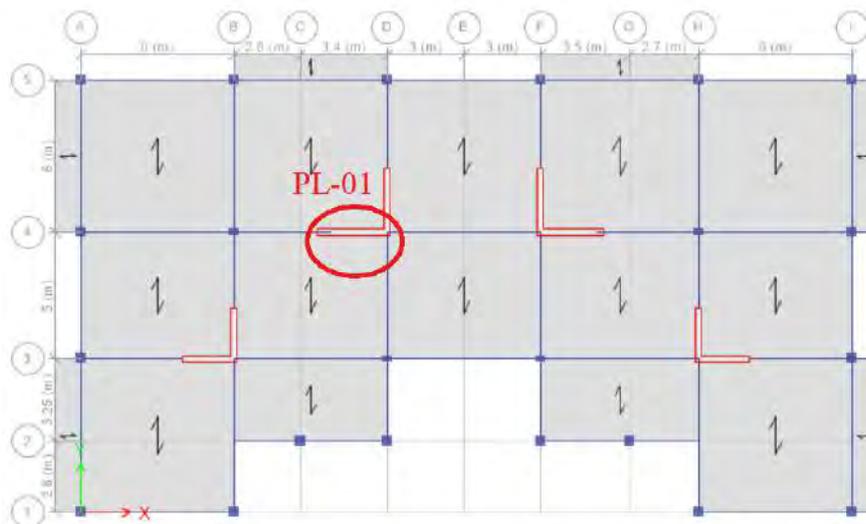


Figura 4.28: Ubicación de la placa mas cargada del modelo estructural con CFRP

Tabla 4.15: Cargas obtenidas para la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento

NIVEL	PLACA	CASO DE CARGA	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
PISO 1	PL-01	Dead	-66.2274	-0.034	6.9026
PISO 1	PL-01	Live	-28.0835	-0.018	1.7645
PISO 1	PL-01	SISMODISEÑOXX	109.19875	0.2073	257.7903
PISO 1	PL-01	SISMODISEÑOYY	128.47935	0.818	89.2971

Las combinaciones de carga más críticas ocurren en el sentido X y se presentan en la tabla 4.16.

Tabla 4.16: Combinaciones de diseño en X para la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento

SISMO EN XX			
COMBINACIÓN	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
1.4CM + 1.7CV	140.46031	-0.0782	12.66329
1.25CM+1.25CV+SX	227.087375	0.1423	268.624175
1.25CM+1.25CV-SX	8.689875	-0.2723	-246.956425
0.9CM + SX	168.80341	0.1767	264.00264
0.9CM - SX	-49.59409	-0.2379	-251.57796

Para el diseño de la placa se considerará nuevamente dos núcleos confinados en los extremos de la placa, y una distribución de acero a doble enmallado para la sección central. Se puede visualizar esta distribución en la figura 4.29.

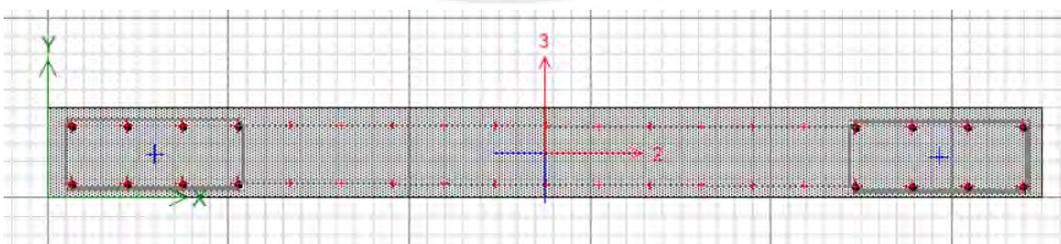


Figura 4.29: Distribución de acero prevista para la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento

Para este caso se propuso utilizar dos núcleos confinados con 8 varillas de 3/4", así como una doble malla con varillas de 3/8" espaciadas cada 15 cm para la parte central de la placa, de este modo se pudo cumplir con las solicitaciones de carga presentadas en la tabla 4.16. Se presenta en la figura 4.30 el diagrama de interacción de la sección planteada, verificando de este modo el diseño de la placa PL-01.

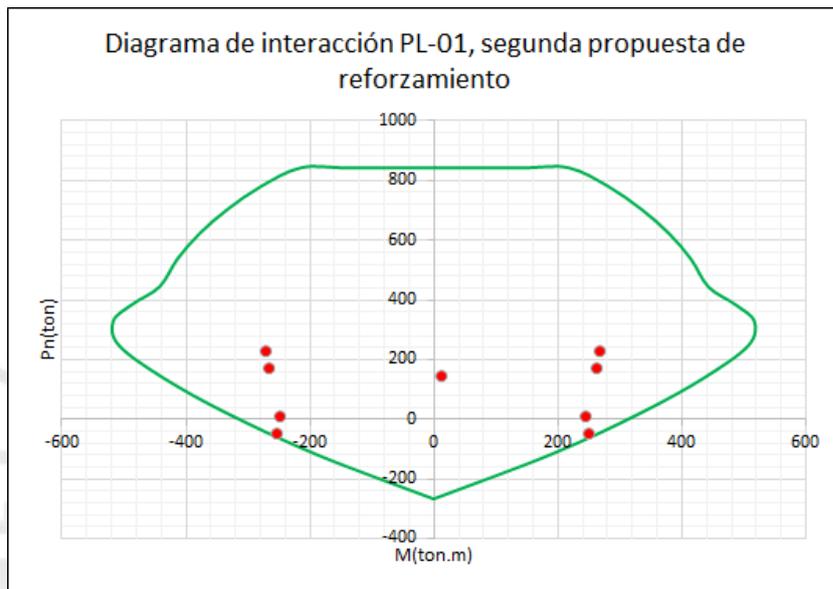


Figura 4.30: Diagrama de interacción para la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento

Del mismo modo se diseñó las demás placas PL-02, PL-03 Y PL-04. De este modo las secciones finales de placas se presentan en la figuras 4.31, 4.32, 4.33.

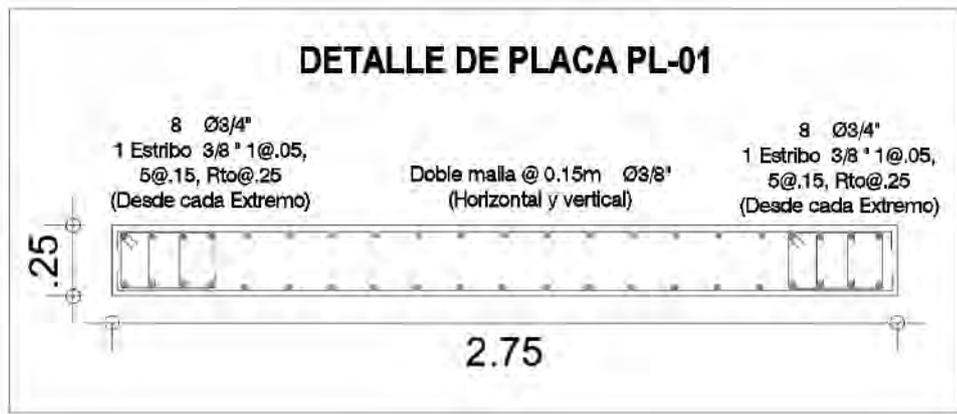


Figura 4.31: Detalle final de la placa PL-01, segunda propuesta de reforzamiento

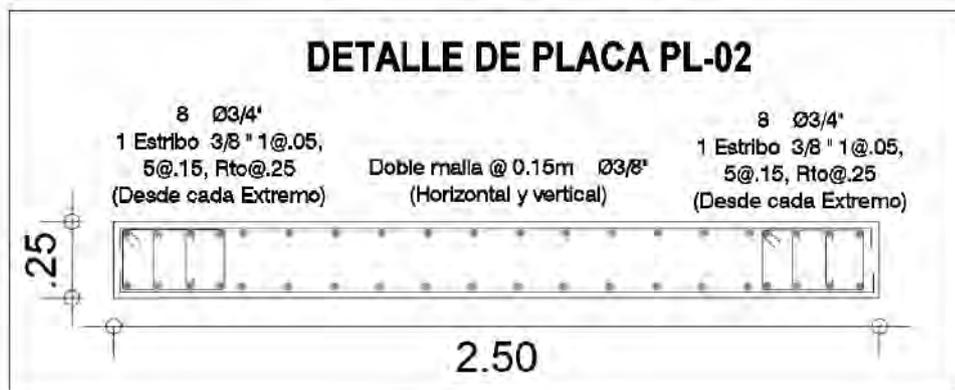


Figura 4.32: Detalle final de la placa PL-02, segunda propuesta de reforzamiento

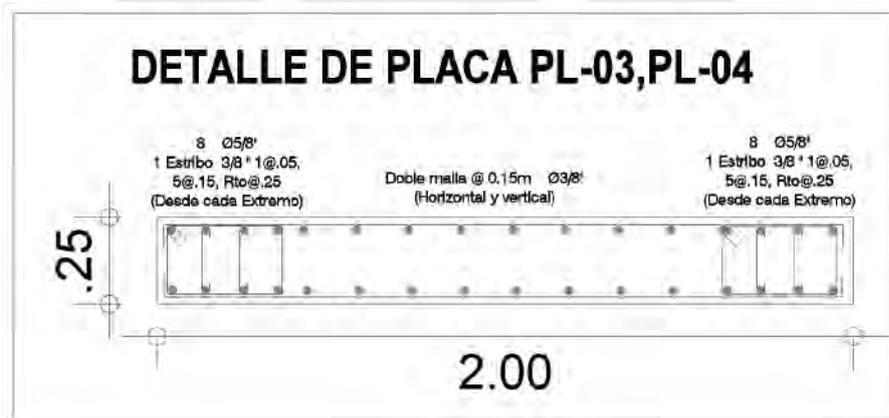


Figura 4.33: Detalle final de la placa PL-03 y PL-04, segunda propuesta de reforzamiento

4.1.10. Peso adicionado a la estructura

Un aspecto importante es el peso de la estructura una vez realizados los reforzamientos estructurales. El código de diseño peruano (norma E 0.30) se basa en la cortante basal de la estructura para poder determinar las solicitaciones en todos los elementos de la estructura. De este modo a mayor peso, mayor será la demanda de estas fuerzas de diseño.

$$V = \frac{Z.U.C.S}{R} .Peso$$

Se presenta en la tabla 4.17 el peso de las 3 estructuras modeladas, como se puede observar los encamisados de concreto armado han incrementando en un porcentaje considerable el peso total de la estructura, por lo que será necesario hacer la verificación si estas cargas sobrepasan el diseño del encamisado de concreto armado planteado. Para el caso del reforzamiento con CFRP el peso añadido es menor por lo que el diseño con 3 capas se mantiene.

Tabla 4.17: Peso de la estructura inicial junto con las reforzadas

Peso de la estructura(ton)		Variación
Estructura inicial	1173.709	-
Estructura reforzada con encamisados	1305.765	11.25 %
Estructura reforzada con CFRP	1179.738	0.46 %

Para el caso del reforzamiento con el encamisado de concreto armado, se verifica si el diagrama de interacción sigue cumpliendo el diseño planteado anteriormente, por lo que del modelo estructural se obtienen las nuevas cargas de diseño para la columna mas crítica, las cuales se presentan en la tabla 4.18.

Tabla 4.18: Cargas re-calculadas para la columna C-13

NIVEL	COLUMNA	CASO DE CARGA	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
PISO 1	C13	Dead	-73.7534	-1.0263	1.601
PISO 1	C13	Live	-21.7516	-0.1826	0.1058
PISO 1	C13	SISMODISEÑOXX	7.007	4.8434	14.0629
PISO 1	C13	SISMODISEÑOYY	13.1072	8.7465	2.0066

Se presentan las combinaciones de carga más crítica para este nuevo caso de carga, en la tabla 4.19, correspondientes a la dirección X.

Tabla 4.19: Combinaciones de diseño en X re-calculadas para la columna C-13

SISMO EN XX			
COMBINACIÓN	P(ton)	M2(ton.m)	M3(ton.m)
1.4CM + 1.7CV	140.23248	-1.74724	2.42126
1.25CM+1.25CV+SX	126.38825	3.332275	16.1964
1.25CM+1.25CV-SX	112.37425	-6.354525	-11.9294
0.9CM + SX	73.38506	3.91973	15.5038
0.9CM - SX	59.37106	-5.76707	-12.622

Para estas combinaciones de carga se verifica si cumplen estar dentro del diagrama de interacción de la sección de encamisado planteado:

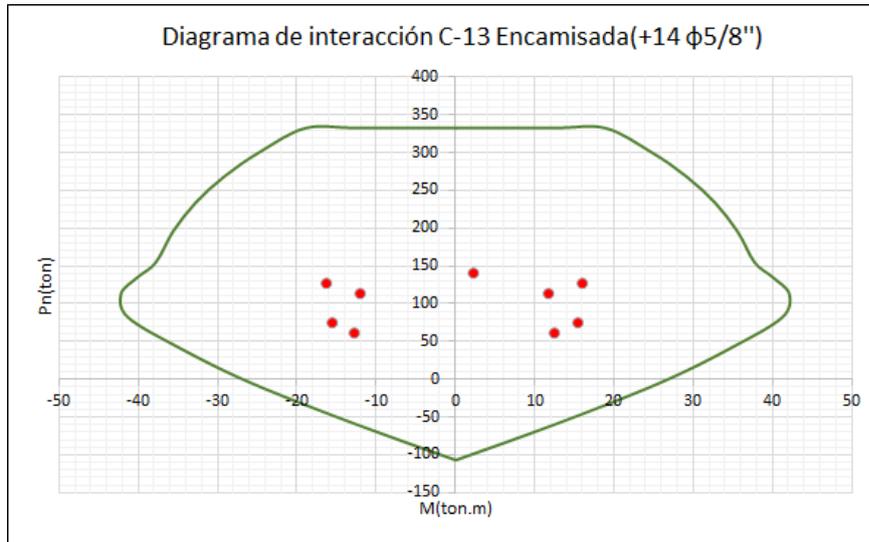


Figura 4.34: Diagrama de interacción de la sección de encamisado de concreto armado con las cargas re-calculadas

Como se puede apreciar en la figura 4.34 las cargas siguen cumpliendo con estar dentro del diagrama de interacción para la sección de encamisado propuesta; por tanto, se valida el diseño para las columnas encamisadas. Sin embargo, hay que considerar que el aumento del peso puede generar una variación en la demanda de cargas que actúan en los demás elementos estructurales como por ejemplo vigas, losas, etc. Para poder verificar el comportamiento de estos elementos se debe obtener del nuevo modelo estructural planteado las cargas actuantes y verificar el diseño de los elementos mencionados, de no cumplir puede ser necesario reforzar otros elementos y generar aún mas peso si se utiliza reforzamientos como encamisados de concreto armado para vigas o refuerzo con acero para losas. Lo descrito representa una desventaja cuando se refuerza con encamisados a diferencia del reforzamiento con CFRP, puesto que reforzar con fibra de carbono no genera un aumento significativo de peso en la estructura como se presentó en la tabla 4.17.

4.1.11. Análisis de resultados obtenidos

Se presenta a continuación en la figura 4.35 una gráfica que resumen el porcentaje de resistencia en fuerza axial nominal , que aporta cada reforzamiento respecto a la sección inicial:

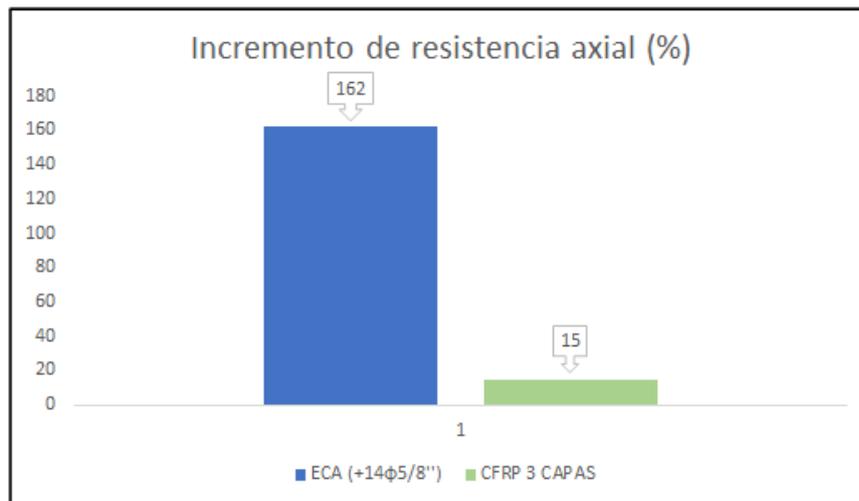


Figura 4.35: Incremento de resistencia de fuerza axial para ambos tipos de reforzamiento

Como se observa, el encamisado de concreto armado aporta una cantidad de resistencia mucho mayor que el reforzamiento con CFRP. Esta aseveración es más contundente en cuanto al aporte de resistencia en la fuerza axial, puesto que el encamisado de concreto armado calculado aumenta en un 162 % la fuerza axial a comparación del reforzamiento calculado con CFRP (15%). Por otro lado, cuando se modeló la estructura con cada alternativa de reforzamiento, el encamisado de concreto aumentó un peso considerable a la estructura, lo cual puede visualizarse en la figura 4.36.

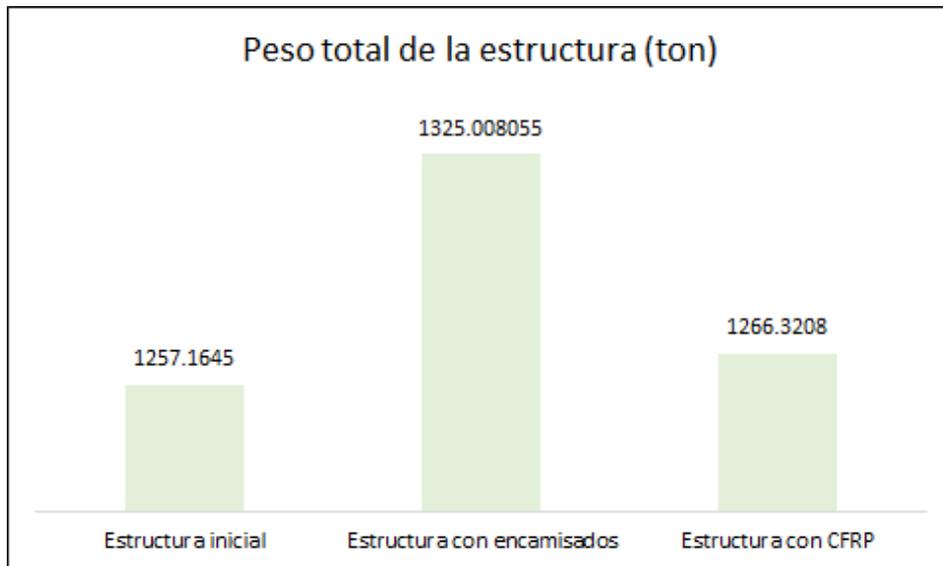


Figura 4.36: Comparación del peso de cada estructura modelada con encamisados y CFRP

El aumento del peso puede generar una mayor demanda de acero en ciertos elementos estructurales, ya que la cortante basal de la estructura se incrementa producto del aumento del peso. Se puede observar que en el caso del refuerzo con CFRP, el peso se incrementó producto de las placas adicionales para cumplir las derivas de entrepiso. El refuerzo con las bandas de polímero de carbono no aporta un peso sustancial a la estructura, por lo que es un beneficio que no tienen los encamisados de concreto armado.

4.2. Comparación entre los procesos constructivos de ambos reforzamientos

4.2.1. Materiales para cada reforzamiento

Encamisado de concreto armado

Como se mencionó brevemente en el capítulo del marco teórico, el encamisado de concreto armado utiliza materiales típicos de construcción para su ejecución. El acero y los ma-

teriales necesarios para elaborar concreto (cemento, agregado, agua,etc.) no tienen dificultad para su obtención. Un aspecto importante a considerar es que se recomienda utilizar un concreto nuevo de mayor resistencia específica ($f'c$) que el concreto viejo, lo cual debe ser considerado en el diseño del encamisado de concreto armado.

Para la junta entre concreto viejo y nuevo es necesario utilizar un adhesivo epóxico, cuya presentación generalmente viene en gel. Un ejemplo de este material es Sikadur®32, el cual viene en presentaciones de 1 y 5kg, con dos componentes a base de resinas epóxicas , libre de solventes.

Las herramientas necesarias para ejecutar este reforzamiento son las que se utilizan en cualquier construcción. Para la aplicación del adhesivo epóxico se requiere una brocha o rodillo, a fin de aplicar la resina sobre una superficie rugosa y limpia.

Refuerzo con CFRP

Para la aplicación de este reforzamiento, se requiere en primer lugar el material principal de polímero reforzado; como se definió anteriormente, se utilizó fibras de carbono confinando la sección de columna propuesta para el diseño del reforzamiento. Tal material se encuentra en presentación de láminas, por ejemplo, SikaWrap ®600C WV-50cm viene en presentación de rollos de 25.00 m² (50 cm x 50.00 m), en sentido unidireccional. Existen otras marcas que ofrecen láminas de CFRP como Horse®o Regbar ®, pero la marca Sika ®es la mas conocida en el Perú. Se puede apreciar la presentación de CFRP SikaWrap en rollizo de laminado en la figura 4.37.



Figura 4.37: SikaWrap @600C WV-50cm

Las láminas con la fibra de carbono se colocan a modo de encamisado alrededor de la columna, ya habiendo redondeado los bordes en caso la sección sea rectangular. Para unir las láminas con el concreto es necesario utilizar una resina de alta resistencia y módulo, como por ejemplo Sikadur @301. Para la preparación de este componente se requiere un mezclador mecánico de bajas revoluciones (400-600 rpm). Antes de su aplicación, se debe limpiar la superficie y eliminar cualquier elemento que impida la adherencia por medios mecánicos, se recomienda que la superficie tenga un estado seco.

La colocación de las láminas de fibras de carbono debe ser realizada por un aplicador autorizado o personal calificado. Se puede cortar las láminas a la longitud apropiada usando tijeras de tipo industrial o para trabajo pesado.

4.2.2. Ejecución de cada reforzamiento

Encamisado de concreto armado

Como se explicó brevemente en el capítulo de marco teórico, para realizar un encamisado de concreto armado óptimo se debe cuidar el proceso constructivo, pues depende de este que el reforzamiento se comporte adecuadamente como se prevé en la fase de diseño. Tam-

bién, el adhesivo epóxico debe colocarse adecuadamente en la sección de la columna que se encamisará, habiendo limpiado y escarificado la superficie de contacto entre concreto antiguo y concreto nuevo. Lo mencionado es bastante importante, pues esta unión permite que la columna reforzada se comporte como un solo elemento.

El personal encargado de reforzar una columna con encamisado de concreto armado debe tener el conocimiento técnico común en construcción, pues el método no tiene algún material externo o proceso de construcción ajeno al convencional. Se puede realizar el reforzamiento con una adecuada supervisión, cuidando cada etapa del procedimiento.

El tiempo de ejecución es considerable, puesto que se requiere preparar la sección a reforzar antes de reforzar la columna. Se puede dividir el procedimiento en cuatro fases:

- Primero, se debe preparar la superficie de la columna que se reforzará, limpiándola y escarificándola.
- Luego, se debe colocar el adhesivo epóxico en la sección de concreto viejo y en las perforaciones donde se ancle acero de refuerzo.
- Después, se debe colocar el acero de reforzamiento y encofrar la sección.
- Finalmente, se vacea el concreto nuevo con un adecuado equipo de vibración.

Teniendo en consideración la secuencia de actividades mencionadas, en una construcción normal se puede terminar de reforzar una columna en un periodo de 2 a 3 días, adicional a ello se debe considerar el tiempo para que el concreto alcance su resistencia de diseño ($f'c$) y se pueda desencofrar (28 días). Por otro lado, existen diferentes situaciones que pueden presentarse en obra de acuerdo a la naturaleza de un proyecto de reforzamiento, lo cual puede generar partidas adicionales. Por ejemplo, puede existir la necesidad de reforzar las cimentaciones de las columnas encamisadas si el aumento de carga es considerable, lo cual genera mayor demanda de recursos, tanto en materiales como en mano de obra.

Reforzamiento con CFRP

El procedimiento para reforzar una columna con CFRP resulta mas corto de realizar que el encamisado de concreto armado, este se puede dividir en dos fases:

- En primer lugar, se debe preparar la superficie de la columna que se reforzará, limpiándola y en caso sea una sección rectangular, redondeando las esquinas a fin de tener todos los bordes curvos.
- En segundo lugar, se debe colocar la resina de alta resistencia, seguido de la lámina de fibra de carbono elegida para el reforzamiento.

Si bien el procedimiento resulta simple, se debe contar con un adecuado personal técnico con conocimiento en reforzamiento con CFRP, debido a que se debe preparar adecuadamente la resina de alta resistencia y tener cuidado al manipular las láminas de fibra de carbono. También, se debe contar con equipo adicional como un mezclador mecánico para preparar la resina y tijeras tipo industrial para el corte de las láminas.

El tiempo para la ejecución de este reforzamiento es corto, pudiendo culminar el trabajo para una columna convencional en un día, siempre y cuando se tenga el personal técnico capacitado para realizar el procedimiento correctamente.

4.2.3. Experiencias previas con cada reforzamiento

Encamisado de concreto armado

Reforzar columnas con este método es la primera opción para la mayoría de constructores en el Perú. Como ejemplo se presenta el proyecto: "MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE LABORATORIOS EN LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO", el cual consistió en el reforzamiento de un pabellón antiguo de la Universidad Nacional del Altiplano, en Puno. El autor del presente

trabajo de investigación fue partícipe en la ejecución del proyecto, realizando sus prácticas pre-profesionales en el año 2019, entre los meses de Enero y Marzo.

En tal proyecto se optó por reforzar las columnas y placas existentes con encamisados de concreto armado. El motivo de reforzar el pabellón fue en esencia el tiempo que tenía la construcción, pues se construyó en el año 1980 y en décadas pasadas no se tenía los códigos de construcción que rigen en la actualidad.

Un aspecto importante en este proyecto fue que la arquitectura en esencia no se modificó, puesto que se tuvo que adecuar los elementos de reforzamiento al casco existente. Al tener ambientes destinados a laboratorios y aulas, se tuvo que modelar la estructura adecuadamente, con elementos rígidos para poder cumplir los lineamientos de la norma sismoresistente E 0.30. En la figura 4.38 se puede apreciar los encamisados de concreto armado ejecutados en el proyecto de reforzamiento mencionado.



Figura 4.38: Reforzamiento de columnas y placas con encamisados de concreto armado

Respecto al proyecto mencionado se puede rescatar lo siguiente:

- Se redujeron algunos espacios debido a las dimensiones de las columnas y placas reforzadas con encamisados de concreto armado.

- En esencia se realizó el reforzamiento para las columnas en todas sus caras, no obstante hubo casos donde el reforzamiento fue parcial, reforzando solo algunas caras de la sección.
- El tiempo de ejecución para el reforzamiento fue considerable, teniendo que aplazar algunos días en el armado del acero y el encofrado, puesto que se demoró más de lo previsto al momento de escarificar la superficie de los elementos a reforzar.

Reforzamiento con CFRP

En los últimos años, se ha tenido en consideración cada vez más el uso de CFRP para reforzamiento de estructuras. Como ejemplo de aplicación se presenta el proyecto de ampliación del "Hotel Santa Cruz", en la ciudad de Lima (2012), cuyas columnas reforzadas se pueden apreciar en la figura 4.39.



Figura 4.39: Refuerzo de columnas a confinamiento con SikaWrap ®600C y Anclaje de FRP. (SIKA, 2018)

El principal fin del proyecto mencionado era la ampliación de la edificación, por lo que se requería el reforzamiento de la estructura existente para soportar las nuevas cargas en todo el edificio. Como se puede observar en la imagen previa, no se podía optar por un método

de reforzamiento convencional (encamisado de concreto armado), debido a la distribución de espacios en el hotel. En este caso, el uso de CFRP resultó la mejor opción para aumentar la resistencia de las columnas existentes.

Algunas características para el reforzamiento fueron las siguientes:

- La filosofía de diseño fue el manual ACI 440.2R, a cargo del Ing. Julio Higashi.
- Se reforzó en total 110 m² de sección de columnas, utilizando SikaWrap®600C.
- Se capacitó al personal obrero encargado de ejecutar el reforzamiento con CFRP; así también, se tuvo una supervisión constante por parte del ingeniero encargado.
- Luego de culminado el proyecto, el reforzamiento no se notó debido a lo delgado de las láminas con la fibra de carbono utilizada.

4.2.4. Análisis de resultados

Con el fin de poder comparar el proceso constructivo de cada reforzamiento, se propuso la tabla 4.20, en la cual se colocó un check cuando el reforzamiento tenía una ventaja considerable en el ítem respectivo.

Tabla 4.20: Comparación entre las características de cada reforzamiento en su proceso constructivo

	ECA	CFRP
Disponibilidad de materiales	✓	
Espacio para su ejecución		✓
Menor cantidad de materiales		✓
Facilidad de construcción		✓
Menor tiempo de ejecución		✓
Ganancia de espacio		✓
Estética		✓

De acuerdo con la tabla 4.20 , el reforzamiento con CFRP presenta una mayor cantidad de ventajas frente al encamisado de concreto armado en el proceso constructivo. Su forma de ejecución resulta más efectiva de realizarse siempre y cuando se tenga la adecuada capacitación en la mano obrera y supervisión en la parte técnica. La principal ventaja de utilizar este método de reforzamiento es el tiempo, puesto que un día se puede realizar correctamente el reforzamiento, a diferencia del encamisado de concreto armado, que requiere una secuencia de partidas a realizar antes de culminarlo, sin considerar el tiempo de fragua del concreto que termina retrasando aún más su proceso.

Otro aspecto importante a considerar es el espacio que se puede perder cuando se utiliza el encamisado de concreto armado, puesto que al incrementar la sección de la columna existente el espacio del ambiente donde se encuentre la columna se verá reducido considerablemente. Lo mencionado puede observarse mejor cuando se refuerza una cantidad grande de columnas con encamisado de concreto armado en un solo nivel. En cambio, el CFRP al utilizar láminas delgadas para reforzar columnas, no reduce el espacio existente en el ambiente, pudiendo inclusive no notarse luego de un tarrajeo adecuado.

4.3. Comparación entre el costo de ambos reforzamientos

Para obtener el costo de realizar cada propuesta de reforzamiento se realizó el análisis de precios unitarios de las partidas mas incisivas en el reforzamiento de las columnas, así también se incluyó el costo de las placas añadidas a la estructura para el control de derivas. El análisis de precios unitarios puede encontrarse en el anexo C.

4.3.1. Partidas del encamisado de concreto armado

En el caso del encamisado de concreto armado, existen partidas previas a su ejecución, como es el caso de picar el concreto existente también llamado escarificado. Posterior a ello, el armado del acero de refuerzo nuevo y finalmente el encofrado y vaceado. Se presenta en la tabla 4.21 el resumen de las partidas involucradas para realizar el reforzamiento de las columnas con encamisados, también se incluyen las partidas involucradas en la ejecución de las placas añadidas para poder cumplir las derivas de entrepiso.

Tabla 4.21: Partidas utilizadas en la primera propuesta de reforzamiento

Partida	Und
LIMPIEZA Y PREPARACIÓN PARA REFORZAMIENTO	m2
MOVILIZACIÓN DE MATERIAL	glb
CONCRETO EN COLUMNA F'C=210 Kg/cm ²	m3
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN COLUMNA	m2
ACERO GRADO 60 EN COLUMNA FY=4200 Kg/cm ²	kg
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO CONCRETO NUEVO-VIEJO	m2
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO ANCLAJE REFUERZO	und
CONCRETO EN PLACA F'C=210 Kg/cm ²	m3
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN PLACA	m2
ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm ²	kg
ENROCADO DE ZAPATAS	m3
CONCRETO EN LOSA DE CIMENTACIÓN F'C=210 Kg/cm ²	m3
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN LOSA DE CIMENTACIÓN	m2
ACERO GRADO 60 EN LOSA DE CIMENTACIÓN FY=4200 Kg/cm ²	kg

4.3.2. Metrado del encamisado de concreto armado

Se presenta en la tabla 4.22 el metrado de las partidas necesarias para la primera propuesta de reforzamiento.

Tabla 4.22: Metrado de las partidas para la primera propuesta de reforzamiento con encamisados

Partida	Und.	N° de veces	Dimensiones			Metrado Parcial	Metrado Total
			Ancho(m)	Largo(m)	Alto(m)		
LIMPIEZA Y PREPARACION PARA REFORZAMIENTO	m2						277.20
COLUMNA TIPO I		12	Per=	1.30	3	46.80	
COLUMNA TIPO II		48	Per=	1.60	3	230.40	
MOVILIZACION DE MATERIAL	glb					1	1.00
CONCRETO EN COLUMNA F'C=210 Kg/cm2	m3						34.92
CONCRETO EN COLUMNA F'C=210 Kg/cm2							
COLUMNA TIPO I		12	A=	0.17	3	6.12	
COLUMNA TIPO II		48	A=	0.20	3	28.8	
ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN COLUMNA	m2						421.20
COLUMNA TIPO I		12	Per=	2.10	3	75.60	
COLUMNA TIPO II		48	Per=	2.40	3	345.60	
ACERO GRADO 60 EN COLUMNA FY=4200 Kg/cm2	kg						8865.6
COLUMNA TIPO I		12	Según planilla de metrado			131.24	1574.88
COLUMNA TIPO II		48	Según planilla de metrado			151.89	7290.72
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO CONCRETO NUEVO-VIEJO	m2						421.20
COLUMNA TIPO I		12	Per=	2.10	3	75.60	
COLUMNA TIPO II		48	Per=	2.40	3	345.60	
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO ANCLAJE REFUERZO	Und.						2880
COLUMNA TIPO I		12	28			336	
COLUMNA TIPO II		48	32			1536	
PLACA TIPO I		12	84			1008	
CONCRETO EN PLACA F'C=210 Kg/cm2	m3						15.75
PLACA TIPO PL-01,PL-02,PL-03,PL-04		12	0.25	1.75	3	15.75	
ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN PLACA	m2						144
PLACA TIPO PL-01,PL-02,PL-03,PL-04		12	Per=	4.00	3	144	
ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm2	kg						2542.44
PLACA TIPO PL-01,PL-02,PL-03,PL-04		12	Según planilla de metrado			211.87	2542.44
ENROCADO DE ZAPATAS	m3						28.50
ZAPATA Z-01		4	A=	2.00	0.65	5.2	
ZAPATA Z-02		16	A=	2.24	0.65	23.30	
CONCRETO EN LOSA DE CIMENTACIÓN F'C=210 Kg/cm2	m3						123.44
LOSA PARA Z-01		4	A=	10.27	0.55	22.59	
LOSA PARA Z-02		16	A=	11.46	0.55	100.85	
ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN LOSA DE CIMENTACIÓN	m2						148.28
LOSA PARA Z-01		4	Per=	13.00	0.55	28.6	
LOSA PARA Z-02		16	Per=	13.60	0.55	119.68	
ACERO GRADO 60 EN LOSA DE CIMENTACIÓN FY=4200 Kg/cm2	kg						8331.68
LOSA PARA Z-01		4	Según planilla de metrado			394.36	1577.44
LOSA PARA Z-02		16	Según planilla de metrado			422.14	6754.24

Con los metrados de las partidas mas incisivas para el reforzamiento con encamisados

se determinó el costo total en soles (S/.) como se puede apreciar en la tabla 4.23.

Tabla 4.23: Presupuesto de la primera propuesta de reforzamiento

PRESUPUESTO PRIMERA PROPUESTA DE REFORZAMIENTO (ENCAMISADOS DE CONCRETO ARMADO)				
Partida	Und	Cant	Precio(S/.)	Subtotal(S/.)
LIMPIEZA Y PREPARACION PARA REFORZAMIENTO	m2	8.88	3.05	27.08
MOVILIZACION DE MATERIAL	glb	1.00	600.00	600.00
CONCRETO EN COLUMNA F'C=210 Kg/cm2	m3	34.92	388.87	13579.34
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN COLUMNA	m2	421.20	51.81	21822.37
ACERO GRADO 60 EN COLUMNA FY=4200 Kg/cm2	kg	8856.60	4.34	38437.64
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO CONCRETO NUEVO-VIEJO	m2	421.20	31.85	13415.22
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO ANCLAJE REFUERZO	und	2880.00	5.16	14860.80
CONCRETO EN PLACA F'C=210 Kg/cm2	m3	15.75	388.87	6124.70
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN PLACA	m2	144.00	51.81	7460.64
ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm2	kg	2542.44	4.34	11034.19
ENROCADADO DE ZAPATAS	m3	28.5	69.11	1969.64
CONCRETO EN LOSA DE CIMENTACIÓN F'C=210 Kg/cm2	m3	123.44	337.97	41719.02
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN LOSA DE CIMENTACIÓN	m2	148.28	52.93	7848.46
ACERO GRADO 60 EN LOSA DE CIMENTACIÓN FY=4200 Kg/cm2	kg	8331.68	4.34	36159.49
			Total(S/.)	215058.60

4.3.3. Partidas del reforzamiento con CFRP

Del mismo modo que en la primera propuesta de reforzamiento con encamisados, se presenta en la tabla 4.24 las partidas necesarias para el reforzamiento de las columnas con CFRP. También se han incluido las partidas referidas a la inclusión de placas en la estructura para el control de derivas de entrepiso.

Tabla 4.24: Partidas utilizadas en la segunda propuesta de reforzamiento

Partida	Und
REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO SIKAWRAP 600 WV 50cm	m2
CONCRETO EN PLACA F'C=210 Kg/cm2	m3
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN PLACA	m2
ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm2	kg

4.3.4. Metrado del reforzamiento con CFRP

Se muestra en la tabla 4.25 el metrado de las partidas necesarias para la segunda propuesta de reforzamiento.

Tabla 4.25: Metrado de las partidas para la segunda propuesta de reforzamiento con enca-misados

Partida	Und.	N° de veces	Dimensiones			Metrado Parcial	Metrado Total
			Ancho(m)	Largo(m)	Alto(m)		
REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO SIKAWRAP 600 WV 50cm	m2						601.20
COLUMNA TIPO I	3	12	Per=	1.30	3	140.40	
COLUMNA TIPO II	2	48	Per=	1.60	3	460.80	
CONCRETO EN PLACA F'C=210 Kg/cm2	m3						25.5
PLACA TIPO PL-01		3	0.25	2.75	3	3	
PLACA TIPO PL-02		3	0.25	2.5	3	22.5	
PLACA TIPO PL-03,PL-04		6	0.25	2	3	36	
ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN PLACA	m2						103.50
PLACA TIPO PL-01		3	Per=	6.00	3	54.00	
PLACA TIPO PL-02		3	Per=	5.50	3	49.50	
PLACA TIPO PL-03,PL-04		6	Per=	4.50	3	81.00	
ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm2	kg						3122.13
PLACA TIPO PL-01		3	Según planilla de metrado			303.8	911.4
PLACA TIPO PL-02		3	Según planilla de metrado			294.17	882.51
PLACA TIPO PL-03,PL-04		6	Según planilla de metrado			221.37	1328.22

Con los metrados de las partidas mas incisivas para el reforzamiento con CFRP se determinó el costo total en soles (S/.) como se puede apreciar en la tabla 4.26.

Tabla 4.26: Presupuesto de la primera propuesta de reforzamiento

PRESUPUESTO SEGUNDA PROPUESTA DE REFORZAMIENTO (REFORZAMIENTO CON CFRP)				
Partida	Und	Cant	Precio(S/.)	Subtotal(S/.)
REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO SIKAWRAP	m2	601.20	471.41	283411.69
CONCRETO EN PLACA F'C=210 Kg/cm2	m3	25.50	388.87	9916.19
ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN PLACA	m2	103.50	51.81	5362.34
ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm2	kg	3122.13	4.34	13550.04
			Total(S/.)	312240.26

4.3.5. Análisis de resultados

Se analizó el costo de ejecutar cada propuesta de reforzamiento en una columna, obteniendo un precio mucho mayor para el reforzamiento con CFRP (1.45 veces el precio del encamisado) , lo cual se debe al costo de los materiales que se requieren para su elaboración.

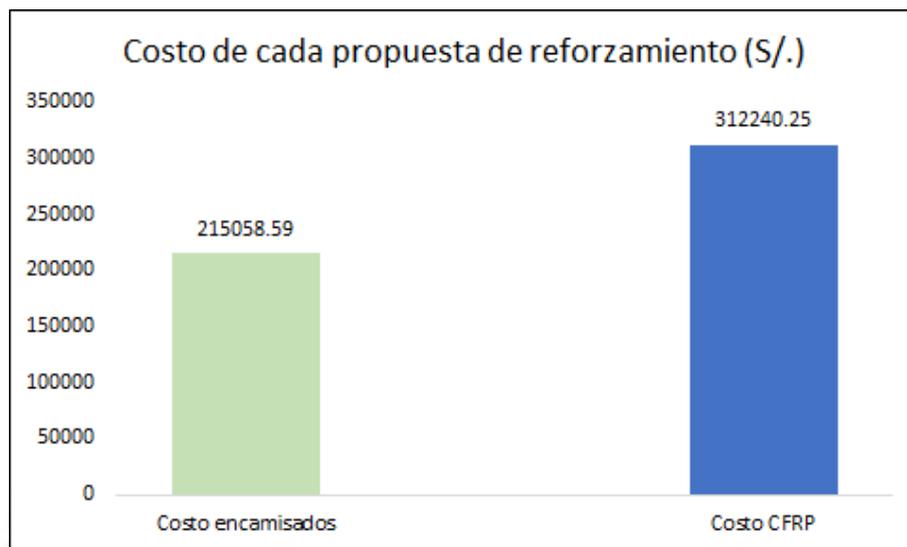


Figura 4.40: Comparación del costo de cada reforzamiento en soles

Al momento de analizar el costo del encamisado de concreto armado, se encontró muchas partidas involucradas en su ejecución, las cuales correspondían a partidas típicas de un proyecto de construcción. Es importante mencionar que pese al tiempo de ejecución más alto para el encamisado de concreto armado frente al reforzamiento con CFRP, el costo de las horas trabajadas no se vio reflejado en el costo final, puesto que de todas maneras el CFRP resultó más costoso, pero elaborado en mucho menos tiempo que la primera propuesta de reforzamiento. El valor del ratio de costo CFRP vs encamisado al reforzar columnas de concreto armado se puede comparar con otros valores determinados en investigaciones similares. Se presenta en la tabla 4.27 los valores determinados de este ratio en 2 investigaciones anteriores, junto con la presente.

Tabla 4.27: Ratio Costo CFRP/Encamisado para refuerzo estructural en columnas

RATIO: COSTO CFRP/COSTO ENCAMISADO	
Castro (2019)	2.4
Guillermo y Silva (2020)	1.39
Tudela (2022)	1.45

Como se vio en el proyecto de referencia, muchas veces no basta solamente con reforzar las columnas para poder cumplir los demás criterios de diseño que exige la norma E 0.30. Esto genera costos adicionales y una concepción estructural nueva, para el caso del proyecto mencionado fue la adición de elementos rígidos como muros de corte (placas). Estos elementos incrementan las partidas requeridas para la ejecución del proyecto de reforzamiento, de este modo incrementándose el costo total.

Finalmente, es importante recalcar el costo adicional que representa la ganancia de metros cuadrados (m²) en una edificación. Como se vio anteriormente, el encamisado de concreto armado requiere la ampliación de su sección por lo que se pierde área construida al reforzar las columnas con este método. Para cierto tipo de edificaciones como centros comerciales o construcciones con valor histórico, es posible que no se pueda alterar significativamente su espacio; por tanto, el CFRP resultaría la mejor opción en este escenario planteado, justificando de este modo su costo.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

- De acuerdo con el análisis teórico de la resistencia a flexo-compresión de ambos reforzamientos, el encamisado de concreto aportó mayor resistencia que el CFRP, según los dos modelos de reforzamiento planteados. Esto se evidenció principalmente cuando se halló el diagrama de interacción para la sección de columna encamisada, generando una resistencia a compresión y flexión mucho mayor que el CFRP, lo cual se debió a la sección generosa de concreto armado con la que se decidió reforzar las columnas.
- El uso de los encamisados de concreto armado permitió reducir el desplazamiento lateral de la estructura, sin embargo se tuvo que adicionar placas de concreto armado para poder cumplir con el límite de la norma peruana de diseño sísmoresistente E 0.30 (deriva máxima permitida 0.007). Con todas estas implicaciones el peso de la estructura se incrementó en un 11.25 %, de este modo se incrementó la cortante basal de diseño. Una consecuencia del aumento del peso fue el hecho de tener que reforzar las cimentaciones existentes. En contraste, el uso de CFRP confinando las columnas no permitió reducir el desplazamiento lateral de la estructura, por lo que también se tuvo que incluir placas para cumplir el límite de derivas exigido por norma. Pese a esta

adición el incremento del peso de la estructura fue solo de 0.46 %.

- El proceso constructivo del CFRP presenta muchas ventajas frente al encamisado de concreto armado. En general, ejecutar este tipo de reforzamiento resulta una opción rápida para reforzar una columna, pues no tiene partidas que requieren una secuencia para poder terminar el reforzamiento, a diferencia del encamisado de concreto armado, el cual consiste en una secuencia de partidas típicas de estructuras (encofrado, armado de acero, vaceado de concreto) . Además, una característica importante para el CFRP es la ganancia de espacio, pues el espesor de las láminas de fibra de carbono permite que el reforzamiento no quite metros cuadrados en el piso que se requiera reforzar las columnas.
- En proyectos de reforzamiento estructural de espacio considerable y con un tiempo de ejecución largo, se recomienda utilizar el encamisado de concreto armado. Por ejemplo, en obras de ampliación y reforzamiento donde se tenga ese margen de tiempo considerado desde la fase de planificación. Por otro lado, en proyectos que requieran reforzar lo antes posible sus elementos estructurales, y no contemplen la pérdida de espacio cuando se refuercen las columnas (un hotel por ejemplo), se recomienda utilizar CFRP para el reforzamiento.
- El costo de reforzar una columna con CFRP resulta mayor que reforzarla con un encamisado de concreto armado (1.45 veces) , lo cual se debe principalmente a los materiales requeridos para el reforzamiento. Las ventajas que ofrece el CFRP frente al encamisado, pueden justificar la diferencia de costo, siendo la ganancia de espacio y el tiempo de ejecución las características más importantes que ofrece el CFRP.
- Para que el encamisado de concreto armado pueda cumplir adecuadamente su función estructural, se debe tener un cuidado especial en el proceso constructivo, pues la

junta entre concreto viejo y nuevo determinará que la sección se comporte como una sola y transmita adecuadamente los esfuerzos en todo el elemento.

- Cuando se requiera ejecutar un reforzamiento con CFRP, se debe supervisar el proceso del colocado de la lámina con fibra de carbono, así también se debe capacitar adecuadamente al personal obrero encargado de realizar en obra el reforzamiento, pues se debe colocar con cuidado el CFRP, así como mezclar adecuadamente la resina epóxica para unir las capas del reforzamiento.



Bibliografía

- ACI 440 Committee. (2019). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.2 R-19). *American Concrete Institute, Detroit, Michigan.*
- Alegre, G. G. (2017). *Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Tesis de Pregrado.
- Castro, Z. C. R. (2019). *Reforzamiento estructural con fibra de carbono como alternativa económica para aumentar la resistencia a la compresión de las columnas en la galería comercial fullmarket en el 2019.* Universidad Privada del Norte. Tesis de Pregrado.
- Committee, A. (2019). Building code requirements for structural concrete (aci 318-19) and commentary..
- Cornejo, Q. C. A. (2019). *Comportamiento experimental de columnas cortas con refuerzo externo.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Tesis de Maestría.
- Damazo, J. (2006). Las estructuras no son eternas. *Revista Construcción y Tecnología. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto [IMCYC]. 48-54.*
- Estrada, P. F. E. (2018). *Estudio comparativo de dos alternativas para la ampliación de un nivel de un módulo de aulas existente.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Tesis de Maestría.
- Gameros, M. S. J. (2015). *Análisis comparativo de tres tipos de refuerzo estructural para pabe-*

- llones de aulas de locales escolares de dos pisos y tres aulas por piso.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Tesis de Pregrado.
- García, C. R., y Heredia, R. B. (2013). Influencia del factor de reducción de la resistencia en el diseño de columnas mediante diagramas de interacción. *Avanzada Científica*, 16(2), 82–94.
- Gomes, A., y Appleton, J. (1997). Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling. *Engineering Structures*, 19(10), 822–826.
- Guillermo La Torre, A. d. J., y Silva, T. Y. S. (2019). *Evaluación y diseño de dos propuestas de reforzamiento para vigas y columnas de concreto armado en una edificación de hotel.* Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Tesis de Pregrado.
- Helal, J., Sofi, M., y Mendis, P. (2015). Non-destructive testing of concrete: A review of methods. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 97–105.
- Martel Vargas, P. F. (2004). Comparación de la respuesta sísmica de edificaciones escolares diseñadas con las normas simoresistentes de 1997 y 1977. afectados por el sismo del 23 de junio del 2001, región sur-arequipa.
- Masterbreace. (2020). Sistema compuesto de reforzamiento.
- Mirmiran, A., y Shahawy, M. (1997). Behavior of concrete columns confined by fiber composites. *Journal of structural engineering*, 123(5), 583–590.
- Muñoz, P. A. (2011). Ingeniería sismorresistente. *Lima, Perú: Fondo Editorial PUCP.*
- Nakano, Y., y cols. (1995). Ductilidad y diseño estructural de los edificios de concreto reforzado. En *Curso sobre seguridad sísmica de las construcciones para directores responsables de obra* (pp. 154–76). México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).
- Navarrete, T. I. A. (2017). Procedimiento de refuerzo de estructuras de hormigón armado con materiales CFRP.

- Oliveira, D. R. C. D., Damasceno, I. I. R., y Branco, V. H. L. (2018). Columnas de concreto armado reforzados a flexo-compresión con encamisado parcial. *Revista ALCONPAT*, 8(2), 150–162.
- Ottazzi, G. (2016). Apuntes del curso: Concreto armado 1. *Editorial PUCP, Lima*.
- Portland Cement Association, P., y cols. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. *Portland Cement Association, 1a edición, Capítulo, 3*, 77–91.
- Prieto, S. L. R. (1991). *Introducción al diseño de estructuras de acero*. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Quispe, S. C. N. (2018). *Variación de la resistencia mecánica de elementos sometidos a compresión, con el incremento de su sección resistente mediante un encamisado, haciendo uso de un puente epóxico*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Rao, P. P. K. V., Singh, Y., Kadam, S., y Haldar, P. (2016). Seismic evaluation and retrofit of reinforced concrete and masonry buildings.
- Rougier, V. (2003). *Confinamiento de columnas de hormigón con materiales compuestos*. San Miguel de Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán. Tesis de maestría.
- SIKA. (2018). Guía de usuario software de diseño Sika®CarboDur® basado en ACI 440.2R-8.
- Silva, R. J. C., Muniz, Silveira, M. B., Lima, Feitosa, É. M., Da Silva Júnior, F. E. S., y Dos Santos Araújo, C. V. (2019). Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened with steel bars and epoxy structural adhesive. *Revista ALCONPAT*, 9(1), 65–78.
- Soto, E. (2008). *Rehabilitación de estructuras de concreto*. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría.
- Thermou, G. E., Papanikolaou, V. K., y Kappos, A. J. (2014). Monolithicity factors for the design of r/c columns strengthened with r/c jackets. , 25–29.
- Untiveros, C. M. A. (2007). *Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión*.

Villafuerte, O. J. D., y Arellano, H. A. P. (2021). *Estudio y diseño de sistemas de reforzamiento estructural en concreto armado*. Pontifica Universidad Católica del Perú. Tesis de pregrado.

Villagrán, E. I., Vera, C., y Posada, A. E. (2013). Modelo esfuerzo-deformación para elementos de concretos reforzado que cumple con las hipótesis de las ntc rcdf 2004. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 5(1), 32–39.

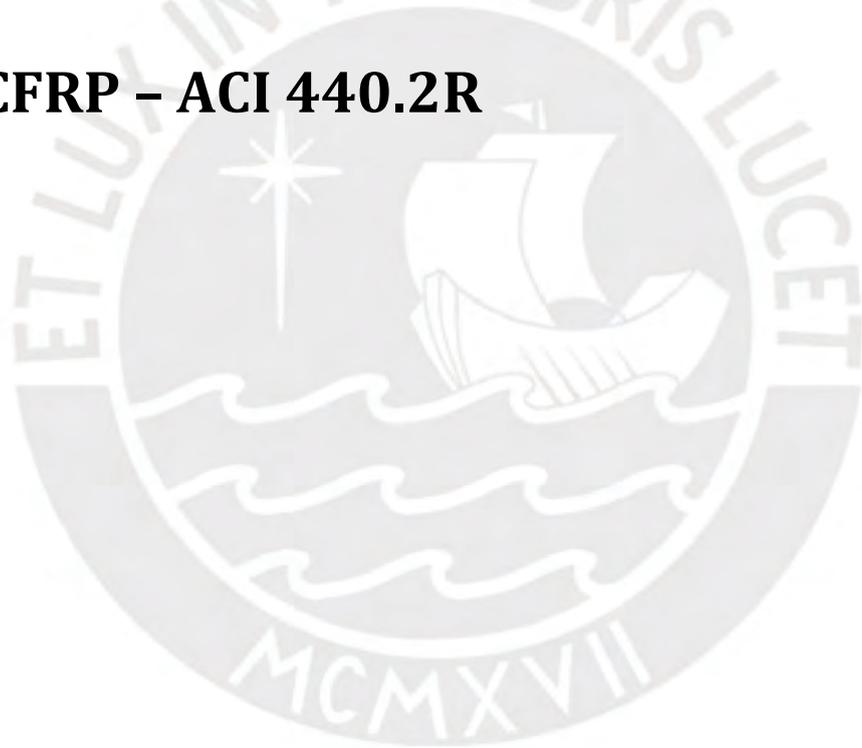


Anexos



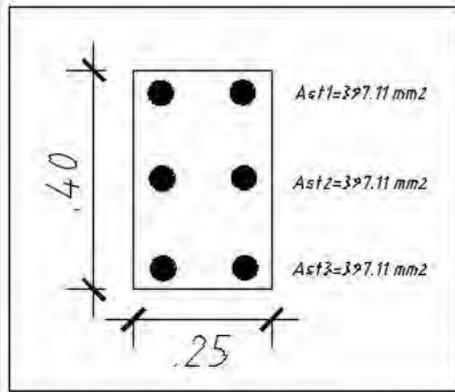
Anexo A

Hoja de cálculo: diseño del reforzamiento con CFRP – ACI 440.2R



DISEÑO DE ELEMENTOS FRP (ACI-400.2R-17)

- Diseño de reforzamiento con CFRP para la columna C-13 (25cmX40cm) para un caso de incremento de resistencia axial ($\epsilon < 0.1h$)



$$\Psi_g \epsilon^{-900} c$$

$$\Psi_h \epsilon^{-900} c$$

$$\Psi_i \epsilon^{-900} c$$

- **Datos de entrada para la sección inicial:**

c_l	:Base de la sección
i_K	:Altura de la sección
l	:Recubrimiento de la sección
c_l	:Radio de curvatura en las esquinas de la sección
$i c_K$:Resistencia a tracción del acero
$K c_O$:Resistencia a compresión del concreto
$\phi c c_K^d$:Módulo de elasticidad del acero
$\phi c c_K K K$:Módulo de elasticidad del concreto
$K O I$:Factor de reducción para compresión

Ψ	$ c_K K K c$:Área bruta de la sección
Ψ	$\Psi_g \Psi_h \Psi_i c O O c e c$:Área de acero de la sección
Ψ	$ K K K c$:Cuantía de acero de la sección

- **Propiedades del material FRP:**

$K e e O$:Espesor por capa del laminado
$K c^{-} O$:Esfuerzo último de compresión
$K K K c$:Deformación última de ruptura
$\phi c e l K K K$:Módulo de elasticidad

1. Cálculo de las propiedades de diseño.

Considerando un factor de reducción por condiciones de ambiente $CE=0.95$, se obtiene:

$$\rho \phi \bar{K} \bar{Q} \bar{1}$$

$$K \rho \phi | c'' Q \bar{9} \bar{1}$$

$$K \rho \phi | K K Q c$$

2. Cálculo de la compresión máxima de diseño $f'cc$.

$O \bar{e} l K''$: Resistencia a compresión requerida

$$K \bar{K} \bar{Q} \bar{1} \bar{\psi} \bar{8} \bar{\psi} \bar{K} \bar{Q} \bar{K} \bar{8} \bar{\psi}$$

$$K | c i'' q c e \bar{c}$$

3. Cálculo de la presión máxima de confinamiento f_l .

El área de confinamiento efectiva se calcula:

$$O \bar{8} \bar{3} \bar{8} \bar{c} \bar{4} \bar{c} \bar{6} \bar{3} \bar{8} \bar{c} \bar{4} \bar{c} \bar{8} \bar{e} \bar{\psi} \bar{O} \bar{8} | K \bar{Q} \bar{c} \bar{—}$$

Los factores de forma K_a y K_b se calculan:

$$\bar{c} | K \bar{Q} \bar{K} \bar{K} \bar{K} | K \bar{Q} \bar{—}$$

Finalmente se determina la presión de confinamiento.

$$K \bar{8} \bar{K} \bar{e} \bar{Q}$$

$$| 1 K \bar{Q} \bar{c} \bar{—} \bar{c}$$

Anexo B

Memoria de cálculo obtenida en el software

CarboDur®



SIKA® CARBODUR® CALCULATION SOFTWARE

PROYECTO: PABELLÓN SISTEMAS UNA-PUNO

ELEMENTO: C-25X40

ÍNDICE

1. CRITERIOS DE DISEÑO Y REGLAMENTO.....	3
2. HIPÓTESIS DE CÁLCULO.....	3
2.1. Geometría.....	3
2.2. Concreto.....	3
2.3. Acero de refuerzo.....	3
2.4. Factores de reducción de resistencia.....	4
2.5. Factores de carga.....	4
2.6. Condiciones de exposición.....	4
3. REFUERZO FRP DE CONFINAMIENTO.....	5
3.1. Propiedades del refuerzo FRP.....	5
3.2. Diagrama tensión deformación (concreto no confinado y confinado mediante FRP).....	6
4. COMBINACIONES DE CARGA PREVISTAS.....	7
4.1. Acciones esperadas (diseño del refuerzo).....	7
5. RESULTADOS.....	8
5.1. Resumen de resultados.....	8
5.2. Estados límite últimos.....	8
5.3. Estados límite de servicio.....	11
5.4. Resistencia al fuego (t=0 min.).....	12
5.5. Disposición del FRP.....	14

6. ESPECIFICACIÓN DE PRODUCTO.....	14
6.1. Tejidos SikaWrap® adheridos.....	14
6.1.1. Preparación de la superficie de hormigón/concreto.....	15
6.1.2. Tejidos SikaWrap®.....	15
6.1.3. Adhesivo epoxi.....	16
6.1.4. Procedimiento de aplicación.....	16
7. AVISO LEGAL.....	18
8. ACERCA DE SIKA® CARBODUR® CALCULATION SOFTWARE.....	18



1. CRITERIOS DE DISEÑO Y REGLAMENTO

Refuerzo de pilar por medio de confinamiento con FRP.

- ACI 440.2R-17
- ACI 318
- País: Perú

2. HIPÓTESIS DE CÁLCULO

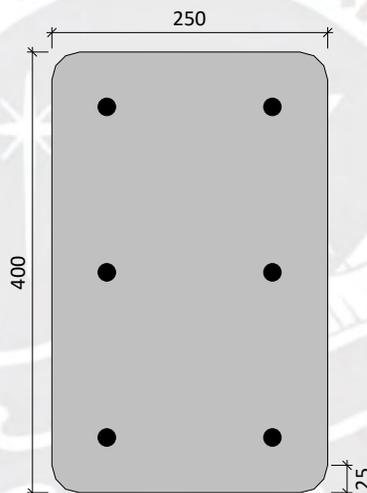
2.1. Geometría

Sección transversal = Rectangular (redondeada)

Ancho (b) = 250 mm

Canto (h) = 400 mm

Radio (r) = 25 mm



2.2. Concreto

Resistencia a compresión del hormigón

Resistencia del concreto (f'_c) = 21 MPa

Probeta cilíndrica = 21 MPa

Probeta cúbica = 26 MPa

2.3. Acero de refuerzo

Recubrimiento X = 50 mm

Recubrimiento Y = 50 mm

Refuerzo	Acero f_y (MPa)	E_s (MPa)	Número x d_s (mm)
Esquina	(Usuario ($f_y = 420.00$ MPa)) 420	200000	4 x 16
Cara Y	(Usuario ($f_y = 420.00$ MPa)) 420	200000	2 x 16

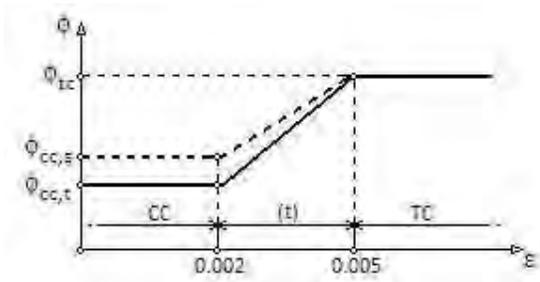
2.4. Factores de reducción de resistencia

Definido por (ACI 318)

$$\phi_{cc,t} = 0.65$$

$$\phi_{cc,s} = 0.75$$

$$\phi_{tc} = 0.90$$



2.5. Factores de carga

Combinaciones ACI	Cargas muertas	Cargas vivas
Límites del refuerzo	1.10	1.00
Acciones esperadas (diseño del refuerzo)	1.20	1.60
Acciones de servicio previstas	1.00	1.00
Caso de incendio	1.00	1.00

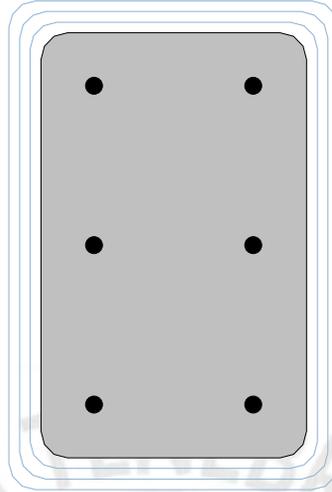
2.6. Condiciones de exposición

Tipo de fibra: Carbono

Condiciones de exposición: Exposición interior ($C_e = 0.95$)

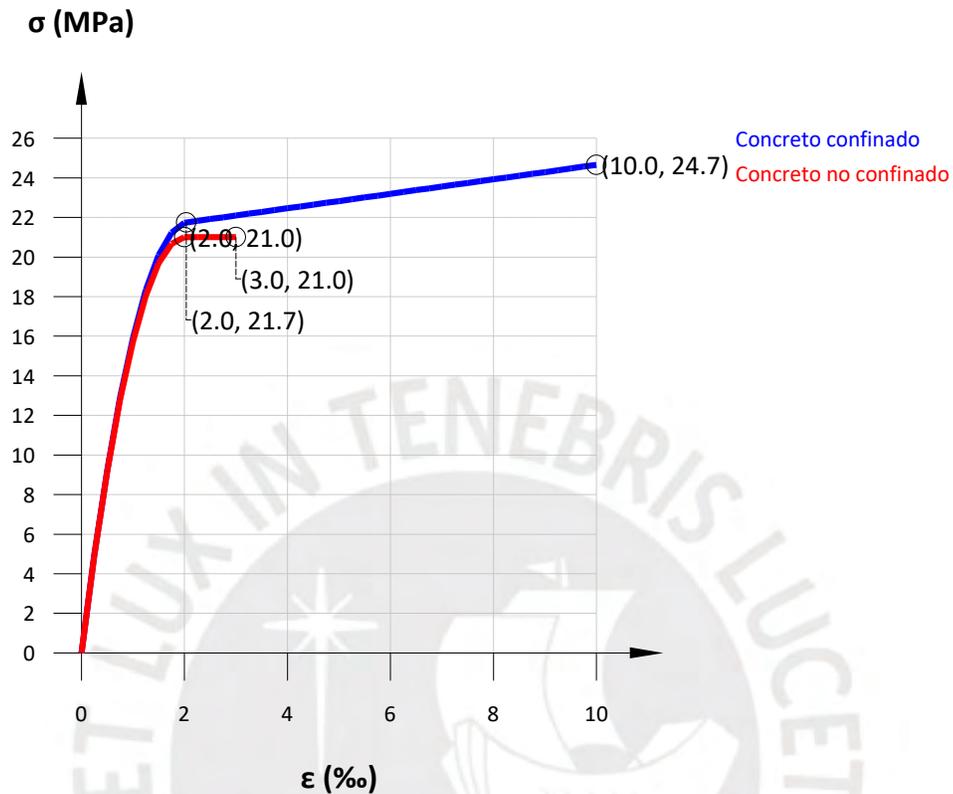
3. REFUERZO FRP DE CONFINAMIENTO

3.1. Propiedades del refuerzo FRP



Laminado	ϵ_{fu}	E_f (MPa)	Espesor t_f (mm)	Número n	Ancho (mm)
SikaWrap® 600C WV - 50cm	0.0126	235000.00	0.331	3	500.00

3.2. Diagrama tensión deformación (concreto no confinado y confinado mediante FRP)



Concreto no confinado*

$$f_c = \begin{cases} f'_c \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon'_c \\ f'_c & \epsilon'_c \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases}$$

$$\epsilon'_c : \underline{0.0020}$$

$$\epsilon_{cu} : \underline{0.0030}$$

El diagrama tensión-deformación adoptado para el concreto confinado mediante FRP es obtenido a partir de las siguientes expresiones (ACI 440.2R-17, 12.1)*

$$f_c = \begin{cases} E_c \cdot \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 \cdot f'_c} \cdot \epsilon_c^2 & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon'_t \\ f'_c + E_2 \cdot \epsilon_c & \epsilon'_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{ccu} \end{cases}$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\epsilon_{ccu}}$$

$$E_2 : \underline{365.88} \text{ MPa}$$

$$\epsilon'_t = \frac{2 \cdot f'_c}{E_c - E_2}$$

$$\epsilon'_t : \underline{0.0020}$$

*La resistencia del elemento no confinado, y la resistencia del elemento confinado para para el modelo tensión-deformación considerado en el cálculo son, respectivamente, $0.85 \cdot f_c$ y $0.85 \cdot f_{cc}$.

Resistencia máxima del concreto confinado

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_F \cdot 3 \cdot \kappa_a \cdot f_i$$

$$f'_{cc} : \underline{24.66} \text{ MPa}$$

Maxima presión de confinamiento

$$f_i = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D}$$

$$f_i : \underline{6.51} \text{ MPa}$$

Deformación efectiva de FRP en fallo

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_c \cdot \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fe} : \underline{0.0066}$$

Máxima deformación de compresión en el concreto confinado con FRP

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \cdot \left(1.50 + 12 \cdot \kappa_b \cdot \frac{f_i}{f'_c} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \leq 0.01$$

$$\varepsilon_{ccu} : \underline{0.0100}$$

$$f_i/f'_c : \underline{0.31}$$

Debería considerarse un factor de eficiencia de deformación κ_e de 0.55 y una relación de confinamiento mínima f_i/f'_c de 0.08 

ε_{fu}^*	f_{fu}^* (MPa)	C_E	ε_{fu}	f_{fu} (MPa)	E_f (MPa)	κ_e	ε'_c	E_c (MPa)	n	t_f (mm)	D (mm)	$A_e A_c$	κ_a	κ_b	ψ_f
0.0126	2961.00	0.95	0.0120	2812.95	235000.00	0.55	0.0020	21000.00	3	0.331	471.70	0.53	0.21	0.67	0.95

4. COMBINACIONES DE CARGA PREVISTAS

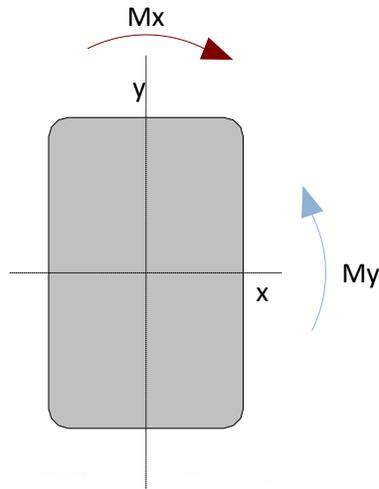
4.1. Acciones esperadas (diseño del refuerzo)

Cargas muertas

$$P_{DL} = 794.89 \text{ kN}, M_{DL,x} = 3.11 \text{ kN}\cdot\text{m}, M_{DL,y} = 4.94 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Cargas vivas

$$P_{LL} = 232.01 \text{ kN}, M_{LL,x} = 0.81 \text{ kN}\cdot\text{m}, M_{LL,y} = 4.61 \text{ kN}\cdot\text{m}$$



La carga viva que actúa sobre el elemento se espera que esté presente durante periodos de tiempo prolongados

5. RESULTADOS

5.1. Resumen de resultados

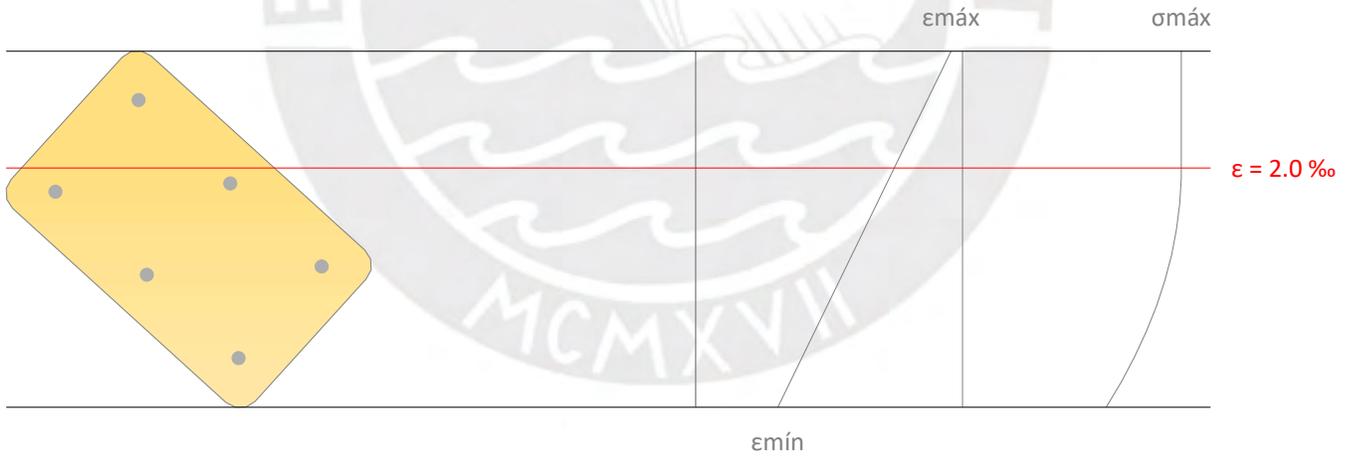
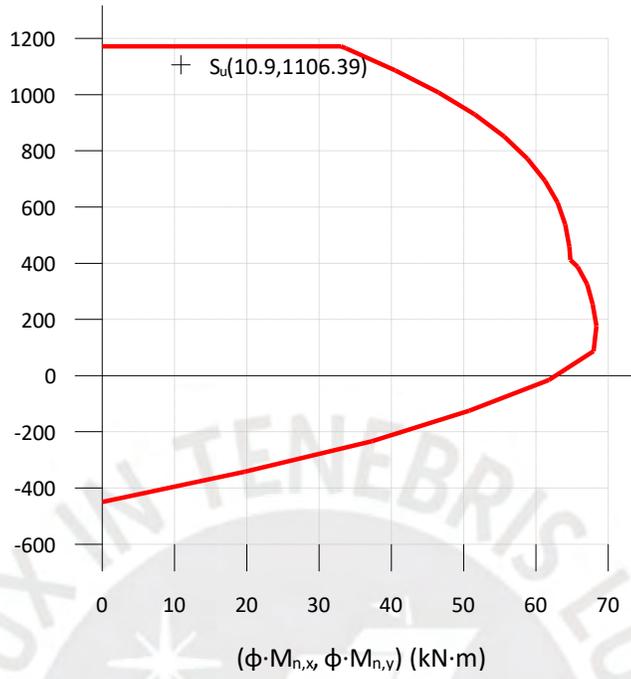
Límites del refuerzo (ACI440.2R-17, 9.2)					
Acciones	ϕ	P_u (kN)	$M_{u,x}$ (kN·m)	$M_{u,y}$ (kN·m)	$\phi \cdot P_{n,max} \geq P_u; \phi \cdot S_n \geq S_u$
$S_u = 1.10 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$	0.65	1106.39	4.23	10.04	Sección no reforzada ✓
Sección reforzada bajo cargas previstas					
Acciones	ϕ	P_u (kN)	$M_{u,x}$ (kN·m)	$M_{u,y}$ (kN·m)	$\phi \cdot P_{n,max} \geq P_u; \phi \cdot S_n \geq S_u$
$S_u = 1.20 \cdot S_{DL} + 1.60 \cdot S_{LL}$	0.65	1325.08	5.03	13.30	Sección reforzada ✓
Estados límite de servicio					
Acciones	Tensiones de servicio		$\sigma_{c,Máx.} \leq 0.65 \cdot f'_c$	$\sigma_{y,Máx.} \leq 0.60 \cdot f_y$	
$S_u = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$	$\sigma_{c,Máx.} = 10.76 \text{ MPa}$	$\sigma_{y,Máx.} = 138.26 \text{ MPa}$	$10.76 \text{ MPa} \leq 13.65 \text{ MPa}$ ✓	$138.26 \text{ MPa} \leq 252.00 \text{ MPa}$ ✓	
Resistencia al fuego (t=0 min.)					
Acciones	ϕ	P_u (kN)	$M_{u,x}$ (kN·m)	$M_{u,y}$ (kN·m)	$\phi \cdot P_{n,max} \geq P_u; \phi \cdot S_n \geq S_u$
$S_u = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$	1.00	1026.90	3.92	9.55	Sección no reforzada ✓

5.2. Estados límite últimos

Equilibrio de la sección. Límites del refuerzo. Combinación mínima de cargas que debe resistir el elemento sin reforzar (ACI440.2R-17, Sección 9.2).

$$S_u = 1.10 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$$

$\phi \cdot P_n$ (kN)



Deformación máxima y mínima

$$\varepsilon_{\text{máx}} = 2.57 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{\text{mín}} = 0.83 \text{ ‰}$$

Tensión máxima en el hormigón

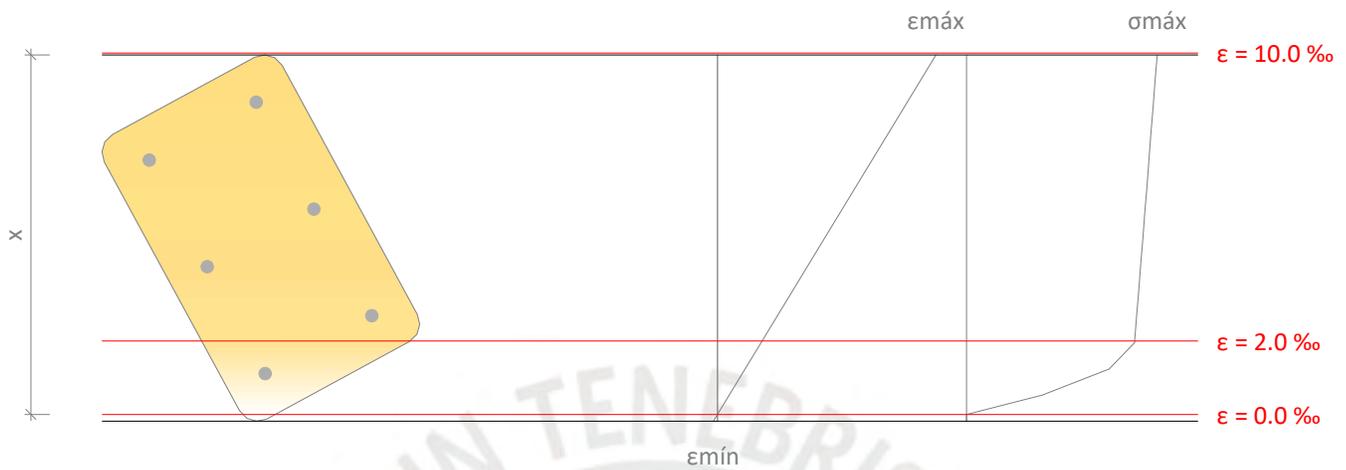
$$f_c = 17.85 \text{ MPa}$$

Tensión y deformación de los refuerzos				
Ref.	Coord. X (mm)	Coord. Y (mm)	f (MPa)	ε (‰)
No. 15.9	75	150	420.00	2.33
No. 15.9	75	-150	303.41	1.52
No. 15.9	-75	-150	213.81	1.07
No. 15.9	-75	150	376.79	1.88
No. 15.9	75	0	384.90	1.92
No. 15.9	-75	0	295.30	1.48

Equilibrio de la sección. Sección reforzada con cargas previstas mayoradas.

$$S_u = 1.20 \cdot S_{DL} + 1.60 \cdot S_{LL}$$





Deformación máxima y mínima

$$\epsilon_{\text{máx}} = 9.95 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{\text{mín}} = -0.19 \text{ ‰}$$

Tensión máxima en el hormigón

$$f_c = 20.94 \text{ MPa}$$

Profundidad de la fibra neutra

$$x = 444.62 \text{ mm}$$

Tensión y deformación de los refuerzos				
Ref.	Coord. X (mm)	Coord. Y (mm)	f (MPa)	ε (‰)
No. 15.9	75	150	420.00	8.63
No. 15.9	75	-150	420.00	2.73
No. 15.9	-75	-150	226.05	1.13
No. 15.9	-75	150	420.00	7.03
No. 15.9	75	0	420.00	5.68
No. 15.9	-75	0	420.00	4.08

5.3. Estados límite de servicio

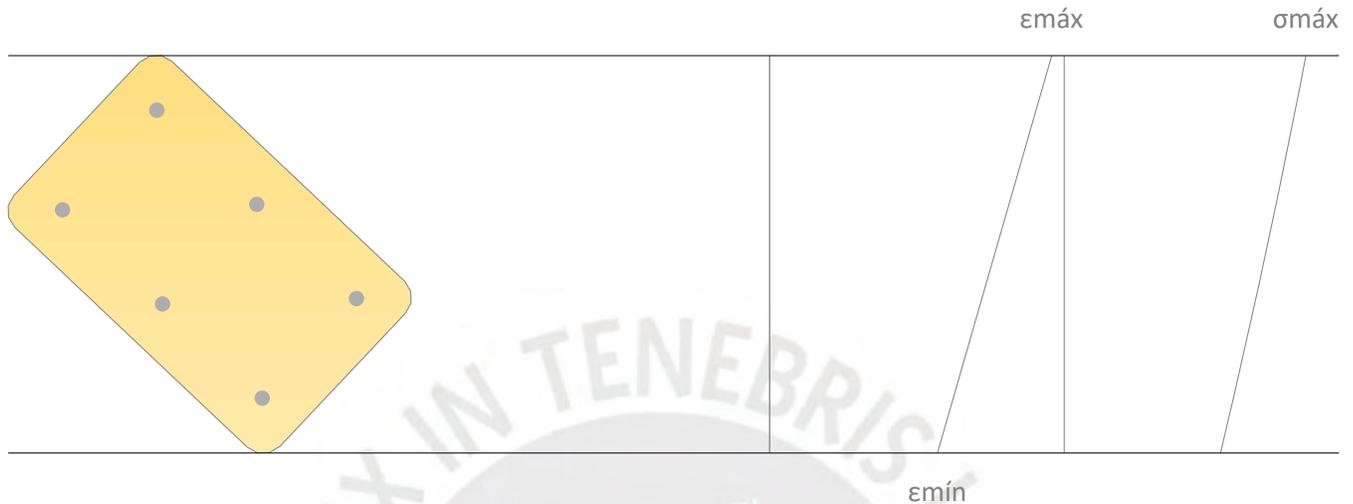
Para evitar la aparición de fisuras radiales bajo cargas de servicio, la deformación transversal en el concreto debe permanecer por debajo de su deformación de fisuración bajo cargas de servicio (ACI 440.2R-17, 12.1.3)

Esto equivale a limitar la tensión de compresión en el concreto a $0.65 \cdot f'_c$.

Además la tensión de servicio en el refuerzo longitudinal debe permanecer por debajo de $0.60 \cdot f_y$, para evitar deformaciones plásticas bajo cargas sostenidas o de servicio.

Equilibrio de la sección. Sección reforzada bajo cargas de servicio.

$$S_u = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$$



Deformación máxima y mínima

$$\epsilon_{máx} = 0.73 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{mín} = 0.44 \text{ ‰}$$

Tensión máxima en el hormigón

$$f_c = 10.76 \text{ MPa}$$

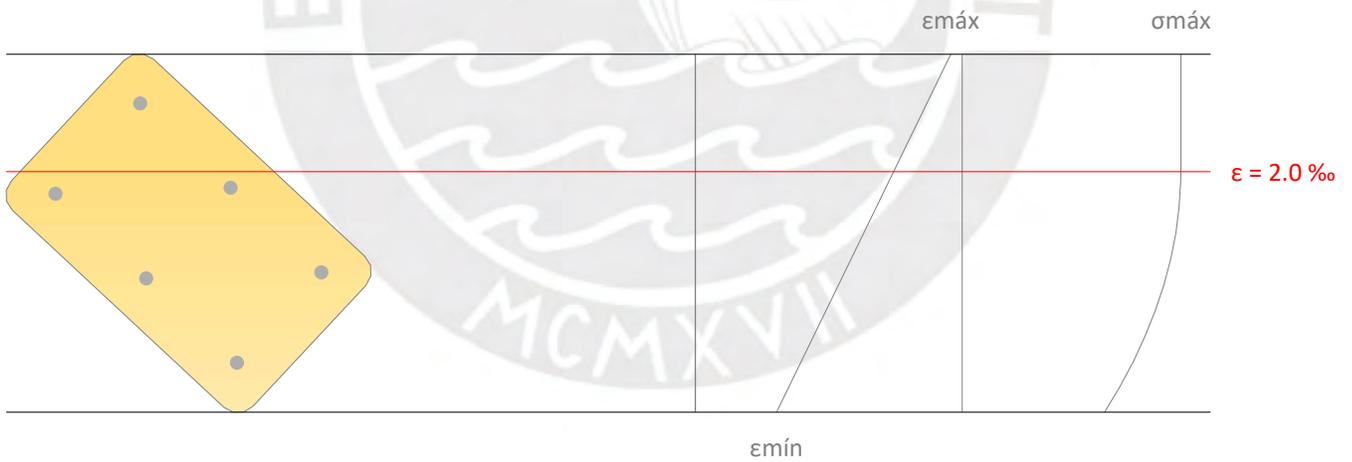
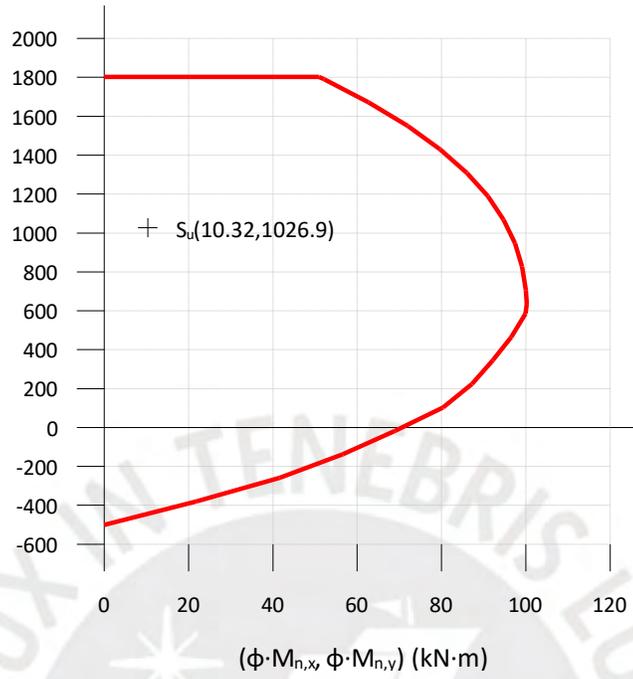
Tensión y deformación de los refuerzos				
Ref.	Coord. X (mm)	Coord. Y (mm)	f (MPa)	ε (‰)
No. 15.9	75	150	138.26	0.69
No. 15.9	75	-150	110.12	0.55
No. 15.9	-75	-150	95.24	0.48
No. 15.9	-75	150	123.38	0.62
No. 15.9	75	0	124.19	0.62
No. 15.9	-75	0	109.31	0.55

5.4. Resistencia al fuego (t=0 min.)

Equilibrio de la sección. Sección no reforzada.

$$S_u = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$$

$\phi \cdot P_n$ (kN)



Deformación máxima y mínima

$$\epsilon_{\text{máx}} = 2.58 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{\text{mín}} = 0.82 \text{ ‰}$$

Tensión máxima en el hormigón

$$f_c = 17.85 \text{ MPa}$$

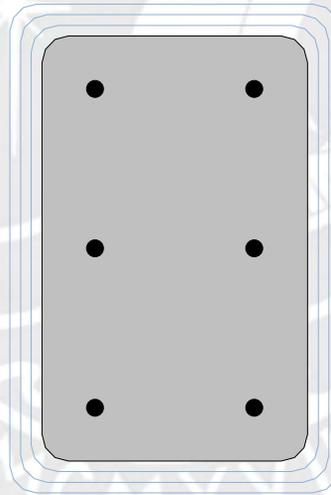
Tensión y deformación de los refuerzos				
Ref.	Coord. X (mm)	Coord. Y (mm)	f (MPa)	ϵ (‰)
No. 15.9	75	150	420.00	2.34
No. 15.9	75	-150	301.13	1.51
No. 15.9	-75	-150	212.12	1.06
No. 15.9	-75	150	378.12	1.89
No. 15.9	75	0	384.13	1.92
No. 15.9	-75	0	295.12	1.48

La resistencia nominal del elemento no reforzado supera la requerida para la combinación de cargas correspondiente a la situación de incendio. El refuerzo FRP, por tanto, no es necesario durante la situación de incendio, y no es necesario aplicarle protección. Si se necesita una cierta resistencia al fuego, el proyectista debe evaluar la necesidad de aplicar una protección al elemento de hormigón armado de acuerdo con la normativa local.

5.5. Disposición del FRP

Los resultados previos corresponden al siguiente esquema FRP:

3 capas de SikaWrap® 600C WV - 50cm



6. ESPECIFICACIÓN DE PRODUCTO

6.1. Tejidos SikaWrap® adheridos

Se obtendrá el refuerzo mediante tejido de carbono unidireccional, saturado y adherido externamente a la estructura mediante adhesivo epoxi Sikadur®-300

Las fibras deberán estar alineadas y libres de torsión.

El material dispondrá de un registro de utilización (> 25 años) para refuerzo estructural.

El tejido de fibra será unidireccional y elaborado mediante fibras de carbonos elaboradas a partir de PAN.

Será posible la instalación en varias capas.

Se aportarán los valores correspondientes a las propiedades mecánicas medidos a partir de los tejidos laminados, basados en series de ensayos de al menos 20 muestras.

6.1.1. Preparación de la superficie de hormigón/concreto

Cualquier material no cohesivo será retirado, y el hormigón/concreto será reparado tal y como se indica anteriormente. Cualquier oquedad significativa o nido de grava será rellenado con un mortero de reparación adecuado.

Los materiales de reparación serán totalmente compatibles con el adhesivo.

La resistencia real a arrancamiento del soporte de hormigón/concreto será verificada al menos mediante 3 ensayos de pull-off.

El hormigón/concreto tendrá una edad superior a 28 días.

La lechada superficial en el substrato será eliminada hasta que se logre una superficie de poro abierto.

La superficie del soporte será limpiada hasta que quede libre de aceites, grasas y cualquier otro contaminante, así como de partículas sueltas y polvo.

Para la aplicación de tejidos, se redondearán todas las esquinas con un radio de 20mm, eliminando cualquier borde anguloso.

La humedad del soporte será inferior al 4% pbw.

6.1.2. Tejidos SikaWrap®

Los materiales cumplirán con las prestaciones mínimas indicadas a continuación:

6.1.2.1. Propiedades del tejido SikaWrap® 600C WV - 50cm :

Propiedades del tejido seco:

Módulo Elástico	EN 2561/ASTM D3039	≈ 230000 N/mm ² (MPa)
Resistencia a tracción	EN 2561/ASTM D3039	≈ 4000 N/mm ² (MPa)
Deformación de rotura	EN 2561/ASTM D3039	1.26 %

Propiedades del laminado (respecto al espesor del tejido seco):

Módulo Elástico	EN 2561/ASTM D3039	≈ 235000 N/mm ² (MPa)
-----------------	--------------------	----------------------------------

6.1.3. Adhesivo epoxi

Los adhesivos serán de naturaleza epoxi.

El tejido SikaWrap® 600C WV - 50cm se saturará con resina antes de su colocación sobre la estructura con Sikadur-300

6.1.3.1. Propiedades del adhesivo Sikadur®-300

El adhesivo cumplirá con lo establecido en la EN 1504-4.

Base química		Resina epoxi
Densidad		1.16 kg/l (a +23°C).
Viscosidad (velocidad de cizalladura 50/S)	+15°C	≈ 2000 mPas
	+23°C	≈ 700 mPas
	+40°C	≈ 200 mPas
Coefficiente de expansión térmica	-20°C a +40°C	6.0 x 10 ⁻⁵ por°C
Estabilidad térmica. HDT (ASTM D648)	Curado	
	7 días, +15°C	+43°C
	7 días, +23°C	+49°C
	3 días, +40°C	+60°C
7 días, +40°C	+66°C	
Temperatura de servicio	23°C Curado	-40°C a +45°C
Resistencia a tracción	DIN EN ISO 527-3	45 N/mm ² (7 days a +23°C)
Adherencia (soporte chorreado con arena)	DIN EN ISO 4624	Fractura del hormigón/concreto (> 4 N/mm ²)
Módulo elástico (flexión)	DIN EN 1465	2800 N/mm ² (7 días a +23°C)
Módulo elástico a tracción	DIN EN ISO 527-3	3500 N/mm ² (7 días a +23°C)
Deformación de rotura	DIN EN ISO 527-3	1.5% (7 días a +23°C)

6.1.4. Procedimiento de aplicación

El tejido se cortará a la medida adecuada mediante tijeras especiales para fibra.

En caso de confinamiento de columnas, el solape mínimo en la dirección del tejido será de 150 mm

Se dispondrá una primera capa de la resina de impregnación sobre la superficie del sustrato, usando una espátula dentada o un rodillo.

Distribuir 2/3 de la cantidad prevista de Sikadur®-300 en un film limpio de polietileno y a continuación colocar el tejido previamente cortado sobre el film cubierto de resina. Saturar el tejido SikaWrap® mediante rodillo en el sentido de las fibras hasta que la resina penetre en él. Distribuir el tercio restante de Sikadur®-300 sobre el tejido y distribuir igualmente con rodillo hasta la completa impregnación del tejido. Retirar el exceso de resina.

El tejido será colocado sobre el soporte, presionándolo suavemente e impregnando la resina en el tejido mediante un rodillo de impregnación hasta que el tejido esté totalmente saturado.

Las capas adicionales se dispondrán tal y como se indicó anteriormente, preferiblemente húmedo sobre húmedo.

En caso de un revestimiento cementoso, la superficie final de resina se saturará con árido de cuarzo.

La impregnación se efectuará siempre en la dirección de las fibras.

Tras la aplicación, el tejido saturado se protegerá de la lluvia, arena, polvo o cualquier otro contaminante.

Si fuera necesario, el sistema aplicado será protegido con un revestimiento adecuado (se dispondrán de tests de compatibilidad entre el tejido y el revestimiento).



7. AVISO LEGAL

EL USO Y/O LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE Y LOS RESULTADOS RESPECTIVOS DEBEN SER DETERMINADOS SOLAMENTE POR USUARIOS PROFESIONALES CON CONOCIMIENTOS ESPECIALES EN EL ÁREA DEL USO Y/O LA APLICACIÓN PREVISTO/A. LOS USUARIOS TIENEN QUE VERIFICAR INDEPENDIENTEMENTE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ANTES DEL USO. TAMBIÉN TIENEN QUE SEGUIR RIGUROSAMENTE LAS CONDICIONES LOCALES DEL USO Y/O DE LA APLICACIÓN, LAS HOJAS DE DATOS DE PRODUCTOS Y LA LITERATURA RESPECTIVA, EL ESTADO DE LA TÉCNICA ASÍ COMO LAS NORMATIVA Y REGLAMENTACIÓN LOCALES.

El software está disponible "TAL CUAL" Y SIN NINGUNA GARANTÍA O INDEMNIZACIÓN DE NINGUNA CLASE. SIKA NO OTORGA GARANTÍAS, CONDICIONES, INDEMNIZACIONES, REPRESENTACIONES O TÉRMINOS, EXPRESOS O IMPLÍCITOS, YA SEA POR ESTATUTO, JURISPRUDENCIA, COSTUMBRE, USO O POR CUALQUIER OTRA FORMA en relación con el uso del software.

En ningún caso Sika será responsable ante usted por cualquier daño, reclamación o costos de cualquier naturaleza, ni de ningún daño resultante, indirecto, incidental, punitivo o especial, ni de perjuicios o pérdida de ahorros o de cualquier otro tipo que surja de cualquier forma debido a la instalación, uso o mantenimiento del software.

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil y de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario debe ensayar la conveniencia de los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Sika se reserva el derecho de modificar las propiedades de sus productos. Se reservan los derechos de propiedad de terceras partes. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos, copias de las cuales se mandarán a quién las solicite.

Salvo que se indique lo contrario, toda la información, texto, imágenes gráficas, características o funciones, y el diseño contenidos en este software son propiedad exclusiva de Sika y no podrán ser copiados o distribuidos, en su totalidad o en parte, sin el consentimiento expreso y por escrito de la Compañía

Al facilitar información a Sika, usted concede a la Compañía la licencia no restringida e irrevocable para utilizar, reproducir, exhibir, modificar, distribuir y reproducir tal información. La información personal será utilizada por Sika sólo para procesar solicitudes de información efectuadas por el usuario o para la comercialización de nuestros productos y servicios.

© Copyright Sika Services AG 2016

8. ACERCA DE SIKA® CARBODUR® CALCULATION SOFTWARE

Desarrollado por:



Cype Software - Eusebio Sempere, 5 - 03003 Alicante (España)

www.cype.com

Sika Services AG
Corporate Tech. Dept.
Tüffenwies 16
8048 Zürich (Suiza)
www.sika.com

Elemento: C-25X40
Editor: Marcell Hasser Tudela Laura
Notas: -Elemento con años de antigüedad.

Fecha: 04/03/2022

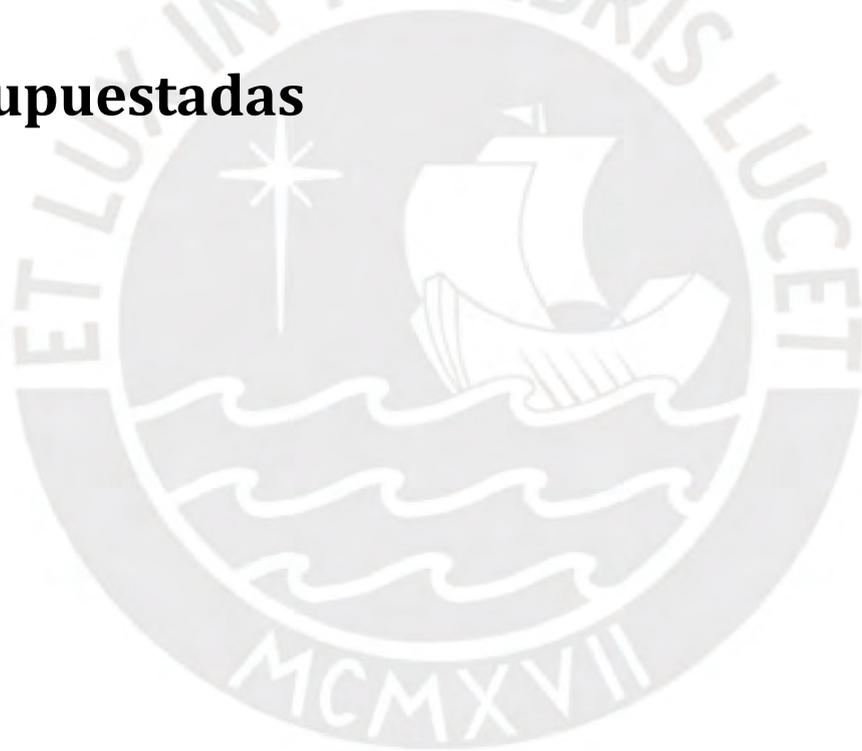
Proyecto: PABELLÓN SISTEMAS UNA...

BUILDING TRUST



Anexo C

Análisis de precios unitarios de las partidas presupuestadas



LIMPIEZA Y PREPARACION PARA REFORZAMIENTO							
Rendimiento	m2/DIA	MO. 30.0000	EQ. 30.0000	Costo unitario directo por : m2		3.05	
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
CAPATAZ			HH	0.100	0.027	12.67	0.34
OFICIAL			HH	1.000	0.267	9.84	2.62
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		3.000	2.96	0.09
MOVILIZACION DE MATERIAL							
Rendimiento	glb	MO. 1	EQ. 1	Costo unitario directo por : glb		600.00	
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Equipos							
MOVILIZACIÓN DE MATERIAL			glb		1.000	600.00	600.00
CONCRETO EN COLUMNAS F'C=210 Kg/cm2							
Rendimiento	m3/DIA	MO. 10.0000	EQ. 10.0000	Costo unitario directo por : m3		388.87	
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
OPERADOR EQUIPO			HH	1.000	0.800	11.52	9.22
CAPATAZ			HH	0.200	0.160	12.67	2.03
OPERARIO			HH	2.000	1.600	11.52	18.43
OFICIAL			HH	2.000	1.600	9.84	15.74
PEON			HH	10.000	8.000	8.88	71.04
Materiales							
AGREGADO FINO (MATERIAL ZARANDEADO)			m3		0.500	30.00	15.00
AGREGADO GRUESO (MATERIAL ZARANDEADC)			m3		0.750	35.00	26.25
CEMENTO PORTLAND TIPO IP (42.5KG)			BOL		9.550	21.80	208.19
AGUA			m3		0.185	15.00	2.78
GASOLINA DE 84 OCTANOS			gln		0.100	15.00	1.50
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		3.000	116.46	3.49
MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9 -11P3			hm	1.000	0.800	10.00	8.00
WINCHE ELECTRICO			hm	1.000	0.800	6.00	4.80
VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 2.40"			hm	0.500	0.400	6.00	2.4
ENCOFRADO Y DESENCOFRADO EN COLUMNA							
Rendimiento	m2/DIA	MO. 10.0000	EQ. 10.0000	Costo unitario directo por : m3		51.81	
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
CAPATAZ			HH	0.100	0.080	12.67	1.01
OPERARIO			HH	1.000	0.800	11.52	9.22
OFICIAL			HH	1.000	0.800	9.84	7.87
PEON			HH	1.000	0.800	8.88	7.10
Materiales							
CLAVOS PARA MADERA			kg		0.170	4.00	0.68
ALAMBRE NEGRO 8			kg		0.300	4.00	1.20
MADERA AGUANO			p2		5.160	4.50	23.22
PETROLEO			gln		0.050	15.00	0.75
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		3.000	25.21	0.76

ACERO GRADO 60 EN COLUMNA FY=4200 Kg/cm2						
Rendimiento	kg/DIA	MO. 240.0000	EQ. 240.0000	Costo unitario directo por : kg		4.34
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
CAPATAZ		HH	0.100	0.003	12.67	0.04
OPERARIO		HH	1.000	0.033	11.52	0.38
OFICIAL		HH	1.000	0.033	9.84	0.33
Materiales						
ALAMBRE NEGRO N16		kg		0.300	4.00	0.12
FIERRO CORRUGADO GRADO 60		kg		1.070	3.20	3.42
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		3.000	0.75	0.02
CIZALLA DE PALANCA		hm		0.0001	310.00	0.03
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO CONCRETO VIEJO-NUEVO						
Rendimiento	m2/DIA	MO. 18.0000	EQ. 18.0000	Costo unitario directo por : m2		31.85
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
CAPATAZ		HH	0.100	0.044	12.67	0.56
OPERARIO		HH	1.000	0.444	11.52	5.11
Materiales						
SIKADUR 32 GEL		kg		0.400	65.00	26.00
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		3.000	5.68	0.17
ADITIVO ADHESIVO EPOXICO ANCLAJE REFUERZO						
Rendimiento	und/DIA	MO. 30.0000	EQ. 30.0000	Costo unitario directo por : und		5.16
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
CAPATAZ		HH	0.100	0.026	12.67	0.34
OPERARIO		HH	1.000	0.266	11.52	3.07
Materiales						
SIKADUR 31		kg		0.300	55.00	1.65
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		3.000	3.41	0.10

CONCRETO EN PLACAS F'C=210 Kg/cm2						
Rendimiento	m3/DIA	MO. 10.0000	EQ. 10.0000	Costo unitario directo por : m3	388.87	
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
OPERADOR EQUIPO		HH	1.000	0.800	11.52	9.22
CAPATAZ		HH	0.200	0.160	12.67	2.03
OPERARIO		HH	2.000	1.600	11.52	18.43
OFICIAL		HH	2.000	1.600	9.84	15.74
PEON		HH	10.000	8.000	8.88	71.04
Materiales						
AGREGADO FINO (MATERIAL ZARANDEADO)		m3		0.500	30.00	15.00
AGREGADO GRUESO (MATERIAL ZARANDEADC)		m3		0.750	35.00	26.25
CEMENTO PORTLAND TIPO IP (42.5KG)		BOL		9.550	21.80	208.19
AGUA		m3		0.185	15.00	2.78
GASOLINA DE 84 OCTANOS		gln		0.100	15.00	1.50
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		3.000	116.46	3.49
MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9 -11P3		hm	1.000	0.800	10.00	8.00
WINCHE ELECTRICO		hm	1.000	0.800	6.00	4.80
VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 2.40"		hm	0.500	0.400	6.00	2.4

ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN PLACA						
Rendimiento	m2/DIA	MO. 10.0000	EQ. 10.0000	Costo unitario directo por : m3	51.81	
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
CAPATAZ		HH	0.100	0.080	12.67	1.01
OPERARIO		HH	1.000	0.800	11.52	9.22
OFICIAL		HH	1.000	0.800	9.84	7.87
PEON		HH	1.000	0.800	8.88	7.10
Materiales						
CLAVOS PARA MADERA		kg		0.170	4.00	0.68
ALAMBRE NEGRO 8		kg		0.300	4.00	1.20
MADERA AGUANO		p2		5.160	4.50	23.22
PETROLEO		gln		0.050	15.00	0.75
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		3.000	25.21	0.76

ACERO GRADO 60 EN PLACA FY=4200 Kg/cm2						
Rendimiento	kg/DIA	MO. 240.0000	EQ. 240.0000	Costo unitario directo por : kg	4.34	
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
CAPATAZ		HH	0.100	0.003	12.67	0.04
OPERARIO		HH	1.000	0.033	11.52	0.38
OFICIAL		HH	1.000	0.033	9.84	0.33
Materiales						
ALAMBRE NEGRO N16		kg		0.300	4.00	0.12
FIERRO CORRUGADO GRADO 60		kg		1.070	3.20	3.42
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		3.000	0.75	0.02
CIZALLA DE PALANCA		hm		0.0001	310.00	0.03

ENROCADO DE ZAPATAS

Rendimiento m3/DIA MO. 120.0000 EQ. 120.0000 **Costo unitario directo por : m3** **69.11**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra					
OPERADOR DE EQUIPO	HH	2.000	0.133	11.52	1.53
CAPATAZ	HH	0.100	0.007	12.67	0.08
OFICIAL	HH	1.000	0.067	9.84	0.66
PEON	HH	4.000	0.267	8.88	2.37
Materiales					
PIEDRA GRANDE MAXIMO DE 20"	m3		1.350	40.00	54.00
HORMIGON	m3		0.013	25.00	0.31
Equipos					
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.000	4.65	0.14
RETROEXCAVADOR S/LLANTAS 80-110HP	hm	1.000	0.0667	150.00	10.01

CONCRETO EN LOSA DE CIMENTACIÓN F'C=210 Kg/cm2

Rendimiento m3/DIA MO. 16.0000 EQ. 16.0000 **Costo unitario directo por : m3** **337.97**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra					
OPERADOR EQUIPO	HH	1.000	1.000	11.52	11.52
CAPATAZ	HH	0.200	0.100	12.67	1.27
OPERARIO	HH	2.000	1.000	11.52	11.52
OFICIAL	HH	2.000	1.000	9.84	9.84
PEON	HH	9.000	4.500	8.88	39.96
Materiales					
AGREGADO FINO (MATERIAL ZARANDEADO)	m3		0.500	30.00	15.00
AGREGADO GRUESO (MATERIAL ZARANDEADO)	m3		0.750	35.00	26.25
CEMENTO PORTLAND TIPO IP (42.5KG)	BOL		9.550	21.80	208.19
AGUA	m3		0.180	15.00	2.70
GASOLINA DE 84 OCTANOS	gln		0.100	15.00	1.50
Equipos					
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.000	74.11	2.22
MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9 -11P3	hm	1.000	0.500	10.00	5.00
VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 2.40"	hm	1.000	0.500	6.00	3

ENCOFRADO Y DEENCOFRADO EN LOSA DE CIMENTACION

Rendimiento m2/DIA MO. 10.0000 EQ. 10.0000 **Costo unitario directo por : m3** **52.93**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra					
CAPATAZ	HH	0.100	0.080	12.67	1.01
OPERARIO	HH	1.000	0.800	11.52	9.22
OFICIAL	HH	1.000	0.800	9.84	7.87
PEON	HH	1.000	0.800	8.88	7.10
Materiales					
CLAVOS PARA MADERA	kg		0.200	4.00	0.80
ALAMBRE NEGRO 8	kg		0.300	4.00	1.20
MADERA AGUANO	p2		5.160	4.50	23.22
PETROLEO	gln		0.050	15.00	0.75
Equipos					
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.000	25.21	0.76
SIERRA CIRCULAR	hm	0.500	0.400	2.00	0.80

ACERO GRADO 60 EN LOSA DE CIMENTACIÓN FY=4200 Kg/cm2

Rendimiento	kg/DIA	MO. 240.0000	EQ. 240.0000	Costo unitario directo por : kg			4.34
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
CAPATAZ			HH	0.100	0.003	12.67	0.04
OPERARIO			HH	1.000	0.033	11.52	0.38
OFICIAL			HH	1.000	0.033	9.84	0.33
Materiales							
ALAMBRE NEGRO N16			kg		0.300	4.00	0.12
FIERRO CORRUGADO GRADO 60			kg		1.070	3.20	3.42
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		3.000	0.75	0.02
CIZALLA DE PALANCA			hm		0.0001	310.00	0.03

REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO SIKAWRAP 600

Rendimiento	m2/DIA	MO. 10.0000	EQ. 10.0000	Costo unitario directo por : m2			471.41
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
CAPATAZ			HH	0.100	0.080	15.00	1.20
OPERARIO			HH	1.000	0.800	12.50	10.00
OFICIAL			HH	1.000	0.800	12.50	10.00
Materiales							
SIKAWRAP 600C 50mx50cm			m2		1.000	298.80	298.80
PEGAMENTO EPOXICO A+B SIKA 301 4KG			und		0.375	397.80	149.18
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		3.000	21.20	0.64
MEZCLADOR 400 rpm			hm	0.500	0.800	2.00	1.6