



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

**“Estudio comparativo sobre el comportamiento de columnas y vigas
de hormigón armado con y sin reforzamiento de fibra de carbono,
de una estructura existente”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de: INGENIERO CIVIL CON
ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

Autores:

CARLOS MANUEL PEREZ AVECILLAS

MARIO ESTEBAN AUQUILLA TORRES

Director:

JOSÉ VÁZQUEZ CALERO

CUENCA, ECUADOR

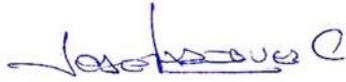
2022

“Estudio comparativo sobre el comportamiento de columnas y vigas de hormigón armado con y sin reforzamiento de fibra de carbono, de una estructura existente”

RESUMEN

En nuestra ciudad, existe escasa información sobre uso de la fibra de carbono (FRP) como refuerzo estructural, a pesar de ser un material altamente resistente a tracción. En Cuenca, el material típicamente usado para reforzamiento estructural es el acero de refuerzo. Por esta razón, el objetivo de la investigación fue comparar el reforzamiento estructural con fibra de carbono y acero estructural de una edificación existente en la ciudad. Se dimensionó la estructura en un programa de modelado y se le sometió a diferentes esfuerzos demostrando así los beneficios estructurales de la fibra de carbono. Además, se realizó una comparación de costos entre la estructura reforzada tradicionalmente con la misma estructura reforzada tradicionalmente sumado la aplicación de fibra de carbono.

Palabras clave: fibra de carbono, FRP, ensayos no destructivos, END, acero.



Ing. José Fernando Vázquez Calero

DIRECTOR DE ESCUELA



Ing. José Fernando Vázquez Calero

DIRECTOR DE TESIS



Mario Esteban Auquilla Torres

AUTOR



Carlos Manuel Pérez Avecillas

AUTOR

“Comparative study about the behavior of reinforced concrete columns and beams with and without carbon fiber reinforcement, of an existing structure”

ABSTRACT

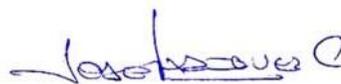
In our city doesn't exist too much information about the use of carbon fiber (FRP) as structural reinforcement, despite being a material highly traction resistant. In Cuenca, the material normally used for structural reinforcement is reinforcing steel. For this reason, the objective of the investigation was to compare the structural reinforcement with carbon fiber with structural steel of an existing building in the city. The structure was dimensioned in a modeling program and subjected to different stresses demonstrating the structural benefits of carbon fiber. Additionally, a cost comparison was made between the traditionally reinforced structure with the same traditionally reinforced structure plus the application of carbon fiber.

Keywords: carbon fiber, FRP, non-destructive testing, NDT, steel.



Ing. José Fernando Vázquez Calero

DIRECTOR DE ESCUELA



Ing. José Fernando Vázquez Calero

DIRECTOR DE TESIS



Mario Esteban Auquilla Torres

AUTHOR



Carlos Manuel Pérez Avecillas

AUTHOR



Translated by: Mario Esteban Auquilla Torres

DEDICATORIA

Se la dedico a mis padres quienes fueron el cimiento para la construcción de mi vida profesional, inculcando valores y principios para caminar por la vida haciéndole frente a los obstáculos.

A mis hermanas por su apoyo y cariño en los momentos buenos y no tan buenos.

A mi familia, amigos y todos quienes caminaron conmigo y formaron parte de esta etapa.

Carlos Manuel Pérez Avecillas.

DEDICATORIA

Con mucho cariño dedico este trabajo de titulación a toda mi familia y amigos, en especial a mi madre y padre que fueron un pilar fundamental en mi formación profesional, sin su ayuda y motivación no lo hubiera logrado.

Mario Esteban Auquilla Torres.

AGRADECIMIENTO

Primero damos las gracias a Dios por habernos permitido vivir una de las mejores experiencias dentro de la universidad. A nuestros padres por apoyarnos y ser testigos de todo el proceso de formación que pasamos como estudiantes de la universidad. A nuestros profesores por enseñarnos a dar lo mejor de nosotros y prepararnos para la vida profesional que nos espera. Finalmente, un agradecimiento especial para nuestro tutor de tesis, el ingeniero José Vázquez Calero por darnos su guía y apoyo en el desarrollo del trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	17
ANTECEDENTES	18
Primeras aplicaciones de la fibra de carbono	19
OBJETIVOS	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos	20
JUSTIFICACION.....	20
CAPITULO 1: MARCO TEORICO	23
1.1. Tipos de intervención estructural.....	23
1.2. Reforzamiento estructural	23
1.3. Materiales compuestos.....	24
1.4. Reforzamiento con fibra de carbono (CFRP).....	25
1.5. Configuración de la fibra de carbono.....	26
1.6. Proceso de fabricación de la fibra de carbono	26
1.7. Uso de fibras de carbono en estructuras.....	28
1.8. Metodología de instalación de la fibra de carbono como refuerzo estructural.....	28
1.9. Generalidades de diseño.....	28
1.9.1. Filosofía de diseño	29

1.9.2. Límites del reforzamiento.....	29
1.9.3. Capacidad estructural	30
1.9.4. Resistencia al fuego.....	30
1.9.5. Cuidado sísmico	31
1.9.6. Consideraciones ambientales	31
1.9.7. Consideración de sección de recubrimientos de protección	32
1.9.8. Propiedades de los materiales de diseño	32
1.9.9. Resistencia nominal.....	34
1.9.10. Diseño a flexión	35
1.9.11. Diseño por corte	36
1.9.12. Diseño por compresión.....	37
CAPITULO 2: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	38
2.1. Escáner de armados.....	39
2.2. Modo de uso del escáner de armados.....	42
2.3. Esclerómetro.....	43
2.4. Aspectos que influyen en el ensayo de esclerometría.....	43
2.5. Ejecución del ensayo de esclerometría	44
2.6. Toma de muestras con ensayos no destructivos	45
2.7. Media aritmética (ensayo de esclerometría).....	47
2.8. Determinación del punto de inicio para el análisis y reforzamiento.....	55

2.9. Elementos estructurales y no estructurales analizados	57
2.9.1. Cimentación	57
2.9.2. Columnas	57
2.9.3. Vigas de hormigón	59
2.9.4. Vigas metálicas	62
2.9.5. Losas.....	63
2.9.6. Uniones.....	64
2.9.7. Mampostería	65
CAPITULO 3: MODELACION EN PROGRAMAS COMPUTACIONALES	68
3.1. Programas computacionales y hojas electrónicas de fibra de carbono	68
3.2. CYPE Ingenieros	68
3.3. Ingreso de datos	69
3.4. Obtención de información	70
3.4.1 Acero de refuerzo.....	77
CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS	78
4.1 Diseño del refuerzo de las fibras de carbono.....	78
4.1.1. Diseño de refuerzo con fibra de carbono en columnas	79
4.2. Uso del programa SIKA Carbodour	85
4.2.1 Ingreso de datos	85
4.2.2. Chequeo de cargas y de la sección sin reforzar	87

4.2.3 Cálculo de los puntos del diagrama de interacción simplificado.....	87
4.2.4. Contribución del FRP como reforzamiento estructural.....	90
4.2.5. Cálculo de los puntos del diagrama de interacción simplificado para el reforzamiento con FRP	91
4.2.6. Diseño de refuerzo con fibra de carbono en vigas	97
4.2.7. Aspectos generales del diseño de una viga a flexión	101
4.3. Propuesta de mitigación	108
4.4. Comparación de costos entre reforzamiento estructural con FRP y acero junto FRP	110
CONCLUSIONES.....	113
RECOMENDACIONES.....	115
BIBLIOGRAFIA.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Imagen molecular de la fibra de carbono</i>	18
<i>Figura 1.2. Fibra de carbono de alto rendimiento hecha de poliacrilonitrilo (PAN)</i>	19
<i>Figura 1.3. Comparación de resistencias a tensión entre varias fibras</i>	24
<i>Figura 1.4. Sistemas FRP adheridos externamente</i>	34
<i>Figura 1.5. Resistencia a la flexión de vigas rectangulares reforzadas con FRP</i>	36
<i>Figura 1.6. Configuraciones para sistemas reforzadas con el sistema FRP</i>	36
<i>Figura 2.1. Ubicación de la edificación existente</i>	39
<i>Figura 2.2. Escáner de pared Bosch Wall scanner d-tect 150 professional manual</i>	39
<i>Figura 2.3. Pantalla de Escáner de pared Bosch Wall scanner d-tect 150</i>	41
<i>Figura 2.4. Desplazamiento del Escáner de pared Bosch Wall scanner d-tect 150</i>	42
<i>Figura 2.5. Área de prueba para ensayo de esclerometría</i>	44
<i>Figura 2.6. Puntos de impacto para ensayo de esclerometría</i>	45
<i>Figura 2.7. Toma de muestras con escáner de armados</i>	46
<i>Figura 2.8. Toma de datos mediante escáner de armados</i>	47
<i>Figura 2.9. Esclerometría en columnas</i>	48
<i>Figura 2.10. Esclerometría en vigas</i>	48
<i>Figura 2.11. Vista frontal de la edificación</i>	56
<i>Figura 2.12. Fachada frontal de la edificación</i>	56

<i>Figura 2.13. Ingreso a la edificación</i>	57
<i>Figura 2.14. Estado actual de las columnas</i>	58
<i>Figura 2.15. Desprendimiento y segregación de hormigón en columnas</i>	58
<i>Figura 2.16. Columna apeada que nace del entrepiso</i>	59
<i>Figura 2.17. Nivelación de columnas</i>	59
<i>Figura 2.18. Desgaste del recubrimiento</i>	60
<i>Figura 2.19. Segregación y desprendimiento del hormigón</i>	61
<i>Figura 2.20. Vigas interrumpidas por vigas de metal</i>	61
<i>Figura 2.21. Viguetas soldadas a armadura de vigas de hormigón</i>	62
.....	62
<i>Figura 2.22. Vigas atravesadas por tuberías</i>	62
<i>Figura 2.23. Perfiles omegas oxidados</i>	63
<i>Figura 2.24. Vigas oxidadas</i>	63
<i>Figura 2.25. Viga metálica con sección girada</i>	63
<i>Figura 2.26. Losas de entrepiso</i>	64
<i>Figura 2.27. Perfiles omegas de losa de bloque</i>	64
<i>Figura 2.28. Unión viga-columna</i>	64
<i>Figura 2.29. Uniones con segregación de hormigón</i>	65
<i>Figura 2.30. Unión en cruce de vigas de hormigón</i>	65
<i>Figura 2.31. Fisuras en mampostería</i>	66

<i>Figura 3.1. Modelo estructural de la vivienda</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.2. Modelo estructural de la vivienda</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.3. Vista en planta del Nivel 1 N+0.00.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.4. Análisis del pórtico 1.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.5. Sección transversal de las columnas.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.1. Capacidad nominal de la columna</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.2. Pórtico sujeto a cargas verticales y horizontales</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.3. Solicitaciones que actúan en la columna</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.4. Diagrama de interacción de una columna tipo</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.5. Diagrama de interacción de dos columnas con distintos M_u y P_u.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.6. Diagrama de interacción de una columna con refuerzo de FRP</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.7. Comportamiento de esfuerzo-deformación de columnas no confinadas y confinadas.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.8. Modelo de esfuerzo-deformación para hormigón confinado con FRP.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.9. Diagrama de interacción.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.10. Sección transversal de las columnas.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.11. Cargas actuantes en la sección de la columna</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.12. Diagrama de interacción de Cargas de la Sección sin Reforzar.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.13. Sección transversal circular equivalente</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.14. Diagrama de interacción de Cargas de la Sección Reforzada.....</i>	<i>94</i>

<i>Figura 4.15. Ejes verticales discontinuos</i>	96
<i>Figura 4.16. Continuidad de elementos estructurales</i>	97
<i>Figura 4.17. Sección transversal de las vigas</i>	98
<i>Figura 4.18. Deformaciones unitarias</i>	102
<i>Figura 4.19. Fuerzas internas</i>	104
<i>Figura 4.20. Configuración de secciones de vigas resultantes</i>	107
<i>Figura 4.21. Vista frontal de estructura de reforzamiento</i>	109
<i>Figura 4.22. Vista frontal de estructura de reforzamiento</i>	110

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Factores de reducción ambiental</i>	33
<i>Tabla 2.1. Datos registrados del ensayo utilizando esclerómetro</i>	46
<i>Tabla 2.2. Esclerometría en viga</i>	48
<i>Tabla 2.3. Esclerometría en Columna</i>	49
<i>Tabla 2.4. Esclerometría en Columna</i>	50
<i>Tabla 2.5. Esclerometría en Columna</i>	51
<i>Tabla 2.6. Esclerometría en Columna</i>	52
<i>Tabla 2.7. Esclerometría en Columna</i>	53
<i>Tabla 2.8. Esclerometría en Columna</i>	54
<i>Tabla 3.1. Vigas por familias tipo</i>	71
<i>Tabla 3.2. Análisis del pórtico 1</i>	72
<i>Tabla 3.3. Columnas por familias tipo</i>	74
<i>Tabla 3.4. Análisis de columna tipo 1</i>	75
<i>Tabla 4.1. Columna C17 de la familia tipo 1 listado de cargas y momentos</i>	87
<i>Tabla 4.2. Resumen de Cargas de la Sección sin Reforzar</i>	90
<i>Tabla 4.3. Resumen de Cargas de la Sección Reforzada</i>	94
<i>Tabla 4.4. Columnas que necesitan reforzamiento con fibra de carbono</i>	95
<i>Tabla 4.5. Columnas que necesitan incluir otra forma de reforzamiento</i>	95

<i>Tabla 4.6. Propiedades Sika Carbodour S512.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.7. Momentos máximos por cada familia tipo</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4.8. Resultados platinas FRP</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4.9. Resumen de cargas de la sección sin reforzar</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4.10. Resumen de reforzamiento a flexión</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4.11. Resumen de los parámetros en estado último</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 4.12. Comprobación de vigas reforzadas</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 4.13. Presupuesto de reforzamiento estructural con acero</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 4.14. Datos de reforzamiento estructural de FRP para vigas</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 4.15. Datos de reforzamiento estructural de FRP para columnas.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 4.16. Presupuesto de reforzamiento estructural con acero y FRP</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 4.17. Comparación de reforzamientos.....</i>	<i>112</i>

INTRODUCCIÓN

La Norma Ecuatoriana de la Construcción se ha ido actualizando a lo largo de los años, esta nos indica los requerimientos necesarios a ser utilizado en el diseño de estructuras. La norma está basada en la norma American Concrete Institute, la cual, su más actual versión es la 318-19. El reforzamiento de las estructuras debe cumplir con los estándares de las normas mencionadas ya que actualmente contienen reformas para que el diseño sea sismo resistente.

Aun así, existen construcciones que no cumplen con dichas normas, construcciones informales o estructuras antiguas que cumplen con normativas pasadas en donde no se tomaba en cuenta el tema de sismos y son un constante peligro para su entorno. El método para que dichas estructuras cumplan con las normas de construcción es el reforzamiento estructural con el fin de aumentar su capacidad resistente.

El material a utilizar en la siguiente investigación será un material compuesto llamado FRP o Fibras de carbono, la cual, comprende de una matriz polimérica con fibras en forma de tela o hebras. Este material se empleó en la construcción como una alternativa a los materiales tradicionales para reparación y rehabilitación.

El presente trabajo de titulación tiene la finalidad de estudiar el comportamiento de la fibra de carbono como un material de reforzamiento estructural, conocer sus beneficios y limitaciones frente a esfuerzos aplicados, cumpliendo con la normativa ACI 440. 2R. Además, se pretende comparar con el acero de refuerzo en resistencia y precio. La fibra de carbono es un material atractivo en muchos países del mundo. Sin embargo, en nuestro país no es muy utilizada como refuerzo estructural en la construcción por su alta economía al compararla con el precio del acero.

ANTECEDENTES

La industrialización de la fibra de carbono comenzó en 1956 en la empresa Union Carbide, la cual es una de las empresas más antiguas de químicos y polímeros de Estados Unidos. En el mismo año el físico Roger Bacon desarrolló las primeras fibras de carbono cuando se encontraba trabajando en el centro técnico de Parma. Bacon estaba trabajando a altas temperaturas y presiones con un arco de carbono, trataba de encontrar el equilibrio térmico entre el estado líquido, sólido y gaseoso del grafito. Al disminuir la presión en el arco pudo observar que el carbono cambió de estado gaseoso a estado sólido, formando un hilo muy delgado que se podía doblar y no era frágil (American Chemistry Society, 2003).

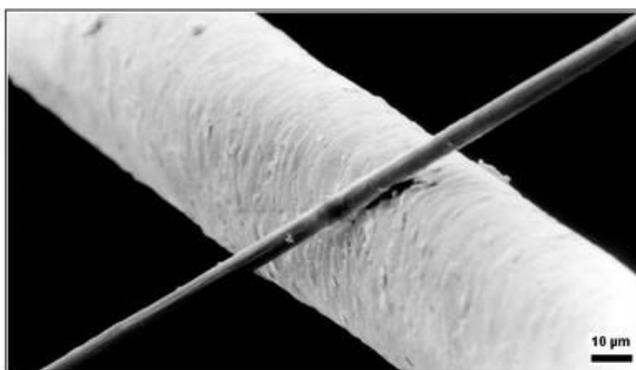


Figura 1.1. Imagen molecular de la fibra de carbono
Fuente: Llano (2021)

En 1958 Bacon demostró las primeras fibras de carbono de alto rendimiento. El carbono y el grafito en formas fibrosas son los materiales más fuertes y rígidos en relación a su peso, nunca antes se había producido un material de iguales características. Las fibras que Bacon demostró tenían una resistencia última a la tracción de 20 gigapascales y un módulo de Young de 700 gigapascales, siendo diez veces más resistente a tracción que el acero. A pesar de todo, las fibras seguían siendo un caso de laboratorio, en ese entonces el costo por libra de la fibra de carbono era 10 millones de dólares (American Chemistry Society, 2003). El costo para su época era demasiado

alto, imposible de comparar con la actualidad, debido a que se descubrió un material nuevo del cual no se tenía investigación alguna. Actualmente, muchos investigadores e inversores se han interesado y han dedicado tiempo y dinero a la fibra de carbono.

Primeras aplicaciones de la fibra de carbono

En cuanto a las primeras aplicaciones de la fibra de carbono, fue utilizado en la industria militar debido a sus propiedades anticorrosivas y su gran resistencia calórica. En el tema comercial, la empresa japonesa Toray industries la cual es una multinacional dedicada a productos industriales sintéticos como los polímeros, transformo la fibra de carbono en un producto comercial ya no dedicada solamente a fines militares. Se empezó a comercializar a mayor escala la fibra de carbono basada en poliacrilonitrilo (PAN), el cual es un polímero utilizado para fabricar fibras sintéticas que sirven para desarrollar productos como aros de bicicletas, raquetas de tenis, partes de autos, chalecos antibalas, guantes, etc. (Alegre, 2017).



Figura 1.2. Fibra de carbono de alto rendimiento hecha de poliacrilonitrilo (PAN)

Fuente: Toray Industries (2022)

En los últimos años el costo de fabricación de la fibra de carbono se ha reducido drásticamente. Existen aplicaciones del material que antes eran imposibles y actualmente se las realiza con normalidad. En un futuro, se podrán utilizar para la carrocería completa de un automóvil o en la construcción de un edificio completo (American Chemistry Society, 2003). Mientras más investigaciones existan, es más probable que su costo siga reduciéndose.

En temas constructivos, La primera estructura a nivel mundial que utilizo materiales compuestos con fibra de carbono fue el puente Ibach en Suiza en el año 1991. En Latinoamérica se utilizó materiales compuestos FRP por primera vez en Colombia en el puente Cocorná en 1996 siguiendo el sistema comercial SikaCarbodur (Rendón, 2020). SikaCarbodur es una empresa que se dedica a la comercialización de las platinas de carbono para refuerzo estructural.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la factibilidad del uso de fibra de carbono como reforzamiento estructural de una edificación existente, evaluando su comportamiento ante cargas aplicadas, con la finalidad de conocer sus beneficios y compararla económicamente con el acero de refuerzo.

Objetivos específicos

- Levantar información mediante Ensayos No Destructivos (END), de la edificación existente.
- Evaluar los resultados obtenidos con CYPECAD y llegar a una conclusión sobre el uso de la fibra de carbono como refuerzo en edificaciones.
- Comparar resultados de análisis económicos entre la fibra de carbono y el acero, ambos como materiales de reforzamiento estructural.

JUSTIFICACION

Ecuador está localizado en una zona catalogada de alto riesgo sísmico. Para precautelar la seguridad de los ecuatorianos, el Ministerio de desarrollo Urbano y Vivienda conjuntamente con

la Cámara de la Industria de la Construcción llevaron a cabo un proceso de actualización de la Normativa Técnica referente a la Seguridad Estructural de Edificaciones (Código Ecuatoriano de la Construcción 2001). El objetivo de la actualización fue determinar normas de construcción de acuerdo a los avances tecnológicos. Lo que se obtuvo como resultado fue la Norma Ecuatoriana de la Construcción cuya finalidad es mejorar la seguridad de las edificaciones protegiendo la vida de sus habitantes y fomentando un desarrollo urbano sostenible. La Norma Ecuatoriana de la Construcción nos entrega parámetros de calidad y seguridad de obligatorio cumplimiento a nivel nacional (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda , 2015). Construir una casa siguiendo las normas es mucho más caro que construir una casa informal. Puesto que, la norma nos exige reglas y prácticas constructivas costosas. Por esta razón, mucha gente prefiere contratar gente que no está capacitada.

En última versión de Norma Ecuatoriana de la Construcción del año 2015 nos presenta el mapa de zonificación sísmica del Ecuador. El mapa está dividido en zonas sísmicas que tienen valores de aceleración de 0.15g a 0.5g como máximo valor. Sin embargo, El 16 de abril de 2016, ocurrió un sismo de 7.8Mw con 1.4g de aceleración máxima registrada sobrepasando a la máxima aceleración de 0.5g descrita por la NEC. El sismo se produjo en las costas del Ecuador afectando a la región de Manabí y Esmeraldas, en el cual murieron alrededor de 600 personas y colapsaron estructuras en un radio de 300 km del epicentro. La ciudad más afectada fue la de Pedernales (Aguirre, 2017).

El sismo dejó en evidencia la informalidad en la construcción o malas prácticas constructivas que se realizan en la zona, una gran cantidad de la población en el país desconoce la existencia de una normativa que regula las construcciones en el Ecuador, se dice que el 70% de construcciones en el país son informales, las cuales no cumplen con los requerimientos mínimos

especificados por la normativa nacional. Las estructuras informales no tienen un adecuado diseño en sus perfiles, carecen de acero de refuerzo, no cumplen con una adecuada relación agua cemento, el exceso de agua utilizado en obra disminuye la resistencia del hormigón. Todas estas maneras anti-técnicas hacen que las estructuras estén en constante peligro de colapso ante solicitaciones externas como un sismo, afectando la vida de sus usuarios y su entorno (Escuela Politécnica Nacional, 2022).

La solución podría ser reforzamiento estructural con acero, el material típicamente usado para así cumplir con los requisitos mínimos de diseño para obtener estructuras sismo resistente. Sin embargo, en la presente investigación se propone un material alternativo e innovador en nuestro medio debido a que se necesitan soluciones inmediatas para la cantidad de construcciones informales que están en pie. La fibra de carbono o FRP no requiere de grandes cambios estructurales, es muy utilizado internacionalmente, tiene la finalidad de aumentar la capacidad resistente de las estructuras ya sea por aumento de cargas verticales, acero de refuerzo insuficiente, secciones que no cumplen la normativa nacional, actualización sísmica y deterioro por el paso del tiempo.

CAPITULO 1: MARCO TEORICO

1.1. Tipos de intervención estructural

Son trabajos que sirven para actualizar una estructura. Existen diferentes tipos de intervenciones como:

- **Reforzamiento:** Aumento de capacidad resistente de la estructura en conjunto mediante aumentos de sección o adicción de materiales nuevos.
- **Reparación:** Cuando un evento externo o interno causo daños en la estructura como fisuras o grietas.
- **Restauración:** Cuando existe deterioro por el paso del tiempo y se quiere restaurar su arquitectura.
- **Rehabilitación:** Cuando se quiere poner en funcionamiento a la estructura luego de ser afectada por un evento impactante (Moncayo, 2016).

1.2. Reforzamiento estructural

Reforzamiento se define como la acción que permite aumentar la capacidad resistente de una estructura en conjunto mediante la adición de materiales nuevos o un aumento de su sección. Como técnicas frecuentes están en encamisado de concreto o con perfiles de acero y el refuerzo estructural mediante placas de acero (Moncayo, 2016). En la actualidad, también existen nuevos materiales compuestos para reforzamiento estructural como los laminados de carbono.

Se debe aplicar reforzamiento estructural en el caso de tener una estructura que no fue construida con un respaldo técnico, cambio de uso de la edificación, fallas en la fase de diseño o construcción, deterioro por el paso del tiempo y cuando se conozca que la estructura llego al final

de su vida útil (Moncayo, 2016). En el presente proyecto se tiene una estructura informal, con fallas constructivas típicas. En donde se cumplió con los estándares de calidad.

1.3. Materiales compuestos

Materiales compuestos como su nombre lo indica, están formados por dos o más materiales con el fin de que actúen de manera conjunta. En este caso, como componentes se tiene (fibra + matriz), la fibra aporta rigidez y resistencia. La matriz que generalmente es resina, transmite los esfuerzos de una fibra a otra (Gómez & Sobrino, 2003). Al juntar los materiales se logran características únicas, que no pueden ser obtenidas en los materiales originales por si solos.

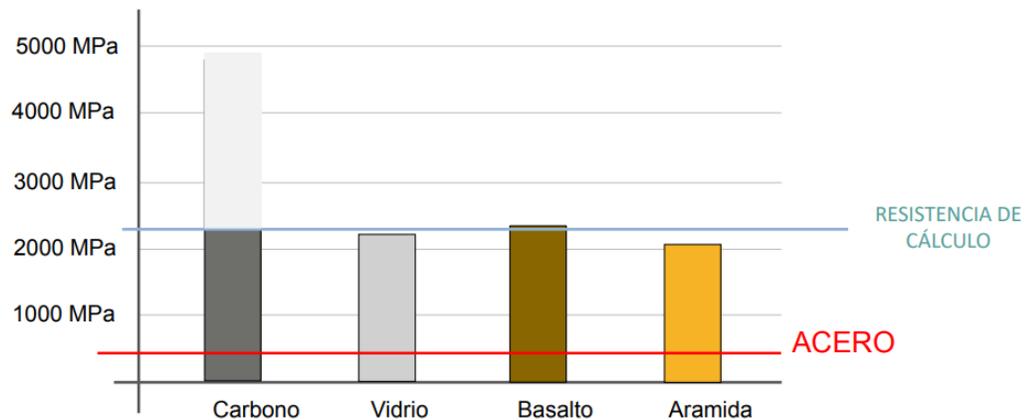


Figura 1.3. Comparación de resistencias a tensión entre varias fibras

Fuente: Rendón (2020)

Los materiales compuestos FRP son mucho más resistentes que el acero. El acero fluye a 420 MPa. En cambio, fibras como la aramida, vidrio o basalto fluyen a 2000 MPa. La fibra que mayor propiedades mecánicas presenta es la de carbono con una resistencia mayor a 4000 MPa. Cuando se trabaja con fibra de carbono se toma una resistencia promedio por factores de seguridad, se trabaja con la mitad de la resistencia última.

Como propiedades generales de las fibras, podemos decir que son mecánicamente mucho más resistentes que el acero, su comportamiento es lineal hasta la rotura, es resistente a los agentes

químicos, no sufre de corrosión. Además, tiene una buena relación resistencia – peso, su presentación puede ser en diferentes tamaños sin necesidad de juntas, es durable y tiene propiedades dieléctricas (Gómez & Sobrino, 2003). Al hablar de propiedades mecánicas, incluyen resistencia a la tensión, deformación y módulo de elasticidad.

Para fines constructivos, la forma más general de los materiales compuestos se la llama laminado, constituida por varias láminas de fino espesor. Dependiendo de la orientación de los laminados y de la secuencia de las mismas se puede generar un amplio rango de propiedades físicas y mecánicas. Las propiedades mecánicas del material compuesto van a depender del porcentaje de las fibras orientadas en la misma dirección, dando como resultado la máxima resistencia y modulo en la dirección del eje de las fibras. Por otro lado, las características de la matriz a utilizar va a influir en la resistencia cortante del producto compuesto (Gómez & Sobrino, 2003). La matriz ayuda a adherir las fibras a que sean compactas y funcionen como un solo material de alta resistencia protegiendo el material de agentes externos o químicos agresivos. Además, ayuda a soporte de solicitaciones de compresión.

1.4. Reforzamiento con fibra de carbono (CFRP)

La fibra de carbono es un material compuesto por hilos o filamentos de carbono con diámetros muy pequeños que varían entre 5 a 10 micras. Miles de micro filamentos se juntan de manera desordenada y densa, dando como resultado un material compuesto resistente. La fibra de carbono es 10 veces más resistente que el acero, es un material muy flexible y liviano. Además, es un material resistente a altas temperaturas y tiene baja expansión térmica (Moncayo, 2016). Al ser un material muy flexible y liviano, sus costos de instalación son bajos y su puesta a servicio es inmediata.

1.5. Configuración de la fibra de carbono

La fibra de carbono desde sus inicios se ha ido desarrollando industrialmente, cambiando su modificación. Actualmente, más de la mitad de las fibras de carbono producidas industrialmente están hechas de poliacrilonitrilo (PAN). Solo un pequeño porcentaje restante se hace de petróleo. En general todos estos materiales son polímeros orgánicos que tienen sus moléculas unidas por átomos de carbono (Alegre, 2017). Desde que la fibra de carbono se volvió popular en varias industrias, han aumentado sus investigaciones y pruebas con diferentes composiciones. En el futuro será un material más popular y accesible.

1.6. Proceso de fabricación de la fibra de carbono

Para fabricar la fibra de carbono se utilizan diferentes gases y líquidos, la fabricación pasa por procesos químicos y mecánicos. Se empieza calentando los filamentos a temperaturas muy altas, la fibra no se quema debido a que se impide que entre en contacto con oxígeno. Al calentar la fibra expulsa a los átomos que no sean de carbono, formando una fibra compuesta de cadenas de átomos de carbono unidas. Existen diferentes materiales que pueden ser utilizados como materia prima. Por ejemplo, el rayón, proveniente de la celulosa, compuestos obtenidos del alquitrán un material barato pero no efectivo y el PAN o poliacrilonitrilo que es el más utilizado y se toma de base su proceso de fabricación. A continuación, se presenta el proceso de fabricación de fibra de carbono a partir de poliacrilonitrilo (Alegre, 2017).

- Hilado: El polvo de plástico de acrilonitrilo mezclado con acrilato de metilo funciona como un catalizador en el proceso de polimerización para formar el plástico de poliacrilonitrilo. Posteriormente, se lavan y se estiran las fibras con el diámetro deseado ayudando a alinear las moléculas internas de las fibras y proporcionando la base para la formación de cristales de carbono unidos.

- Oxidación: Se necesita de una unión más estable luego del hilado. Por lo tanto, se calienta las fibras en aire a una temperatura de 250 grados Celsius durante 30 o 120 minutos. Esto hace que capten moléculas de oxígeno y estabilicen su patrón de unión atómica. A medida que las fibras se oxidan, van tomando un color más oscuro.
- Carbonización: Una vez estabilizadas las fibras de carbono, se calientan a una temperatura de 1000 a 3000 grados Celsius en un horno sin oxígeno. La falta de oxígeno hace que las fibras no se quemen a esa gran cantidad de temperatura. En el momento que las fibras se calientan, empiezan a perder átomos dejando únicamente a los de carbono que finalmente forman cristales de carbono unidos, alineados al eje de la fibra.
- Tratamiento de la superficie: Luego de la carbonización las fibras necesitan una superficie que se junte bien con materiales epóxicos y otros materiales iguales. Para lograr la unión, la superficie debe estar oxidada y así lograr una superficie sin defectos que causen fallas en las fibras.
- Modelamiento: El proceso final, en donde las fibras se recubren para ser protegidas durante el enrollado. Los materiales de recubrimiento deben ser compatibles con los adhesivos que se eligen para formar el material compuesto. Finalmente, las fibras con recubrimiento se instalan en una máquina de hilar y las fibras se tuercen en filamentos de diferentes tamaños (Alegre, 2017).

Como sabemos, un material compuesto está constituido por resina que vendría a ser el polímero que unido a los tejidos de carbono nos da como resultado una platina o tela que nos da las propiedades mecánicas esperadas.

1.7. Uso de fibras de carbono en estructuras

La fibra de carbono debido a su alta resistencia puede ser utilizada en reforzamiento de vigas para aumentar o recuperar su resistencia a la tensión. Por lo general, se utilizan tiras o platinas de fibra de carbono para ayudar a la captación de los esfuerzos de tensión. En cuanto a las columnas, la fibra ayuda restaurando su capacidad para resistir esfuerzos a tracción y aumenta su confinamiento. Además, existen más ventajas de utilizar la fibra de carbono en reforzamiento de estructuras como mayor resistencia a los impactos, resistencia al fuego y aislamiento térmico (Moncayo, 2016).

1.8. Metodología de instalación de la fibra de carbono como refuerzo estructural

Como primer paso, se limpia el soporte de contacto, eliminando toda partícula suelta como polvo, para lograr una mayor adherencia. Seguidamente, se aplica la capa de imprimación epóxica y se pasa un rodillo. Luego se rellenan los huecos con masilla o pasta epóxica. Una vez preparada la superficie, se corta y preparan los laminados de carbono a medida según la sección de soporte. Seguidamente, se colocan las platinas sobre la superficie haciendo compresión y se procede a aplicar una capa de recubrimiento y finalmente una capa de acabado que cubre el laminado para así dar una apariencia similar al concreto y proteger el laminado de carbono de agentes externos (Alegre, 2017). Cada método de instalación dependerá del profesional o encargado de reforzar con fibra de carbono.

1.9. Generalidades de diseño

El momento que reforzamos con FRP, las fibras deben soportar los esfuerzos a tensión. Además, mantener la compatibilidad de deformación junto con la capa de concreto. No es competencia del refuerzo FRP resistir las cargas a compresión, pueden existir cambios en los

parones de carga. Pero, la resistencia a las fuerzas de compresión debe ser despreciada (ACI 440, 2008).

1.9.1. Filosofía de diseño

Se basa en los principios de estados límite, que buscan la seguridad tanto en estados límite de servicios o en estados límite-último. Se deben evaluar todos los posibles casos de falla y las consecuentes deformaciones y esfuerzos de cada material. Los sistemas de reforzamiento FRP deben seguir la norma ACI 318 y cumplir con todos los requerimientos mínimos recomendados por la guía. En el caso de reforzar una columna con FRP, el refuerzo es diseñado para soportar la carga sísmica disipando la energía. Posterior al evento sísmico, los elementos afectados pueden ser reparados o reemplazados (ACI 440, 2008). Se debe tomar en cuenta que la seguridad de la vida es el principal objetivo.

1.9.2. Límites del reforzamiento

Los límites de reforzamiento nos ayudan a proteger la estructura en caso de que colapse, en el caso de ocurrir una falla en el sistema FRP debido a causas como fuego o una mala adherencia. Se recomienda que el miembro estructural sin refuerzo FRP tenga la suficiente capacidad de resistir un nivel de carga específico. Por lo tanto, en el caso de que el sistema FRP resulte dañado, la estructura debe resistir el nivel de carga sin colapsar (ACI 440, 2008). En conclusión, es recomendable que la resistencia existente cumpla con la siguiente ecuación:

$$(\Phi R_n)_{\text{existente}} \geq (1.1SDL + 0.75SLL)_{\text{nueva}} \quad (\text{Ecu. 1.1})$$

Donde,

R_n: Resistencia nominal

DL: Carga muerta

LL: Carga viva

1.9.3. Capacidad estructural

Es importante conocer que el reforzamiento estructural con sistemas FRP es eficaz cuando se requiere soportar esfuerzos a flexión o corte y para confinamiento que ayuda a mejorar la ductilidad global del elemento estructural. Se debe asegurar que todos los elementos estructurales puedan soportar el nuevo incremento de carga planificado al usar reforzamiento con FRP. Además, el diseño debe ser realizado y examinado para que bajo condiciones de sobrecarga, el elemento estructural reforzado falle a flexión antes que a cortante (ACI 440, 2008).

1.9.4. Resistencia al fuego

El sistema FRP no puede resistir el fuego por tiempo prolongado. Las resinas de los polímeros usados en el FRP y los adhesivos utilizados pierden su adherencia estructural cuando son sometidas a altas temperaturas de 60 a 80 grados Celsius. Además, no es factible aislar el reforzamiento, debido a la cantidad de aislamiento necesario para protegerlo.

Se sabe que el concreto es resistente al fuego. Por lo tanto, si se combina con el sistema FRP podría tener una resistencia considerable. Es importante cumplir con los límites de reforzamiento establecidos en la norma, nos garantiza que la estructura no va a colapsar en un incendio. Para asegurar que la estructura no colapse, se calcula la resistencia de un elemento bajo esfuerzos, con la resistencia reducida del acero y del concreto y sin refuerzo FRP. La resistencia resultante puede ser comparada con la demanda de carga de un elemento. Con el fin de que la estructura no colapse bajo cargas de servicio y altas temperaturas (ACI 440, 2008). La resistencia existente de un elemento estructural debe cumplir con los requisitos de la siguiente ecuación:

$$(R_n\theta)_{\text{existente}} \geq \text{SDL} + \text{SLL} \quad (\text{Ecu. 1.2})$$

Existen ciertos polímeros y métodos que pueden ayudar a la protección contra el fuego, no son métodos muy utilizados actualmente. Sin embargo, se espera que se empiecen a considerar estos métodos el momento de diseñar los sistemas FRP y así cumplir con la resistencia al fuego requerida (ACI 440, 2008).

1.9.5. Cuidado sísmico

Muchos estudios dan prioridad al reforzamiento de columnas con sistemas FRP, el reforzamiento ayuda a confinar las columnas mejorando su ductilidad, su resistencia a compresión, reduce la longitud de empalme requerida y aumenta su capacidad a cortante. En el caso de vigas y losas reforzadas, se debe verificar la resistencia de ambos elementos estructurales para asegurar que la articulación plástica este lejos de la junta y de la columna (ACI 440, 2008). Es muy limitada la información que se tiene de reforzamientos FRP actuando en estructuras con peligro sísmico.

1.9.6. Consideraciones ambientales

La exposición ambiental que incluye químicos, exposición a rayos ultravioleta, agua salada, humedad, etc. degrada al sistema FRP, afecta directamente en sus propiedades mecánicas. Es importante tener en cuenta el entorno en el cual se va a utilizar las platinas o mantos de reforzamiento. Se debe considerar que existen resinas que ayudan a proteger la fibra de ambientes alcalino/ácidos, que ayudan a retardar el deterioro aislando la fibra. En el caso de que exista un aumento de temperatura en pequeños rangos de +/- 28 grados Celsius y cause una expansión térmica, no afectara de ninguna manera en la adherencia con el concreto. En cuanto a la conductividad eléctrica, es recomendable que no entre en contacto con acero, debido a que el CFRP o polímero reforzado con fibras de carbono es un conductor de electricidad (ACI 440, 2008).

1.9.7. Consideración de sección de recubrimientos de protección

Como sabemos, los recubrimientos externos son materiales eficaces para retardar la degradación. Dependiendo de los requerimientos se elige el tipo y grosor de recubrimiento. Puede existir humedad, agua salada, ambientes extremos, vandalismo, etc. Pueden existir recubrimientos como capas de resina que ayudan a soportar los impactos por tráfico, en el caso de necesitar protección adicional se utilizan empastes o morteros con cemento. En sitios de menor impacto se puede utilizar polímeros para proteger la fibra (ACI 440, 2008).

1.9.8. Propiedades de los materiales de diseño

Las propiedades de los materiales utilizados el momento de diseñar, deben ser reducidas dependiendo el tipo de exposición. La exposición por largo tiempo a diversas condiciones ambientales puede ser perjudicial para el material, puede reducir su resistencia a la tensión, la ruptura por fluencia plástica y la resistencia a la fatiga. (Alegre, 2017). Para calcular la resistencia real que debemos utilizar en el diseño, se presentan tres ecuaciones que dependen de la exposición ambiental.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (\text{Ecu. 1.3})$$

Donde,

f_{fu} : Resistencia última a la tracción del material FRP

C_E : Factor de reducción ambiental

f_{fu}^* : Resistencia máxima a tracción dada por el fabricante

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (\text{Ecu. 1.4})$$

Donde,

\mathcal{E}_{fu} : Tensión de ruptura de diseño del refuerzo de FRP

C_E : Factor de reducción ambiental

\mathcal{E}_{fu}^* : Tensión máxima de ruptura del refuerzo de FRP

$$E_f = f_{fu} / \mathcal{E}_{fu} \tag{Ecu. 1.5}$$

Donde,

E_f : Módulo de elasticidad a la tracción de FRP

f_{fu} : Resistencia última a la tracción del material FRP

\mathcal{E}_{fu} : Tensión de ruptura de diseño del refuerzo de FRP

Tabla 1.1. Factores de reducción ambiental

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Fuente: ACI 440 (2008)

1.9.9. Resistencia nominal

En algunos casos, las vigas reforzadas con material compuesto como FRP tienen fallas ya sea frágiles o imprevistas causando un desprendimiento del material de refuerzo, lo cual reduce su capacidad de alcanzar la resistencia máxima o última a la flexión (Rendón, 2020). Es importante que el material compuesto como refuerzo este bien ejecutado para evitar fallas o peligros a largo plazo.

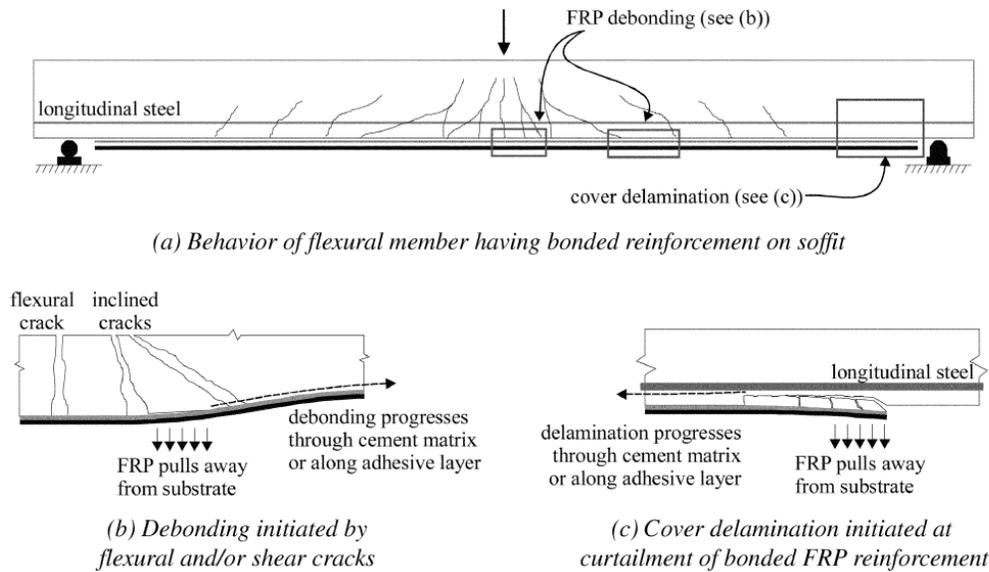


Figura 1.4. Sistemas FRP adheridos externamente
Fuente: ACI 440 (2008)

Para controlar que no suceda la falla por desprendimiento causado por el agrietamiento debido al aumento de las solicitaciones, se presenta una ecuación que nos da el límite de la deformación unitaria efectiva que debe ser limitada al nivel de deformación en donde dicho desprendimiento debe ocurrir (ACI 440, 2008).

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (\text{Ecu. 1.6})$$

Donde,

ϵ_{fd} : Límite de la deformación unitaria efectiva

f_c' : Resistencia a compresión del concreto

n : Número de capas de refuerzo FRP

E_f : Modulo de elasticidad del refuerzo FRP a la tracción

t_f : Espesor nominal de la capa de refuerzo FRP

ϵ_{fu} : Deformación unitaria última

1.9.10. Diseño a flexión

Existen algunas consideraciones para el cálculo de la resistencia a flexión. Por ejemplo, todo el diseño del refuerzo se basa en el miembro estructural a reforzar, sus propiedades, dimensiones y su disposición interna del acero de refuerzo. No existe deslizamiento relativo entre el refuerzo FRP y el concreto. Se considera la deformación unitaria máxima del concreto de 0.003 dada por el ACI. Además, se desprecia la resistencia a tracción del concreto y la cura tensión-deformación tendrá un comportamiento lineal hasta la rotura (Rendón, 2020). Un miembro que se comporta a flexión es porque tiene cargas perpendiculares a su eje longitudinal, en donde un diagrama de corte produce un momento flector. Para calcular el momento nominal se tiene la siguiente ecuación:

$$M_n = A_s f_s \left(d \frac{\beta_{1c}}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h \frac{\beta_{1c}}{2} \right) \quad (\text{Ecu. 1.7})$$

Donde,

$$M_u \leq \phi M_n \quad (\text{Ecu. 1.8})$$

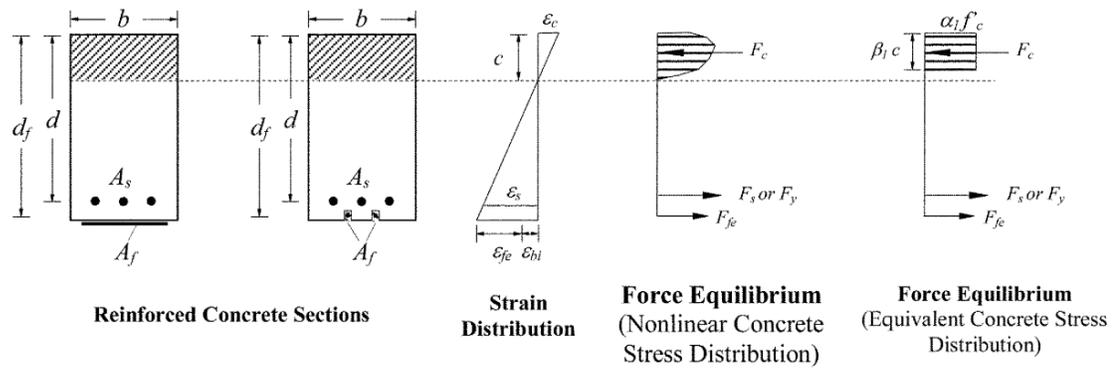


Figura 1.5. Resistencia a la flexión de vigas rectangulares reforzadas con FRP
 Fuente: ACI 440 (2008)

1.9.11. Diseño por corte

Lo primero que se debe considerar para diseño a corte, es el tipo de configuración de refuerzo que se va a utilizar, pueden existir configuraciones que sean en forma de U, configuraciones completas o que se refuerce únicamente a los laterales del soporte (Rendón, 2020). A continuación, se presentan los tipos de configuración.

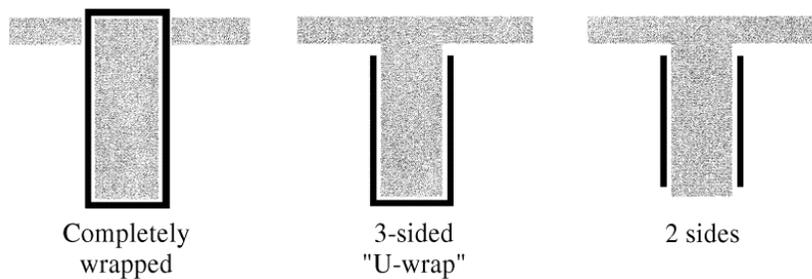


Figura 1.6. Configuraciones para sistemas reforzadas con el sistema FRP
 Fuente: ACI 440 (2008)

Se debe garantizar que el cortante último sea menor o igual al cortante nominal minorada como se presenta a continuación:

$$\phi V_n \geq V_u \tag{Ecu. 1.9}$$

Donde,

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (\text{Ecu. 1.10})$$

1.9.12. Diseño por compresión

Se realiza un reforzamiento a compresión cuando existe un aumento de los esfuerzos axiales sobre la columna. La solución es el confinamiento de columna, para que pueda soportar las nuevas sollicitaciones a compresión. Para elementos estructurales como vigas, se utilizan platinas de FRP. Sin embargo, en este caso se utiliza un manto de FRP menos resistente, pero que ayuda a confinar una columna en su totalidad e incrementa su ductilidad haciendo que su capacidad de deformación en el rango inelástico sea mayor (Rendón, 2020). Además, Se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

$$\phi P_n = 0.8\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (\text{Ecu. 1.11})$$

Donde,

$$P_u < \phi P_n \quad (\text{Ecu. 1.12})$$

CAPITULO 2: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos (END) tienen por finalidad determinar la calidad de un objeto o elemento estructural. Tal como afirman Vallejos y Suzuki (2016) este tipo de ensayos no afectan al hormigón desde ningún tipo de vista. Los ensayos no destructivos permiten evaluar un elemento y detectar las condiciones en las cuales se encuentra, evaluando así sus aptitudes.

En este caso, se realizaron este tipo de ensayos a gran cantidad de columnas y vigas que forman parte de la estructura y no presentan ningún tipo de obstáculo que dificulte la evaluación. La edificación se encuentra totalmente en obra gris, es decir, está finalizada la estructura e instalaciones de tuberías internas pero no estaba realizado ningún tipo de acabado, por lo cual facilitaba la elaboración de los END.

Se decidió realizar dos tipos de END para poder evaluar las condiciones y estado de la estructura original de la edificación.

El presente informe comprende la revisión y propuesta de mitigación de la estructura existente de la edificación de la familia Inga, ubicada en la calle Manuel Córdova e Isauro Rodríguez, en la ciudad de Cuenca perteneciente a la provincia del Azuay. Se presenta la ubicación a continuación.

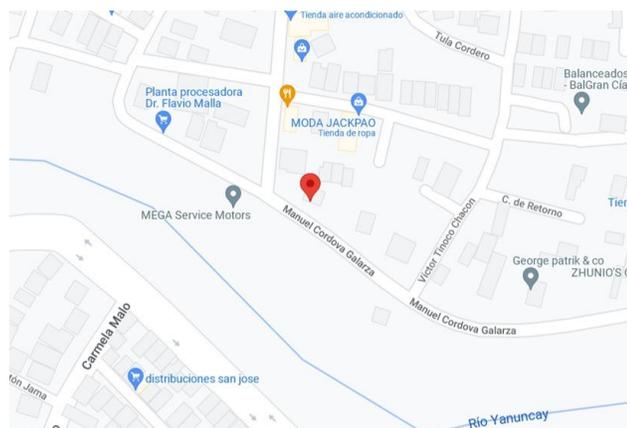


Figura 2.1. *Ubicación de la edificación existente*

Fuente: Propia (2022)

2.1. Escáner de armados

Este proceso consiste en ubicar y conocer el tipo de armado que se utilizó en la construcción de la estructura. Al no poder ver el acero se usa un escáner de pared o también conocido como escáner de armados o detector de materiales. Usamos el escáner de pared marca Bosch Wall scanner d-tect 150 professional manual, el cual, está conformado de la siguiente forma.

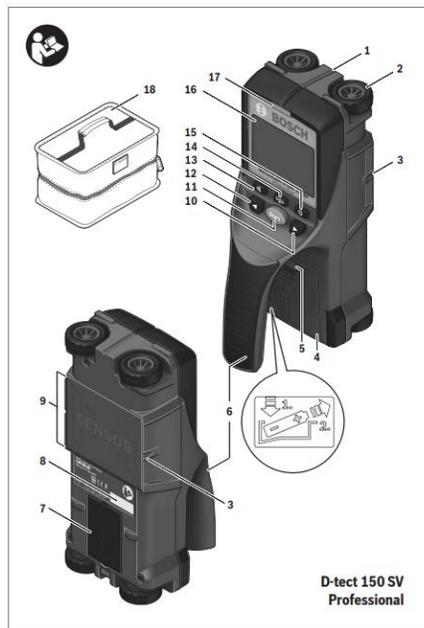


Figura 2.2. *Escáner de pared Bosch Wall scanner d-tect 150 professional manual*

Fuente: Robert Bosch GmbH (2011)

1. Línea de ayuda para marcar, arriba
2. Ruedas
3. Línea de ayuda para marcar, izquierda y derecha
4. Tapa de la batería

5. Pestillo de la tapa de la batería
6. Empuñadura
7. Tapa de mantenimiento
8. Número de serie
9. Zona de sensores
10. Botón de selección, derecho
11. Botón de inicio
12. Botón de selección, izquierda
13. Botón de señal de audio
14. Botón de configuración
15. Botón de encendido/apagado
16. Pantalla
17. LED
18. Bolsa protectora

Su pantalla cuenta además con la siguiente configuración.

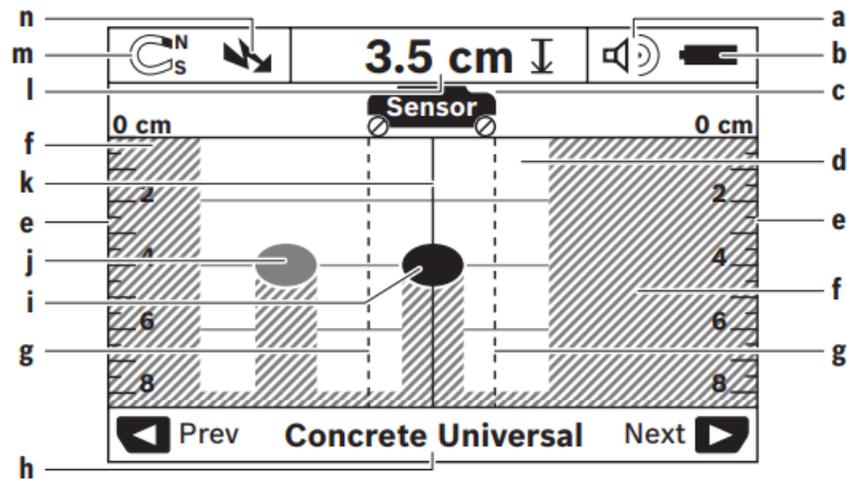


Figura 2.3. Pantalla de Escáner de pared Bosch Wall scanner d-TECT 150
 Fuente: Robert Bosch GmbH (2011)

- a. Indicador de señal de audio
- b. Indicador de batería
- c. Indicador de rango del sensor
- d. Área ya detectada
- e. Escala de medición para la profundidad del objeto
- f. Área aún no detectada
- g. Bordes exteriores, para marcar a la izquierda y a la derecha con la ayuda de marcado 3
- h. Indicación del modo de funcionamiento
- i. Negro: Objeto encontrado dentro del rango del sensor
- j. Gris: objeto encontrado fuera del alcance del sensor
- k. Línea central, corresponde con la ayuda de marcado 1

- l. Indicación de la profundidad del objeto
- m. Indicación del material del objeto
- n. Indicador de cable “vivo”

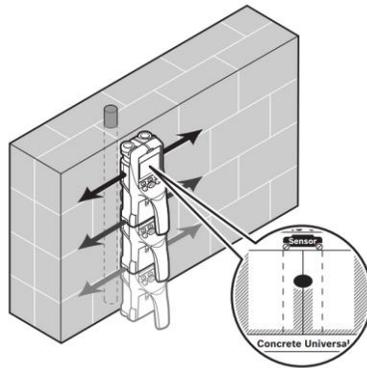


Figura 2.4. Desplazamiento del Escáner de pared Bosch Wall scanner d-tec 150
Fuente: Robert Bosch GmbH (2011)

2.2. Modo de uso del escáner de armados

Se coloca el sensor de tal manera que sus cuatro ruedas estén sobre la superficie de hormigón tomando en cuenta que las mismas se encuentren firmes y no se levanten para evitar errores en el equipo. Se inicia el movimiento lateral con una velocidad moderada e inmediatamente el sensor iniciará a analizar el material, brindándonos la ubicación y profundidad del armado. Con las líneas de ayuda superior y laterales ubicaremos el armado en la superficie señalando con un lápiz o marcador para luego tener una idea más clara y se facilite la toma de medidas. La profundidad del objeto es de ± 5 mm para hormigón seco y de ± 10 mm para hormigón húmedo, todo esto en función del tamaño y tipo de objeto, así como el material y el estado del material superficial (Robert Bosch GmbH, 2011).

2.3. Esclerómetro

Este tipo de ensayo tiene un equipo estandarizado el cual en su interior integra una masa metálica que recibe un impulso y golpea el hormigón. La cantidad de energía recuperada por la masa al rebotar nos brinda un índice de dureza de la superficie (Vallejos & Suzuki, 2016). La esclerometría estima la resistencia del concreto por medio del índice de rebote.

2.4. Aspectos que influyen en el ensayo de esclerometría

La Norma ASTM C 805 – 97 trata sobre el Método de prueba estándar para el número de rebote de hormigón endurecido y nos brinda información acerca de este tipo de ensayo, en la cual establece que el aparato principal es el martillo de rebote y una piedra abrasiva la cual consiste en carburo de silicio de textura de grano medio o un material equivalente, la cual sirve para limpiar la superficie de hormigón a analizar hasta que nos quede una capa lisa sin pintura o carbonatación puesto que genera problemas al aumentar la dureza superficial del concreto, sin embargo, si la capa de carbonato es profunda y no hay como removerla, se puede realizar el ensayo usando los factores de corrección que suministra el fabricante del equipo.

Al comparar las lecturas se deben hacer entre impactos con la misma dirección, horizontal, vertical hacia arriba, vertical hacia abajo, entre otras. Si se desea analizar datos de golpes con diferentes direcciones se debe aplicar un factor de corrección establecido por el fabricante.

Se debe realizar las pruebas con el mismo martillo ya que varía entre 1 a 3 unidades dependiendo el fabricante y los datos perderían credibilidad puesto que serían medidos con diferentes aparatos. El martillo debe tener mantenimiento semestral para una operación adecuada.

2.5. Ejecución del ensayo de esclerometría

“El área de prueba debe tener al menos 100mm de espesor” (American Society for Testing and Materials C - 805, 1997, p. 1). Debe evitarse analizar áreas que cuenten con imperfecciones o alta porosidad.

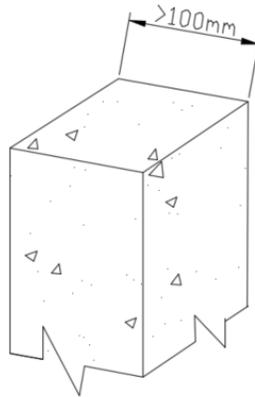


Figura 2.5. Área de prueba para ensayo de esclerometría
Fuente: Propia (2022)

“Se selecciona mínimo 10 puntos de impacto en el área de ensayo con una separación entre ellos no menor de 25mm” (American Society for Testing and Materials C - 805, 1997, p. 2). A cada punto se le ejerce presión con el esclerómetro de manera perpendicular a la superficie y tomamos el valor de rebote que indica el equipo. Este procedimiento se repite en todos los puntos y los datos se promedian. En este caso se tomaron 12 puntos de impacto puesto que es un ensayo estimativo, se aumenta la confiabilidad con un método estadístico y la desviación estándar de los datos.

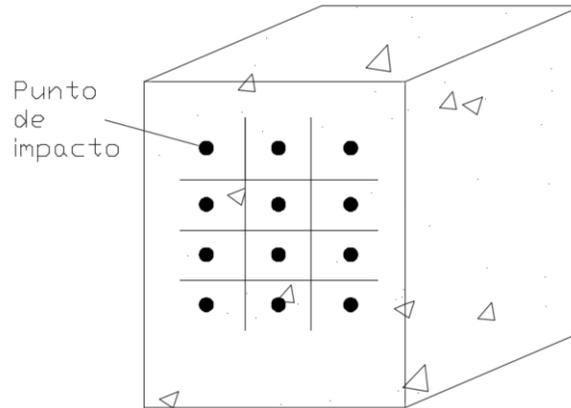


Figura 2.6. Puntos de impacto para ensayo de esclerometría
Fuente: Propia (2022)

Hay que tener cuidado al realizar el ensayo de no ubicar un punto de impacto en un lugar donde se encuentre el acero de refuerzo o varillas en su interior para que no altere el resultado o se forme un dato atípico.

Si al realizar el ensayo, la superficie se aplasta o se rompe un vacío de aire se debe ignorar ese dato y tomar otro. De igual manera, si existe un dato atípico en más de 6 unidades al promedio, se lo debe descartar y determinar el promedio de los datos restantes. Si hay más de 2 datos atípicos, se debe descartar todos los 12 datos y tomar todo el conjunto de datos nuevamente.

2.6. Toma de muestras con ensayos no destructivos

En el edificio analizado se realizó este ensayo no destructivo en varias columnas y vigas para encontrar su acero longitudinal y transversal, para lo cual se realizó un chequeo previo del equipo y que el mismo se encuentre en buenas condiciones para que el resultado sea óptimo. Además configurándolo indicando las condiciones de la superficie analizada, la cual en nuestro caso es de hormigón.

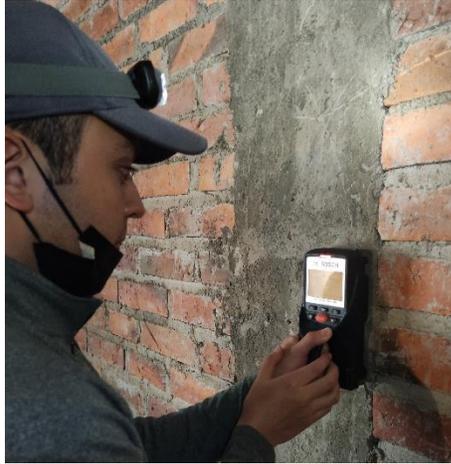


Figura 2.7. Toma de muestras con escáner de armados
 Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.1. Datos registrados del ensayo utilizando esclerómetro

ELEMENTO	ACERO LONGITUDINAL	ACERO TRANSVERAL
COLUMNAS (sección variable, 15x20cm)	Columna electro-soldada reforzada con 1 varilla central por cara.	1 estribo cada 15cm
VIGAS (sección variable, 15x20cm)	Viga electro soldada	1 estribo cada 15cm

Fuente: Propia (2022)

Mediante el dispositivo escáner de armados se ha determinado la existencia de una varilla intermedia en las columnas, por lo que se presume un armado de una columna electro-soldada reforzada con una varilla intermedia por cada cara, práctica constructiva que es común localmente.



Figura 2.8. Toma de datos mediante escáner de armados
Fuente: Propia (2022)

2.7. Media aritmética (ensayo de esclerometría)

El uso del esclerómetro se efectuó, con el fin de determinar la resistencia a compresión simple del hormigón, de los elementos estructurales. En las tablas siguientes se muestra las esclerometrías realizadas en las columnas que fueron accesibles para este ensayo.

Los resultados de las esclerometrías se consideran satisfactorios, la mayoría de los ensayos realizados (12 en total) representan una resistencia del hormigón mayor a $f'c=210\text{kg/cm}^2$. En el estudio se decidió usar un valor promedio entre todas las muestras, la cual es de 240 kg/cm^2 .



Figura 2.9. Esclerometría en columnas

Fuente: Propia (2022)



Figura 2.10. Esclerometría en vigas

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.2. Esclerometría en viga

ESCLEROMETRÍA VIGA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm2)
1	33	28	280.0
2	30	23	230.0

3	33	28	280.0
4	32	26	260.0
5	40	40	400.0
6	30	23	230.0
7	30	23	230.0
8	34	30	300.0
9	35	31	310.0
10	38	36	360.0
11	34	30	300.0
12	32	26	260.0
VALOR ASUMIDO:			280.0

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.3. Esclerometría en Columna

ESCLEROMETRÍA COLUMNA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm2)
1	32	26	260.0
2	30	23	230.0
3	31	24	240.0

4	31	24	240.0
5	28	20	200.0
6	29	22	220.0
7	25	16	160.0
8	30	23	230.0
9	30	23	230.0
10	34	30	300.0
11	37	35	350.0
12	32	26	260.0
VALOR ASUMIDO:			235.0

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.4. Esclerometría en Columna

ESCLEROMETRÍA COLUMNA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm2)
1	32	26	260.0
2	35	31	310.0
3	32	26	260.0
4	31	24	240.0

5	32	26	260.0
6	33	28	280.0
7	33	28	280.0
8	34	30	300.0
9	35	31	310.0
10	28	20	200.0
11	33	28	280.0
12	27	19	190.0
VALOR ASUMIDO:			270.0

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.5. Esclerometría en Columna

ESCLEROMETRÍA COLUMNA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm²)
1	27	19	190.0
2	27	19	190.0
3	33	28	280.0
4	30	23	230.0
5	28	20	200.0

6	31	24	240.0
7	30	23	230.0
8	33	28	280.0
9	30	23	230.0
10	32	26	260.0
11	31	24	240.0
12	33	28	280.0
VALOR ASUMIDO:			235.0

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.6. Esclerometría en Columna

ESCLEROMETRÍA COLUMNA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm²)
1	37	35	350.0
2	28	20	200.0
3	35	31	310.0
4	32	26	260.0
5	22	12	120.0
6	30	23	230.0

7	35	31	310.0
8	20	10	100.0
9	34	30	300.0
10	37	35	350.0
11	25	16	160.0
12	32	26	260.0
VALOR ASUMIDO:			260.0

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.7. Esclerometría en Columna

ESCLEROMETRÍA COLUMNA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm²)
1	35	31	310.0
2	30	23	230.0
3	37	35	350.0
4	32	26	260.0
5	30	23	230.0
6	31	24	240.0
7	32	26	260.0

8	25	16	160.0
9	32	26	260.0
10	25	16	160.0
11	30	23	230.0
12	30	23	230.0
VALOR ASUMIDO:			235.0

Fuente: Propia (2022)

Tabla 2.8. Esclerometría en Columna

ESCLEROMETRÍA COLUMNA			
# disparos	valor medido esclerómetro	MPA	f'c (kg/cm²)
1	30	16	160.0
2	32	20	200.0
3	27	12	120.0
4	31	18	180.0
5	35	24	240.0
6	26	11	110.0
7	36	26	260.0
8	33	21	210.0

9	31	18	180.0
10	33	21	210.0
11	28	14	140.0
12	31	18	180.0
VALOR ASUMIDO:			180.0

Fuente: Propia (2022)

Se conoce por información brindada por los propietarios que se realizaron fundiciones de hormigón contratado con empresas locales, por lo que se accede a realizar esclerometría para corroborar la resistencia mínima del hormigón. Aunque es un método aplicado referencial, su uso está muy extendido ya que proporciona valores aproximados y se emplea principalmente como método de comprobación.

2.8. Determinación del punto de inicio para el análisis y reforzamiento

Para poder determinar el punto de inicio se realiza una evaluación inicial general de todo el edificio, mirando detalles constructivos y arquitectónicos los cuales intervienen en el diseño, puesto que para poder iniciar el análisis estructural se necesita obtener todos los datos posibles en campo para que el diseño en un software sea lo más cercano a la realidad.

La edificación corresponde a una estructura de 3 pisos con columnas de hormigón armado, vigas principales de hormigón armado, vigas metálicas y losas de bloque con perfiles tipo omega.

La evaluación parte con el conocimiento que la infraestructura presenta vulnerabilidad debido a varias irregularidades observadas.



Figura 2.11. Vista frontal de la edificación
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.12. Fachada frontal de la edificación
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.13. Ingreso a la edificación

Fuente: Propia (2022)

2.9. Elementos estructurales y no estructurales analizados

2.9.1. Cimentación

No se puede visualizar a profundidad los miembros estructurales cimientos debido al relleno existente y no existe información al respecto del desplante ni el tipo de cimentación. Se conoce en base a la geomorfología que el emplazamiento se encuentra en un depósito aluvial, el cual tiene buenas características de capacidad admisible.

2.9.2. Columnas

En la inspección a la vivienda, no se presentan a la vista daños estructurales en columnas, no existe desplazamientos, sin embargo, se observó que algunas de ellas presentan las siguientes observaciones:

- Desgaste del recubrimiento de hormigón por lo que varias varillas de refuerzo se encuentran expuestas.
- Segregación y desprendimientos del hormigón.
- Existe una columna de hormigón armado apeada (columna que no nace de cimentación sino del primer entrepiso).

Las columnas presentan secciones variables de 15x20cm y según las varillas de acero que se observan expuestas se conoce que están armadas mediante elementos electro-soldados se presume tipo V7. A continuación, se presentan fotografías, donde se aprecia lo expuesto.



Figura 2.14. Estado actual de las columnas
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.15. Desprendimiento y segregación de hormigón en columnas
Fuente: Propia (2022)

Esta columna apeada se asienta sobre una vigueta metálica que está apoyada sobre una pared de mampostería, por lo que no existe una estructura soportante para esa columna, situación que compromete la integridad de la pared

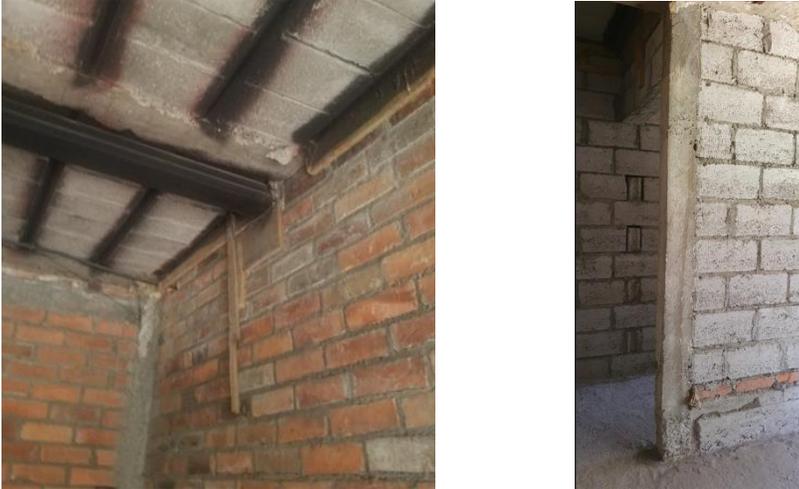


Figura 2.16. Columna apeada que nace del entrepiso
Fuente: Propia (2022)

No se observó desplazamientos en columnas y se realizó la verificación con nivel en todas las columnas.



Figura 2.17. Nivelación de columnas
Fuente: Propia (2022)

2.9.3. Vigas de hormigón

En la inspección a la vivienda, no se visualiza desplazamientos, ni deflexiones, sin embargo, se observó que algunas de ellas presentan las siguientes observaciones:

- Desgaste del recubrimiento de hormigón por lo que varias varillas de refuerzo se encuentran expuestas.
- Segregación y desprendimientos del hormigón.
- Existen varias secciones de vigas de hormigón interrumpidas por viguetas metálicas que las atraviesan, rompiendo la continuidad de sección de hormigón y además de armado del armado principal.
- Existen varias viguetas metálicas soldadas directamente a la armadura de las vigas de hormigón.
- Existen varias vigas que están atravesadas por tuberías a nivel del nudo viga-columna.

Las vigas de hormigón visibles de la vivienda tienen dimensiones de 15x20cm y según las varillas de acero que se observan expuestas se conoce que están armadas mediante elementos electro soldados. A continuación, se presentan fotografías, donde se aprecia lo expuesto.



Figura 2.18. Desgaste del recubrimiento

Fuente: Propia (2022)



Figura 2.19. Segregación y desprendimiento del hormigón
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.20. Vigas interrumpidas por vigas de metal
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.21. Viguetas soldadas a armadura de vigas de hormigón
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.22. Vigas atravesadas por tuberías
Fuente: Propia (2022)

2.9.4. Vigas metálicas

Las vigas metálicas se encuentran oxidadas al haber estado expuestas al ambiente durante el paso de los años. Existen vigas metálicas soldadas en caja que disponen de una posición girada, con el lado largo en sentido horizontal, sin aprovechar la inercia del perfil en sentido vertical.



Figura 2.23. *Perfiles omegas oxidados*
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.24. *Vigas oxidadas*
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.25. *Viga metálica con sección girada*
Fuente: Propia (2022)

2.9.5. Losas

Las losas existentes de entrepiso corresponden a losas de bloque con perfiles tipo omega.

Como se muestra a continuación:



Figura 2.26. Losas de entrepiso
Fuente: Propia (2022)



Figura 2.27. Perfiles omegas de losa de bloque
Fuente: Propia (2022)

2.9.6. Uniones

Varias de las uniones se encuentran obstaculizadas por el paso de tuberías hidrosanitarias.

Como se muestra a continuación:



Figura 2.28. Unión viga-columna

Fuente: Propia (2022)



Figura 2.29. Uniones con segregación de hormigón

Fuente: Propia (2022)



Figura 2.30. Unión en cruce de vigas de hormigón

Fuente: Propia (2022)

2.9.7. Mampostería

Este informe se enfoca en área estructural de la vivienda, sin embargo, es importante reconocer ciertas fallas de mampostería que dan indicios del comportamiento de la estructura ante problemas. A continuación, se presentan los registros fotográficos de las fisuras presentadas en la vivienda a la actualidad:



Figura 2.31. Fisuras en mampostería
Fuente: Propia (2022)

Observaciones preliminares. En base a la inspección realizada, se pudo constatar las siguientes observaciones:

- No se consideran criterios de diseño estructural.
- No se considera criterios de sismo resistencia.
- Las columnas de hormigón no presentan desplome o deformación residual.
- Existen elementos estructurales y no estructurales que no se encuentran en buen estado, existen varios elementos con desgaste, segregación y desprendimiento del recubrimiento de hormigón.
- Existen áreas de mampostería que deberán ser liberadas y remplazadas. Al ser la mampostería de bloque no es recomendable cerrar las fisuras con un engrampado.
- Existe irregularidad por la columna apeada, el cual repercute en una alta vulnerabilidad de la estructura.

- En el caso de realizar una remodelación, es importante apuntalar la viga que soporta la columna apeada y ubicar una columna que pueda completar la continuidad, de ser posible.
- No se observa confinamiento estribos en pie y cabeza de columnas, ni en extremos de vigas, como indica la norma ecuatoriana de construcción NEC-SE-2015.
- Se considera que las columnas tienen una sección inferior para una vivienda de 3 pisos, según la norma ecuatoriana NEC-SE-2015.
- El sistema de losas de bloque con perfiles omega no cumple estándares de diseño estructural sismo resistente, según la norma ecuatoriana NEC-SE-2015.
- Varias uniones viga columna de la estructura se encuentran perforados por tuberías y con segregación de hormigón.
- Se siente vibración en la estructura, pese a que actualmente solo soporta el peso propio de la obra gris, sin acabados y sin carga viva de ocupación.

CAPITULO 3: MODELACION EN PROGRAMAS COMPUTACIONALES

3.1. Programas computacionales y hojas electrónicas de fibra de carbono

Si de software para análisis estructural y diseño de estructuras hablamos, en el mercado existen varios como CYPE Ingenieros, SAP2000, Autodesk Robot, Tekla Structures, ETABS, entre otros. Elegir el software adecuado es una de las partes más importantes para el proceso constructivo debido a que debemos saber cómo funciona el mismo para asegurar la resistencia de la estructura a las cargas aplicadas y acciones que será sometida en su vida útil.

El software ayuda y facilita en gran medida al usuario a realizar las operaciones de diseño y rehabilitación de estructuras, por lo cual el manejo del mismo debe ser apoyado con los conocimientos y teoría necesaria para sacarle provecho y entender las diferentes posibilidades de comportamiento en la estructura.

3.2. CYPE Ingenieros

Para este proyecto de investigación fue necesaria la utilización de programas computacionales. Por lo que se optó por utilizar el programa CYPE Ingenieros, el cual es un software elaborado por una empresa española con más de 40 años de experiencia en diferentes campos estructurales (CYPE , 2022).

Se decidió usar este programa por su facilidad de ingreso y obtención de datos, siendo un software muy didáctico y práctico para entender el comportamiento de la estructura, a más de que este programa lo aprendimos y usamos en varias asignaturas a lo largo de la carrera.

El software contiene varias ramas dentro de su interfaz, tales como CYPECAD que se usa principalmente para el análisis, dimensionamiento y reforzamiento de proyectos de viviendas y edificios de hormigón armado obteniendo listados y planos; CYPE 3D el cual es un programa que

analiza estructuras de manera tridimensional que a diferencia del anterior, en este se introducen barras, mas no columnas o vigas; ARQUIMEDES que funciona como una herramienta de gestión para realizar presupuestos, mediciones, documentos técnicos y control de obra durante el proceso de construcción. Así además existen varios programas dentro de CYPE Ingenieros listos para poner en práctica en la arquitectura, ingeniería y construcción.

3.3. Ingreso de datos

Dentro de CYPECAD se ingresa la estructura con los datos obtenidos en campo y así entender cómo funciona la misma. Se le brinda los datos que se conocen como armadura, secciones y la carga que se va a ocupar que en este caso será la carga designada por la Norma Ecuatoriana de la Construcción para Viviendas.

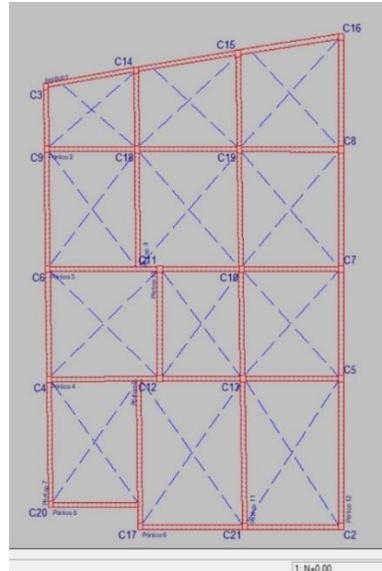


Figura 3.1. Modelo estructural de la vivienda
Fuente: Propia (2022)



Figura 3.2. Modelo estructural de la vivienda

Fuente: Propia (2022)

**Figura 3.3.** Vista en planta del Nivel I N+0.00

Fuente: Propia (2022)

3.4. Obtención de información

Para proceder al cálculo y diseño del reforzamiento de fibras de carbono, necesitamos conocer diversos datos y obtenerlos del programa CYPECAD.

Debemos analizar la estructura en su totalidad. Todos sus elementos estructurales como columnas y vigas tienen esfuerzos que soportar a lo largo de su vida útil, por lo cual, debemos seleccionar el peor escenario posible en el edificio puesto que en este escenario se pueden dar los fallos más grandes porque su momento y cortante tienen un valor mayor.

Se han separado las vigas por familias tipo, puesto que por sección y armado son iguales. Además por longitud y vanos, muchas son similares en su longitud y configuración. Por lo cual las familias tipo quedaron de la siguiente manera:

Tabla 3.1. Vigas por familias tipo

Familias		Momento máx (Kn.m)	Cortante máx (Kn)
Tipo 1	Pórtico 1	15,43	29,9
Tipo 2	Pórtico 4	23,49	79,68
Tipo 3	Pórtico 9	23,27	74,27
Tipo 4	Pórtico 11	24,57	90,14
Tipo 5	Pórtico 6	23,27	48,09

Fuente: Propia (2022)

Donde:

- Tipo 1 incluye al pórtico 1.
- Tipo 2 incluye a los pórticos 2, 3, 4.
- Tipo 3 incluye a los pórticos 5, 9, 10.
- Tipo 4 incluye a los pórticos 7, 11, 12.
- Tipo 5 incluye a los pórticos 6, 8.

Una vez separadas las vigas en 5 tipos distintos, se analiza primero el listado de esfuerzos y armados de vigas y seleccionamos las más desfavorables para cada tipo. Ejemplo:

Tipo 1.

Pórtico 1. Nivel 3 N+6.10.

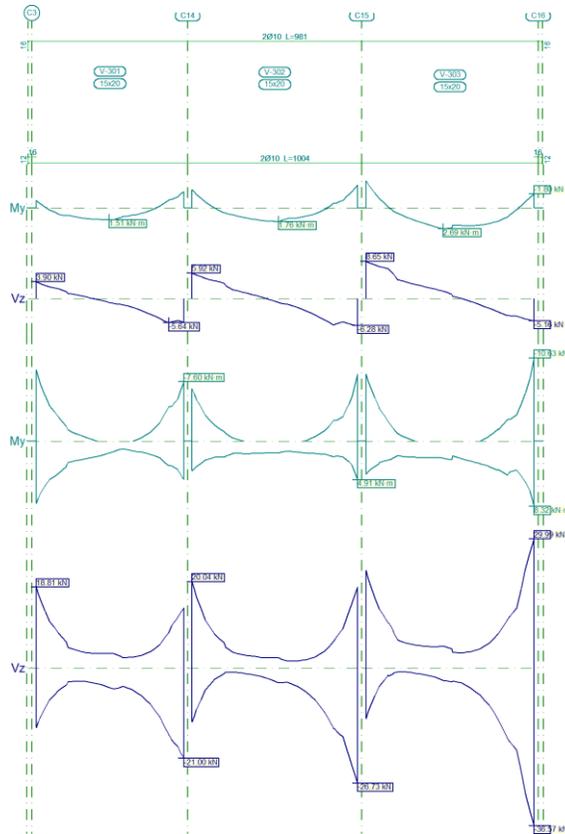


Figura 3.4. Análisis del pórtico 1
Fuente: Propia (2022)

Tabla 3.2. Análisis del pórtico 1

Pórtico 1			Tramo: V-301			Tramo: V-302			Tramo: V-303		
Sección			15x20			15x20			15x20		
Zona			1/3L	2/3L	3/3L	1/3L	2/3L	3/3L	1/3L	2/3L	3/3L
Situaciones persistentes o transitorias	Momento mín.	[kN·m]	-0.93	--	-2.11	-2.31	--	-2.90	-3.45	--	-1.80
	x	[m]	0.00	--	2.72	0.00	--	3.06	0.00	--	3.10
	Momento máx.	[kN·m]	1.27	1.51	0.84	1.30	1.76	1.07	1.85	2.69	2.22
	x	[m]	0.83	1.34	1.85	1.01	1.60	2.11	1.01	1.43	2.10
	Cortante mín.	[kN]	--	-1.96	-5.64	--	-2.41	-6.28	--	-1.04	-5.16
	x	[m]	--	1.76	2.44	--	2.02	3.06	--	2.02	3.10
Cortante máx.	[kN]	3.90	0.39	--	5.92	1.03	--	8.65	2.78	--	

Pórtico 1			Tramo: V-301			Tramo: V-302			Tramo: V-303			
Sección			15x20			15x20			15x20			
Zona			1/3L	2/3L	3/3L	1/3L	2/3L	3/3L	1/3L	2/3L	3/3L	
	x	[m]	0.00	0.92	--	0.00	1.09	--	0.00	1.09	--	
	Torsor mín.	[kN]	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	x	[m]	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	Torsor máx.	[kN]	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	x	[m]	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Situaciones sísmicas	Momento mín.	[kN·m]	-9.12	--	-7.60	-6.73	--	-8.58	-8.59	--	-10.63	
	x	[m]	0.00	--	2.72	0.00	--	3.06	0.00	--	3.10	
	Momento máx.	[kN·m]	7.92	2.23	4.91	3.78	1.57	4.91	4.21	2.68	8.32	
	x	[m]	0.00	0.92	2.72	0.00	1.09	3.06	0.00	2.02	3.10	
	Cortante mín.	[kN]	-13.80	-5.01	21.00	12.49	-4.84	26.73	11.70	-5.48	36.57	
	x	[m]	0.00	1.76	2.72	0.00	2.02	3.06	0.00	2.02	3.10	
	Cortante máx.	[kN]	18.81	3.64	13.97	20.04	2.82	18.81	22.67	5.13	29.99	
	x	[m]	0.00	0.92	2.72	0.00	1.09	3.06	0.00	1.43	3.10	
	Torsor mín.	[kN]	-0.69	--	--	--	--	--	-0.56	--	-0.65	
	x	[m]	0.00	--	--	--	--	--	0.00	--	2.95	
	Torsor máx.	[kN]	0.96	--	--	0.64	--	--	0.89	--	--	
	Área Sup.	[cm ²]	Real	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
			Nec.	2.24	0.82	1.38	1.77	0.82	1.58	2.13	0.82	2.55
	Área Inf.	[cm ²]	Real	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
			Nec.	2.00	0.82	0.87	1.22	0.82	0.87	1.30	0.82	2.08
Área Transv.	[cm ² /m]	Real	31.40	19.63	19.63	31.40	19.63	19.63	31.40	19.63	19.63	
		Nec.	3.80	1.02	4.25	4.05	1.02	5.41	4.58	1.02	7.40	
F. Activa			0.30 mm, L/8958 (L: 2.72 m)			0.30 mm, L/9608 (L: 2.92 m)			0.73 mm, L/4269 (L: 3.10 m)			

Fuente: Propia (2022)

De la misma manera, se agrupan en diferentes familias tipo a las columnas puesto que tienen la misma sección y armado similar, por lo cual trabajarían de manera similar y para simplificar el análisis y ser más eficientes en el mismo, se los agrupa de la siguiente manera.

Tabla 3.3. Columnas por familias tipo

Familias		N (Kn)	Mxx (Kn.m)	Myy (Kn.m)	Qx (kN)	Qy (kN)
Tipo 1	C17	125,2	-13,2	37,2	-12,5	-8,9
Tipo 2	C21	188,3	12,2	73,4	24,7	-7,4
Tipo 3	C12	245,9	11,5	61,9	21,3	3,3
Tipo 4	C19	318,1	-32,9	23,4	10,8	13,3

Fuente: Propia (2022)

Donde:

- Tipo 1 incluye a las columnas C2, C3, C16, C17, C20.
- Tipo 2 incluye a las columnas C4, C5, C6, C7, C8, C9, C14, C15, C21.
- Tipo 3 incluye a las columnas C11, C12.
- Tipo 4 incluye a las columnas C10, C13, C18, C19.

Al igual que en las vigas, se seleccionaron en las familias tipo a las columnas más desfavorables o las que reciben mayor carga para poder reforzarlas. Para pre-dimensionar columnas según la norma American Concrete Institute 318 (2019) “la dimensión menor de la sección transversal, medida en una línea recta que pasa a través del centroide geométrico, no debe

ser menor de 30cm” (p. 155). Esto aplica para columnas rectangulares y circulares. Entonces, se debe tomar en cuenta que las columnas existentes no cumplen con la sección mínima. La columna tipo seleccionada contiene los siguientes datos:

Columna Tipo 1.

Columna C17

Tabla 3.4. Análisis de columna tipo 1

Sección de hormigón																						
Tramo	Dimensión (cm)	Posición	Comprobaciones							Esfuerzos pésimos						Estado						
			Disp.	Arm.	Q (%)	N, M (%)	Sism.	Disp. S.	Cap.	Aprov. (%)	Naturaleza	Comp.	N (kN)	Mxx (kN·m)	Myy (kN·m)		Qx (kN)	Qy (kN)				
N+8.95 (6.1 - 8.95 m)	15x20	Cabeza	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	27.8	64.4	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	27.2	3.2	0.6	-	-	0.6	3.2	No cumple		
			G, Q ⁽⁸⁾	Q	29.1	3.6	0.7	-	-	0.8	3.9											
			G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.	25.6	2.3	5.7	-	-	5.4	2.2											
		8.25 m	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	43.8	111.9	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	29.9	-5.8	-1.2	-	-	0.6	3.2	No cumple		
			G, Q, S ⁽⁹⁾	Q S.,N,M S.	27.9	-4.0	-9.9	-	-	5.4	2.2											
		6.6 m	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	43.8	111.9	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	29.9	-5.8	-1.2	-	-	0.6	3.2	No cumple		
			G, Q, S ⁽⁹⁾	Q S.,N,M S.	27.9	-4.0	-9.9	-	-	5.4	2.2											
		Pie	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	27.4	111.9	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	No cumple ⁽⁵⁾	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. Q (H)	29.9	-5.8	-1.2	-	-	0.6	3.2	No cumple		
			G, Q ⁽⁸⁾	Q	31.5	-7.3	-1.5	-	-	0.8	3.9											
			G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.	27.9	-4.0	-9.9	-	-	5.4	2.2											
		N+6.10 (3.25 - 6.1 m)	15x20	Cabeza	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	63.5	176.6	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	No cumple ⁽⁶⁾	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. N,M (H)	70.6	9.0	2.0	-	-	1.2	6.0	No cumple
					G, Q, S ⁽¹⁰⁾	Q S.	66.6	13.0	-	-	11.4	6.2	8.9									
G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.				69.8	5.5	16.0	-	-	8.8	3.5											
5.4 m	No cumple ⁽¹⁾			Cumple	62.6	157.9	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	73.3	-9.3	-2.0	-	-	1.2	6.0	No cumple		
	G, Q, S ⁽¹⁰⁾			Q S.,N,M S.	68.1	-	13.2	9.8	6.5	-	8.5											
3.75 m	No cumple ⁽¹⁾			Cumple	62.6	157.9	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	73.3	-9.3	-2.0	-	-	1.2	6.0	No cumple		
	G, Q, S ⁽¹⁰⁾			Q S.,N,M S.	68.1	-	13.2	9.8	6.5	-	8.5											
Pie	No cumple ⁽¹⁾			Cumple	62.6	157.9	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	No cumple ⁽⁵⁾	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. Q (H)	73.3	-9.3	-2.0	-	-	1.2	6.0	No cumple		
	G, Q, S ⁽¹⁰⁾			Q S.,N,M S.	68.1	-	13.2	9.8	6.5	-	8.5											
N+3.25 (0 - 3.25 m)	15x20			Cabeza	Cumple	73.6	368.5	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. N,M (H)	113.5	6.9	4.2	-	-	0.5	2.6	No cumple		

Sección de hormigón																			
Tramo	Dimensión (cm)	Posición	Comprobaciones								Esfuerzos pésimos						Estado		
			Disp.	Arm.	Q (%)	N, M (%)	Sism.	Disp. S.	Cap.	Aprov. (%)	Naturalidad	Comp.	N (kN)	Mxx (kN·m)	Myy (kN·m)	Qx (kN)		Qy (kN)	
	2.542 m	No cumple ⁽¹⁾	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	72.8	360.6	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	No cumple ⁽⁵⁾	No cumple ⁽⁶⁾	No cumple	G, S ⁽¹¹⁾	Q S.	68.6	7.6	-25.0	11.7	-3.4	No cumple
												G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.	114.3	3.3	37.2	-12.5	-0.9	
												G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. Q (H)	116.6	-3.9	-4.4	-0.5	-2.6	
		G, S ⁽¹¹⁾	Q S.	70.6	-4.6	25.2	11.7	-3.4											
		G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.	116.9	-3.4	-36.3	-12.5	-0.9											
		G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	116.6	-3.9	-4.4	-0.5	-2.6											
	0.508 m	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	72.8	360.6	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	116.6	-3.9	-4.4	-0.5	-2.6	No cumple		
										G, S ⁽¹¹⁾	Q S.	70.6	-4.6	25.2	11.7	-3.4			
										G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.	116.9	-3.4	-36.3	-12.5	-0.9			
	Pie	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	72.8	360.6	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	No cumple ⁽⁵⁾	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. Q (H)	116.6	-3.9	-4.4	-0.5	-2.6	No cumple		
										G, S ⁽¹¹⁾	Q S.	70.6	-4.6	25.2	11.7	-3.4			
										G, Q, S ⁽⁹⁾	N,M S.	116.9	-3.4	-36.3	-12.5	-0.9			
N+0.00 (-1 - 0 m)	15x20	Cabeza	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	54.2	64.3	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	Cumple	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.	124.4	1.3	0.4	-0.8	-2.5	No cumple	
											G, S ⁽¹¹⁾	Q S.	70.0	0.7	5.2	8.8	-2.2		
											G, Q, S ⁽¹²⁾	N,M S.	100.1	10.5	0.3	0.7	-1.4		
	Pie	No cumple ⁽¹⁾	Cumple	54.1	126.4	No cumple ⁽⁴⁾	Cumple	No cumple ⁽⁵⁾	No cumple	G ⁽⁷⁾	Disp.,Sism.,Cap. Q (H)	125.2	-0.7	-0.2	-0.8	-2.5	No cumple		
										G, S ⁽¹¹⁾	Q S.	70.5	-1.0	12.2	8.8	-2.2			
										G, Q, S ⁽¹⁰⁾	N,M S.	110.8	-1.2	12.1	8.5	-2.9			
Cimentación	15x20	Arranque	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽³⁾	126.4	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	126.4	G, Q, S ⁽¹⁰⁾	N,M S.	110.8	-1.2	12.1	8.5	-2.9	No cumple	

Notas:
⁽¹⁾ No cumple: 'Disposiciones relativas a las armaduras' (Armado longitudinal)
⁽²⁾ La comprobación no procede
⁽³⁾ La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.
⁽⁴⁾ No cumple: 'Criterio de diseño por sismo' (Geometría, Armadura transversal)
⁽⁵⁾ No cumple: 'Cortante de diseño para columnas.'
⁽⁶⁾ No cumple: 'Resistencia mínima a flexión de columnas.'
⁽⁷⁾ 1.4·PP+1.4·CM
⁽⁸⁾ 1.2·PP+1.2·CM+1.6·Qa
⁽⁹⁾ 1.2·PP+1.2·CM+0.5·Qa-SX
⁽¹⁰⁾ 1.2·PP+1.2·CM+0.5·Qa+SX
⁽¹¹⁾ 0.9·PP+0.9·CM+SX
⁽¹²⁾ 1.2·PP+1.2·CM+0.5·Qa+SY

Fuente: Propia (2022)

3.4.1 Acero de refuerzo

Para iniciar el cálculo y diseño del refuerzo con fibras de carbono, se debe partir desde el acero mínimo en columnas y vigas. El acero una vez se combina con el concreto, forma un material conocido como hormigón armado el cual es conocido por resistir la flexo compresión. La unión de estos dos materiales es ideal ya que el hormigón tiene la capacidad de resistir esfuerzos a compresión y el acero proporciona propiedades ideales para resistir esfuerzos de tracción.

En este caso, se conoce por el dueño del edificio y los resultados del escáner de armados que las columnas y vigas están fundidas con malla electro-soldada V7, contando con una varilla de refuerzo en cada cara en el caso de las columnas.

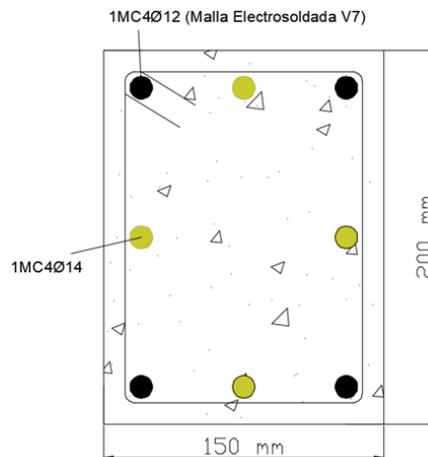


Figura 3.5. Sección transversal de las columnas
Fuente: Propia (2022)

CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Diseño del refuerzo de las fibras de carbono.

Las fibras de carbono se han implementado en la construcción en los últimos años por tener beneficios a corto y largo plazo, tales como: velocidad de instalación, poca mano de obra, menos área de ocupación y entre otras, las cuales hacen que se haya dado uso a este material de manera efectiva. Para el diseño del refuerzo de las fibras de carbono en vigas y columnas, se toman todos los datos de esfuerzos y momentos adquiridos del programa estructural con anticipación.

Se ha comprobado dentro de CYPE Ingenieros que hay elementos estructurales como columnas y vigas las cuales no cumplen con las comprobaciones mínimas de diseño para que la estructura sea considerada como sismo resistente. Por lo cual, se planteó el uso de fibras de carbono como una alternativa para poder brindar una solución rápida y segura.

Como ya se mencionó en el capítulo 1, la estructura que sea reforzada por Fibras de Carbono (FRP) debe tener una capacidad de resistencia mínima dado el caso de vandalismo, incendio u otros y las fibras sean sustraídas o dejen de trabajar con la estructura, esta no colapse (ACI 440, 2014). En este caso la estructura no presenta colapsos por el hecho de que no ha estado en uso desde su construcción pero el propietario desea trasladarse al edificio para usarlo como vivienda y local comercial, entonces presentaría problemas al momento de comenzar su uso. Como ya sabemos, Todos los materiales de fibras tienen factores de reducción respecto a su exposición al medio ambiente. Estos factores se dividen en 3: Exposición interior, exposición exterior y exposición en ambiente agresivos.

4.1.1. Diseño de refuerzo con fibra de carbono en columnas

En el capítulo 3 se obtuvo la información sobre las columnas en el programa CYPE Ingenieros y se obtuvo un listado de esfuerzos donde se pudo corroborar que ninguna columna cumple con los estándares mínimos de diseño y tampoco soportan las cargas que se van a aplicar en la estructura.

Como ya se mencionó en el capítulo 1, se debe conocer la capacidad nominal de la columna a reforzar y para obtener estos datos se usó el software CYPE Ingenieros, el cual usa la teoría basada en la norma ACI 440, en la cual se menciona la capacidad de una columna de concreto viene dado por la siguiente fórmula:

$$\phi P_n = 0.8\phi[0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s] \quad (\text{Ecu. 4.1})$$

Donde:

P_n = Capacidad nominal de la columna.

φ = Coeficiente de reducción.

f'c = Resistencia a compresión del hormigón.

A_g = Area de la sección.

A_s = Area de acero.

f_y = Límite a fluencia del acero.

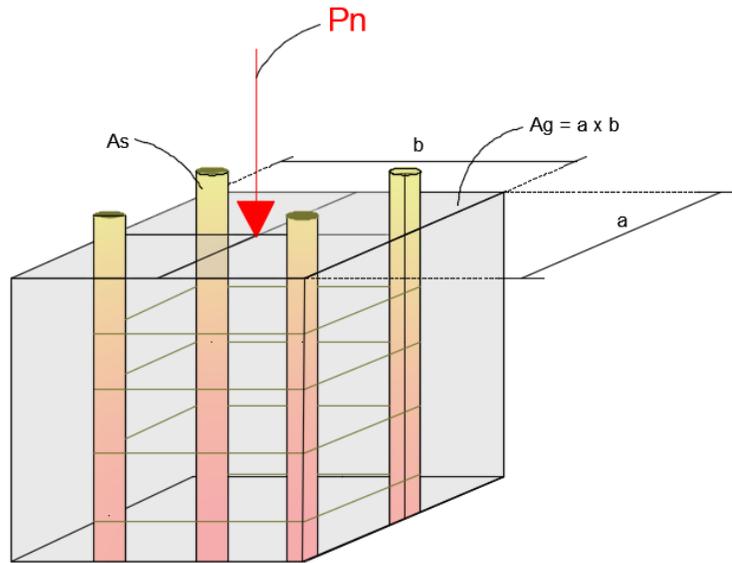


Figura 4.1. Capacidad nominal de la columna
 Fuente: Propia (2022)

Dicha fórmula se trabaja cuando la columna se encuentra a flexión y en este proyecto entrará en funcionamiento en la gráfica de la columna sin reforzar. Sin embargo hay que comprender que toda estructura va a estar sujeta a cargas laterales y verticales como se observa en la siguiente ilustración.

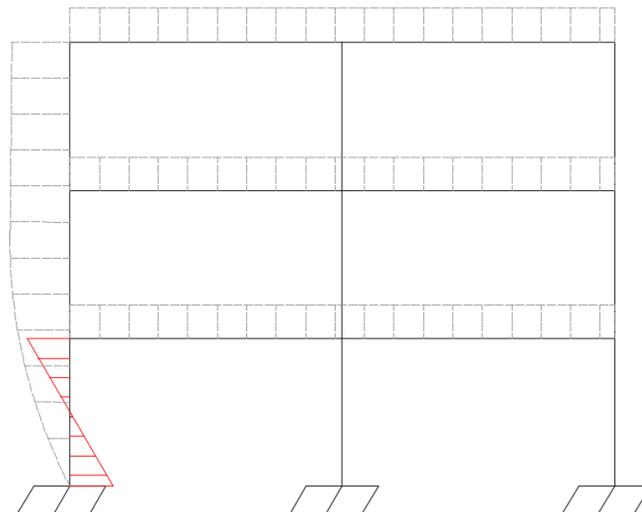


Figura 4.2. Pórtico sujeto a cargas verticales y horizontales
Fuente: Propia (2022)

Se observa que las columnas trabajan con una combinación de esfuerzos axiales y flexión. Entonces si lo separamos de la estructura como una columna tipo, se tiene una columna con las siguientes solicitaciones.

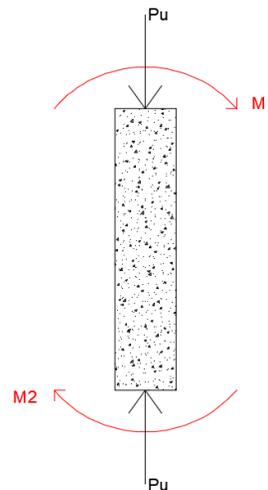


Figura 4.3. Solicitaciones que actúan en la columna
Fuente: Propia (2022)

La columna tipo tiene una carga P_u que es la solicitación axial producto de las cargas mayoradas como exige la Norma Ecuatoriana de la Construcción. M_1 y M_2 son los momentos mayorados en los extremos de la columna, tomando el más desfavorable. El valor mayor de momento se le denomina M_u . Entonces, M_u y P_u son los momentos y cargas solicitantes en la columna, los cuales deben cumplir dentro del diagrama de interacción. El diagrama de interacción nos muestra la resistencia nominal de la columna (línea azul) donde las abscisas representan a los momentos y las ordenadas a la carga axial.

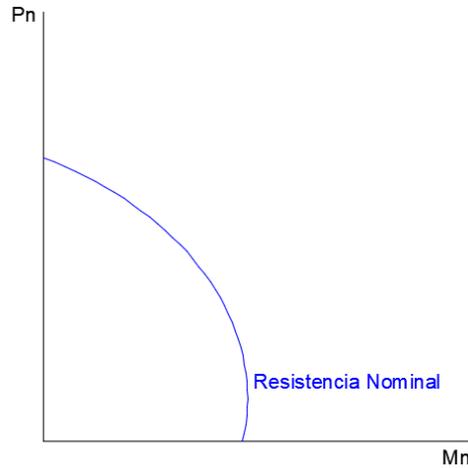


Figura 4.4. Diagrama de interacción de una columna tipo
 Fuente: Propia (2022)

Entonces al ingresar el par de datos M_u y P_u , nos va a indicar si las cargas que van a soportar las columnas van a estar dentro del rango de su resistencia, por lo cual si el punto con el par ordenado se encuentra bajo o dentro de la gráfica azul, significa que la columna si es capaz de resistir las cargas consideradas. De lo contrario, si el punto con el par ordenado M_u y P_u está fuera de la gráfica de resistencia nominal, significa que la columna no es capaz de resistir esas cargas y fallaría, por lo tanto dicha columna necesita ser reforzada estructuralmente de alguna manera.

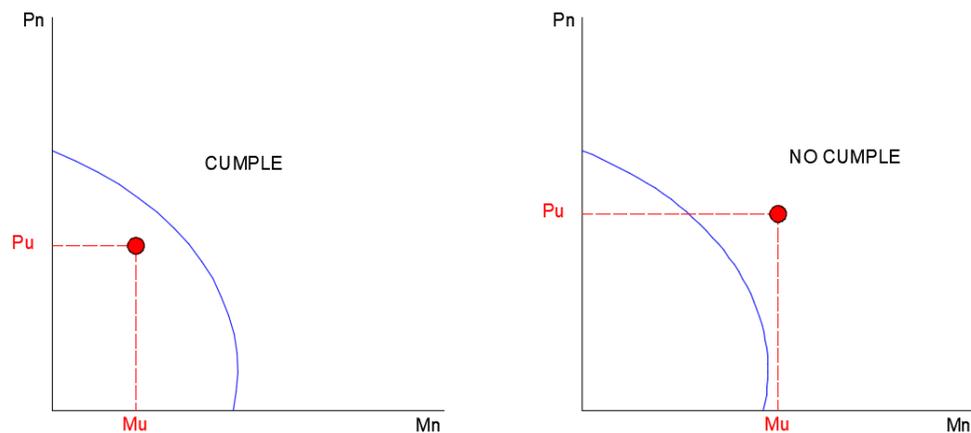


Figura 4.5. Diagrama de interacción de dos columnas con distintos M_u y P_u
 Fuente: Propia (2022)

Para este caso de estudio se decidió reforzar a la estructura con fibra de carbono, lo cual hace que el diagrama de interacción de las columnas cambie, puesto que adicional a la curva de resistencia nominal debemos añadir una curva de resistencia por el refuerzo con fibra de carbono, la cual da un área más amplia para que las solicitaciones puedan ser cubiertas en su totalidad.

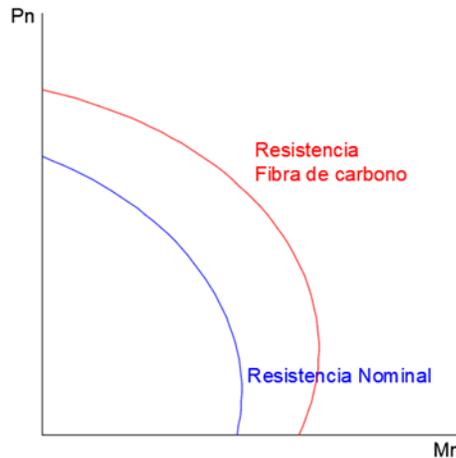


Figura 4.6. Diagrama de interacción de una columna con refuerzo de FRP
Fuente: Propia (2022)

La norma ACI 440 especifica que cuando hay efecto de confinamiento utilizando el manto de fibras de carbono en las columnas, la resistencia a la compresión se incrementa. A medida que avanza el confinamiento la resistencia sube, ayudando al elemento estructural (ACI 440, 2014).

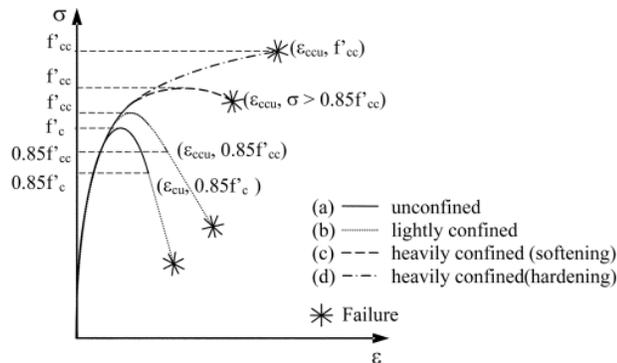


Figura 4.7. Comportamiento de esfuerzo-deformación de columnas no confinadas y confinadas
Fuente: ACI 440 (2014)

En la norma se menciona que los investigadores Lam y Teng's hicieron un ensayo con varias secciones con la teoría del confinamiento para poder estimar la resistencia en columnas las cuales se han adaptado al ACI 440 para el desarrollo de la norma, llegando a la misma conclusión de que las columnas tienen una resistencia mayor cuando se le confina su sección (ACI 440, 2014). En la siguiente imagen se aprecia claramente un diagrama de interacción de una columna sin confinamiento y la misma columna con un confinamiento propuesto, apreciando como mejora la capacidad de carga axial por el confinamiento.

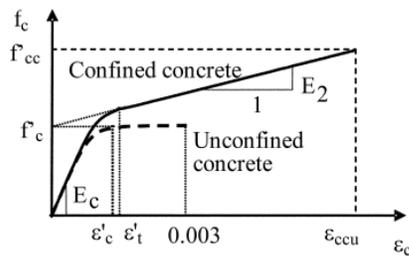


Figura 4.8. Modelo de esfuerzo-deformación para hormigón confinado con FRP
 Fuente: ACI 440 (2014)

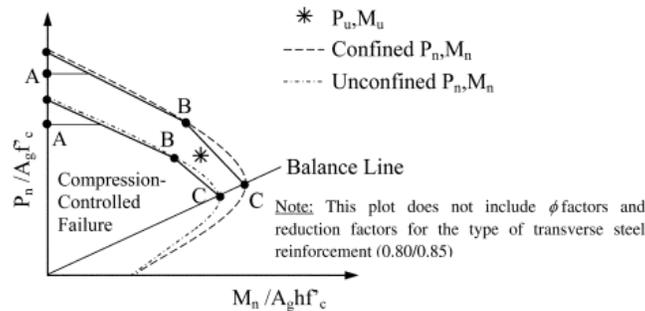


Figura 4.9. Diagrama de interacción
 Fuente: ACI 440 (2014)

Este efecto de confinamiento utilizando los mantos de fibra de carbono tiene resultados positivos para secciones circulares, elípticas, cuadradas y rectangulares con la condición de que la relación largo/ancho no exceda de 2, por lo tanto si $(h/b > 2)$ el confinamiento no es eficiente (ACI 440, 2014).

4.2. Uso del programa SIKA Carbodour

4.2.1 Ingreso de datos

Las hojas electrónicas de Sika requieren del ingreso de varios datos, algunos de los cuales son comunes en todas las columnas:

- Longitud de la base: 200 [mm] ^2
- Longitud del peralte: 150 [mm] ^2
- Radio de las esquinas: 25 [mm] ^2

Información del acero existente.

- Tipo de estribo: Tied – Rectangular.
- Area de acero de la capa 1: 380.13 [mm] ^2
- Area de acero de la capa 2: 307.88 [mm] ^2
- Area de acero de la capa 3: 380.13 [mm] ^2
- Distancia desde la fibra extrema a compresión del concreto a la primera capa de refuerzo:
25 mm
- Distancia desde la fibra extrema a compresión del concreto a la segunda capa de refuerzo:
100 mm
- Distancia desde la fibra extrema a compresión del concreto a la tercera capa de refuerzo:
175 mm

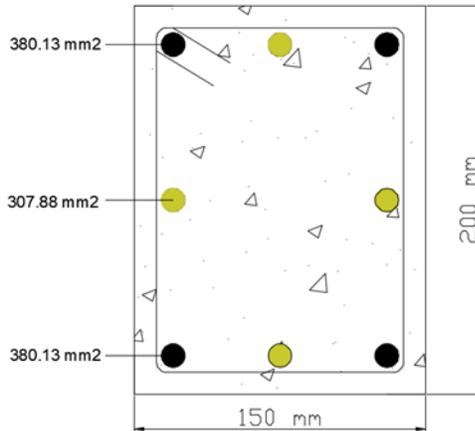


Figura 4.10. Sección transversal de las columnas
Fuente: Propia (2022)

Propiedades de la sección transversal.

- Esfuerzo de fluencia del acero (F_y) = 420 MPa.
- Módulo de elasticidad del acero (E_s) = 200000 MPa.
- Esfuerzo a compresión del concreto (f'_c) = 24 MPa.
- Deformación unitaria máxima del concreto sin confinar correspondiente a f'_c = 0.0018.
- Módulo de elasticidad del concreto = 23025 MPa.
- Propiedades del sistema FRP
- SikaWrap Hex 103C.
- Ambiente: Interior.

Las propiedades y datos desde este punto comienzan a variar dependiendo de cada columna, para las cuales tomamos los 4 tipos de familias mencionadas anteriormente. En este apartado, se indica el método de cálculo con una de las columnas más solicitadas en carga, la cual fue la columna C17 de la familia tipo 1.

Tipo 1

Columna C17**Tabla 4.1.** Columna C17 de la familia tipo 1 listado de cargas y momentos

Esfuerzos pésimos						Pésima	Aprov. (%)	Estado
Naturaleza	N (kN)	M _{xx} (kN·m)	M _{yy} (kN·m)	Q _x (kN)	Q _y (kN)			
G, Q, S	116.9	-3.4	-36.3	-12.5	-0.9	N,M S.	360.6	No cumple

Fuente: Propia (2022)

- PDL = 58.5 KN - Carga axial muerta (sin mayorar)
- PLL = 58.5 KN - Carga axial viva (sin mayorar)
- MDL = -3.4 KN-m - Momento de carga muerta (sin mayorar)
- MLL = -36.3 KN-m - Momento de carga viva (sin mayorar)

Para iniciar el diseño de reforzamiento estructural con fibra de carbono se debe comprender a la columna de hormigón armado, para la cual elaboraremos un diagrama de interacción con su resistencia nominal y luego con el reforzamiento para corroborar si las solicitaciones se encuentran dentro de las curvas de resistencia.

4.2.2. Chequeo de cargas y de la sección sin reforzarCarga axial a compresión requerida.

$$P_u = 1.2 P_{DL} + 1.6 P_{LL} = 165.2 \text{ kN} \quad (\text{Ecu. 4.2})$$

Momento total requerido.

$$M_u = 1.2 M_{DL} + 1.6 M_{LL} = 62.16 \text{ kN} \quad (\text{Ecu. 4.3})$$

4.2.3 Cálculo de los puntos del diagrama de interacción simplificado

Determinación de la curva simplificada para la columna sin reforzamiento.

Punto A´.

- Esfuerzo a compresión $f'c$: 24 MPa
- Deformación unitaria máxima: 0.003
- Capacidad axial nominal: 540 Kn

$$\phi Pn = 0.8\phi[0.85f'c(Ag - As) + fyAs] = \mathbf{540 Kn} \quad (\text{Ecu. 4.5})$$

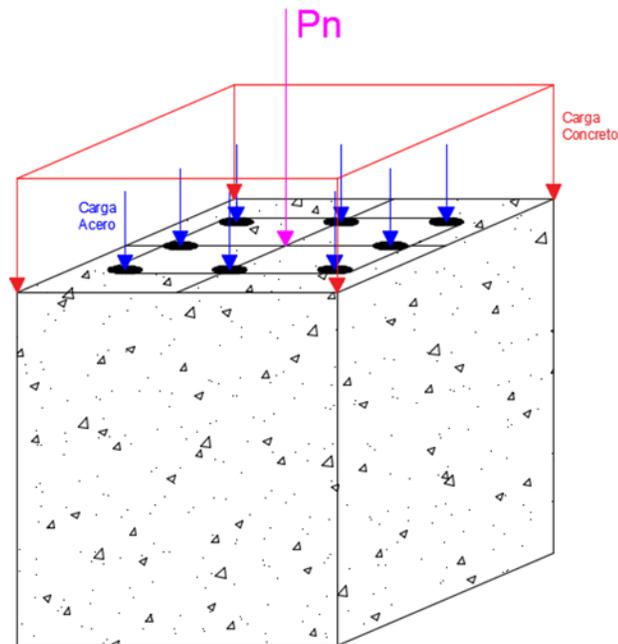


Figura 4.11. Cargas actuantes en la sección de la columna
Fuente: Propia (2022)

Momento nominal:

$$\Phi Mn(A) = \mathbf{0 Kn.m}$$

Punto B´.

Pendiente de la porción lineal del modelo esfuerzo-deformación para el concreto confinado con FRP.

$$E_2 = \frac{2f'_c}{\epsilon_{ccu}} = 0 Mpa \quad (\text{Ecu. 4.6})$$

Transición de la deformación unitaria en la curva esfuerzo-deformación.

$$E'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} = 0.0021 \quad (\text{Ecu. 4.7})$$

$$c = d = 175 \text{ mm}$$

$$y_t = c \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \quad (\text{Ecu. 4.8})$$

Deformaciones unitarias en cada capa de acero y los esfuerzos correspondientes determinados por triángulos semejantes en la distribución de deformaciones.

Deformaciones unitarias.

$\varepsilon_{s1} =$	0,00257
$\varepsilon_{s2} =$	0,00129
$\varepsilon_{s3} =$	0,00300

Esfuerzos.

$f_{s1} =$	420,0	MPa
$f_{s2} =$	257,1	MPa
$f_{s3} =$	420,0	MPa

Una vez calculados todos estos factores se resuelven los siguientes coeficientes.

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2 = -8.11E_{-0.5} \text{ kN/mm}^3 \quad (\text{Ecu. 4.9})$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right) = 0.03 \text{ kN/mm}^2 \quad (\text{Ecu. 4.10})$$

$$C = -bf'_c = -3.6 \text{ kN/mm} \quad (\text{Ecu. 4.11})$$

$$D = bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\varepsilon_{ccu}) = 630 \text{ kN} \quad (\text{Ecu. 4.12})$$

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2 = -6.09E_{-0.5} \text{ kN/mm}^3 \quad (\text{Ecu. 4.13})$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right) = 2.58E_{-0.2} \text{ kN/mm}^2 \quad (\text{Ecu. 4.14})$$

$$G = -\left[\frac{b}{2}f'_c + b \left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{E_c - E_2}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)\right] = -4.02 \text{ kN/mm} \quad (\text{Ecu. 4.15})$$

$$H = bf'_c \left(c - \frac{h}{2}\right) = 270 \text{ kN} \quad (\text{Ecu. 4.16})$$

$$I = \frac{bc^2}{2}f'_c - bcf'_c \left(c - \frac{h}{2}\right) + \frac{bc^2E_2}{3}\varepsilon_{ccu} - \frac{bcE_2}{3} \left(c - \frac{h}{2}\right)\varepsilon_{ccu} = 8677 \text{ kN.mm} \quad (\text{Ecu. 4.17})$$

Ahora se reemplazan los coeficientes en las ecuaciones para obtener los dos puntos necesarios para la gráfica, así obteniendo el **Punto B'**.

$$\phi P_n(B) = \phi(A(yt)3 + B(yt)2 + C(yt) + D + \sum Asifsi) = 470 \text{ kN} \quad (\text{Ecu. 4.18})$$

$$\phi Mn(B) = \phi(E(yt)4 + F(yt)3 + G(yt)2 + H(yt) + I + \sum Asifside) = 18 \text{ kN.m} \quad (\text{Ecu. 4.19})$$

El mismo proceso del **Punto B'** se repite para el **Punto D'** obteniendo así los siguientes resultados.

Tabla 4.2. Resumen de Cargas de la Sección sin Reforzar

Punto	Carga axial nominal a compresión ϕP_n , sin reforzar (kN)	Momento a flexión nominal ϕM_n , sin reforzar (kN-m)
A'	540	0
B'	470	18
C'	189	26

Fuente: Propia (2022)

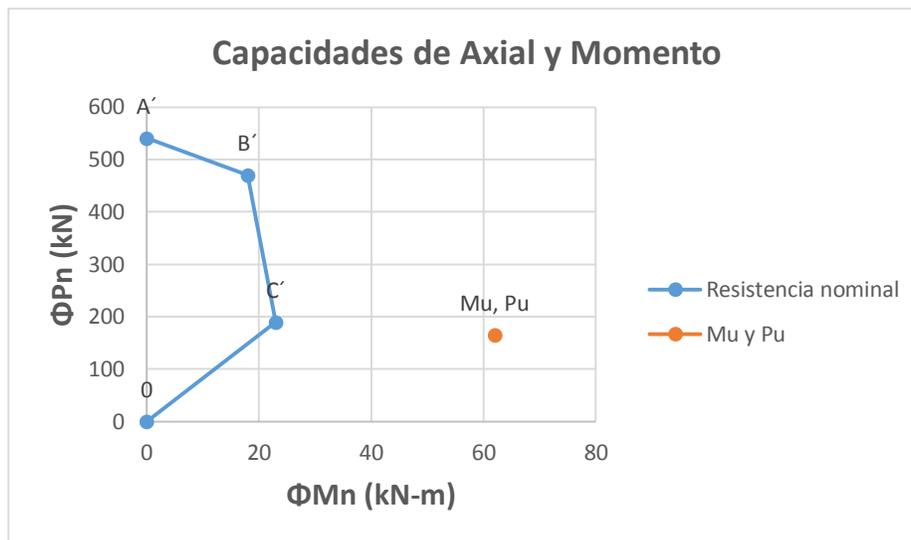


Figura 4.12. Diagrama de interacción de Cargas de la Sección sin Reforzar

Fuente: Propia (2022)

Queda evidenciado que Mu y Pu quedan fuera de la resistencia nominal por lo cual es necesario reforzar la estructura.

4.2.4. Contribución del FRP como reforzamiento estructural

Propiedades de diseño del material

Esfuerzo último a tensión.

Se multiplica el factor de reducción (C_E) por exposición ambiental al esfuerzo último que presenta la fibra de carbono.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 618.45 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.20})$$

Deformación unitaria de rotura.

Se multiplica el factor de reducción (C_E) por exposición ambiental a la deformación unitaria última que presenta la fibra de carbono.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0.0086 \quad (\text{Ecu. 4.21})$$

4.2.5. Cálculo de los puntos del diagrama de interacción simplificado para el reforzamiento con FRP

Punto A:

Para definir a A_e se necesita entender un concepto que dice que A_e consta de 4 parábolas en la sección transversal de la columna y solamente dentro de ellas el concreto está confinado en su totalidad y fuera de ellas el confinamiento es prácticamente nulo (ACI 440, 2014).

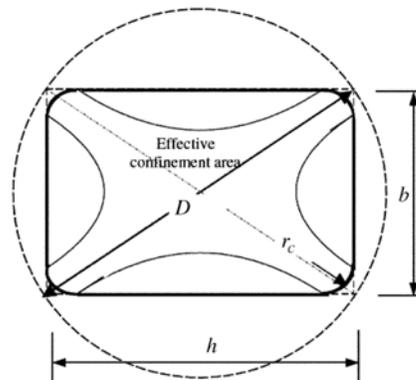


Figura 4.13. Sección transversal circular equivalente
Fuente: ACI 440 (2014)

Esta relación entre la forma de las parábolas y el área efectiva de confinamiento está en función de la dimensión de la columna (b y h), el radio en las esquinas (r_c) y la relación del acero de refuerzo longitudinal (p_g) y viene expresado de la siguiente manera (ACI 440, 2014).

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right] p_g}{3A_g - p_g} = 0.652 \quad (\text{Ecu. 4.22})$$

Factores de forma

$$K_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^2 = 0.367 \quad (\text{Ecu. 4.23})$$

$$K_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} = 0.753 \quad (\text{Ecu. 4.24})$$

Presión de confinamiento máxima debida al encamisado con FRP

$$f_l = \frac{2E_{fnt}f_{\varepsilon}f_e}{D} = 2.29 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.25})$$

Chequeo de la relación de confinamiento mínimo

En el ACI 440 se llega a la conclusión de que la relación entre la presión de confinamiento máxima debido al encamisado de FRP y la resistencia a compresión del hormigón sea mayor a 0.08 para que el confinamiento sea apropiado según la gráfica tensión-deformación.

$$\frac{f_l}{f'_c} = 0.10 > 0.08$$

Deformación unitaria efectiva

Esta deformación debe ser controlada por un factor K_e , el cual según la norma ACI 400 tiene un valor de 0.55.

$$\varepsilon_{fe} = K_e \varepsilon_{fu} = 0.00475 \quad (\text{Ecu. 4.26})$$

Esfuerzo a compresión máximo del concreto confinado

$$f'_{cc} = \psi_f 3.3 K_a f_l + f'_c = 26.63 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.27})$$

Donde el valor de K_a es el factor de forma y representa la geometría de la sección.

Capacidad axial nominal

$$\phi P_n = 0.8\phi [0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s] = 574 \text{ Kn} \quad (\text{Ecu. 4.28})$$

Momento nominal

$$\phi M_{n(A)} = 0 \text{ kN.m}$$

Punto B

Los factores de forma del punto A también se aplican en el punto B.

Deformación unitaria efectiva

El valor de ε_{fe} es limitado a 0.004 para asegurar integridad cortante del concreto confinado (ACI 440, 2014).

Presión de confinamiento máxima debida al encamisado con FRP

$$f_t = \frac{2E_{fnt}f_{fe}}{D} = 1.93 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.29})$$

Esfuerzo a compresión máximo del concreto confinado

$$f'_{cc} = \psi_f 3.3K_a f_t + f'_c = 26.21 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.30})$$

Deformación unitaria del esfuerzo a compresión máximo en el concreto reforzado con FRP

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.50 + 12k_b \frac{f_t}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) = 0.0045 < 0.01 \text{ Si cumple con la condición.} \quad (\text{Ecu. 4.31})$$

Deformación unitaria máxima del concreto sin confinar.

Este valor fue calculado al principio del diseño y está en función de la resistencia a compresión del hormigón y su módulo de elasticidad.

$$\varepsilon'_c = 0.001782$$

Pendiente de la porción lineal del modelo esfuerzo-deformación para el concreto confinado con FRP.

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} = 489 \text{ Mpa} \quad (\text{Ecu. 4.32})$$

Transición de la deformación unitaria en la curva esfuerzo-deformación.

$$E'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} = 0.0021 \quad (\text{Ecu. 4.33})$$

$$c = d = 175 \text{ mm}$$

$$y_t = c \frac{E'_t}{\varepsilon_{ccu}} = 82.25 \text{ mm} \quad (\text{Ecu. 4.34})$$

Deformaciones unitarias en cada capa de acero y los esfuerzos correspondientes determinados por triángulos semejantes en la distribución de deformaciones.

Deformaciones unitarias.

$\varepsilon_{s1} =$	0,00388
$\varepsilon_{s2} =$	0,00194
$\varepsilon_{s3} =$	0,00453

Esfuerzos.

$f_{s1} =$	420,0	MPa
$f_{s2} =$	388,4	MPa
$f_{s3} =$	420,0	MPa

Nuevamente se resuelven todos los coeficientes puntualizados en el **Punto B'** del diagrama de interacción sin reforzar y obtenemos los siguientes resultados.

$$\phi P_n(B) = \phi(A(yt)^3 + B(yt)^2 + C(yt) + D + \sum Asifsi) = 546 \text{ kN} \quad (\text{Ecu. 4.35})$$

$$\phi Mn(B) = \phi(E(yt)^4 + F(yt)^3 + G(yt)^2 + H(yt) + I + \sum Asifside) = 17 \text{ kN.m} \quad (\text{Ecu. 4.36})$$

El mismo proceso del **Punto B** se repite para el **Punto D** obteniendo así los siguientes resultados.

Tabla 4.3. Resumen de Cargas de la Sección Reforzada

Punto	Carga axial a compresión de la sección reforzada ϕP_n , sección reforzada (kN)	Momento a flexión de la sección reforzada ϕM_n , sección reforz. (kN-m)
A	574	0
B	546	17
C	277	28

Fuente: Propia (2022)

A continuación, se presenta el diagrama de Interacción mostrando las curvas simplificadas para las secciones sin reforzar y reforzada de la columna C17.

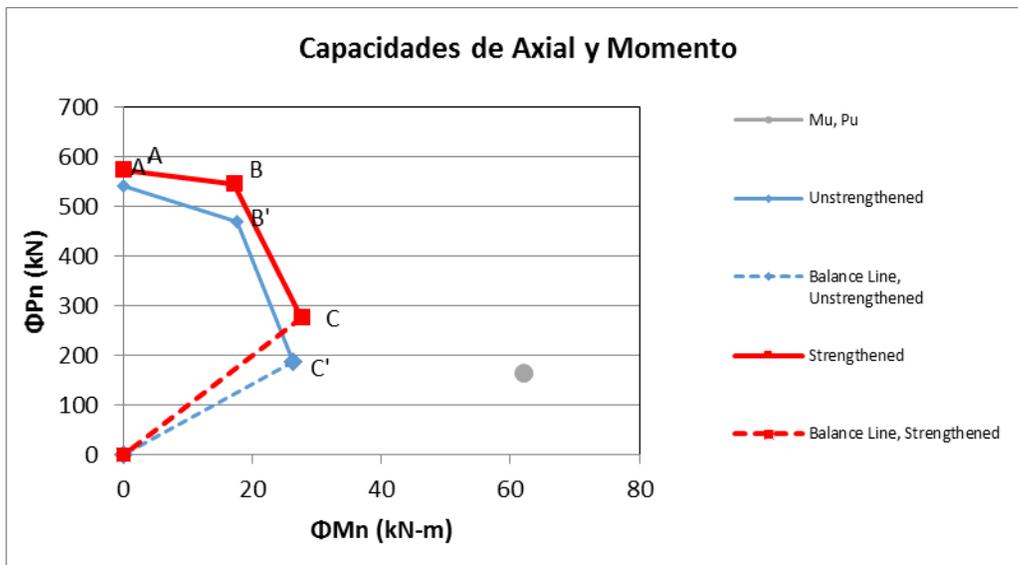


Figura 4.14. Diagrama de interacción de Cargas de la Sección Reforzada

Fuente: Propia (2022)

La curva roja representa al reforzamiento con fibra de carbono y es la que debe apoyar a la curva azul que representa la estructura para que este soporte la carga extra, pero en este caso y la

mayor parte de columnas presenta que esto no es posible. Se observa que el punto que representa el momento y carga puntual última se encuentra demasiado alejado de las curvas cuando debería estar en el interior de las mismas, por lo cual se debería acercarlo con un tipo de reforzamiento distinto, puesto que las fibras de carbono no abastecen para poder estabilizar y tener al elemento en óptimas condiciones.

Existen varias columnas las cuales no son capaces de ser reforzadas con fibra de carbono, esto debido a que sus solicitaciones son aún mayores y excede en su aprovechamiento más del 100% llegando a valores incluso mayores a 1000%, es el caso de la columna C17 de la familia Tipo 1. Este fenómeno. Ocurre en la mayor parte de columnas de esta edificación, por lo cual se decidió analizar en el programa de Sika, todas las columnas en todos sus niveles para ver su comportamiento y donde sería necesario reforzarla. Se elaboraron dos gráficas que serán presentadas a continuación para entender de mejor manera el reforzamiento de columnas.

Tabla 4.4. Columnas que necesitan reforzamiento con fibra de carbono

COLUMNAS QUE NECESITAN REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO																						
Tramo	Dimensión (cm)	Posición	COLUMNAS																			
			C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
N+8.95 (6.1 - 8.95 m)	15x20	Cabeza																				
		8.25 m																				
		6.6 m																				
		Pie																				
N+6.10 (3.25 - 6.1 m)	15x20	Cabeza																				
		5.4 m																				
		3.75 m																				
Pie																						
N+3.25 (0 - 3.25 m)	15x20	Cabeza																				
		2.542 m																				
		0.508 m																				
Pie																						
N+0.00 (-1 - 0 m)	15x20	Cabeza																				
		Pie																				
Cimentacion	15x20	Arranque																				

Necesita una capa de refuerzo de fibra de carbono
 Necesita dos capas de refuerzo de fibra de carbono

Fuente: Propia (2022)

Tabla 4.5. Columnas que necesitan incluir otra forma de reforzamiento

COLUMNAS QUE NECESITAN INCLUIR OTRA FORMA DE REFORZAMIENTO																						
Tramo	Dimensión (cm)	Posición	COLUMNAS																			
			C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
N+8.95 (6.1 - 8.95 m)	15x20	Cabeza																				
		8.25 m																				
		6.6 m																				
		Pie																				
N+6.10 (3.25 - 6.1 m)	15x20	Cabeza																				
		5.4 m																				
		3.75 m																				
		Pie																				
N+3.25 (0 - 3.25 m)	15x20	Cabeza																				
		2.542 m																				
		0.508 m																				
		Pie																				
N+0.00 (-1 - 0 m)	15x20	Cabeza																				
		Pie																				
Cimentacion	15x20	Arranque																				

 Necesita reforzamiento adicional

Fuente: Propia (2022)

La columna apeada que nace del primer entrepiso mencionada anteriormente, no se considera como elemento estructural resistente a fuerza horizontal como indica la Norma ecuatoriana de la construcción NEC-SE-DS. En donde la edificación presenta irregularidad vertical al tener el eje discontinuo.

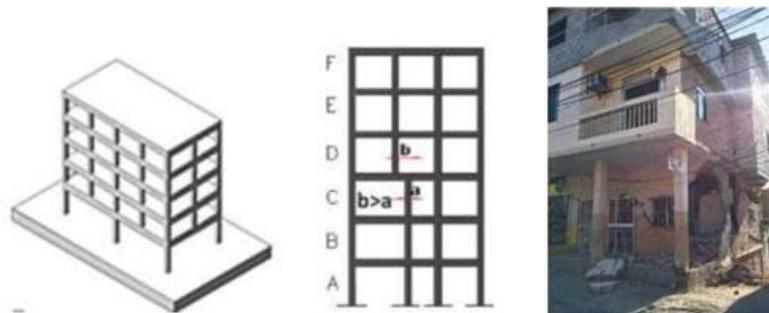


Figura 4.15. Ejes verticales discontinuos
Fuente: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2015)

Se especifica que los pórticos deben ser continuos hasta la cubierta. Columnas con irregularidad vertical no se consideran como elementos resistentes a fuerzas horizontales.

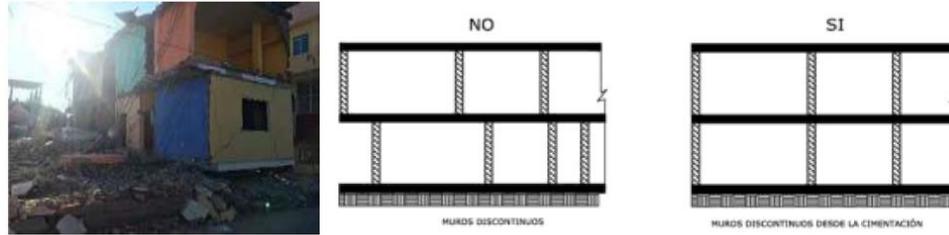


Figura 4.16. Continuidad de elementos estructurales
 Fuente: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2015)

4.2.6. Diseño de refuerzo con fibra de carbono en vigas

Se ha decidido implementar dentro del estudio, el refuerzo a flexión de las vigas de la edificación con fibra de carbono. Ya se explicó las condiciones actuales del edificio y es necesario realizar un reforzamiento para que la estructura entre en funcionamiento sin problema alguno. El programa CYPE Ingenieros permitió entender el comportamiento de los pórticos y a su vez de las vigas que los conforman.

El programa nos entregó como resultado errores en las comprobaciones en las vigas en situaciones persistentes y en situaciones sísmicas. Esto quiere decir que los momentos a los cuales va a estar sometida la estructura serán mayores a los que la misma puede soportar y al momento de ocurrir un sismo, la misma colapsaría. Por lo cual, se procede al diseño a flexión de las vigas, iniciando por identificar el armado que las conforman. En los ensayos no destructivos se pudo constatar que las vigas tienen una dimensión de 15x20, con un armado de 4 varillas de 12mm; además conocemos que el hormigón tiene una resistencia a la compresión de 24 MPa y el acero un límite de fluencia de 420 MPa. Las fibras de carbono utilizadas son de SIKA quienes mantienen en stock la platina de fibra de carbono Sika Carbodour S512.

Tabla 4.6. Propiedades Sika Carbodour S512

Tipo	Ancho mm.	Espesor mm.	Sección Transversal mm ²
------	-----------	-------------	-------------------------------------

S512	50	1,2	60
------	----	-----	----

Fuente: Propia (2022)

Las hojas electrónicas de Sika requieren del ingreso de varios datos, algunos de los cuales son comunes en todas las vigas:

- Longitud de la base: 200 mm^2
- Longitud del peralte: 150 mm^2

Información del acero existente.

- Área de acero a tracción: 226 mm^2
- Área de acero a compresión: 226 mm^2
- Profundidad efectiva del acero a tracción: 175 mm
- Profundidad efectiva del acero a compresión: 25 mm

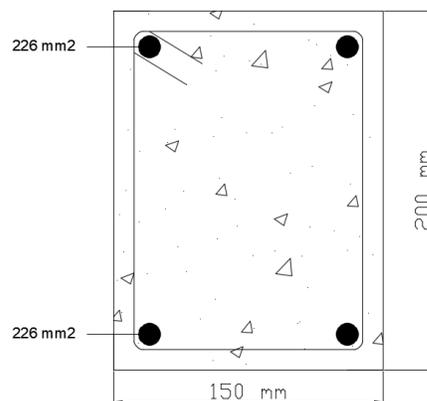


Figura 4.17. Sección transversal de las vigas

Fuente: Propia (2022)

Las vigas de entrepiso no cumplen el peralte mínimo según la norma que indica que las vigas deben tener al menos un peralte de 25cm. Se presenta el caso además que varias vigas tienen más sección que las columnas, lo que incumple el criterio de diseño sismo resistente, columna fuerte-viga débil (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda , 2015).

El empleo del concepto de columna fuerte – viga débil, se utiliza para diseñar pórticos de concreto reforzado sometidos a cargas sísmicas. Se exige que las resistencias a flexión de diseño de las columnas que lleguen hasta una unión excedan las resistencias a flexión de diseño de las vigas en al menos un 20% (American Concrete Institute 318, 2019). Las resistencias a flexión de las columnas deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$\sum M_{nc} \geq \frac{6}{5} \sum M_{nb} \quad (\text{Ecu. 4.37})$$

Las resistencias a la flexión deben sumarse de tal manera que los momentos de la columna se opongan a los momentos de la viga. Debe satisfacerse la ecuación para momentos de vigas que actúen en ambas direcciones en el plano vertical del pórtico que se considera. En este caso, no cumple con este criterio.

Propiedades de los materiales de la sección:

- Esfuerzo de fluencia del acero (F_y) = 420 MPa.
- Módulo de elasticidad del acero (E_s) = 200000 MPa.
- Esfuerzo a compresión del concreto (f'_c) = 24 MPa.
- Esfuerzo último del acero tensionado (f_{pu}) = 1860 MPa.
- Esfuerzo de fluencia del acero tensionado (f_{py}) = 1690 MPa.
- Esfuerzo efectivo del acero tensionado (f_{pe}) = 1138 MPa.
- Módulo de elasticidad del acero tensionado (E_p) = 196500 MPa.
- Ambiente: Interior.
- Espera sostener carga viva.

Los valores que diferencian a las vigas son los momentos que va a soportar cada elemento estructural.

Se debe ingresar 3 valores de momentos los cuales son:

- MD = Momento total de carga muerta sin mayorar.
- Mi = Momento sin mayorar actuando en el elemento antes de reforzar.
- ML = Momento total de carga viva sin mayorar.

Se inicia el análisis con la familia tipo 1 que tiene los siguientes datos proporcionados por CYPE Ingenieros luego del análisis.

Tabla 4.7. Momentos máximos por cada familia tipo

Familias		Momento máx. (Kn.m)
Tipo 1	Pórtico 1	15,43
Tipo 2	Pórtico 4	23,49
Tipo 3	Pórtico 9	23,27
Tipo 4	Pórtico 11	24,57
Tipo 5	Pórtico 6	23,27

Fuente: Propia (2022)

El valor de momento que se ingresó a las hojas electrónicas de Sika es 15.43 Kn.m, para el cual inicia el análisis a flexión.

- Capacidad de la sección a reforzar en estado último (ϕMn) = 14 Kn.m
- Resistencia requerida = 1.1MD + 0.75ML
- Resistencia requerida = 32 Kn.m

Esto nos establece que la sección no satisface con los requerimientos a flexión debido a que la resistencia requerida es mayor a la capacidad que tiene la estructura de soportar los esfuerzos proporcionados.

4.2.7. Aspectos generales del diseño de una viga a flexión

Para el diseño de una viga a flexión, partimos del gráfico 1.4 representado en el capítulo 1 para el diseño de vigas a flexión, el cual nos presenta la ecuación para la capacidad a flexión con el adicional del reforzamiento de fibra de carbono.

$$Mn = A_s * f_s * \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) + \psi_f * A_f * f_{fe} * \left(h - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad (\text{Ecu. 4.38})$$

Donde:

Mn = Capacidad nominal a flexión.

A_s = Área de acero de la sección.

d = Peralte efectivo.

f_s = Esfuerzo a fluencia del acero.

β_1 = Coeficiente del bloque de compresión de Whitney.

c = Distancia de la fibra superior al eje neutro.

ψ_f = Factor de reducción.

A_f = Área de la fibra de carbono.

f_{fe} = Esfuerzo de la fibra de carbono.

Partiendo de esta fórmula es posible entender y calcular las capas de fibra de carbono necesarias para poder brindar un reforzamiento a la estructura. El valor de “c” es un proceso iterativo los cuales se repiten varias veces. El proceso es el siguiente, tomando como ejemplo la última iteración.

Paso 1. Posición del eje neutro

$$C = 41.9 \text{ mm}$$

Paso 2. Cálculo de deformaciones en la fibra superior del concreto por distintos modos de falla

1. Modo 1. Aplastamiento del concreto

$$\varepsilon_{cu1} = 0.003 \text{ mm/mm}$$

2. Modo 2. Ruptura del tendón

$$\varepsilon_{cu2} = \frac{(0.035 - \varepsilon_{pi})c_u}{d_p - c_u} = 0.003 \text{ mm/mm} \quad (\text{Ecu. 4.39})$$

3. Modo 3. Falla del FRP

$$\varepsilon_{cu3} = \frac{(\varepsilon_{fd} - \varepsilon_{bi})c_u}{h - c_u} = 0.00191 \text{ mm/mm} \quad (\text{Ecu. 4.40})$$

El modo de falla que gobierna es la falla del FRP

Paso 3. Calculo de las deformaciones unitarias en estado último basados en ε_{cu}



Figura 4.18. Deformaciones unitarias
Fuente: Propia (2022)

Deformación unitaria del acero a compresión en estado último

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_c \frac{c_u - d'}{c_u} = 0.00077 \text{ mm/mm} \quad (\text{Ecu. 4.41})$$

Deformación unitaria del **acero a tracción** en condiciones últimas

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \frac{d - c_u}{c_u} = 0.00606 \text{ mm/mm} \quad (\text{Ecu. 4.42})$$

Deformación unitaria en el **FRP** en condiciones últimas

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d-c_u}{c_u} - \varepsilon_{bi} = 0.00458 \text{ mm/mm} \quad (\text{Ecu. 4.43})$$

Paso 4. Cálculo de esfuerzos en condiciones últimas

Esfuerzo en el acero a compresión en condiciones últimas

$$f'_s \begin{cases} fy \text{ si } \varepsilon'_s > \varepsilon_{sy} \\ -fy \text{ si } \varepsilon'_s < -\varepsilon_{sy} \\ E_s \varepsilon'_s \end{cases} = 154.385 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.44})$$

Esfuerzo en el acero a tracción en condiciones últimas

$$f_s \begin{cases} fy \text{ si } \varepsilon_s > \varepsilon_{sy} \\ -fy \text{ si } \varepsilon_s < -\varepsilon_{sy} \\ E_s \varepsilon_s \end{cases} = 420 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.45})$$

Esfuerzo en el FRP en condiciones últimas

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_f = 733.43 \text{ MPa} \quad (\text{Ecu. 4.46})$$

Paso 5. Parámetros del bloque de esfuerzos equivalente del concreto α y β asumiendo su relación esfuerzo – deformación como se observa abajo:

$$f_c(\varepsilon) = f'_c \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon'_c} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (\text{Ecu. 4.47})$$

Para secciones rectangulares:

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{2}{3} \varepsilon_c \frac{(-3\varepsilon'_c + \varepsilon_c)^2}{(-4\varepsilon'_c + \varepsilon_c)(\varepsilon'_c)^2} = 0.907 \\ \beta = \frac{1 - 4\varepsilon'_c + \varepsilon_c}{2 - 3\varepsilon'_c + \varepsilon_c} = 0.759 \end{cases} \quad (\text{Ecu. 4.48})$$

Paso 6. Calcular las resultantes de fuerzas internas y chequear el equilibrio

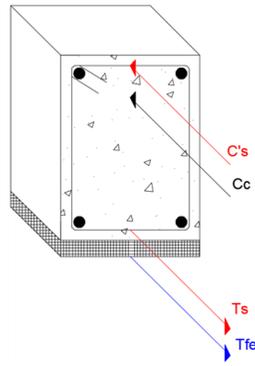


Figura 4.19. Fuerzas internas
Fuente: Propia (2022)

- Fuerza a compresión en el concreto (Cc) = 104 Kn
- Fuerza en el acero a compresión (C's) = $f'_s A'_s = 35 Kn$
- Fuerza del acero a tracción (Ts) = $f_s A_s = 95 Kn$
- Fuerza a tracción en el FRP (Tfe) = $f_{fe} A_f = 44 Kn$
- Chequeo: $Cc + C's - Ts - Tfe = 0 Kn$

Cumple

Luego se procede al cálculo y chequeo de la capacidad a flexión en condiciones últimas.

Contribución del acero a la flexión:

$$Mns = Ts \left(d - \frac{\beta \cdot c_u}{2} \right) = 15 Kn.m \quad (\text{Ecu. 4.49})$$

Contribución del FRP a la flexión:

$$Mnf = Tfe \left(h - \frac{\beta \cdot c_u}{2} \right) = 8 Kn.m \quad (\text{Ecu. 4.50})$$

Ahora se calcula el factor de reducción ϕ que en este caso es 0.9

$$\phi \begin{cases} 0.9 \text{ si } \varepsilon_s > 0.005 \\ 0.65 + \frac{\varepsilon_s - 0.002}{250/3} \text{ si } 0.005 > \varepsilon_s > 0.002 \\ 0.65 \text{ si } \varepsilon_s < 0.002 \end{cases} \quad (\text{Ecu. 4.51})$$

Cálculo de la demanda a flexión en estado último

$$M_u = 1.2MD + 1.6ML = 43 \text{ Kn.m} \tag{Ecu. 4.52}$$

Cálculo de la resistencia a flexión de diseño considerando un factor de reducción adicional de

$$\psi_f = 0.85$$

$$\phi Mn = \phi(Mns + Mnp + \psi_f Mnf) = 20 \text{ Kn.m} \tag{Ecu. 4.53}$$

$$M_u > \phi Mn \tag{Ecu. 4.54}$$

En este caso usamos 1 sola platina de fibra de carbono. Para el mismo pórtico se usaron hasta 3 platinas de fibra de carbono obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4.8. Resultados platinas FRP

	Mu (Kn.m)	ϕMn (Kn.m)	Comprobación
1 Platina FRP	43	20	NO CUMPLE
2 Platinas FRP	43	25	NO CUMPLE
3 Platinas FRP	43	31	NO CUMPLE

Fuente: Propia (2022)

Se obtuvieron los siguientes resultados en este caso

Tabla 4.9. Resumen de cargas de la sección sin reforzar

ϕM_n , sin reforzar (kN-m)	14	Momento resistente
M_u (kN-m)	43	Momento último requerido
FRP	SI	Se requiere reforzar con FRP?

Fuente: Propia (2022)

Tabla 4.10. Resumen de reforzamiento a flexión

ϕM_n , sección reforzada (kN-m)	20	Momento de la sección reforzada con FRP
M_u (kN-m)	43	Momento último requerido
Chequeo de la Sección Reforzada	NG	Verificar que $\phi M_{n, \text{sección reforzada}} \geq M_u$
Chequeo antes del reforzamiento	NG	Chequeo de la resistencia existente del elemento estructural para satisfacer el ACI 440.2R-08 Sección 9.2, Eq. (9-1): $(\phi M_{n, \text{existing}}) \geq 1.1M_D + 0.75M_L$ or $1.1M_D + 1.0M_L$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Concreto	NG	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{c,s} \leq 0.45f'_c$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero	NG	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{s,s} \leq 0.80f_y$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero Tensionado	N/A	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{p,s} \leq 0.82f_{py}$ or $0.74f_{pu}$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del FRP	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{f,s} \leq \Psi_f f_{fu}$
CHEQUEO TOTAL A FLEXION	NG	

Fuente: Propia (2022)

Tabla 4.11. Resumen de los parámetros en estado último

Ubicación del Eje Neutro (mm)	41,9		
Modo de Falla	Falla del FRP		
	Deform. (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (kN)
Fibra Superior a Compresión del Concreto	0,00191	21,77	104
Acero	0,00606	420,00	95
Acero Tensionado	0,00000	0,00	0
FRP	0,00458	733,43	44
Chequeo del Equilibrio de Fuerzas	-	-	0

Fuente: Propia (2022)

El resultado de esto es que no cumple, debido a que la demanda a flexión es mucho mayor a la resistencia que tendrá la viga a flexión al aplicar las cargas y ni usando 3 platinas puede cubrir sus requerimientos. Cabe recalcar que se usaron hasta 3 platinas de fibra de carbono puesto que cada una tiene un ancho de 50 mm y la base a reforzar tiene un espesor de 150 mm.

Se hizo este mismo análisis con todos los 48 pórticos existentes en el edificio; la mayor parte de vigas no cumplían con las condiciones de que el momento último sea menor al momento real adicionando fibras de carbono, es decir, la fibra de carbono no abastece en la mayor parte de vigas para poder asegurar la estructura y que esta pueda ser habitada. Se optó por reforzar con platinas de fibra de carbono a las vigas que si cumplían con las condiciones de diseño a flexión. Las vigas reforzadas serían un total de 11 como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4.12. Comprobación de vigas reforzadas

Nivel	Viga	Pórtico	Longitud (m)	Número FRP	Mu (Kn.m)	ϕM_n (Kn.m)	Comprobación
4	V-401	1	2,72	1	8	18	CUMPLE
4	V-402	1	2,95	1	10	18	CUMPLE
4	V-403	1	3,1	1	10	18	CUMPLE
4	V-404	2	2,68	1	11	19	CUMPLE
4	V-405	2	3,04	1	12	19	CUMPLE
4	V-407	3	3,34	2	12	24	CUMPLE

4	V-409	3	2,96	1	10	18	CUMPLE
4	V-413	5	2,65	1	11	19	CUMPLE
4	V-419	7	0,53	1	10	18	CUMPLE
4	V-420	8	3,55	1	11	19	CUMPLE
4	V-421	8	2,27	2	12	24	CUMPLE

Fuente: Propia (2022)

Como resultado, estas secciones tendrían la siguiente configuración.

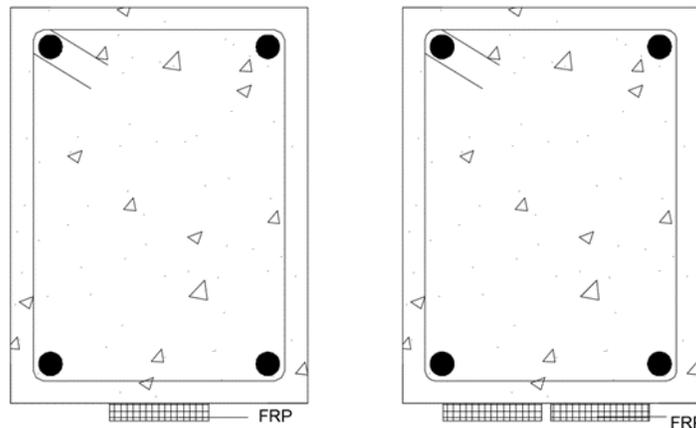


Figura 4.20. Configuración de secciones de vigas resultantes

Fuente: Propia (2022)

Finalmente, luego de todo el análisis estructural hecho en CYPE Ingenieros y los programas de Sika Carbodour, se ha podido entender de una manera más clara como se está comportando la estructura y cuál sería la mejor propuesta de reforzamiento.

Para poder brindar una recomendación de reforzamiento de fibra de carbono a esta estructura debemos recordar que tanto en columnas como en vigas las secciones son demasiado pequeñas, incumpliendo el área mínima de sección por lo cual la fibra de carbono no puede realizar todo el trabajo de reforzamiento por si sola. El reforzamiento de fibra de carbono en este caso debe venir acompañado de otra propuesta de reforzamiento estructural.

4.3. Propuesta de mitigación

Una vez conocida y analizada la realidad de la edificación, es necesario pensar y proyectar un reforzamiento aplicado a la estructura con las condiciones que han sido detalladas y en virtud de eso se presenta la siguiente propuesta de mitigación.

Se recomienda y plantea usar reforzamiento de fibra de carbono únicamente en el último nivel, ya que se ha visto que en este se encuentran los menores esfuerzos en vigas y columnas. Adicionalmente, se debe reforzar el edificio con una estructura nueva e independiente en acero conformado que calce a la edificación existente apoyándola así a soportar cargas gravitatorias como cargas sísmicas.

En este caso de estudio se recomienda el reforzamiento con fibra de carbono en el último nivel en todas las 11 vigas que si había la posibilidad de reforzarlas y de las columnas C4, C5, C6, C8, C10, C11, C12, C13, C15, C17, C18, C19, C21. Estas son las columnas que se analizaron y necesitaban reforzamiento con fibra de carbono para aumentar su capacidad de carga. Cabe recalcar que a pesar de ser reforzadas dichas columnas, algunas no llegaban a soportar toda la carga que sería aplicada en la estructura de manera gravitatoria y sísmica. Es por eso que se tomó como base el reforzamiento de esta misma estructura diseñada por la Ing. Belén Arízaga quien realizó un diseño de reforzamiento con acero estructural, entonces se presentará una propuesta para que los dos reforzamientos trabajen en conjunto.

La Ing. Belén Arízaga recalca la importancia de que la nueva estructura de acero tenga su propia cimentación ajena a la cimentación existente. Se debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Las columnas serán reforzadas con acero en todos los niveles exceptuando el nivel N+8.95 donde únicamente reforzarán con acero a las columnas C2, C3, C7, C9, C14, C16, C20 y la fibra de carbono será usada en las 13 columnas especificadas en dicho nivel.
2. Las platinas de fibra de carbono serán instaladas en las 11 vigas analizadas en este caso de estudio ubicadas en el último nivel. El resto de vigas contarán con el refuerzo ya presupuestado de acero.
3. La vinculación de la nueva estructura con la vivienda se realizará mediante un sistema de pórticos de acero en dos direcciones que se ejecutará mediante anclajes estructurales que se soldarán al nuevo sistema.
4. Los elementos arquitectónicos como mamposterías, podrán ser mejorados o reemplazados solo posteriormente al reforzamiento estructural, evaluando el estado de cada elemento no estructural.

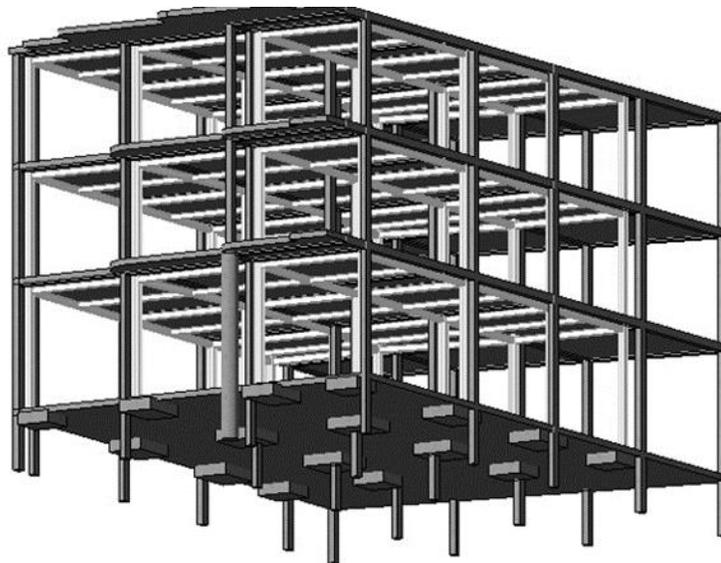


Figura 4.21. Vista frontal de estructura de reforzamiento
Fuente: Propia (2022)

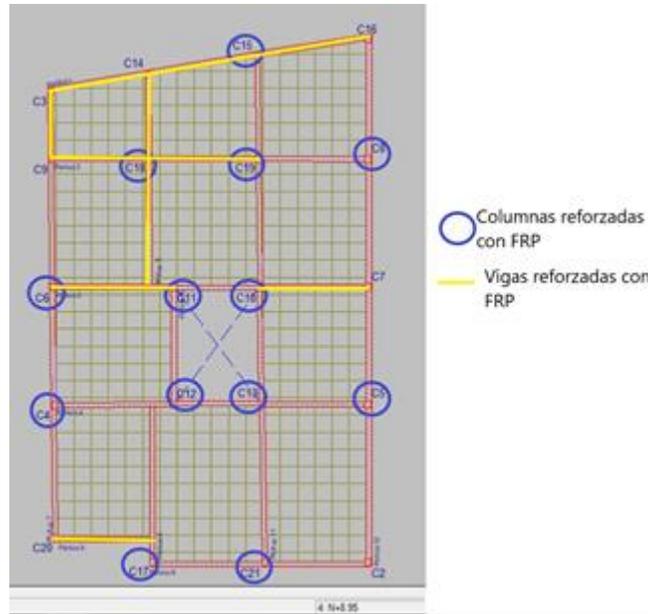


Figura 4.22. Vista frontal de estructura de reforzamiento
 Fuente: Propia (2022)

4.4. Comparación de costos entre reforzamiento estructural con FRP y acero junto FRP

Se ha elaborado dos presupuestos, el primero es un presupuesto que considera la instalación de reforzamiento estructural planteado por la Ing. Belén Arízaga el cual plantea que la estructura sea reforzada únicamente con acero y el otro presupuesto presenta la propuesta de la mezcla de reforzamiento estructural con acero y FRP en las partes convenientes y en las cuales si es posible realizar el mismo.

Tabla 4.13. Presupuesto de reforzamiento estructural con acero

PRESUPUESTO REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON ACERO					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P.Unitario	P.Total
CIMENTOS					
1,1	Acero de refuerzo $F_y=4200\text{kg/cm}^2$	Kg	267,16	2,25	601,11
1,1	Encofrado y desencofrado de zapatas	m^2	24,15	12,92	312,18
1,1	Hormigón $f'c=240\text{ kg/cm}^2$	m^3	4,08	138,13	563,57
ESTRUCTURA DE REFORZAMIENTO					
2,1	Columnas (perfiles acero)	Kg	3.807,09	2,80	10.659,85
2,2	Vigas (Perfiles acero)	Kg	4.738,20	2,80	13.266,96
				TOTAL	25.403,67

Fuente: Propia (2022)

Para el cálculo del presupuesto de reforzamiento estructural con FRP se calculó el área y longitud necesaria para la aplicación de este material en columnas y vigas.

Tabla 4.14. Datos de reforzamiento estructural de FRP para vigas

Nivel	Viga	Pórtico	Número FRP	Longitud (m)	Area FRP (m2)	Area Total FRP (m2)
4	V-401	1	1	2,72	0,136	0,136
4	V-402	1	1	2,95	0,1475	0,1475
4	V-403	1	1	3,1	0,155	0,155
4	V-404	2	1	2,68	0,134	0,134
4	V-405	2	1	3,04	0,152	0,152
4	V-407	3	2	3,34	0,167	0,334
4	V-409	3	1	2,96	0,148	0,148
4	V-413	5	1	2,65	0,1325	0,1325
4	V-419	7	1	0,53	0,0265	0,0265
4	V-420	8	1	3,55	0,1775	0,1775
4	V-421	8	2	2,27	0,1135	0,227
					TOTAL FRP	1,77

Fuente: Propia (2022)

Tabla 4.15. Datos de reforzamiento estructural de FRP para columnas

Reforzamiento con FRP de una columna del nivel N+8,95	
Altura (m)	2,9
Longitud Sección (m)	0,7
Ancho FRP (m)	0,3
Número de capas de recubrimiento	9,5
Longitud recubrimiento (m)	6,7
Area total de recubrimiento (m2)	2,0

Reforzamiento con FRP las columnas seleccionadas del nivel N+8,95	
Número de columnas por reforzar	13
Longitud total de FRP (m)	86,5
Area total de FRP (m2)	25,9

Fuente: Propia (2022)

Tabla 4.16. Presupuesto de reforzamiento estructural con acero y FRP

PRESUPUESTO REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON ACERO y FRP					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P.Unitario	P.Total

CIMIENTOS					
1,1	Acero de refuerzo $F_y=4200\text{kg/cm}^2$	Kg	267,16	2,25	601,11
1,2	Encofrado y desencofrado de zapatas	m^2	24,15	12,92	312,18
1,3	Hormigón $f'_c=240\text{ kg/cm}^2$	m^3	4,08	138,13	563,57
ESTRUCTURA DE REFORZAMIENTO ACERO					
2,1	Columnas (Perfiles acero)	Kg	1.868,10	2,80	5.230,68
2,2	Vigas (Perfiles acero)	Kg	4.129,07	2,80	11.561,40
REFORZAMIENTO FRP					
3,1	Redondeo de esquinas	m	148,20	9,49	1.406,42
3,2	Preparación de superficie de hormigón.	m^2	25,94	15,25	395,59
3,3	Suministro e instalación de mantos de fibra de carbono	m^2	27,70	168,70	4.672,99
3,4	Inyección a presión de epóxido líquido	Kg	15,00	124,46	1.866,90
				TOTAL	26.610,68

Fuente: Propia (2022)

Tabla 4.17. Comparación de reforzamientos

REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL	
Acero	Acero con FRP
\$25.403,67	\$26.610,68

Fuente: Propia (2022)

CONCLUSIONES

- La estructura no cuenta con las secciones mínimas estipuladas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción, por lo cual está propensa a fallar o colapsar si se llega a dar el uso como vivienda o ante el efecto de un sismo.
- La fibra de carbono es un material muy resistente y óptimo para el reforzamiento estructural pero en el caso de esta edificación no satisface las solicitaciones requeridas puesto que son demasiado grandes para las secciones y configuración que posee la estructura.
- Las vigas que si tienen la posibilidad de ser reforzadas con FRP fueron las del último nivel puesto que estas no están expuestas a cargas superiores de otros pisos.
- La combinación de los dos sistemas de reforzamiento estructural se acoplan a la perfección puesto que no se juntan pero se complementan, la fibra de carbono actúa sobre la estructura de hormigón y la nueva estructura de acero trabaja como una sola pero vinculada a la estructura ya existente.
- Luego de la evaluación in situ y el modelo estructural analizado, se concluye que tiene alto nivel de vulnerabilidad y peligrosidad ante cargas sísmicas, pero con la propuesta de reforzamiento presentada se solucionaría.
- El precio final usando mantos de fibra de carbono, solucionando todos los problemas de grietas con epóxido líquido y todo el procedimiento necesario, no aumenta en gran proporción al precio del reforzamiento estructural únicamente de acero, teniendo una diferencia de 1207.01 dólares.
- Los mantos de fibra de carbono tienen un precio alto en el mercado, en este caso no aumenta demasiado el valor total puesto que se está reforzando pocas columnas y vigas, por lo cual si es factible juntar los dos tipos de reforzamiento estructural.

- Los ensayos no destructivos aplicados de manera correcta y eficaz en la estructura nos brindan resultados óptimos para tener un punto de partida confiable y cercano a la realidad.
- Una vez realizado el análisis técnico y económico de la estructura se puede decir que la mejor opción sería el uso de acero de refuerzo.

RECOMENDACIONES

- Toda obra civil debe ser diseñada y supervisada por un profesional, de igual manera su construcción y mantenimiento, pues de esta depende la seguridad de las personas que la usen, vivan a sus alrededores o frecuenten por el lugar.
- Entender la teoría y tener bases sólidas sobre estructuras para poder realizar un diseño o reforzamiento estructural puesto que se pueden cometer errores en los programas computacionales. Los software encargados del diseño únicamente realizan procedimientos pero depende del usuario interpretarlos para poder entregar un trabajo de calidad que cumpla con todas las condiciones requeridas y no se encuentre sobre dimensionado.
- Previo a un reforzamiento se debe hacer una evaluación in situ para entender de mejor manera como está la estructura y sus condiciones.
- Se debe ubicar el origen de fallas existentes para poder solucionar el problema de raíz y así a futuro no siga afectando en el desarrollo normal de la estructura.
- Para este caso de estudio se recomienda reforzar a la estructura únicamente con acero estructural ya que tiene un costo menor que la mezcla de los dos materiales de reforzamiento y ese dinero puede servir para readecuar paredes fisuradas, vigas con errores de construcción, fachada y detalles que hay que tomar en cuenta para un correcto funcionamiento de la estructura.
- Estudiar las normas de diseño competentes para entender sobre parámetros y condiciones mínimas, así como errores que se deben evitar al realizar un diseño o reforzamiento.
- En cuanto al análisis comparativo de costos, en teoría existe una alta diferencia económica de un refuerzo estructural con CFRP a un reforzamiento con acero. Sin embargo, es

importante presupuestar los costos indirectos generados durante la instalación y los beneficios o prejuicios a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

- Aguirre, C. (2017). Análisis de Casos y Diseño de Guía Pre y Post Eventos. [*Tesis de Ingeniería*]. Universidad San Francisco De Quito, Quito. Obtenido de <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6736>
- Alegre, G. (2017). Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado. [*Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil*]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9254>
- American Chemistry Society. (2003). *Fibras de carbono de alto rendimiento*. Obtenido de ACS chemistry of life: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/carbonfibers.html>
- American Concrete Institute 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. ACI Committee 318. Obtenido de <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English>
- American Concrete Institute 440. (2014). *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Materials Made by Wet Layup for External Strengthening of Concrete and Masonry Structures*. ACI Committee 440. Obtenido de <https://cecollection2.files.wordpress.com/2020/05/440.8-13-specification-for-carbon-and-glass-fiber-reinforced-polymer-frp-materials-made-by-wet-layup-.pdf>
- American Society for Testing and Materials C - 805. (1997). *Standard test method for rebound number of hardened concrete*. Obtenido de ASTM-C805: <https://es.scribd.com/document/438537651/Astm-c805>
- CYPE Latam. (2022). *CYPE*. Obtenido de Software para Ingeniería Arquitectura y Construcción: <https://www.cypelatam.com/>
- Escuela Politécnica Nacional. (2022). *La Informalidad en la Construcción es el Mayor Riesgo en un Terremoto*. Obtenido de Instituto Geofísico: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/381-la-informalidad-en-la-construcci%C3%B3n-es-el-mayor-riesgo-en-un-terremoto#:~:text=Existen%20varios%20factores%2C%20como%20la,pa%C3%ADs%20es%20casi%20del%2070%25>.
- Gómez, M., & Sobrino, J. (2003). Criterio de diseño para el refuerzo de estructuras con materiales compuestos con fibra de carbono. [*Investigación*]. Universidad de los Andes. Obtenido de <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/download/483/664>
- Llano, C. (2021). *Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario [imagen]*. Obtenido de Materiales: <https://www.eurograte.es/doc/Catalogo-Perfiles-Estructuras-Eurograte>.
- Manrique, d., & Paucar, M. (2019). *Uso de fibra de carbono en reforzamiento de estructuras de edificaciones, centro empresarial camino real, san isidro*. Obtenido de

http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2597/T030_48062932_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI]. (2015). *NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción)*. Obtenido de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Moncayo, M. (2016). Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras. *Ingenieria revista academica*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927006.pdf>
- Rendón, J. (2020). *Reforzamiento de estructuras con materiales compuestos FRP - sistema Sika Carbodur [seminario web]*. Obtenido de Sika: <https://web1.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2020/11/Webinar-2020-11-25-Reforzamiento...-Rendo%CC%81n.pdf>
- Robert Bosch GmbH. (2011). *D-tect 150 SV Professional*. Obtenido de Bosch d-tect 150sv manual: <https://www.tooled-up.com/artwork/ProdPDF/Bosch%20d-tect-150-sv-manual.pdf>
- Toray Industries. (2022). *Fibras Continuas [imagen]*. Obtenido de toray innovation by chemistry carbon fiber composite material: https://www.cf-composites.toray/products/carbon_fiber/continuous.html
- Vallejos, C., & Suzuki, R. (2016). *Parámetros que influyen en los resultados de los ensayos no destructivos de esclerometría y ultrasonido*. Obtenido de Universidad Nacional de Asuncion : <http://ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/29ho-29.pdf>