

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**USO DE FIBRA DE CARBONO EN REFORZAMIENTO DE  
ESTRUCTURAS DE EDIFICACIONES, CENTRO EMPRESARIAL  
CAMINO REAL, SAN ISIDRO**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA CIVIL**

**PRESENTADO POR**

**Bach. MANRIQUE SILES DIEGO ARTURO**

**Bach. PAUCAR BERROCAL MIGUEL DIRCEU**

**ASESOR: Mg. Ing. GÁRATE CÁCERES, FRANCISCO HÉCTOR**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a Dios por darme la posibilidad de llegar tan lejos, dándome la voluntad y fuerzas que necesitaba y por ayudarme a llegar a esta etapa tan importante en mi carrera profesional. A mis padres Gabriela y Rubén, ya que son el mejor regalo que Dios me ha dado y por su gran apoyo incondicional que me brindaron y por su gran amor en estos veintiséis años a su lado. A mi hermano mayor por sus consejos y alientos en las buenas y las malas y ser un gran ejemplo de hermano mayor para mí.

Manrique Siles, Diego Arturo

Agradezco por haber culminado esta tesis a mis padres Benny y Miguel por ser mi ejemplo de perseverancia, a mis hermanos por su apoyo constante durante mi formación académica, a Don Lucho que, aunque ya no se encuentra con nosotros sé que estaría muy contento por la culminación de esta etapa.

Paucar Berrocal, Miguel Dirceu

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos profundamente a nuestra alma mater la Universidad Ricardo Palma, por todos estos años de apoyo, a los profesores que nos brindaron su tiempo para ayudarnos en esta etapa y a nuestro asesor Mg. Ing. Francisco Héctor Gárate Cáceres por todo el apoyo brindado en nuestra tesis.

Diego Manrique y Miguel Paucar

# ÍNDICE GENERAL

|  |      |
|--|------|
| RESUMEN.....   | XIII |
| ABSTRACT .....   | XIV  |
| INTRODUCCIÓN.....  | 1    |
| CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                             | 2    |
| 1.1 Descripción del problema .....                                       | 2    |
| 1.2 Formulación del problema .....                                       | 3    |
| 1.2.1 Problemas en general.....  | 3    |
| 1.2.2 Problemas específicos.....   | 3    |
| 1.3 Objetivos de la investigación .....                                  | 3    |
| 1.3.1 Objetivo general .....   | 3    |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....  | 4    |
| 1.4 Importancia y justificación del estudio .....                        | 4    |
| 1.5 Limitaciones.....  | 4    |
| 1.6 Viabilidad.....  | 4    |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....   | 6    |
| 2.1 Antecedentes de la investigación.....                                | 6    |
| 2.1.1 Tesis Nacionales.....  | 6    |
| 2.1.2 Tesis Internacionales .....  | 7    |
| 2.2 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio ..... | 8    |
| 2.2.1 Imprimación con fibras de carbono .....                            | 9    |
| 2.2.2 Fortalecimiento con las Fibras de Carbono.....                     | 10   |
| 2.3 Estructuras teórica y científica que sustenta el estudio.....        | 11   |
| 2.3.1 Normas.....  | 11   |
| 2.3.1.1. Normas Nacionales.....  | 11   |
| 2.3.1.2. Normas Internacionales .....                                    | 17   |
| 2.3.2 Comportamiento de Materiales .....                                 | 18   |
| 2.3.2.1 Propiedades Físicas .....  | 18   |
| 2.3.2.2 Propiedades Mecánicas.....                                       | 19   |
| 2.4 Filosofía de Diseño de las fibras de carbono.....                    | 19   |
| 2.5 Definición de términos importantes.....                              | 20   |
| 2.6 Hipótesis .....  | 21   |
| 2.6.1 Hipótesis Principal.....   | 21   |
| 2.6.2 Hipótesis Secundaria .....   | 21   |

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....                                    | 23 |
| 3.1 Tipo de Investigación .....                                    | 23 |
| 3.2 Diseño de investigación .....                                  | 23 |
| 3.3 Relación entre variables .....                                 | 23 |
| 3.4 Operacionalización de variables .....                          | 24 |
| 3.5 Universo, población y muestra .....                            | 24 |
| 3.5.1 Universo de estudio .....                                    | 24 |
| 3.5.2 Población de estudio .....                                   | 24 |
| 3.5.3 Muestra de estudio .....                                     | 25 |
| 3.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos .....          | 25 |
| 3.7 Procedimiento para la recopilación de datos .....              | 25 |
| 3.8 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos .....       | 25 |
| CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LA EDIFICACIÓN .....                      | 27 |
| 4.1 Descripción del proyecto .....                                 | 27 |
| 4.2 Sistema estructural existente. ....                            | 27 |
| 4.3 Intervención propuesta.....                                    | 28 |
| 4.4 Normativa aplicable.....                                       | 29 |
| 4.5 Metrado de cargas.....   | 29 |
| 4.6 Especificaciones de los materiales .....                       | 30 |
| 4.6.1 Concreto Armado .....  | 30 |
| 4.6.2 Acero Corrugado .....  | 30 |
| 4.7 Estados de carga .....   | 30 |
| 4.7.1 Carga Muerta.....  | 31 |
| 4.7.2 Carga viva .....   | 32 |
| 4.8 Análisis Sismorresistente de la Edificación .....              | 34 |
| 4.8.1 Diseño de concreto armado.....                               | 34 |
| 4.8.2 Modelo matemático de la edificación .....                    | 34 |
| 4.8.2.1 Parámetros sísmicos .....                                  | 35 |
| 4.8.2.2 Espectro de diseño según Norma E-030 .....                 | 38 |
| CAPÍTULO V: REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO .....               | 40 |
| 5.1 Filosofía de diseño de las fibras de carbono .....             | 40 |
| 5.1.1 Resistencia estructural general del FRP.....                 | 42 |
| 5.1.2 Selección del sistema FRP .....                              | 42 |
| 5.1.3 Expansión térmica .....                                      | 43 |
| 5.1.4 Consideraciones de cargas .....                              | 43 |
| 5.1.5 Consideraciones de durabilidad.....                          | 43 |
| 5.1.6 Consideraciones de selección de revestimiento protector..... | 44 |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| 5.2  | Propiedades de diseño del material .....                                | 44  |
| 5.3  | Fortalecimiento a la Flexión.....                                       | 47  |
| 5.3.1  | Resistencia a la flexión nominal.....                                   | 47  |
| 5.3.1.1  | Modos de Fallo.....   | 48  |
| 5.4  | Reforzamientos de elementos estructurales .....                         | 51  |
| 5.5  | Suposiciones.....   | 52  |
| 5.6  | Fortalecimiento a la flexión de plafones cóncavos.....                  | 52  |
| 5.7  | Deformaciones en el reforzamiento de fibras de carbono.....             | 53  |
| 5.8  | Tensiones en el reforzamiento de fibra de carbono .....                 | 54  |
| 5.9  | Factor de reducción de fuerza .....                                     | 54  |
| 5.10   | Resistencia máxima en una sección rectangular reforzada .....           | 55  |
| 5.11   | Tensión en acero bajo cargas de servicio.....                           | 60  |
| 5.12   | Cizallamiento .....   | 61  |
| 5.12.1   | Esquemas de envoltura .....   | 62  |
| 5.12.2   | Resistencia al corte nominal.....                                       | 62  |
| 5.12.3   | Contribución a la resistencia de la fibra de carbono al corte.....      | 64  |
| 5.13   | Procedimiento para el refuerzo por flexión con CFRP.....                | 67  |
| 5.14   | Procedimiento para la resistencia al corte con CFRP .....               | 76  |
| 5.15   | Propiedades del FRP a utilizar para el reforzamiento.....               | 80  |
| CAPÍTULO VI: CÁLCULOS DEL REFORZAMIENTO CON CFRP ..... |   | 81  |
| 6.1  | Análisis de Vigas Principales .....                                     | 81  |
| 6.1.1  | Comparación de momento actuante y resistente en la estructura .....     | 82  |
| 6.1.2  | Comparación del esfuerzo cortante actuante y resistente en la viga..... | 83  |
| 6.1.3  | Reforzamiento con CFRP de la Viga B1/S1 – V5.....                       | 85  |
| 6.2  | Análisis de Viguetas .....  | 88  |
| 6.2.1  | El tramo entre los ejes 6-7-8 entre los ejes F y G.....                 | 89  |
| 6.2.1.1  | Análisis de reforzamiento positivo VG01 (Tramo central).....            | 92  |
| 6.2.1.2  | Análisis de reforzamiento positivo VG01 (Apoyo Eje 6´).....             | 96  |
| 6.2.2  | El tramo entre los ejes 6 y 8 entre los ejes B´ y C´.....               | 100 |
| 6.2.2.1  | Análisis de reforzamiento negativo VG4 (Apoyo 7) .....                  | 103 |
| 6.2.2.2  | Análisis de reforzamiento positivo VG 04 (Tramo derecho) .....          | 107 |
| 6.3  | Análisis del reforzamiento de la losa sólida.....                       | 111 |
| 6.3.1  | Diseño de la losa entre los ejes 6-8 y A-B´ .....                       | 111 |
| 6.3.1.1  | Sentido X-X (Tramo 6-7).....  | 112 |
| 6.3.1.1.1  | Análisis del reforzamiento Losa (Tramo Inferior).....                   | 113 |
| 6.3.1.2  | Sentido X-X. (Tramo 7-8).....   | 117 |
| 6.4  | Acero estructural como reforzamiento .....                              | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| CAPÍTULO VII: PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....       | 121 |
| 7.1 Momento y Esfuerzo Cortante en Vigas Principales .....            | 121 |
| 7.2 Momentos y cortantes sin la incorporación de Viga de Acero.....   | 122 |
| 7.3 Comparación de los Momentos Actuante vs Resistente con CFRP ..... | 123 |
| 7.4 Cronograma de ejecución del reforzamiento .....                   | 125 |
| 7.5 Comparativo del reforzamiento con CFRP y Platina Acero .....      | 126 |
| 7.6 Comparación económica uso de CFRP vs Platinas de Acero .....      | 127 |
| 7.7 Contrastación de objetivos y resultados.....                      | 128 |
| CONCLUSIONES .....  | 129 |
| RECOMENDACIONES .....   | 130 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....                                      | 131 |
| ANEXOS .....  | 133 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla N° 1: Cargas vivas mínimas repartidas .....   | 12 |
| Tabla N° 2: Clasificación de los perfiles de suelo.....                                   | 14 |
| Tabla N° 3: Periodos “TP” y “TL” .....  | 14 |
| Tabla N° 4: Categoría de las edificaciones y factor “U” .....                             | 14 |
| Tabla N° 5: Sistemas estructurales .....  | 15 |
| Tabla N° 6: Operacionalización de variables .....   | 24 |
| Tabla N° 7: Cargas muertas.....   | 30 |
| Tabla N° 8: Cargas vivas.....   | 31 |
| Tabla N° 9: Carga muerta en la zona del GGEE.....   | 31 |
| Tabla N° 10: Carga muerta en la zona de intervención .....                                | 32 |
| Tabla N° 11: Carga viva en la intervención .....  | 33 |
| Tabla N° 12: Factores de reducción de resistencia.....                                    | 34 |
| Tabla N° 13: Datos del sistema estructural .....  | 37 |
| Tabla N° 14: Resultado de los desplazamientos .....                                       | 39 |
| Tabla N° 15: Factores de reducción ambiental para FRP.....                                | 47 |
| Tabla N° 16: Factores de reducción adicionales recomendados para FRP .....                | 64 |
| Tabla N° 17: Propiedades de CFRP .....  | 80 |
| Tabla N° 18: Tipos de Sika CarboDur M .....   | 80 |
| Tabla N° 19: Momento actuante y resistente en vigas principales (eje x) .....             | 82 |
| Tabla N° 20: Momento actuante y resistente en vigas principales verticales (eje y).....   | 83 |
| Tabla N° 21: Esfuerzo cortante actuante y cortante resistente de las vigas principales .. | 84 |
| Tabla N° 22: Carga muerta en la vigueta 01 .....  | 89 |
| Tabla N° 23: Carga muerta en la vigueta 01 .....  | 89 |
| Tabla N° 24: Análisis de Momentos Flectores Vigueta 01 .....                              | 90 |
| Tabla N° 25: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 01 .....                             | 91 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla N° 26: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 01 - VA.....  | 91  |
| Tabla N° 27: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 01 -VA.....   | 91  |
| Tabla N° 28: Carga muerta en la vigueta 04 .....                   | 100 |
| Tabla N° 29: Carga muerta en la vigueta 04 .....                   | 100 |
| Tabla N° 30: Análisis de Momentos Flectores Vigueta 04 .....       | 101 |
| Tabla N° 31: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 04 .....      | 102 |
| Tabla N° 32: Análisis de Momento Flector Vigueta 04 – VA .....     | 102 |
| Tabla N° 33: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 04 – VA ..... | 102 |
| Tabla N° 34: Carga muerta en la losa .....                         | 111 |
| Tabla N° 35: Análisis de la losa Tramo 7-8.....                    | 118 |
| Tabla N° 36: Momento Flector en Viga Principal .....               | 121 |
| Tabla N° 37: Esfuerzo Cortante de Vigas Principales .....          | 121 |
| Tabla N° 38: Nuevos Momentos con CFRP .....                        | 122 |
| Tabla N° 39: Nuevos Cortantes con CFRP .....                       | 122 |
| Tabla N° 40: Nuevos Momentos con CFRP y Viga de acero .....        | 123 |
| Tabla N° 41: Nuevos esfuerzos cortantes de viguetas .....          | 124 |
| Tabla N° 42: Cuadro Comparativo Platina Acero vs CFRP .....        | 126 |
| Tabla N° 43: Refuerzo exterior con CFRP .....                      | 127 |
| Tabla N° 44: Refuerzo con Platinas Metálicas .....                 | 128 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura N° 1: Reforzamiento con fibras de carbono .....                        | 9  |
| Figura N° 2: Zonas sísmicas en el Perú .....                                  | 13 |
| Figura N° 3: Localización del Proyecto.....                                   | 27 |
| Figura N° 4: Área afectada por las sobrecargas .....                          | 28 |
| Figura N° 5: Plano del piso analizado .....                                   | 28 |
| Figura N° 6: Pesos de los equipos colocados en el piso.....                   | 29 |
| Figura N° 7: Cargas muertas distribuidas en el piso.....                      | 31 |
| Figura N° 8: Cargas muertas en el resto de los paños.....                     | 32 |
| Figura N° 9: Cargas viva en el resto de los paños.....                        | 33 |
| Figura N° 10: Modelo en 3D de la estructura.....                              | 37 |
| Figura N° 11: Espectro de Pseudo aceleraciones. ....                          | 38 |
| Figura N° 12: Sismo Aplicado. ....  | 39 |
| Figura N° 13: Efectos del concreto armado ante un incendio .....              | 41 |
| Figura N° 14: Efectos del concreto armado ante un incendio .....              | 41 |
| Figura N° 15: Sistemas FRP unidos para fortalecer la estructura.....          | 51 |
| Figura N° 16: Tipo de enlaces externos de fibras de carbono.....              | 51 |
| Figura N° 17: Profundidad efectiva de los sistemas de fibras de carbono ..... | 53 |
| Figura N° 18: Distribución interna de tensión y deformación. ....             | 57 |
| Figura N° 19: Tensión elástica y distribución de tensiones .....              | 60 |
| Figura N° 20: Envoltura típicos para el refuerzo de corte con FRP.....        | 64 |
| Figura N° 21: Refuerzo utilizando láminas de FRP .....                        | 66 |
| Figura N° 22: Momentos flectores de la losa del primer sótano .....           | 81 |
| Figura N° 23: Esfuerzos cortantes de la losa del primer sótano .....          | 81 |
| Figura N° 24: Momento flector en la viga B1/S1 – V5 .....                     | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura N° 25: Carga muerta repartida vigueta 01 (Eje 6-8 y F-G) ..... | 89  |
| Figura N° 26: Carga viva de la vigueta 01 (Eje 6-8 y F-G).....        | 90  |
| Figura N° 27: Momentos debido a la carga muerta VG 01. ....           | 90  |
| Figura N° 28: Momentos debido a la carga viva VG 01. ....             | 90  |
| Figura N° 29: Carga muerta repartida vigueta 04 (Eje 6-8 y F-G) ..... | 100 |
| Figura N° 30: Carga viva de la vigueta 04 (Eje 6-8 y F-G).....        | 101 |
| Figura N° 31: Momentos debido a la carga muerta VG 04. ....           | 101 |
| Figura N° 32: Momentos debido a la carga viva VG 04. ....             | 101 |
| Figura N° 33: Ilustración de las cargas muertas en la losa .....      | 111 |
| Figura N° 34: Ilustración de las cargas vivas en la losa. ....        | 111 |
| Figura N° 35: Momento debido a carga muerta losa .....                | 112 |
| Figura N° 36: Momento debido a carga viva losa. ....                  | 112 |
| Figura N° 37: Momento debido a carga muerta.....                      | 117 |
| Figura N° 38: Momento debido a carga viva .....                       | 118 |
| Figura N° 39: Diagrama de Momento Viga W12x45 Eje B'-C' .....         | 119 |
| Figura N° 40: Diagrama de Momento Viga W12x45 Eje C'- D' .....        | 119 |
| Figura N° 41: Excel de diseño de Acero Estructural .....              | 120 |
| Figura N° 42: Diagrama de Momento Admisible para W12x45 .....         | 120 |
| Figura N° 43: Cronograma Reforzamiento con Platina de acero .....     | 125 |
| Figura N° 44: Cronograma Reforzamiento con CFRP .....                 | 125 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo N° 1: Notación de los términos usados en las ecuaciones
- Anexo N° 2: Matriz de consistencia
- Anexo N° 3: Procedimiento para el reforzamiento por flexión con FRP
- Anexo N° 4: Procedimiento para el reforzamiento por corte con FRP
- Anexo N° 5: Análisis de Precios Unitarios reforzamiento con platinas de acero
- Anexo N° 6: Análisis de Precios Unitarios reforzamiento de FRP
- Anexo N° 7: Cronograma Reforzamiento con Platina de Acero
- Anexo N° 8: Cronograma Reforzamiento con FRP
- Anexo N° 9: Modelo Matemático de la Edificación
- Anexo N° 10: Corte 2-2 y 4-4 de viga reforzada con las fibras de carbono
- Anexo N° 11: Vista de viga reforzada con la fibra de carbono
- Anexo N° 12: Vistas de las vigas en la planta
- Anexo N° 13: Plano estructural As Built de la planta a reforzar
- Anexo N° 14: Reforzamiento con fibras de carbono

## RESUMEN

El objetivo de la tesis fue usar fibras de carbono en las vigas principales, viguetas de la losa aligerada y la losa maciza, que debido al cambio de uso del área de interés estaban en infradiseño, se realizó el presupuesto y cronograma de la intervención, además de compararlo con el reforzamiento de platina de acero.

La empresa Repsol optó que el primer nivel sería utilizado como un Data Center al cual también se agregaron los equipos aire acondicionado y el grupo electrógeno.

En la tesis se utilizaron las pautas y fórmulas mostradas en la Norma Internacional ACI 440-2R17, en base a la norma se formuló una hoja de cálculo la cual nos permite incorporar el efecto del sismo para el diseño del reforzamiento para las vigas por flexión y esfuerzo de corte. Las fibras de carbono aumentan la resistencia a la tensión, mejora el confinamiento y aumenta la capacidad de cargas.

La metodología de nuestra investigación fue experimental, de orientación aplicada y enfoque mixto.

Con la aplicación del reforzamiento CFRP los elementos estructurales aumentaron sus momentos resistentes, sin que los efectos de fisura y el desprendimiento de la fibra de carbono se den según lo estipulado en la ACI 440 2R17, se usó vigas de acero estructural para solucionar las fallas de corte de las viguetas por la sobrecarga de los equipos.

Los plazos de ejecución se vieron reducidos en un 20.48% comparado a un método tradicional a costa de un aumento de los costos de instalación.

**Palabras claves:** Reforzamiento, estructuras, fibras de carbono.

## **ABSTRACT**

The objective of the thesis was to use carbon fibers in the main beams, lightened beam slabs and solid slab, which due at the change of use of the area of interest they were under-design, doing the budget and schedule of the work.

The Repsol company opted that the first level would be used as a data center to which the Air Conditioning equipment and the Generator Group were also added.

In this thesis the guidelines and formulas shown in the International ACI 440-2R17 standard were used, based on the standard a spreadsheet was formulated which allows us to incorporate the effect of the earthquake for the design of the reinforcement for bending beams and cutting effort.

The methodology of our research was experimental, of applied orientation and mixed approach.

With the application of the CFRP reinforcement the structural elements increased the resistance moments without the effects of cracking and the detachment of carbon fiber being given as stipulated in ACI 440 2R17, structural steel beams were used to solve the failures of joist cutting due to equipment overload.

The execution deadlines were reduced by 20.48% compared to a traditional method at the cost of an increase in installation costs.

**Keywords:** Reinforcement, structures, carbon fibers.

## INTRODUCCIÓN

Nuestro país se encuentra ubicado en Cinturón de Fuego del Pacífico y es una zona de alta actividad sísmica debido que bajo el Perú se da la subducción de la Placa Nazca en la Placa Sudamericana, la energía acumulada debido al traslape y fricción de estas se libera y da origen a las ondas sísmicas.

La edificación analizada fue construida antes de que la normativa Sismorresistente esté vigente y será sometida a un cambio de uso, por lo cual algunos de los elementos estructurales están en infradiseño. Se utilizó las pautas y fórmulas mostradas en la Norma Internacional ACI 440-2R17 para llevar a cabo un adecuado reforzamiento del techo y las vigas del primer nivel del centro empresarial, utilizando láminas de fibras de carbono, ya que no se requerirá de mucha mano de obra para poder realizar el reforzamiento.

En el Capítulo I analizamos la problemática, realizamos el planteamiento del problema, los objetivos, la importancia de la tesis, entre otros aspectos generales del alcance de nuestra investigación.

En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico, el uso de tesis nacionales e internacionales, la normativa internacional vigente para el uso de fibra de carbono, la cual será la base de los criterios utilizados en esta tesis.

En el Capítulo III se da a conocer la metodología de investigación.

En el Capítulo IV se realiza la descripción del proyecto base para la investigación, se hace mención a las características estructurales de vigas, losas sólidas y aligeradas, así mismo del tipo de sistema predominante en la edificación

En el Capítulo V se explica la filosofía de diseño en la cual se basa las fibras de carbono, las consideraciones que se tendrán y el procedimiento a seguir para la correcta selección de la fibra de carbono.

En el Capítulo VI se identifica los elementos a realizar el reforzamiento y se calcula las dimensiones de la fibra de carbono.

# **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1.1 Descripción del problema**

Lima metropolitana concentra la mayor cantidad de edificaciones para fines de oficina, comercio y de vivienda del Perú, un porcentaje de estos fueron construidos antes del 2006, año en que se aprobó la norma técnica sismorresistente del país, bajo estos nuevos estándares y las lecciones aprendidas de la evaluación de los sismos ocurridos en el país, estas edificaciones quedaron con un infradiseño, ya sea por dimensiones o por la cuantía de acero presente de los elementos estructurales.

Nuestro país se encuentra inmerso en el Cinturón de Fuego del Pacífico, siendo la costa peruana la que presenta el mayor potencial sísmico, esto conlleva a un aumento en el riesgo de las edificaciones que no han sido diseñadas bajo la normativa sismorresistente.

La informalidad presente en nuestra sociedad y la no consulta a personal calificado hace que muchas de las edificaciones en el Perú, no terminen siendo utilizadas con el fin por la cual fueron diseñadas, originando un aumento en la vulnerabilidad de las edificaciones.

La solución en ambos casos para evitar daños en las edificaciones es el reforzamiento estructural. Existen varias formas de realizar el reforzamiento, una de estas es el reforzamiento con fibra de carbono, la cual presenta grandes ventajas frente a otros métodos, por ejemplo, la inocuidad ante la intemperie, la fácil intervención en los proyectos, el no uso de equipos de grandes dimensiones y la ventaja más importante sería la rápida puesta en marcha de los ambientes intervenidos, por otro lado se presentan dos principales desventajas la primera es que no se cuenta con una normativa en el Perú y la segunda es el factor económico, el costo de la fibra de carbono es alto siendo solo costeados en proyectos de mediana o gran envergadura lo cual no permite propagar su uso.



## 1.2 Formulación del problema

### 1.2.1 Problemas en general

¿En qué medida el uso de la fibra de carbono (FRP) reduciría el tiempo de ejecución, el costo del reforzamiento y mejoraría el comportamiento de las vigas, losa sólida y las viguetas de la losa aligerada que se encuentran en infradiseño por cambio de uso de la edificación frente a un sismo, en el Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?

### 1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿En qué medida el uso de la fibra de carbono (FRP) mejoraría el comportamiento (momento y cortante) de las vigas, losa sólida y las viguetas de la losa aligerada que se encuentran en infradiseño por cambio de uso de la edificación frente a un sismo, en el Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?
- b) ¿De qué manera el uso de la fibra de carbono (FRP) reduciría el tiempo de ejecución del reforzamiento de los elementos estructurales en infradiseño de la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?
- c) ¿En qué medida el uso de la fibra de carbono (FRP) incidiría en los costos de un reforzamiento de los elementos estructurales en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?

## 1.3 Objetivos de la investigación

### 1.3.1 Objetivo general

Reducir el tiempo de ejecución, el costo del reforzamiento y mejorar el comportamiento (momento y cortante) de las vigas, losa sólida y las viguetas de la losa aligerada que se encuentran en infradiseño por cambio de uso de la edificación, frente a un sismo, utilizando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) Mejorar el comportamiento (momento y cortante) de las vigas, losa sólida y las viguetas de la losa aligerada que se encuentran en infradiseño por cambio de uso de la edificación, frente a un sismo, utilizando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.
- b) Reducir el tiempo de ejecución del reforzamiento de los elementos estructurales usando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.
- c) Costear la ejecución del reforzamiento de los elementos estructurales usando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.

### 1.4 Importancia y justificación del estudio

La importancia de la investigación proporcionaría información sobre los beneficios estructurales, económicos y productivos del reforzamiento de los elementos estructurales utilizando la fibra de carbono, buscando obtener el reforzamiento óptimo para las limitaciones encontradas En las edificaciones presentes en Lima Metropolitana.

### 1.5 Limitaciones

Las limitaciones que se presentan serian para la presente investigación son:

- a) No se cuenta con una norma específica de reforzamiento con fibras de carbono en el Perú.
- b) La cantidad de proveedores de fibra de carbono a nivel nacional es limitada.
- c) No se dispone de un gran número de personal calificado en el uso de fibra de carbono.

### 1.6 Viabilidad

Las viabilidades para el proyecto son las siguientes:

- a) Se cuenta con dimensiones finales de los elementos estructurales, así como sus propiedades que se encuentran definidas por las inspecciones a campo y la realización de pruebas insitu.

- b) El uso de reforzamiento con fibra de carbono se encuentra estandarizado a nivel internacional con la norma ACI 440 - 2017, siendo estos corroborados por diferentes investigaciones previas.
- c) Las disposiciones del proyecto a desarrollarse reducen las posibilidades del uso de un refuerzo convencional, haciendo que el factor económico no sea considerado para estos efectos.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes de la investigación

Para llevar a cabo nuestra investigación sobre nuestra tesis, se ha realizado unas investigaciones a otras tesis internacionales y también nacionales.

#### 2.1.1 Tesis Nacionales

Alegre, G. (2017) Es preciso señalar que, como cualquier material, con el transcurso del tiempo y a la exposición natural del material a la intemperie, pueden las estructuras disminuir la capacidad máxima de sus propiedades físicas y químicas al verse expuesto ante problemas patológicos. En general, los problemas patológicos presentan manifestaciones externas características, a partir de las cuales se deducen cuál es la naturaleza, origen y los fenómenos involucrados, además de estimar sus probables consecuencias. (p.13) [...]

Por lo tanto, se ha decidido buscar una manera alterna de reforzamiento de elementos estructurales que garanticen durabilidad y efectividad, llegando a la conclusión de utilizar láminas de fibras de carbono, ya que presentan mejores propiedades que el acero, mayor resistencia a la tensión y es de fácil manipuleo. (p.26)

Belizario, C. (2017) Nos informa en su tesis como fue el gran cambio en las edificaciones pasadas y como utilizaron las normas para poder construir sus edificaciones, ya que hasta el año 2014 en Huancayo casi el 50% de edificaciones fueron construidas sin una licencia de construcción, ósea no siguieron un sustento técnico para su construcción de edificaciones y a su vez que el gran cambio de pasar de tener edificaciones hecha de adobe a nuevas con amortiguadores y aislamientos. (p. xi) [...]

También se da a conocer los diferentes métodos de reforzamientos estructurales que se emplean en el Perú especialmente en la ciudad de Huancayo. Ya que hoy en día, debido a la necesidad de construir más niveles para las viviendas antiguas y tomando en cuenta que fueron hechas de adobe, se necesita un reforzamiento que sea

eficiente y económico ya que años pasados dicha ciudad fue víctima de varios sismos con magnitudes relativamente altas variando entre cinco a siete grados de magnitud, tomando como ejemplos los de Pariahuanca de magnitud 5.6 y 6.2 grados. (p.4)

Bazán, J. (2015) Se dan a conocer los beneficios esperados de las técnicas de reforzamientos de estructuras de concreto empleadas para cualquier tipo de construcción, entre ellas la que más resalta o la que se optó por elegir es a través de las fibras de carbono, ya que beneficia en la resistencia a la tensión y tracción de elementos estructurales y evita que presente daños a través de agentes externos como los movimientos sísmicos entre otros. (p.15)

Los beneficios que brindan los paneles de fibras de carbono según lo indican en la tesis serían los siguientes: Alta resistencia a la flexión (mayor que la del acero), posee menos peso que el acero, ayudando con la movilidad y colocación en los elementos estructurales, no es corrosivo, por lo que no necesita de mucho mantenimiento y se aplica de manera eficiente y rápida. (p.16)

### 2.1.2 Tesis Internacionales

Silva, P. (2016) “Refuerzo estructural con fibra de carbono”, describe en el primer capítulo las ventajas del uso de la fibra de carbono como refuerzo, entre ellos resalta su capacidad de resistir altas cargas de tracción, su fácil y rápida aplicación, así como su puesta en servicio, reducción de los tiempos de ejecución en el proceso constructivo, etc. (p.10) [...]

La tesis mencionada plantea como objetivo comparar el comportamiento de estructuras de acero y las de acero reforzadas con fibras de carbono, para esto se probaron las muestras a tracción y se obvió la de compresión por no tener un aporte considerable, se usó resina epóxica para la adherencia de acero y el refuerzo con fibra de carbono. (p.14)

Yauli, J. (2014) “Desempeño Sísmico de una viga reparada con fibras de carbono”, describe en el sexto capítulo las tres principales alternativas para el refuerzo de estructuras entre los cuales está el aumento de las dimensiones de los elementos estructurales, el refuerzo mediante perfiles metálicos y por último el refuerzo mediante fibras de carbono. (p.47)

En el caso de reforzamiento mediante el aumento de las dimensiones de los elementos estructurales se destaca de la compatibilidad entre el material original y el del refuerzo, además que en ese aumento de dimensiones se puede dar un aumento de la cuantía de acero los cuales se conectan con unas “llaves a la armadura original”, como resultado el nuevo elemento será monolítico. Las normas internacionales que se pueden usar como guía sería el ACI 562-13 y el ASTM C157 / C157 M. (p.47)

Sandoval, P. (2014) “Evaluación experimental del comportamiento mecánico de refuerzos de fibra de carbono con matriz cementícea (FRCM), Influencia del tipo de Matriz” describe que hay dos tipos de reforzamiento con fibra de carbono, el primero que es el más común donde se usa resina epóxica para la adherencia al concreto a la albañilería y el otro caso donde la unión se hace mediante materiales inorgánicos de fibras con la matriz cementícea (p.i) [...]

La matriz cementícea generalmente es un mortero fino con dosis bajas de polímeros orgánicos secos el cual es menor al 5%, la inclusión de los polímeros ayuda a mejorar las propiedades reológicas, mecánicas y ayuda en el tiempo de fraguado del concreto. (p.36)

## 2.2 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

Blanco Blasco, Antonio (1990) indica que “El análisis de pórticos, vigas o losas continuas se hace generalmente usando métodos clásicos como el de Cross,

o métodos más modernos como el de rigidez o flexibilidad, generalmente empleados matricialmente en los programas de computadoras” (p 118). También indica ejemplos de diseños de vigas de todo tipo de secciones según los tipos de cargas a las cuales este sometida la viga, llegando a la conclusión de cuantas barras de acero se necesitan para darle suficiente flexión. También se da a conocer los diferentes métodos de diseño para las losas continuas.

### 2.2.1 Imprimación con fibras de carbono

Para garantizar un reforzamiento más eficiente y rápido se decide en algunas ocasiones usar imprimaciones con fibras de carbono en los elementos estructurales que presenten fallas o agrietamientos, debido al paso del tiempo, por estar sometidos a sobrecargas o por el efecto de las sales. Al realizar la imprimación garantiza muchos puntos positivos, como una buena compatibilidad con fibra de carbono, infiltración sencilla en la superficie de concreto, resistencia al agua, además resistencia a la corrosión y excelente rendimiento. Se puede apreciar el reforzamiento de un elemento estructural en la siguiente figura. (Ver fig. N°1)

Se muestran los momentos en los que se utiliza imprimación con fibras de carbono:

- Reforzar el sustrato de hormigón después de cincelado.
- Para cerrar los pequeños orificios del sustrato de concreto
- Reforzamiento de los elementos estructurales de los edificios.



Figura N° 1: Reforzamiento con fibras de carbono

Fuente: Pagina de Horse (<https://es.horseen.com>)

### 2.2.2 Fortalecimiento con las Fibras de Carbono

El fortalecimiento o reequipamiento de estructuras de concreto existentes para resistir mayores cargas designadas, corrigen la pérdida de fortalecimiento por deterioro, también deficiencias constructivas o diseños o incremento de ductilidad que históricamente ha sido realizada usando materiales convencionales y técnicas constructivas. Uniendo planchas de acero externamente son unas de las técnicas tradicionales empleadas y permitidas.

Materiales compuestos por fibras en una resina polimérica también se conocen como fibras de reforzamiento (FRPs) han emergido como una opción para rehabilitar y reparar. Se conoce como resina y fibras se usan para crear compuestos laminados toda resina se usa para unir el substracto de concreto. Se usa para proteger el material recubriéndolo.

Fibras de carbono son de peso ligero y presentar gran esfuerzo de tensión. Estos materiales se usan de muchas formas, ya que las fábricas pueden acomodar las fibras a la forma que se desea y unir las con las resinas dándoles la geometría que se espera.

El uso de las fibras de carbono muestra su accesibilidad, las fibras de carbono está constituida por fibras y resinas combinadas de una específica manera e instaladas por un método específico. Estos sistemas se han desarrollado y probados estructuralmente

Las combinaciones de fibras y resinas no probadas podrían dar lugar a un rango inesperado de propiedades, así como a posibles incompatibilidades materiales. Cualquier sistema de fibras de carbono deben tener suficientes pruebas de datos válidas para poder usarse en una cierta aplicación incluyendo adecuados métodos de instalación, la norma ACI 440.8 proporciona una especificación para carbón unidireccional y materiales de vidrio hechos mediante el proceso de laminado en húmedo

Las sostenibilidades de las fibras de carbono deben evaluarse considerando el medio ambiente, la economía y principios, además debe tomarse en cuenta el mantenimiento adecuado de la construcción hasta el fin de su vida. Los componentes de la fibra deben usarse para fortalecer correctamente el concreto de todas las formas posibles.



Los materiales compuestos utilizados para reforzar los elementos de concreto pueden usar tanto fibra de carbón como fibra de vidrio, que se derivan de minerales fósiles de combustibles fósiles, respectivamente, y por lo tanto tienen impactos relacionados con la extracción de materias primas.

Es de sencillo transporte, ya que poseen poco peso, lo que permite que solo se necesite de pocas personas para el transporte y su instalación o colocación en los elementos estructurales. Se utiliza las fibras de carbono como recubrimiento de elementos estructurales dándoles mayor tiempo de vida y mayor durabilidad, antes de aplicar un mantenimiento. Sin embargo, es difícil separar los materiales, las fibras y las resinas sin degradación alguna de los materiales reciclados resultantes.

Los servicios de búsqueda se basan de una guía. Esta búsqueda nos conduce a los años 80 donde se hicieron estudios analíticos, pruebas, y monitoreo aplicando el refuerzo de las fibras de carbono, garantizando una mayor resistencia y durabilidad de las columnas, vigas y otras aplicaciones. Adicionalmente los efectos y estudios del clima se requieren también para poder llevar a cabo un buen uso de la fibra de carbono para el reforzamiento del concreto.

Las ecuaciones de diseño que se dan en este documento son el resultado de una investigación realizada principalmente en miembros de tamaño moderado y proporcionados fabricados de concreto de peso normal. Se deben dar precauciones a las aplicaciones que involucren el fortalecimiento de miembros de concretos livianos muy grandes o el fortalecimiento en regiones perturbadas de miembros estructurales como vigas profundas, ménsulas y extremos de vigas apisonadas.

## 2.3 Estructuras teórica y científica que sustenta el estudio

### 2.3.1 Normas

#### 2.3.1.1 Normas Nacionales

La norma E-020 da a conocer los diferentes tipos de cargas a las cuales puede estar sometida cualquier estructura, ya sea un edificio, casa, hospital, teatro, etc. Da a conocer que todas edificaciones según el funcionamiento de las diferentes áreas poseen una carga mínima de

carga viva que se expresan o se dan a conocer en una tabla donde se indican varios usos de los pisos de un edificio.

Nos dice las definiciones de las cargas como:

a) Carga muerta: El peso de todo material, dispositivo o mejor dicho elementos sólidos, incluyendo también el peso propio de la edificación. Dichos valores de cargas pueden obtenerse mediante la tabla que se muestra según los datos del diseño y catálogos de los fabricantes.

b) Carga viva: Es la carga mínima que debe resistir toda edificación, según el área designada o mejor dicho por el uso del área. Estos datos se muestran en la siguiente tabla que se encuentra en la norma expresados más abajo (Ver tabla N°1). Estos datos deben ser expresados en todo plano del proyecto que se esté ejecutando.

Tabla N° 1: Cargas vivas mínimas repartidas

| <b>OCUPACIÓN O USO</b>                     | <b>CARGAS REPARTIDAS kPa<br/>(kgf/m<sup>2</sup>)</b>   |
|--|--|
| <b>Oficinas (*)</b>                        |  |
| Exceptuando salas de archivo y computación | 2.5 (250)  |
| Salas de archivo                           | 5.0 (500)  |
| Salas de computación                       | 2.5 (250) Ver 6.4  |
| Corredores y escaleras                     | 4.0 (400)  |
| <b>Baños</b>                               | Igual a la carga principal del resto del área, sin que sea necesario que exceda de 3,0 (300) |

Fuente: Norma E-020 “Cargas”

También indicando ciertos parámetros que se deben tomar en cuenta al momento de colocar cargas en las zonas de toda edificación, como la tabiquería móvil que indica una carga viva adicional que se puede distribuir en 50 kgf/m<sup>2</sup> o 100 kgf/m<sup>2</sup> según las divisiones de alturas, también la conformidad para determinar si las cargas son reales y las

cargas vivas en los techos. A su vez que la norma nos indica los valores mínimos de cargas vivas según las características que posea el techo.

La norma E-030 nos dará a conocer los datos necesarios para poder llevar a cabo un diseño sismorresistente de toda edificación ubicada en el Perú, según estudios anteriores sobre las cualidades del suelo de cada ciudad, datos como la zonificación o Z que da a conocer el peligro sísmico que existe en cada ciudad de lima basándonos de este gráfico (Ver fig. N°2).



Figura N° 2: Zonas sísmicas en el Perú

Fuente: Norma E-030

Otro dato muy importante para el análisis sismorresistente es el perfil de tipo de suelo. Según la norma se dividen en 5 tipos de suelos que son los siguientes:

- Perfil tipo S<sub>0</sub>: Roca dura
- Perfil tipo S<sub>1</sub>: Roca o suelo Muy Rígidos
- Perfil tipo S<sub>2</sub>: Suelos Intermedios
- Perfil tipo S<sub>3</sub>: Suelos Blandos
- Perfil tipo S<sub>4</sub>: Condiciones Excepcionales

En la siguiente tabla se muestran las condiciones para poder elegir el apropiado perfil de suelo. (Ver tabla N° 2)

Tabla N° 2: Clasificación de los perfiles de suelo

| Perfil         | $\tilde{V}_s$                  | $N_{60}$ | $S_u$            |
|----------------|--------------------------------|----------|------------------|
| S <sub>0</sub> | >1500 m/s                      | -        | -                |
| S <sub>1</sub> | 500 m/s a 1500 m/s             | >50      | >100 kPa         |
| S <sub>2</sub> | 180 m/s a 500 m/s              | 15 a 50  | 50 kPa a 100 kPa |
| S <sub>3</sub> | < 180 m/s                      | < 15     | 25 kPa a 50 kPa  |
| S <sub>4</sub> | Clasificación basada en el EMS |          |                  |

Fuente: Norma E-030 “Diseño Sismorresistente”

También se obtienen los valores de Periodos y las categorías de las edificaciones según el uso que se le esté dando. Utilizando las siguientes tablas. (Ver tabla N° 3)

Tabla N° 3: Periodos “TP” y “TL”

|                    | Perfil de Suelo |                |                |                |
|--------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
|                    | S <sub>0</sub>  | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> |
| T <sub>P</sub> (s) | 0.3             | 0.4            | 0.6            | 1.0            |
| T <sub>L</sub> (s) | 3.0             | 2.5            | 2.0            | 1.6            |

Fuente: Norma E-030 “Diseño Sismorresistente”

En la siguiente tabla se muestran los valores del factor U. (Ver Tabla N° 4)

Tabla N° 4: Categoría de las edificaciones y factor “U”

| CATEGORÍA                     | DESCRIPCIÓN  | FACTOR U |
|-------------------------------|--|----------|
| C<br>Edificaciones<br>Comunes | Edificaciones comunes tales como:<br>viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes,<br>depósitos e instalaciones industriales<br>cuya falla no acarree peligros adicionales<br>de incendios o fugas de contaminantes. | 1.0      |

Fuente: Norma E-030 “Diseño Sismorresistente”

Y por último nos da a conocer el valor de la amplificación sísmica (C) a través de las siguientes expresiones:

$$T < T_P \quad C = 2.5$$

$$T_P < T < T_L \quad C = 2.5 * (T_P/T)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 * (T_P * T_L / T^2)$$

Donde T es el periodo.

Se muestran los valores de los coeficientes básicos de reducción. (Ver tabla N° 5)

Tabla N° 5: Sistemas estructurales

| Sistema Estructural                      | Coficiente Básico de Reducción R <sub>0</sub> (*) |
|--|---|
| <b>Concreto Armado:</b>                  |   |
| Pórticos                                 | 8   |
| Dual                                     | 7   |
| De muros estructurales                   | 6   |
| Muros de ductilidad limitada             | 4   |
| <b>Albañilería Armada o Confinada</b>    | 3   |
| <b>Madera (Por esfuerzos admisibles)</b> | 7   |

Fuente: Norma E-030 “Diseño Sismorresistente”

La norma E-060 que nos indica datos de durabilidad de los concretos empleados, según las condiciones climáticas que deba estar sometido y las dosificaciones del concreto.

También indicando todas las maneras de aumentar su resistencia a la compresión en caso esta se vea reducida, también varios estudios y pruebas que se realizan para verificar si el concreto utilizado es válido para ser utilizado y si cumple con las condiciones o pautas necesarias

Indica también las maneras de mezclar concreto, como transportarlo, como colocarlo en la estructura para llevar a cabo un correcto vaciado de vigas o columnas, incluso nos indica las maneras de cómo proteger

el concreto ante agentes externos como las sales, climas fríos o calientes y también realizar un curado adecuado.

Los métodos de análisis y diseño que se aplican según los elementos estructurales de los que este expuesto el edificio, sean columnas y vigas, pórticos, si contara con cargas vivas o diferentes tipos de vigas como la viga T, y también indica la resistencia que necesita cada edificación y también da a conocer que tipo de resistencias se deben de tener en cuenta al momento de realizar nuestro análisis y diseño, como resistencias cortantes o a la flexión y realizar diseños por flexión o carga axial.

También se da a conocer las formulas aplicadas para poder verificar las fuerzas cortantes a las que estarán sometidas las vigas peraltadas que se necesitarán reforzamiento debido al incremento de peso por los objetos pesados que irán colocados. Utilizando las siguientes fórmulas con las que hallamos la resistencia nominal a la cortante y también resistencia nominal a la cortante proporcionada por el concreto:

$$V_n = 0.83 \sqrt{f'c} b_w * d \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'c} b_w * d \quad \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

$V_c$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por hormigón con refuerzo de flexión de acero, lb (N)

$V_n$  = Resistencia al corte nominal, lb (N)

$f'c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto, psi (MPA)

$b_w$  = ancho del diámetro de la sección circular, in (mm)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión.

#### 2.3.1.2. Normas Internacionales

La norma ACI 440-2R2017 da a conocer todos tipo de información necesaria para la aplicación del acero como refuerzo estructural, usando como barras de acero y a su vez el uso de las fibras de carbono como reforzamiento en la construcción.

Nos indica gran cantidad de términos necesarios para poder entender las diferentes fórmulas empleadas para el correcto diseño de acero en la edificación.

A su vez nos narra el origen de las fibras de carbono y del acero y en que ocasiones se empezó a utilizar para realizar reforzamientos, las investigaciones que se realizaron a través de los años para mejorar la calidad del acero y su influencia en las edificaciones. A su vez que nos indica los datos más comunes de los materiales para realizar los cálculos respectivos, mostrados en tablas, datos como coeficientes, del acero o del concreto, a que temperaturas se tiene que trabajar, la durabilidad de las fibras de carbono, por cuanto tiempo tienen que hacerse mantenimiento o si no lo requieren dependiendo de la situación.

También se expresa las inspecciones que tiene que realizarse y las maneras empleadas para realizar una correcta reparación, ya sea interna o superficial. Todos las reparaciones y las investigaciones tienen como referencia la norma ACI318, ya que es la fuente de información más confiable y reciente de la época y mostro ser correcta.

A su vez que varias de las fórmulas se basan completamente de la norma ACI y sus diferentes capítulos. También se muestra la flexibilidad mostrada en las fibras de carbono en base a su uso, las maneras de encontrar las fuerzas y esfuerzos que pueden resistir si se usan como refuerzo interno o externo.

Muestra también los diferentes diagramas utilizados para poder entender con mayor facilidad la resistencia que presentan las fibras de carbono al presentar ciertas deformaciones o también dependiendo del tipo de concreto utilizado.

También muestran gráficos donde se da a conocer su uso y manera de trabajar según la manera que se haga colocado y como se deben unir cuando hay un encuentro entre columnas y vigas, utilizando la fórmula que se muestra en la norma.

Muestran también como se hallan los momentos y fuerzas cortantes en las vigas ya que esos son los elementos estructuras que comúnmente suelen ser reforzados con las fibras.

Y finalmente al final de la norma se muestran los diferentes casos donde se tiene que aplicar las fórmulas que se observaron en la norma en los diferentes capítulos y los datos constantes que se utilizan según los datos de concreto y las áreas de las fibras y aceros a utilizar. Y también da a conocer las cargas muestras, vivas, momentos u otros valores que se presentan comúnmente.

## 2.3.2 Comportamiento de Materiales

### 2.3.2.1 Propiedades Físicas

**Densidad:** Los materiales de fibra de carbono tienen densidades que varían desde 1.2 a 2.1 gr/cm<sup>3</sup>, la cual es de 4 a 6 veces más bajo que la del acero.

**Coefficiente de expansión termal:** El coeficiente de expansión termal del FRP difiere en la dirección longitudinal y la transversal, dependiendo del tipo de fibra, resina y el volumen de fracción de fibra. Un coeficiente termal negativo indica que el material se contrae con el incremento de la temperatura y se expande con la reducción de la temperatura.

**Efectos de altas temperaturas:** Sobre la temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) el módulo elástico de un polímero se reduce significativamente debido a los cambios de la estructura molecular. El valor de la T<sub>g</sub> depende del tipo de resina y se encuentra normalmente en el rango de 60 a 82 °C. En el caso de un FRP que es un material compuesto, las fibras ofrecen mejores propiedades térmicas que las resinas, esta puede continuar



soportando hasta se llegue a la temperatura de la fibra, lo cual ocurre pasando los 1000°C para la fibra de carbono.

#### 2.3.2.2 Propiedades Mecánicas

**Comportamiento a la Tracción:** Cuando se carga en tracción directamente los materiales del refuerzo de fibra de carbono (FRP) no presentan un comportamiento plástico antes de la ruptura.

El comportamiento a la tensión de materiales FRP de un solo tipo de fibra es caracterizado con una relación tensión-deformación elástica lineal hasta la falla.

La resistencia a la tracción y la rigidez de un material FRP depende de muchos factores. Este se debe a que las fibras en un FRP son los principales componentes que soportaran las cargas, el tipo de fibra, la orientación, la cantidad de fibra, los métodos y condiciones en la cual los componentes son producidos afectan a las propiedades de los materiales FRP. Además del rol primario de las fibras y los métodos de aplicación, las propiedades de un sistema de reforzamiento de FRP son reportadas a base del área neta de fibra.

**Comportamiento a la Compresión:** El sistema de reforzamiento con FRP no debe ser usado como refuerzo a la compresión debido a las pruebas insuficientes para validar su uso en este tipo de aplicación. El modo de falla para láminas de FRP sujetas a compresión longitudinal pueden incluir fallas transversales de tracción, falla por corte. El módulo de falla depende del tipo de fibra, la fracción en volumen de fibra, y el tipo de resina.

#### 2.4 Filosofía de Diseño de las fibras de carbono

Estas recomendaciones de diseño se basan en principios de diseño de estados límite. este enfoque establece niveles aceptables de seguridad para la aparición tanto de los estados límite de servicio como de los estados límite últimos (falla, ruptura de tensión y fatiga). Al evaluar la resistencia nominal de un miembro, se deben evaluar los posibles modos de falla y las tensiones y tensiones

subsiguientes en cada material. Para evaluar la capacidad de servicio de un miembro, se pueden usar principios de ingeniería, como los cálculos de sección transformada que usan relaciones modulares.

Los sistemas de fortalecimiento deben diseñarse de acuerdo con los requisitos de resistencia y capacidad de servicio de la norma ACI 318 utilizando los factores de resistencia y carga indicados en la ACI 318. Esta guía recomienda factores de reducción adicionales aplicados a la contribución del refuerzo de fibras de carbono para reflejar las incertidumbres inherentes a los diferentes sistemas de fibras de carbono. De hormigón armado y de hormigón.

Estos factores de reducción se determinaron en función de la evaluación estadística de la variabilidad en las propiedades mecánicas, resultados de pruebas pronosticados frente a escala completa y aplicaciones de campo. Los factores de reducción relacionados con las fibras de carbono que se calibraron para producir índices de fiabilidad muy superiores a 3.5. Se pueden encontrar índices de confiabilidad entre 3.0 y 3.5 en casos donde se usan relaciones relativamente bajas de refuerzo de acero combinadas con relaciones altas de refuerzo de fibras de carbono. Es menos probable que estos casos se encuentren en el diseño porque violan los límites recomendados de la parte 9.2. Los índices de confiabilidad para los miembros reforzados con fibras de carbono se determinan según el enfoque utilizado para la construcción de concreto reforzado. En general, se espera una menor confiabilidad en las estructuras reconstruidas y reparadas que en las estructuras nuevas.

## 2.5 Definición de términos importantes

- a) **Fibras de carbono:** Tejido que posee gran durabilidad, resistencia y altamente flexible. Comúnmente se comercializa en fieltros de telas y su peso es ligero, más ligero que el acero y se usa para realizar reforzamientos externos de elementos estructurales ya sean vigas, losas, columnas, etc. Se utilizan miles de fibras de carbono para formar un hilo, ya que los diámetros de las fibras son entre 50 – 10 micras.
- b) **Módulo de rotura:** es el esfuerzo máximo por parte de la fibra cuando se presentan fallas ya sea por flexión o torsión.

- c) **Resistencia a la tracción:** Es la máxima tensión que puede resistir un material antes de presentar fallas o desgastes. Se define a su vez como la fuerza aplicada por unidad de área.
- d) **Mortero epóxico de reparación:** son aquellos productos embolsados, mezclas entre cementos, aditivos y arenas para la reparación del concreto. Para poder aumentar la adherencia entre elementos estructurales o para resanar las zonas donde el concreto se muestre dañado.  
La diferencia entre el módulo de rotura y el de tracción es que el módulo de rotura se mide con el esfuerzo máximo y el de tracción se mide con la tensión.
- e) **Edificación:** Es toda construcción realizadas por el ser humano y con el propósito específico y planeado. Otra característica importante es que no tienen una forma o estructura definida, sino que puede variar en base a las necesidades del proyecto o en el mayor de los casos de los clientes que desean la construcción, sin alejarse de la realidad, ya que toda edificación se realiza empleando requisitos, normativas y especialmente la economía necesaria para brindar comodidades y seguridad a los propietarios.

## 2.6 Hipótesis

### 2.6.1 Hipótesis Principal

Usando fibras de carbono, reduciremos el tiempo de ejecución del reforzamiento, los costos generados y mejoraremos el comportamiento de los elementos estructurales como vigas, losas sólidas y las viguetas de la losa aligerada en infradiseño debido a un cambio de uso de la edificación frente a un movimiento sísmico, en el Centro Empresarial Camino Real – San Isidro.

### 2.6.2 Hipótesis Secundaria

- a) Usando fibras de carbono se mejoraría el comportamiento de los elementos estructurales como vigas, losas sólidas y las viguetas de la losa aligerada en infradiseño debido a un cambio de uso de la edificación frente a un movimiento sísmico, en el Centro Empresarial Camino Real – San Isidro.

- b) La propuesta del uso de fibras de carbono reduciría el plazo de ejecución en el reforzamiento en la edificación del Centro Empresarial Camino Real – San Isidro.
- c) Utilizando fibras de carbono se reduciría los costos generados en el reforzamiento de la edificación del Centro Empresarial Camino Real – San Isidro.

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

### 3.1 Tipo de Investigación

Ya que buscamos los efectos positivos del reforzamiento de elementos estructurales en un edificio cuyo piso se le está cambiando su uso, entonces se realizó una investigación aplicada. A su vez se buscó realizar una mejora duradera, económica y fácil de aplicar. (Monje Álvarez, 2011, p.61)

Debido a los pasos que debemos seguir para llevar a cabo un correcto análisis de la edificación y reforzamiento de fibras de carbono se realizó una investigación científica ya que primero llegamos a nuestros posibles resultados de mejoras tanto estructurales y económicas que proporcionaría, después realizamos el desarrollo del reforzamiento y así observar si nuestras hipótesis son correctas y llegar a una solución comprobada. (Monje Álvarez, 2011, p.19)

En resumen, nuestra investigación fue del tipo aplicada y científica.

### 3.2 Diseño de investigación

El nivel de nuestra tesis es experimental, debido a que por el cambio de uso del piso de la edificación las cargas aumentan, variando los valores de momentos y cortantes últimos. Por lo tanto, debemos realizar el reforzamiento para que la edificación sea capaz de resistir los nuevos momentos y cortantes últimos y no muestre futuros daños estructurales.

### 3.3 Relación entre variables

Variable dependiente: Edificaciones en la zona de Lima Metropolitana

Indicadores: Geometría de la edificación, número de pisos, dimensiones de elementos estructurales de la edificación.

Instrumentos: Hoja de cálculos obtenidas de la computadora con ayuda del programa ETABS 2016 y una hoja de Excel.

Variable Independiente: Refuerzo con fibras de carbono

Indicadores: Modulo de elasticidad, ancho y espesor de las FRP. Otros indicadores importantes son los momentos flectores y esfuerzos cortantes.

Instrumentos: Hoja de cálculos obtenidas de la computadora con ayuda del programa ETABS 2016 y una hoja de Excel.

### 3.4 Operacionalización de variables

Se realizó la tabla de operacionalización de variable. (Ver tabla N° 6)

Tabla N° 6: Operacionalización de variables

| Hipótesis   | Variables                    | Definición Conceptual   | Definición Operacional   |  |                 |              |
|---|------------------------------|---|--|--|-----------------|--------------|
|   |                              |   | Dimensiones  | Indicadores                            | Fuente          |              |
| Usando fibras de carbono se mejoraría el comportamiento estructural de los elementos en infradiseño que conforman las edificaciones construidas antes de la vigencia de la norma técnica de sismoresistencia. | Principal                    | Tejido que posee gran durabilidad, resistencia y altamente flexible. Comúnmente se comercializa en fieltros de telas y su peso es ligero, más ligero que el acero y se usa para realizar reforzamientos externos de elementos estructurales ya sean vigas, losas, columnas, etc. Se utilizan miles de fibras de carbono para formar un hilo, ya que los diámetros de las fibras son entre 50–10 micras. | Especificaciones Técnicas de FRP   | Modulo de Elasticidad                  | Ficha Técnica   |              |
|   | Dependiente                  |   |  | Deformacion de ruptura                 | Ficha Técnica   |              |
|   | Refuerzo de Fibra de Carbono |   |  | Ancho de Capa FRP                      | Ficha Técnica   |              |
|   |                              |   |  | Espesor de FRP                         | Ficha Técnica   |              |
|   |                              |   | Esfuerzos Principales  | Momento Flector                        | Modelamiento    |              |
|   |                              |   |  | Esfuerzo Cortante                      | Modelamiento    |              |
|   | Independiente                |   | Es toda construcción realizadas por el ser humano y con el propósito específico y planeado. Otra característica importante es que no tienen una forma o estructura definida, sino que puede variar en base a las necesidades del proyecto o en el mayor de los casos de los clientes que desean la construcción, sin alejarse de la realidad, ya que toda edificación se realiza empleando requisitos, normativas y especialmente la economía necesaria para brindar comodidades y seguridad a los propietarios. | Geometria de la Edificacion            | Número de Pisos | Modelamiento |
|   | Edificaciones                |   |  | Dimensiones de Elementos Estructurales | Peralte y base  | Modelamiento |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 Universo, población y muestra

#### 3.5.1 Universo de estudio

El universo de estudio serán todas las edificaciones de más de 10 pisos dentro de Lima Metropolitana que requieran de reforzamiento estructural.

#### 3.5.2 Población de estudio

Las poblaciones de estudio serian todos los edificios de más de 10 pisos dentro de Lima Metropolitana que han sido construidos antes del año 2006, año en la cual se aprobó la norma técnica de sismorresistencia (E-030), además se centrará en los edificios que tienen como fin de uso a las oficinas, y de los cuales se requiere un proceso de reforzamiento por un cambio de uso.

### 3.5.3 Muestra de estudio

Para nuestra investigación se escogió un edificio de oficina de 13 pisos y 3 sótanos ubicado en el Centro Empresarial Camino Real – San Isidro, el cual fue construido en año 1986, en el primer piso se encuentra las oficinas de la empresa Repsol el cual va a realizar un cambio de uso, el mismo pasará de un uso de oficinas a uno donde se colocarán los equipos de Centro de Datos (Data Center).

### 3.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

- a) Inspecciones visuales y Planos As-Built. (Ver Anexo N°2, N°10, N°11, N°12, N°13, N°14 y N°9)
- b) Modelo matemático en software ETABS 2016 (versión 16.2.1) agregando los cambios de carga y se obtiene los nuevos Momentos y Esfuerzos en elementos estructurales. (Ver Anexo N°9)
- c) Elaboración de hojas de Cálculo para obtención de refuerzo de fibra de carbono, basado en la norma ACI440 -2017. (Ver Anexo N°3 y N°4)

### 3.7 Procedimiento para la recopilación de datos

Para el desarrollo del proyecto se contó con los planos de arquitectura y estructuras de manera física, estos se procesaron y se digitalizaron, después se realizaron visitas a las oficinas de Repsol donde se verificó medidas indicadas, además de verificar las interferencias posibles en el proyecto de reforzamiento.

Los datos de los reforzamientos de fibra de carbono se obtuvieron de la empresa Sika Perú, con estos valores y el análisis en base a la Norma ACI 440 R17 para los casos de losas y vigas, esto se realizó el cálculo de los refuerzos.

Para el análisis sísmico se usó los resultados de un análisis de suelo actual, con el fin de tener una mejor aproximación de la aceleración de diseño de la zona.

### 3.8 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

- a) Cálculo de las propiedades del FRP (Hoja técnica Sika).
- b) Cálculo de las propiedades de concreto ( $\beta_1$  y  $E_c$ ).
- c) Obtener los momentos y esfuerzos nuevos después del cambio de carga.

- d) Cálculo de cuantía de acero existente y faltante (Plano As-built).
- e) Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP.
- f) Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP.
- g) Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio.
- h) Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección.
- i) Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada.



## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LA EDIFICACIÓN

### 4.1 Descripción del proyecto

El proyecto de reforzamiento estructural para la “Construcción y adecuación en planta N° 1 de edificio de oficinas existente Torre 5 de instalación destinada para Data Center (En adelante DC) para Repsol en Lima (Perú) ubicado en la calle Víctor Andrés Belaunde N° 147, en el centro empresarial San Isidro, distrito de San Isidro, provincia y departamento de Lima, propiedad de REPSOL sucursal Perú. Podemos apreciar la ubicación exacta en la figura N°3.

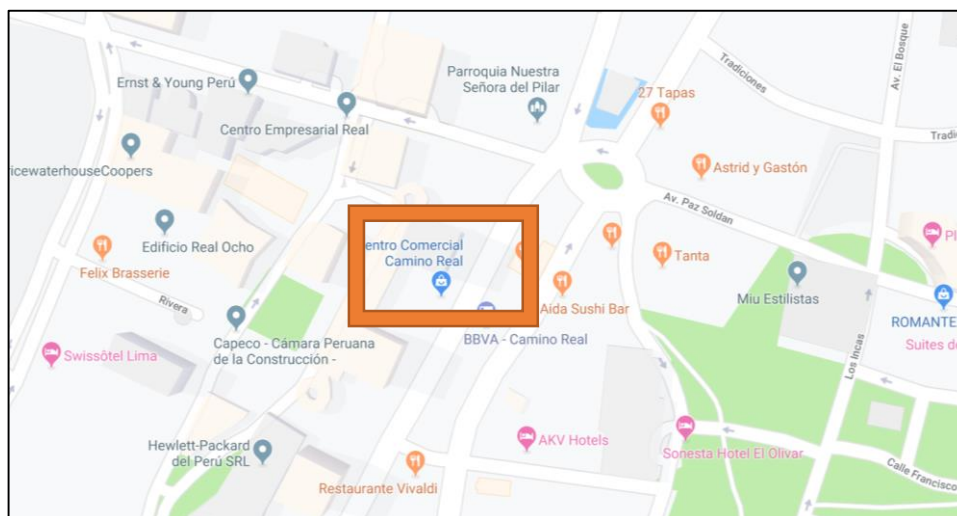


Figura N° 3: Localización del Proyecto

Fuente: Google Maps

### 4.2 Sistema estructural existente.

El área a intervenir forma parte de una estructura de 13 pisos y 3 sótanos, cuyo sistema estructural sismorresistente predominante es en base a pórticos y placas de concreto armado, las columnas conformantes de los pórticos son de 60x60cms en su mayoría, las vigas son de 30x65cms de sección sobre las que descansan las losas aligeradas unidireccionales de 25 cm y losas sólidas de 20cms de espesor, la cimentación existente es en base a zapatas conectadas.

El uso de la estructura es el de oficinas por lo que la sobrecarga de diseño es de  $S/C=250\text{kg/m}^2$ .



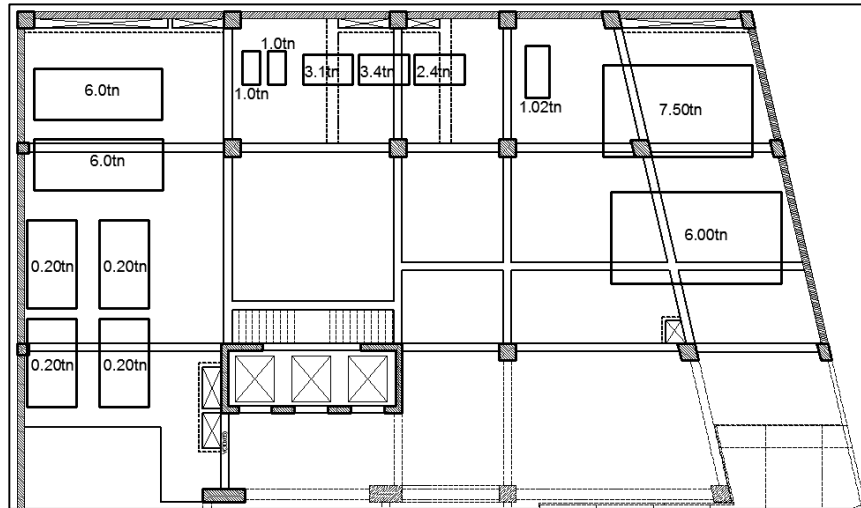


Figura N° 6: Pesos de los equipos colocados en el piso

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Normativa aplicable

La normativa aplicable para el reforzamiento es:

RNE : Reglamento Nacional de Edificaciones

Norma E.020 : Cargas

Norma E.060 : Concreto armado

Norma E.030 : Diseño sismorresistente

ACI 440.2R-17 : Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures

#### 4.5 Metrado de cargas

Para el cálculo de las nuevas sobrecargas a efectos de transferencia de las losas hacia las vigas, se ha hecho un metrado de cargas considerando la carga total de los equipos dividida entre el área en contacto de cada equipo, es así que en el siguiente grafico se muestran las nuevas cargas consideradas.

Es preciso aclarar que, para el caso del diseño y reforzamiento de losas, se ha considerado en cada paño la carga puntual de los equipos en aquellas losas o viguetas más cargadas.

#### 4.6 Especificaciones de los materiales

##### 4.6.1 Concreto Armado

- Resistencia para concreto armado ( $f'c$ ): 210 kg/cm<sup>2</sup> (losas, vigas, columnas, escaleras, zapatas, placas)
- Módulo de Elasticidad (E): 2'173,706 tn/m<sup>2</sup> ( $f'c$ ): 210 kg/cm<sup>2</sup>
- Módulo de Poisson ( $\nu$ ): 0.15
- Peso Específico ( $\gamma_c$ ): 2300 kg/m<sup>3</sup> (concreto simple); 2400 kg/m<sup>3</sup> (concreto armado)

##### 4.6.2 Acero Corrugado

- Resistencia a la fluencia ( $f_y$ ): 4,200 kg/cm<sup>2</sup> (G° 60)
- Módulo de Elasticidad (E): 2'100,000 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4.7 Estados de carga

La Norma Técnica E.020 recomienda valores mínimos para las cargas que se deben considerar en el diseño de una estructura, dependiendo del uso al cual está diseñada la misma. Las cargas para considerar son las denominadas: muertas, vivas y sismo.

Consideramos como carga muerta (CM) al peso de los materiales, tabiques y otros elementos soportados por la estructura, incluyendo su peso propio que se suponen serán permanentes. Como carga viva (CV), al peso de los ocupantes, materiales equipo, muebles y otros elementos móviles. Finalmente, las cargas de sismo (CS) son aquellas que se generan debido a la acción sísmica sobre la estructura. (Ver tabla N° 7 y 8)

Tabla N° 7: Cargas muertas

| Materiales                                 | Unidad            | Carga |
|--|-------------------|-------|
| Acabados                                   | kg/m <sup>2</sup> | 150   |
| Tabiquería                                 | kg/m <sup>2</sup> | 150   |
| Peso propio losa Unidireccional e = 0.25 m | kg/m <sup>2</sup> | 350   |
| Peso propio losa solida de e = 0.20 m      | kg/m <sup>2</sup> | 480   |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 8: Cargas vivas

| Materiales   | Unidad            | Carga |
|--------------|-------------------|-------|
| Corredores   | kg/m <sup>2</sup> | 400   |
| Escaleras    | kg/m <sup>2</sup> | 400   |
| Oficinas     | kg/m <sup>2</sup> | 250   |
| Restaurantes | kg/m <sup>2</sup> | 400   |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.1 Carga Muerta

La carga muerta considerada en el área del grupo electrógeno (GGEE). (Ver tabla N° 9)

Tabla N° 9: Carga muerta en la zona del GGEE

| Materiales                      | Carga | Unidad            |
|---------------------------------|-------|-------------------|
| Losa (*)                        | 0     | Kg/m <sup>2</sup> |
| Peso propio de acabados         | 100   | Kg/m <sup>2</sup> |
| Peso propio de falso piso       | 50    | Kg/m <sup>2</sup> |
| Peso propio de soporte metálico | 50    | Kg/m <sup>2</sup> |
| Total                           | 200   | Kg/m <sup>2</sup> |

Fuente: Elaboración propia

(\*) El peso de la losa es medrado internamente por el software utilizado.

En la zona de grupos electrógenos se ha considerado un peso muerto del encimado para la base del compresor de  $0.20 \times 2.40 = 0.48 \text{tn/m}^2$  menos los  $0.20 \text{tn/m}^2$  de carga muerta considerada en el paño resulta  $\text{CM} = 0.30 \text{tn/m}^2$ . (Ver fig. N°7)

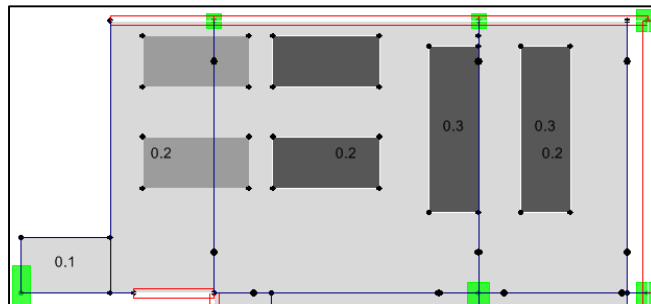


Figura N° 7: Cargas muertas distribuidas en el piso

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Carga muerta de 0.20tn/m en los paños y carga muerta adicional de 0.30tn/m<sup>2</sup> en la base de grupos electrógenos. En la figura N°8 se muestran las cargas muertas en los paños.

La carga muerta considerada en el resto del área. (Ver tabla N° 10)

Tabla N° 10: Carga muerta en la zona de intervención

| Materiales                | Carga | Unidad            |
|---------------------------|-------|-------------------|
| Losa (*)                  | 0     | Kg/m <sup>2</sup> |
| Peso propio de acabados   | 100   | Kg/m <sup>2</sup> |
| Peso propio de falso piso | 50    | Kg/m <sup>2</sup> |
| Total                     | 150   | Kg/m <sup>2</sup> |

Fuente: Elaboración propia

(\*) El peso de la losa es metrado internamente por el software utilizado.

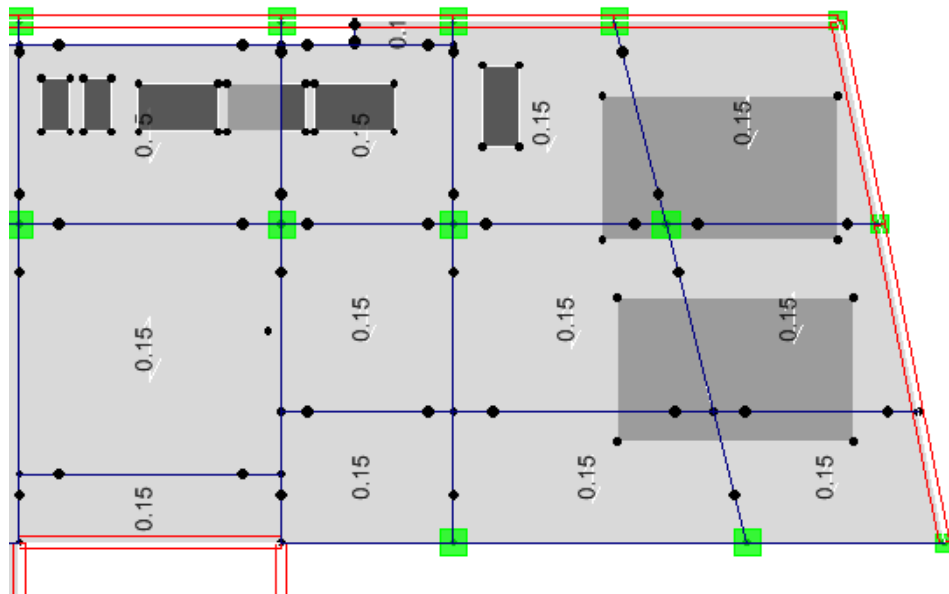


Figura N° 8: Cargas muertas en el resto de los paños

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

#### 4.7.2 Carga viva

La carga viva considerada en toda el área es de la losa 0.25tn/m<sup>2</sup> y en base a esto se calculará la carga viva requerida. (Ver tabla 11)



## 4.8 Análisis Sismorresistente de la Edificación

### 4.8.1 Diseño de concreto armado

Para determinar la resistencia nominal requerida, se emplearon las siguientes combinaciones de cargas establecidas en la Norma E-060 de la RNE (Reglamento Nacional de Edificaciones):

- $1.4 M + 1.7 V$
- $1.25 (M + V) \pm S_x$
- $1.25 (M + V) \pm S_y$
- $0.90 M \pm S_x$
- $0.90 M \pm S_y$

Dónde:

M: Carga muerta

V: Carga viva

S: Carga de sismo

En la tabla N° 12 se muestran los valores de reducción de resistencia para flexión y corte.

Tabla N° 12: Factores de reducción de resistencia

| Solicitación principal | Factor $\phi$ de reducción |
|------------------------|----------------------------|
| - Flexión              | 0.90                       |
| - Cortante             | 0.75                       |

Fuente: Elaboración propia

Resumiendo, para el diseño de elementos estructurales se debe de cumplir que:

$$\text{Resistencia de Diseño} \geq \text{Resistencia Requerida (U)}$$

$$\text{Resistencia de Diseño} = \phi \text{ Resistencia Nominal}$$

### 4.8.2 Modelo matemático de la edificación

El modelo matemático se ha realizado usando el programa ETABS versión 16.2.1 de la compañía Computers and Structures Inc. Basándonos



en la norma NTE-030 de diseño Sismorresistente se ha calculado tomando una carga muerta de 100% y una carga viva de 25% (para oficinas).

El análisis sísmico se desarrolló siguiendo los lineamientos de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E-030.

#### 4.8.2.1 Parámetros sísmicos

Debido a que en el año donde se plantearon los planos de estructuras no se encontraba vigente una normativa sismorresistente se ha tomado consideraciones de suelo de proyectos aledaños a fin de definir el espectro de diseño que se estipula en la Norma E.030 (MVSC 2018), los parámetros para definir el espectro de diseño fueron:

- **Zonificación:** La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral, así como en información geotécnica. El territorio nacional se encuentra dividido en cuatro zonas, a cada zona se le asigna un factor Z. Este factor se interpreta como la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años. (NTP E-030, 2018, p.07-08).

La zona donde está ubicada nuestra edificación es la zona 1 y su factor de zona es 0.45.

- **Estudios de Sitio:** Son estudios similares a los de micro zonificación, aunque no necesariamente en toda su extensión. Estos estudios están limitados al lugar del proyecto y suministran información sobre la posible modificación de las acciones sísmicas y otros fenómenos naturales por las condiciones locales. Su objetivo principal es determinar los parámetros de diseño. (NTP E-030, 2018, p.08).

- **Condiciones Geotécnicas:** “Para los efectos de esta norma los perfiles de suelo se clasifican tomando en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, el espesor del estrato, el periodo

fundamental de vibración y la velocidad de propagación de las ondas de corte”. (NTP E-030, 2018, p.09).

Se considera que el perfil de suelo es del tipo (S1), el parámetro  $T_p = 0.40$  seg. y  $T_L = 2.5$  seg., y el factor de amplificación del suelo asociado se considera  $S = 1.00$ .

- **Factor de amplificación sísmica:** De acuerdo con las características de sitio, se define el factor de amplificación sísmica (C). (NTP E-030, 2018, p.12).

$$C = 2.5x \left( \frac{T_p}{T} \right); C < 2.5$$

- **Categoría de las edificaciones:** Cada estructura debe ser clasificada de acuerdo con la categoría de uso de la edificación, como el “Edificio T5 Playa del Centro Empresarial Camino Real” se está considerando como oficina para el presente análisis, categoría C ( $U = 1.00$ ).

- **Sistemas estructurales:** Los sistemas estructurales se clasificarán según los materiales usados y el sistema de estructuración sísmo resistente predominante en cada dirección. Según la clasificación que se haga de una edificación se usara un coeficiente de reducción de fuerza sísmica (R). En la siguiente figura se muestra el modelo en 3D del edificio (Ver fig. N°10).

Para nuestra edificación se consideraron los datos descritos en la tabla N°13.

Tabla N° 13: Datos del sistema estructural

| Sistema estructural                       | Estructuración en eje   | Factor de reducción |
|---|---|---------------------|
| Concreto Armado: De Muro de Estructurales | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Columnas de 60cm x 60cm</li> <li>- Vigas de 35cm x 65cm</li> <li>- Muro de Contención de 25cm</li> <li>- Placas de 60cm</li> </ul> | RX= 6               |
|   |   | RY= 6               |

Fuente: Elaboración propia

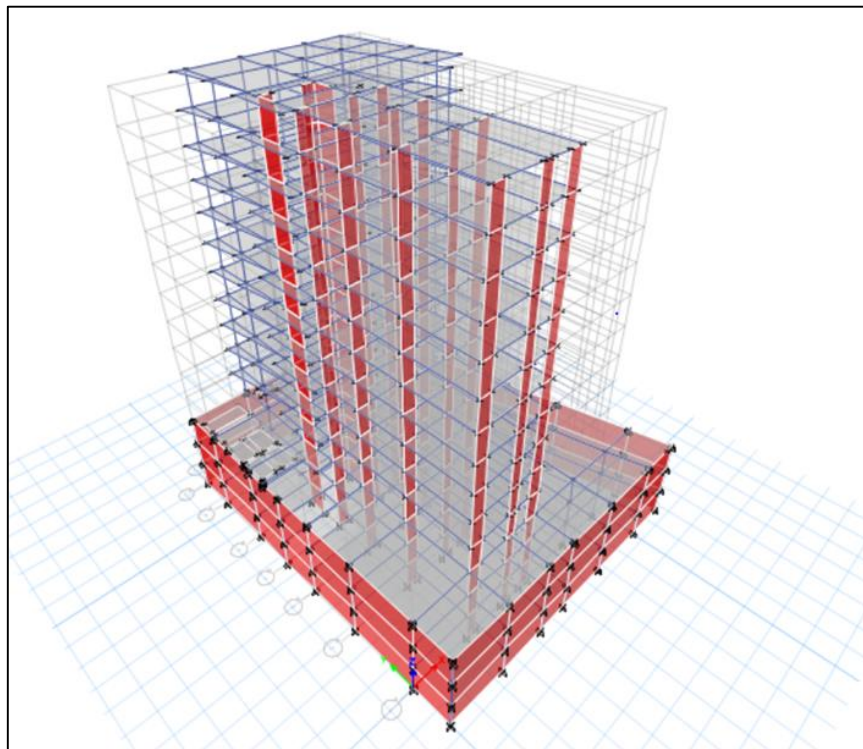


Figura N° 10: Modelo en 3D de la estructura

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

#### 4.8.2.2 Espectro de diseño según Norma E-030

Con los datos obtenidos de la norma Sismorresistente E030 se realizó el cálculo del Espectro de Pseudo aceleraciones. (Ver fig. N°11)

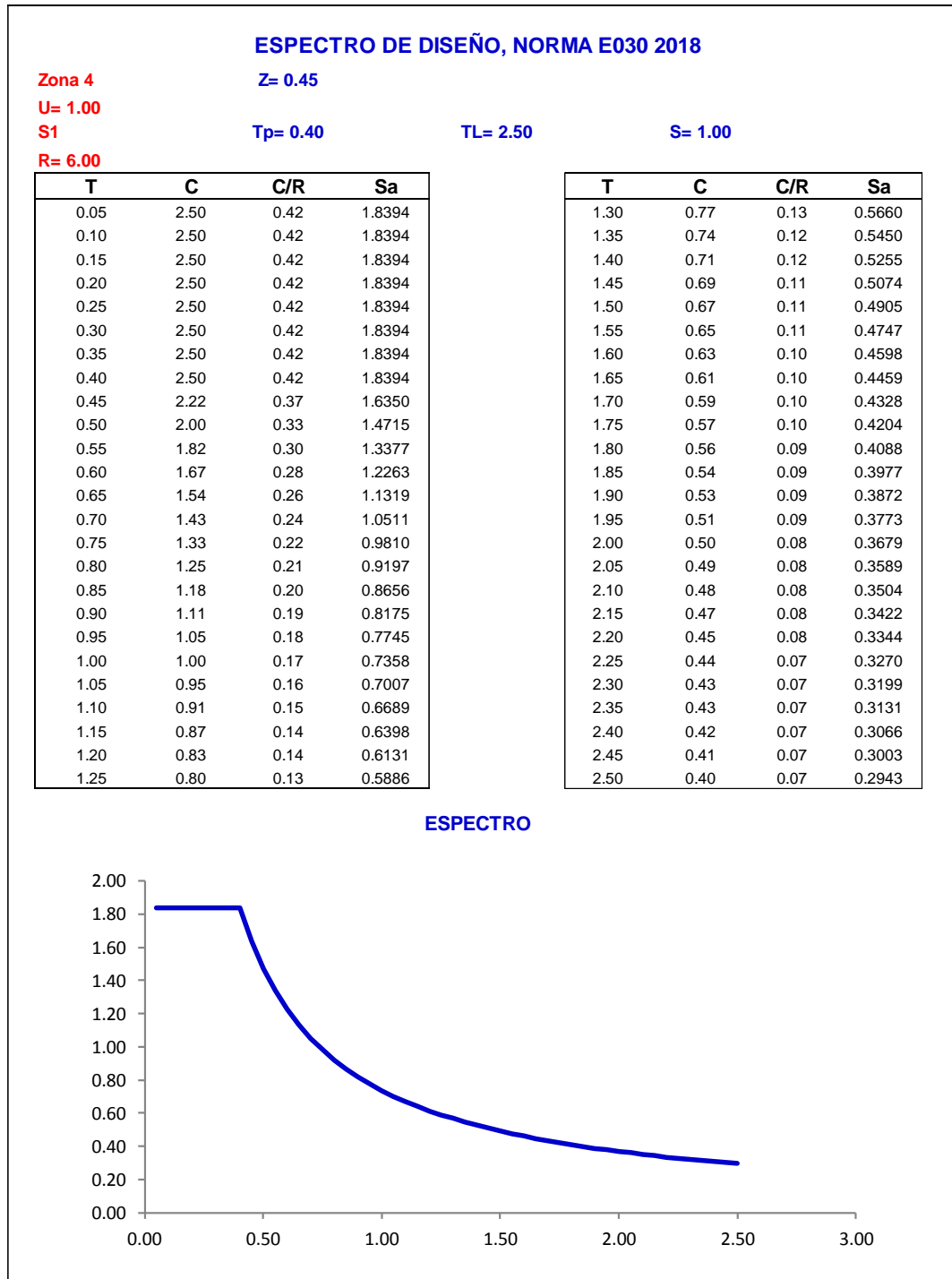


Figura N° 11: Espectro de Pseudo aceleraciones.

Fuente: Q & A Ingenieros

En el software Etabs se adjuntó el espectro de Pseudo aceleraciones (Ver figura N° 12). Una vez cargado todas las condiciones de la edificación se obtuvo los desplazamientos y cumplían con lo estipulado en la Norma E-030 (Ver tabla N°14).

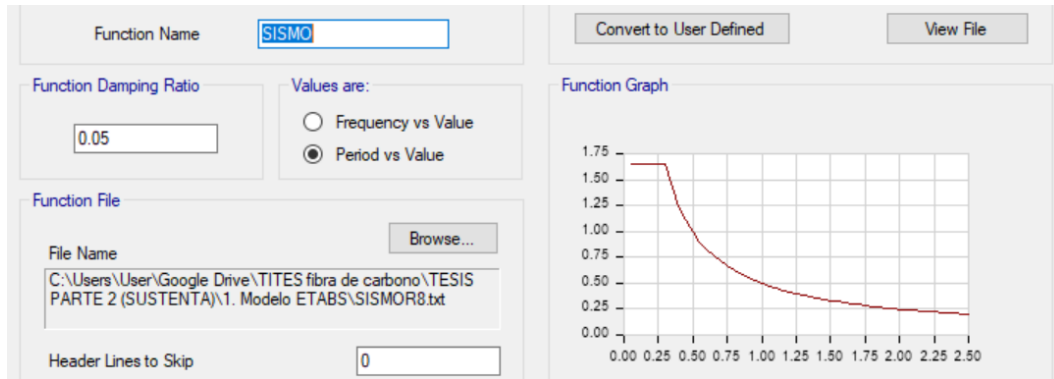


Figura N° 12: Sismo Aplicado.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Tabla N° 14: Resultado de los desplazamientos

| TABLE: Story Drifts |                 |           |       |            |        |
|---------------------|-----------------|-----------|-------|------------|--------|
| Story               | Load Case/Combo | Direction | Drift | 0.75*Drift | Cumple |
| Story14             | DESPLAZ Max     | X         | 0.006 | 0.004      | Ok     |
| Story14             | DESPLAZ Max     | Y         | 0.006 | 0.005      | Ok     |
| Story13             | DESPLAZ Max     | X         | 0.007 | 0.005      | Ok     |
| Story13             | DESPLAZ Max     | Y         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story12             | DESPLAZ Max     | X         | 0.007 | 0.005      | Ok     |
| Story12             | DESPLAZ Max     | Y         | 0.009 | 0.007      | Ok     |
| Story11             | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story11             | DESPLAZ Max     | Y         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story10             | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story10             | DESPLAZ Max     | Y         | 0.009 | 0.007      | Ok     |
| Story9              | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story9              | DESPLAZ Max     | Y         | 0.009 | 0.007      | Ok     |
| Story8              | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story8              | DESPLAZ Max     | Y         | 0.009 | 0.007      | Ok     |
| Story7              | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story7              | DESPLAZ Max     | Y         | 0.009 | 0.007      | Ok     |
| Story6              | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story6              | DESPLAZ Max     | Y         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story5              | DESPLAZ Max     | X         | 0.008 | 0.006      | Ok     |
| Story5              | DESPLAZ Max     | Y         | 0.009 | 0.007      | Ok     |
| Story4              | DESPLAZ Max     | X         | 0.006 | 0.004      | Ok     |
| Story4              | DESPLAZ Max     | Y         | 0.008 | 0.006      | Ok     |

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Ver Anexo N° 9 para más detalle del Modelo Matemático de la edificación en Etabs. Se obtuvo los momentos y cortantes para el análisis del capítulo VI.

## CAPÍTULO V: REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO

### 5.1 Filosofía de diseño de las fibras de carbono

Los límites de reforzamientos se deben considerar de modo muy cuidadoso para poder obtener respuestas muy razonables. Se imponen estos límites con el fin de evitar colapsos de las estructuras debido a fallas del reforzamiento de fibras de carbono, o error en el sistema de la fibra o por cualquier otra cosa. Un elemento estructural que no esté reforzado con fibras de carbono debe tener la suficiente resistencia para resistir un cierto nivel de carga descrita. (ACI 440.2R-17, 2017, p.21)

$$(\Phi R_n)_{\text{existing}} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{\text{new}} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

$R_n$  = fuerza nominal de un miembro

$S_{DL}$  = Carga muerta efectiva

$S_{LL}$  = Carga viva efectiva

El factor de carga muerta de 1.1 es usado debido a una evaluación relativamente precisa de las cargas muertas que se puedan determinar en la estructura un factor de carga viva de 0.75 es usado para exceder el factor principal de carga viva como se indica en la ASCE 7. El reforzamiento limite resulta de la conformidad con la ecuación (3) lo que permitirá al miembro fortalecido mantener una capacidad estructural suficiente hasta que la fibra de carbono dañada se repare. (ACI 440.2R-17, 2017, p.21)

En los casos donde el diseño de la carga viva actué en el miembro reforzado tiene una alta probabilidad de ser presentado por un periodo de tiempo fijo, un factor de carga viva de 1.0 en vez de 0.75 como lo indica la ecuación (1.3). (ACI 440.2R-17, 2017, p.21)

El nivel de fortalecimiento que puede lograrse mediante el uso de enlaces externos con reforzamiento de fibras de carbono puede ser limitada por el rango de resistencia al fuego de la estructura. Las resinas polimerasa típicamente usadas en bandejas húmedas y los adhesivos poliméricos se usan en sistemas de fibras de carbono que sufren deterioración mecánica y propiedades de

temperaturas en las uniones que están cerca de exceder el valor "Tg". (ACI 440.2R-17, 2017, p.21)

A pesar que el sistema de las fibras es significativamente afectado por la exposición a elevadas temperaturas, una combinación entre fibras con una estructura de concreto existentes siguen teniendo una adecuada resistencia al fuego. Cuando consideramos un reforzamiento de fibras de carbono a elementos de concreto, es importante para reconocer que la fuerza de un reforzamiento a un elemento de concreto es reducida durante la exposición al fuego tanto por la fibra de carbono como el concreto (Ver fig. N°13 y N°14). (ACI 440.2R-17, 2017, p.21)

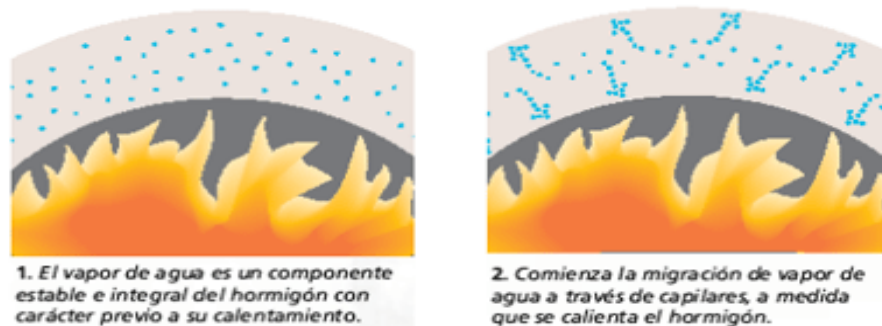


Figura N° 13: Efectos del concreto armado ante un incendio

Fuente: página de Asefa seguros: <https://www.asefa.es>

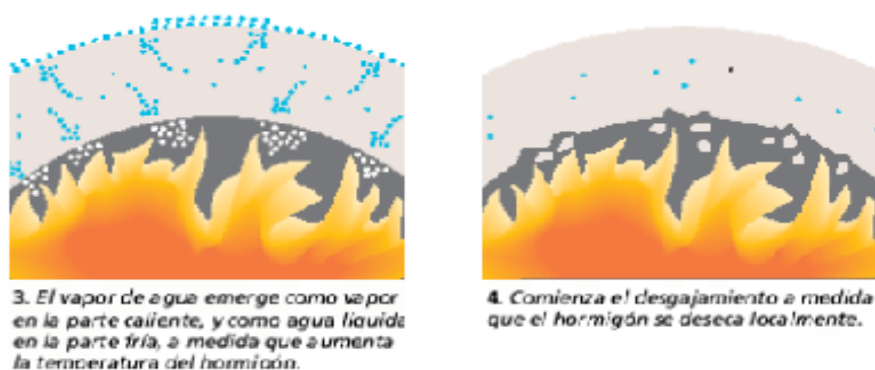


Figura N° 14: Efectos del concreto armado ante un incendio

Fuente: página de Asefa seguros: <https://www.asefa.es>

El rendimiento en el fuego del elemento de hormigón existente se puede mejorar instalando un sistema de aislamiento, que proporcionará protección térmica al hormigón existente y al acero de refuerzo interno, los sistemas de contribución de las fibras de carbono pueden ser reducidos. (ACI 440.2R-17, 2017, p.22)

Reforzando los métodos de reforzamiento con fibras de carbono a los elementos de concreto, los límites de fortalecimiento pueden usarse para garantizar que una estructura reforzada no se derrumbe en un evento de incendio.

#### 5.1.1 Resistencia estructural general del FRP

Mientras los sistemas de fibras de carbono son efectivos en fortalecimiento de miembros por flexión, corte y proporcionan confinamiento adicional otros modos de falla como punzonamiento y capacidad de resistencia de las zapatas pueden verse afectadas marginalmente por sistemas de fibras de carbono. Todos los miembros de la estructura deben ser capaces de soportar el aumento de cargas asociados con los miembros fortalecidos. Adicionalmente se debe analizar a los miembros fortalecidos por los sistemas de fibras de carbono para revisarlos en condiciones de sobrecargas, los miembros fortalecidos fallaran por flexión en vez de uno por corte. (ACI 440.2R-17, 2017, p.22)

#### 5.1.2 Selección del sistema FRP

En condiciones ambientales afectan de forma única a las resinas y fibras de diversos sistemas de FRP. Las propiedades mecánicas de algunos sistemas de FRP degradan bajo exposición a ciertos ambientes como alcalinidad, agua salada, químicos luz ultravioleta, altas temperaturas, alta humedad y ciclos de congelación y descongelación. (ACI 440.2R-17, 2017, p.22)

El profesional de diseño con licencia debe seleccionar un sistema de FRP basada en el comportamiento conocido de ese sistema en las condiciones de servicio previstas. Algunas consideraciones importantes del ambiente que se relacionan con la naturaleza de los sistemas específicos que se dan a continuación. Se puede obtener información específica de las fibras de carbono. (ACI 440.2R-17, 2017, p.22)



La actuación de un sistema de FRP sobre una acidez ambiental depende del material matriz y reforzando la fibra. La fibra de carbono seca, insaturada desnuda o desprotegida es resistente tanto a ambientes alcalinos como ácidos, mientras que la fibra de vidrio desnuda puede degradarse con el tiempo en estos entornos. Sin embargo, una matriz resina correctamente seleccionada y aplicada debe aislar y proteger la fibra del ambiente alcalino/ácido y resistir el deterioro. Los sitios con alta alcalinidad y alta humedad o humedad relativa favorecen la selección de sistemas de fibra de carbono en lugar de sistemas de fibra de vidrio. (ACI 440.2R-17, 2017, p.22)

#### 5.1.3 Expansión térmica

Los sistemas de fibras de carbono pueden tener propiedades de expansiones térmicas que son diferentes a las de concreto. Además, las propiedades de expansión térmica de la fibra y las constituciones polímeros de los sistemas de fibra de carbono pueden variar. Las fibras de carbono tienen un coeficiente de expansión térmica cercano a cero, mientras que las fibras de vidrio tienen un coeficiente de expansión térmica similar al del concreto. Los sistemas de polímeros usados en el fortalecimiento de fibras de carbono tienen típicamente coeficientes de expansión térmica aproximadamente cinco veces más que del concreto. (ACI 440.2R-17, 2017, p.22)

#### 5.1.4 Consideraciones de cargas

Estas condiciones afectan únicamente a los diferentes sistemas de fibras de carbono. Se debe seleccionar un sistema de fibras de carbono basado en el conocimiento del comportamiento que presente el sistema del que estamos hablando. Algunas consideraciones importantes de carga que se relacionan con la naturaleza de los sistemas específicos se dan a continuación. Especifica información debe ser obtenida de materiales manufacturados. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

#### 5.1.5 Consideraciones de durabilidad

El sistema de durabilidad de las fibras de carbono es un tema de considerable investigación en curso. El profesional de diseño autorizado debe seleccionar un sistema de fibra de carbono que haya sido sometido a pruebas

de durabilidad coherentes con el entorno de la aplicación. Las pruebas de durabilidad pueden incluir ciclos de calor húmedo, inmersión alcalina, ciclos de congelación y descongelación, exposición a rayos ultravioletas, calor seco y agua salada. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

Cualquier sistema de fibras de carbono que encaje o cubra una sección de concreto debe ser investigado por sus efectos variados por condiciones ambientales incluyendo condiciones de congelación y descongelación, corrosión de acero, reacciones de álcali y agregados de sílice, atrapamiento de agua, presiones de vapor y transmisión de vapor de humedad. Muchos sistemas de fibras de carbono crearon capas impermeables a la humedad en la superficie del hormigón. En áreas donde se espera la transmisión de vapor de humedad, se deben proporcionar medios adecuados para permitir que la humedad salga de la estructura de concreto. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

#### 5.1.6 Consideraciones de selección de revestimiento protector

Solo se puede aplicar un sistema de recubrimiento o aislamiento al sistema de instalación de fibras de carbono para protegerlo de la exposición a ciertas condiciones ambientales. El grosor y el tipo de recubrimiento deben seleccionarse en función de los requisitos de la reparación compuesta; resistir a los efectos ambientales como la humedad, el agua salada, las temperaturas extremas, el fuego, el impacto y la exposición a los rayos ultravioletas; resistencia a los efectos específicos del sitio; y la resistencia al vandalismo. Se confía en los recubrimientos para retardar la degradación de las propiedades mecánicas de las fibras de carbono. El revestimiento debe inspeccionarse y mantenerse periódicamente para garantizar una eficacia continua. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

## 5.2 Propiedades de diseño del material

A menos que se indique lo contrario, las propiedades del material informadas por los fabricantes, como la resistencia máxima a la tracción, generalmente no consideraran la exposición a largo plazo a las condiciones ambientales y deben considerarse como propiedades iniciales. Debido a la exposición a largo plazo de varios tipos de ambientes puede reducir las propiedades de tracción y la resistencia a la rotura y la fatiga de las láminas de

fibras de carbono, las propiedades del material usadas en las ecuaciones de diseño deben ser reducidas basadas en las condiciones de exposición ambiental. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

Las ecuaciones (1.4) a través de (1.4.1) dan las propiedades de tracción que se deben utilizar en todas las ecuaciones de diseño. El diseño final de resistencia a la tracción debe determinarse utilizando el factor de reducción ambiental dada en la tabla N°9 para las apropiadas condiciones de exposición y tipo de fibras. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

$f_{fu}$  = Diseño de la máxima resistencia a la tracción de la fibra de carbono, psi (MPA)

$C_E$  = Factor de reducción ambiental.

$f_{fu}^*$  = Máxima resistencia a la tracción del material de fibras de carbono según lo informado por el fabricante, psi (MPA)

De manera similar, la tensión de ruptura de diseño también debe reducirse en condiciones de exposición ambiental. Se muestra la ecuación (5).

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura deformación de refuerzo de fibra de carbono, in. /in. (mm/mm)

$C_E$  = Factor de reducción ambiental.

$\epsilon_{fu}^*$  = Tensión de ruptura final de refuerzo de fibras de carbono, in. /in. (mm/mm)

Las expresiones para los módulos de elasticidad se dan en la ecuación (6). reconoce que los módulos son típicamente inmunes a las condiciones ambientales. Los módulos dados en la ecuación serán los mismos que el valor inicial reportado por el fabricante.

$$E_f = f_{fu} / \epsilon_{fu} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$f_{fu}$  = Diseño de la máxima resistencia a la tracción de la fibra de carbono, psi (MPA)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura deformación de refuerzo de fibra de carbono, in. /in. (mm/mm)

Los materiales constituyentes, las fibras y resinas de un sistema de fibras de carbono que afectan su durabilidad y resistencia a exponerse al medio ambiente. Los factores de reducción dados en la tabla son estimaciones conservadoras basadas en la durabilidad relativa de cada tipo de fibra. (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

Como la tabla ilustra, si el sistema de fibras de carbono está ubicado en un entorno relativamente suave, como en interiores, el factor de reducción está más cerca de la unidad. Si el sistema de fibras de carbono está ubicado en un entorno muy grande donde se exponga a alta humedad, ciclos de congelación y descongelación, agua salada o alcalinidad se tendrá una pequeña reducción en los factores que se usan. El factor de reducción puede ser modificado para reflejar el uso de una capa protectora. Si se ha demostrado que el recubrimiento a través de las pruebas disminuye los efectos de la exposición ambiental y el recubrimiento se mantiene durante la vida útil del sistema de fibras de carbono (Ver tabla N°15). (ACI 440.2R-17, 2017, p.23)

Tabla N° 15: Factores de reducción ambiental para FRP

| Condiciones ambientales   | Tipo de fibra | Factor de reducción ambiental $C_E$ |
|---|---------------|-------------------------------------|
| Exposición interna  | Carbon        | 0.95                                |
|   | Glass         | 0.75                                |
|   | Aramid        | 0.85                                |
| Exposición externa (puentes, muelles y estacionamientos no cerrados)      | Carbon        | 0.85                                |
|   | Glass         | 0.65                                |
|   | Aramid        | 0.75                                |
| Ambiente agresivo (plantas químicas y plantas de tratamientos residuales) | Carbon        | 0.85                                |
|   | Glass         | 0.50                                |
|   | Aramid        | 0.70                                |

Fuente: Norma ACI\_440\_2R\_17

### 5.3 Fortalecimiento a la Flexión

La unión de polímeros reforzados con fibras de carbono para reforzar la tensión de cara de concreto a flexión, con fibras que van a todo lo largo del elemento, dando un incremento en la fuerza de flexión. Se han documentado aumentos en la resistencia a la flexión general del 10 al 160 por ciento. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

#### 5.3.1 Resistencia a la flexión nominal

El enfoque de diseño de resistencia requiere que la resistencia a la flexión de diseño de un miembro exceda su momento factorizado requerido, como indica la ecuación (1.5) el diseño de fuerza flexural  $\Phi M_N$  se refiere a la fuerza nominal del miembro multiplicado por un factor de reducción y el factor de momento  $M_u$  referido al momento calculado de cargas facturadas. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

$$\Phi M_n \geq M_u \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

$\Phi$  = Factor de reducción de fuerza

$M_n$  = Resistencia a la flexión nominal, in. -lb (N-mm)

$M_u$  = Momento factorizado en una sección, in. -lb (N-mm)

La guía recomienda que el factor de momento  $M_u$  de una sección se calcula por el uso de factores de cargas requeridos por ACI318. Adicional al factor de reducción para las fibras de carbono,  $\psi_{fs}$  es usada para mejorar la confiabilidad de la predicción de fuerza y da cuenta de los diferentes modos de falla observados para los miembros de reforzamientos de las fibras de carbono. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

La resistencia a la flexión nominal del reforzamiento con fibras de carbono para los miembros de concreto con el refuerzo de acero suave y con acero de pretensado unido puede determinarse en función de la compatibilidad de deformación, el equilibrio de la fuerza interna y el modo de falla de control. Para miembros con acero pretensado no unido, la compatibilidad de deformación no se aplica y la tensión en los tendones no unidos al fallar depende de la deformación general del miembro y se supone que es aproximadamente la misma en todas las secciones. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

#### 5.3.1.1 Modos de Fallo

“La resistencia a la flexión de una sección depende del modo de falla de control. Se deben investigar los siguientes modos de falla de flexión por una sección de reforzamiento con fibras de carbono” (ACI 440.2R-17, 2017, p.24).

- Trituración del hormigón en compresión antes de ceder el acero de refuerzo.
- Cede el acero en la tensión seguido de la ruptura de las láminas de fibras de carbono.
- Cede el acero en la tensión seguido de la trituración de hormigón.
- Cizallamiento/tensión de laminación de la cubierta de hormigón.
- Desunión de la fibra de carbono del substrato de concreto

La delaminación o la separación de la fibra de carbono puede producirse si la fuerza en la fibra de carbono no puede ser sostenida. Dicho comportamiento generalmente se conoce como desunión, independientemente de dónde se propague el plano de falla dentro de la fibra adhesiva de sustrato. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

Lejos de la sección donde termina la unión de fibra de carbono externa, podría darse una falla por la desunión de las fibras de carbono. Para evitar esta falla de desunión inducida por grietas, la tensión efectiva en el reforzamiento de la fibra de carbono debe limitarse a la tensión a la que puede ocurrir la desunión. Esto se define en la ecuación (8). (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

$$\begin{aligned} \epsilon_{fd} &= 0.083 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \quad (\text{in.-lb}) \\ \epsilon_{fd} &= 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \quad (\text{SI}) \end{aligned} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

$\epsilon_{fd}$  = Deformación de unión de refuerzo de fibras de carbono unidas externamente in. /in. (mm/mm)

$f'_c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto., psi (MPA)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura deformación de refuerzo de fibra de carbono, in. /in. (mm/mm)

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, in (mm)

La Ecuación (8) toma una forma modificada de la ecuación de deformación de desacoplamiento propuesta por “Teng et al (2003, 2004)” que fue basada en evaluaciones del comité de una base de datos significativa para pruebas de vigas de flexión con fallas de desacoplamiento de fibras de carbono. La ecuación propuesta fue calibrada usando valore medios de cepas al desunirlas para las pruebas de flexión experimentando un desprendimiento intermedio inducido por grietas para determinar el coeficiente de mejor ajuste de 0.083. La confiabilidad de la contribución de las fibras de carbono a su resistencia a la flexión se aborda incorporando un factor de reducción de resistencia adicional para las fibras de carbono,  $\psi_f$  incluyendo al factor de reducción de fuerza  $\Phi$  por ACI 318 para estructuras de concreto. Sistemas de anclaje como envolturas en U, sujetadores mecánicos, anclajes de fibra y anclajes en U han sido probados exitosamente en retrasar y algunas veces prevenir la falla de desunión longitudinal de fibras de carbono. Los estudios experimentales han demostrado que estos sistemas de anclaje pueden aumentar la tensión efectiva en la flexión de fibras de carbono a valores hasta la ruptura por tracción. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)

Para montaje cerca de la superficie la aplicación de fibras de carbono, el valor de  $\varepsilon_{fd}$  puede variar entre  $0.6\varepsilon_{fd}$  a  $0.9\varepsilon_{fd}$ , dependiendo en muchos factores como las dimensiones de los miembros, el acero y rangos de reforzamiento y rugosidad superficial de las barras de fibras de carbono. Basado en el análisis de una base de datos de estudios existentes, el comité recomienda el uso de  $\varepsilon_{fd} = 0.7\varepsilon_{fd}$ . Para lograr la cepa de diseño de desunión de montado cerca de la superficie de las barras de fibras de carbono,  $\varepsilon_{fd}$  la longitud unida debería ser mayor que la longitud de desarrollo. (ACI 440.2R-17, 2017, p.24)



#### 5.4 Reforzamientos de elementos estructurales

“Esta parte presenta guías en el cálculo de los efectos de reforzamiento de flexión para poner un refuerzo longitudinal de fibras de carbono para aumentar la tensión del elemento estructural de concreto” (Ver fig. N°15 y N°16). (ACI 440.2R-17, 2017, p.24).

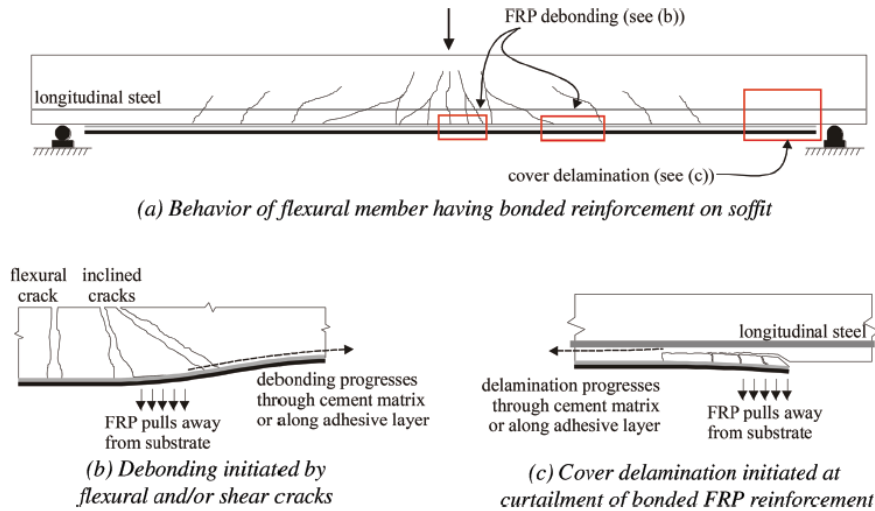


Figura N° 15: Sistemas FRP unidos para fortalecer la estructura

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

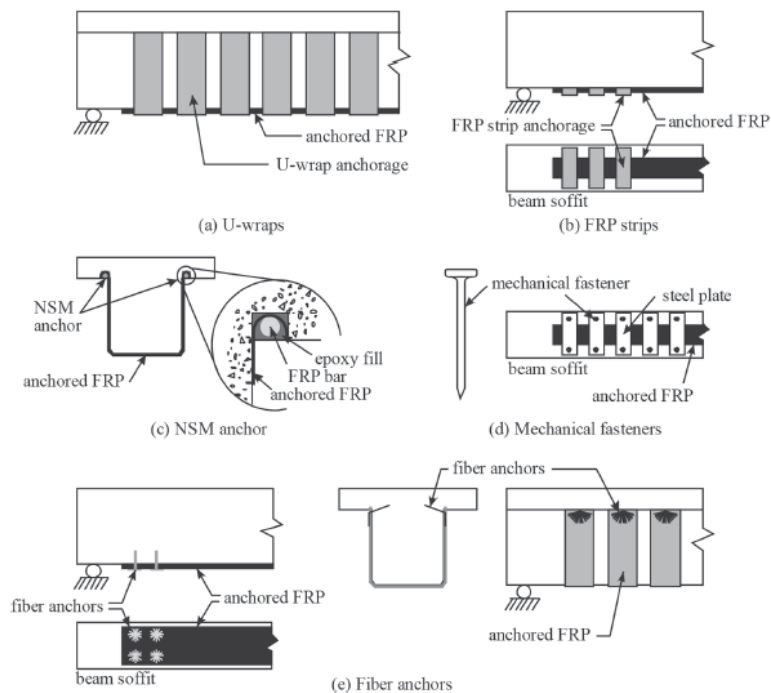


Figura N° 16: Tipo de enlaces externos de fibras de carbono

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

## 5.5 Suposiciones

Se realizan los siguientes supuestos calculando la resistencia a la flexión de una sección reforzada con un sistema de fibras de carbono aplicado externamente:

- Los cálculos de diseño se basan en las dimensiones, la disposición interna del acero de refuerzo y las propiedades del material del miembro existente que se está fortaleciendo.
- La tensión en el refuerzo de acero y el hormigón son directamente proporcionales a su distancia desde el eje neutro. Esa es una sección plana antes de cargarse sigue siendo plana después de cargar.
- No hay deslizamiento relativo entre el refuerzo externo y el concreto.
- La deformación cortante con la capa aditiva es descuidada porque la capa aditiva es muy delgada con solo ligeras variaciones en su grosor.
- La máxima tensión compresiva permisible en el concreto es 0.003.
- La fuerza de tensión del concreto es muy baja.
- El reforzamiento de fibra de carbono tiene una relación lineal tensión deformación elástica.

Fuente: (ACI 440.2R-17, 2017, p.25 – p26)

## 5.6 Fortalecimiento a la flexión de plafones cóncavos

La presencia de curvatura en los plafones de un elemento de concreto puede conducir al desarrollo de tensiones por tracción normal para el adhesivo y la superficie a la que se une la fibra de carbono. Tales reacciones de tensión se producen cuando la fibra de carbono tiende a enderezarse bajo carga y puede impulsar el inicio de la desunión de fibras o fallas interlaminares que reducen la efectividad del fortalecimiento de la flexión. Si la extensión de la porción curva del sofito excede una longitud de 40 pulg. (1 m) con un aumento de 0.2 pulg. (5 mm), la superficie debe hacerse plana antes de fortalecerla. Alternativamente, los sistemas de anclaje, tales como envolturas en U, sujetadores mecánicos, anclajes de fibras, o se deben instalar anclajes para mitigar la delaminación. (ACI 440.2R-17, 2017, p.25)

En la siguiente figura se aprecia el reforzamiento con fibras de carbono y barras de acero (Ver fig. N°17).

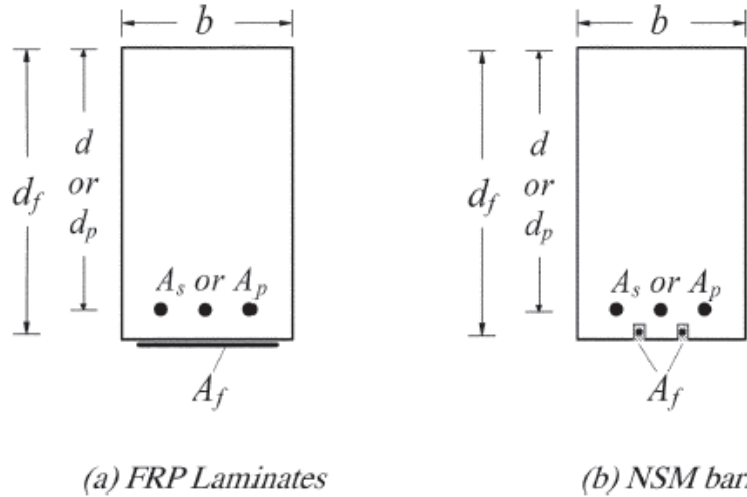


Figura N° 17: Profundidad efectiva de los sistemas de fibras de carbono

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

### 5.7 Deformaciones en el reforzamiento de fibras de carbono

Es importante determinar la deformación en los reforzamientos de las fibras de carbono en el punto límite. Porque los materiales de fibras de carbono son elásticos hasta la falla, las deformaciones en las fibras de carbono impondrán la tensión desarrollada en la fibra. La deformación máxima que se puede lograr en el reforzamiento de fibra se registrará por el punto desarrollo en la fibra de carbono en el punto donde el concreto se quiebra, el punto en el que la fibra de carbono se rompe o el punto en el que la fibra de carbono se desprende del sustrato. La deformación efectiva del refuerzo de fibras de carbono en el último estado limite se puede encontrar en la ecuación (9). (ACI 440.2R-17, 2017, p.26)

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, in (mm)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras de carbono alcanzando en la falla, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fd}$  = Deformación de unión de refuerzo de fibras de carbono unidas externamente in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{cu}$  = Máxima deformación axial del hormigón no confinado, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{bi}$  = deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in. /in. (mm/mm)

### 5.8 Tensiones en el reforzamiento de fibra de carbono

La tensión efectiva en el reforzamiento de fibras de carbono es el máximo nivel de tensión que puede ser desarrollado en el reforzamiento antes de la falla de flexión en la sección. Este estrés efectivo se puede encontrar en la tensión en la fibra, asumiendo un comportamiento perfectamente elástico. Tal como se puede apreciar en la ecuación (10). (ACI 440.2R-17, 2017, p.26)

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPA)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla in. /in. (mm/mm)

### 5.9 Factor de reducción de fuerza

El uso de refuerzo de fibras de carbono unidas externamente para el fortalecimiento de la flexión reduciría la ductilidad del miembro original. En algunos casos, la pérdida de ductilidad es insignificante. Las secciones que experimentan una pérdida significativa de ductilidad, sin embargo, deben abordarse. Para mantener un grado suficiente de ductilidad, se debe verificar la tensión en el acero en el estado limite final. Para reforzar miembros de concreto

con reforzamiento de acero sin tensión, se logra la ductilidad adecuada si la tensión en el acero en el punto de aplastamiento del concreto o falla de fibra de carbono incluyendo delaminación o desunión de al menos 0.005, según a la definición de una sección de control de tensión dada en la ACI 318. Ver la fórmula (11) para verificar el factor de reducción. (ACI 440.2R-17, 2017, p.26)

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \epsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\epsilon_t - \epsilon_{sy})}{0.005 - \epsilon_{sy}} & \text{for } \epsilon_{sy} < \epsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{for } \epsilon_t \leq \epsilon_{sy} \end{cases} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

$\epsilon_{sy}$  = deformación correspondiente al límite elástico del refuerzo de acero no pretensado, in. /in. (mm/mm)

$\epsilon_t$  = tensión de tracción neta en acero de tensión extrema con resistencia nominal, in. /in. (mm/mm)

Esta ecuación utiliza el factor de reducción 0.9 para secciones dúctiles y 0.65 para secciones frágiles donde el acero no cede y proporciona una transición lineal para el factor de reducción entre estos dos extremos, el uso de la ecuación (11) es limitada al acero que tiene un límite elástico  $f_y$  menor que 80 ksi (550 MPa).

#### 5.10 Resistencia máxima en una sección rectangular reforzada

Para presentar los conceptos presentados en el capítulo, esta sección describe la aplicación de estos conceptos de una sección rectangular sin pretensar reforzada individualmente. En la siguiente figura se ilustra la tensión interna y la distribución del estrés para una sección rectangular bajo flexión en el máximo punto límite. (ACI 440.2R-17, 2017, p.27)

El procedimiento de cálculo utilizando para llegar a la resistencia máxima debe satisfacer la compatibilidad de la tensión y el equilibrio de la fuerza, y debe considerar el modo de falla que gobierna. Se pueden derivar varios

procedimientos de cálculo para satisfacer estas condiciones. El procedimiento de cálculo descrito en este documento ilustra un método iterativo que implica seleccionar una profundidad supuesta hasta el punto neutro del eje c, calculando la deformación en cada material usando la compatibilidad de deformación; calculando la tensión asociada en cada material y chequeando las fuerzas internas de equilibrio. Si la fuerza interna resultante no está equilibrada, la profundidad del eje neutral debe revisarse y el procedimiento debe repetirse. (ACI 440.2R-17, 2017, p.27)

Para cualquier profundidad supuesta al eje neutro c, la tensión en los refuerzos de fibras de carbono pueden ser calculados con la ecuación (9) esta ecuación considera el modo de falla que gobierna para la profundidad del eje neutral supuesta. Si el término izquierdo de la desigualdad controla, la trituración de concreto controla la falla de flexión de la sección. Si el término correcto de la desigualdad controlada, las fallas de las fibras de carbono controlan la falla de flexión de la sección. (ACI 440.2R-17, 2017, p.27)

El efecto de la tensión del refuerzo de fibras de carbono puede hallarse en la deformación de fibras de carbono, asumiendo un comportamiento perfectamente elástico usando la ecuación (10). basándonos en la deformación de refuerzo de fibra de carbono, la deformación en el refuerzo de acero no pretensado se puede encontrar en la ecuación (12) usando compatibilidad de deformación. (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

$\epsilon_s$  = deformación en refuerzo de acero sin presión, in. /in. (mm/mm)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla in. /in. (mm/mm)

$\epsilon_{bi}$  = Deformación en el sustrato de concreto al momento de la instalación de las fibras de carbono (tensiones positivas), in. /in. (mm/mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión.

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, in (mm)

Se muestra la siguiente figura donde se muestra las secciones de concreto armado, distribución de deformación en la sección y las fuerzas de equilibrio. (Ver fig. N°18)

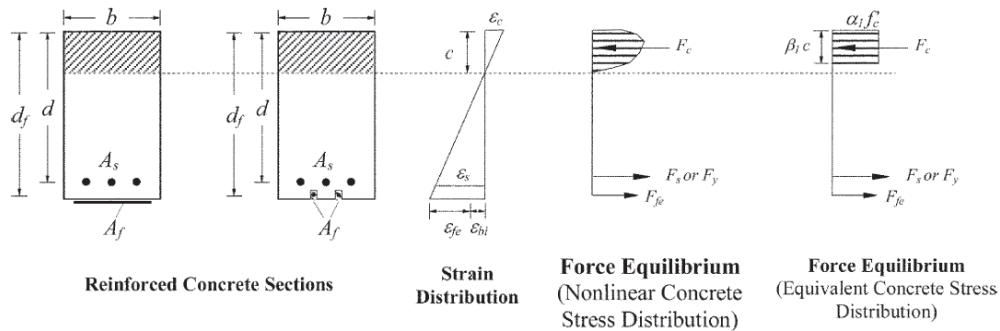


Figura N° 18: Distribución interna de tensión y deformación.

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

“La tensión en el acero es determinada de la deformación en el acero usando su supuesta curva usando su supuesta curva de tensión- deformación plástica perfectamente elástica”. Ver la ecuación (13). (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero ni pretensado, psi (MPA)

$E_s$  = Modulo de elasticidad del acero, psi (MPA)

$\epsilon_s$  = deformación en refuerzo de acero sin presión, in./in. (mm/mm)

$f_y$  = Límite elástico específico de refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

“Con la deformación en la fibra de carbono y el reforzamiento de acero determinado por la profundidad del supuesto eje neutral, el equilibrio de la fuerza interna se puede verificar usando la ecuación (14)”. (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe} \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

$\alpha_1$  = multiplicador en  $f'_c$  para determinar la intensidad de una distribución de tensión rectangular equivalente para concreto

$f'_c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto, psi (MPA)

$\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro.

$b$  = Ancho de la cara de compresión del miembro, in (mm)

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, in (mm)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPA)

Los términos  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  en la ecuación (14) son parámetros que definen una tensión rectangular negra en el hormigón equivalente a la distribución no lineal de la tensión. Si el aplastamiento del concreto es el modo de control de la falla (antes o después de ceder el acero),  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  puede tomarse como los valores asociados con el bloque de estrés de Whitney; que son  $\alpha_1 = 0.85$  y  $\beta_1 = 0.85$  para un valor  $f'_c$  entre 2500 y 4000 psi (17 y 27 MPA), y  $\beta_1$  es reducido linealmente a una tasa de 0.05 por cada 1000 psi (7 MPA) de resistencia de concreto superior a 4000 psi. Nótese que  $\beta_1$  no será un valor menos de 0.65. Si la ruptura de fibras de carbono, la cubierta de delaminación o se produce una desunión, el bloqueo de esfuerzo dará resultados razonablemente precisos. Se



puede usar una distribución de tensión no lineal en el concreto o un bloque de tensión más preciso apropiado para el nivel de deformación alcanzando en el concreto en el estado limite final. (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

La profundidad hasta el eje neutral,  $c$ , se encuentra al satisfacer simultáneamente las ecuaciones (9), (10), (12), (13) y (14), estableciendo así el equilibrio de fuerza interna y la compatibilidad de deformación. Para resolver la profundidad del eje neutro  $c$ , se puede utilizar un procedimiento de solución iterativa. Primero se supone un valor inicial  $c$  y las deformaciones y tensiones se calculan utilizando las ecuaciones (9), (10), (12) y (13). luego se calcula un valor revisado para la profundidad del eje neutral,  $c$ , usando la ecuación (14). Luego se comparan los valores calculados y supuestos para  $c$ . Si es correcto o acercado, se alcanza el valor apropiado de  $c$ . Si los valores calculados y supuestos no concuerdan, se selecciona otro valor para  $c$ , y el proceso se repite hasta que se alcanza la convergencia. (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

La resistencia a la flexión nominal de la sección con refuerzo extremo de fibras de carbono se calcula a partir de la ecuación (15). Un factor de reducción adicional para las fibras de carbono,  $\psi_f$ , se aplica a la contribución de la resistencia a la flexión del refuerzo de la fibra de carbono. El valor recomendado de  $\psi_f$  es 0.85. Este factor de reducción para la contribución de resistencia del refuerzo de fibras de carbono se basa en el análisis de confiabilidad discutido en el capítulo 5.1, que se basó en las propiedades estáticas calibradas experimentalmente de la resistencia a la flexión. (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots(15)$$

Donde:

$M_n$  = Resistencia a la flexión nominal, in. -lb (N-mm)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado, psi (MPa)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión.

$\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro.

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extremo al eje neutro, in (mm)

$\psi_f$  = Factor de reducción de fuerza

$\psi_f = 0.85$  para flexión (calibrado en función de las propiedades del material de diseño).

$\psi_f = 0.85$  para cizalla (basado en análisis de confiabilidad).

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPa)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

### 5.11 Tensión en acero bajo cargas de servicio

La distribución de la tensión y la tensión en la sección de hormigón armado se muestra en la figura N°19. Similar al hormigón armado convencional la profundidad al eje neutro en servicio,  $kd$ , se puede calcular tomando el primer momento de las áreas de la sección transformada. El área transformada de la fibra de carbono puede ser obtenida multiplicando el área de la fibra de carbono por la relación modular de la fibra de carbono para el concreto. Aunque este método ignora la diferencia en la deformación inicial de la fibra de carbono, la deformación inicial no influye mucho en la profundidad del eje neutro en el rango de respuesta elástica del miembro. (ACI 440.2R-17, 2017, p.28)

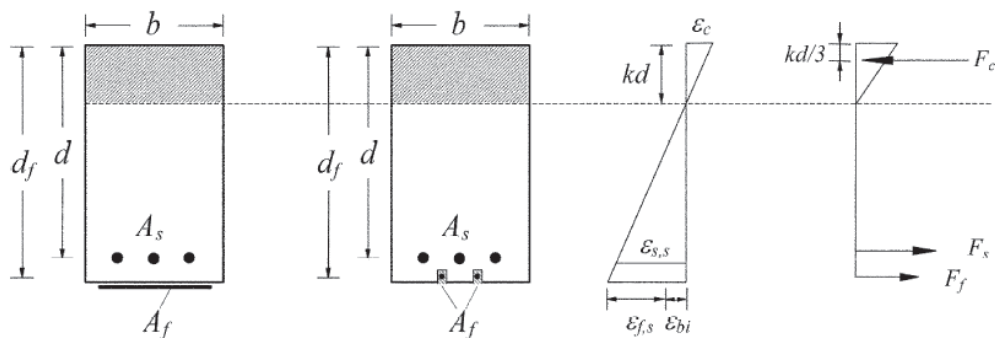


Figura N° 19: Tensión elástica y distribución de tensiones

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

$$f_{s,s} = \frac{\left[ M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left( d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{\left[ A_s E_s \left( d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) \right.} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\left. + A_f E_f \left( d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd) \right]$$

Donde:

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPa)

$E_s$  = Modulo de elasticidad del acero, psi (MPa)

$f_{s,s}$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado en cargas de servicio.

$M_s$  = Momento de servicio en la sección, in. -lb (N-mm)

$\varepsilon_{bi}$  = Deformación en el sustrato de concreto al momento de la instalación de las fibras de carbono (tensiones positivas), in. /in. (mm/mm)

### 5.12 Cizallamiento

Se ha demostrado que los sistemas de polímeros reforzados con fibra aumentan la resistencia al corte de las vigas y columnas de concreto existentes al envolver o envolver parcialmente los miembros. Orientando las fibras de carbono transversales al eje, del miembro o perpendicular a posibles grietas de corte es efectivo para proporcionar resistencia al corte adicional. Es posible que se requiera un aumento en la resistencia al corte cuando se implementa el refuerzo de flexión, para asegurar que la capacidad de flexión siga siendo crítica. Las fallas de flexión son de naturaleza relativamente más dúctil en comparación con las fallas de corte. (ACI 440.2R-17, 2017, p.31)

### 5.12.1 Esquemas de envoltura

Los tres tipos de esquemas de envoltura de fibras de carbono utilizados para aumentar la resistencia al corte de vigas prismáticas, rectangulares o columnas se ilustran en la Figura N°20. Envolver completamente el sistema de fibra alrededor de la sección en los cuatro lados es el esquema de envoltura más eficiente y se usa más comúnmente en aplicaciones de columna donde está disponible el acceso a los cuatro lados de la columna. En aplicaciones de vigas donde una losa integral hace que sea poco práctico envolver completamente el miembro, la resistencia al corte se puede mejorar envolviendo el sistema de fibras de carbono alrededor de tres lados del miembro o uniendo a dos lados opuestos de un miembro. (ACI 440.2R-17, 2017, p.32)

Aunque se ha demostrado que las tres técnicas mejoran la resistencia al corte de un miembro rectangular, envolver completamente la sección es la más eficiente, seguida de la envoltura en U de tres lados. La unión a dos lados de una viga es el esquema menos eficiente. Para el refuerzo de corte de miembros circulares, solo se recomienda el envoltorio circunferencial completo de la sección en la cual la fibra de carbono está orientado perpendicularmente al eje longitudinal del miembro. (ACI 440.2R-17, 2017, p.32)

### 5.12.2 Resistencia al corte nominal

La resistencia al corte de diseño de un miembro de concreto reforzado con un sistema de fibras de carbono que debe exceder la resistencia al corte requerido. La resistencia al corte requerido de un miembro de concreto reforzado con fibras de carbono debe calcularse con los factores de carga requeridos por la ACI 318. La resistencia al corte de diseño debe calcularse multiplicando la resistencia al corte nominal por el factor de reducción de resistencia  $\Phi$  como especifica la ACI 318. Ver la ecuación (17). (ACI 440.2R-17, 2017, p.32)

$$\Phi V_n \geq V_u \quad \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

$V_n$  = Resistencia al corte nominal, lb (N)

$V_u$  = Resistencia al corte último, lb (N)

$\Phi$  = Factor de reducción de fuerza

La resistencia al corte nominal de un miembro de concreto reforzado con fibras de carbono se puede determinar agregando la contribución del refuerzo de corte externo de fibras de carbono a las contribuciones del acero de refuerzo y el concreto (ecuación (18)). Se aplica un factor de reducción adicional  $\psi_f$ , a la contribución del sistema de fibras de carbono.

$$\Phi V_n = \Phi (V_c + V_s + \psi_f * V_f) \dots\dots\dots(18)$$

Donde:

$V_c$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por hormigón con refuerzo de flexión de acero, lb (N)

$V_f$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de fibras de carbono, lb (N)

$V_n$  = Resistencia al corte nominal, lb (N)

$V_s$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de acero, lb (N)

$\psi_f$  = Factor de reducción de fuerza

$\Phi$  = Factor de reducción de fuerza

Donde  $V_c$  y  $V_s$  son las contribuciones de concreto y acero de refuerzo interno a la capacidad de corte calculadas utilizando las disposiciones de la ACI 318, respectivamente. Para miembros pretensados,  $V_c$  es el mínimo de  $V_{ci}$  y  $V_{cw}$  definido en la ACI 318. Basándonos en un análisis de confiabilidad utilizando datos de Bousseham and chaallal (2006), Deniaud and Cheng (2001, 2003) y Pellegrino and Modena (2002), el factor de reducción  $\psi_f$  de 0.85 es recomendado para los tres lados de refuerzo de fibras de carbono o dos lados opuestos (Ver la Fig. 20). No existen datos experimentales suficientes para realizar un análisis de confiabilidad para

secciones completamente envueltas; sin embargo, debería haber menos variabilidad con este esquema de fortalecimiento, ya que es menos dependiente de las uniones y por lo tanto el factor de reducción  $\psi_f$  de 0.95 es recomendado. El factor  $\psi_f$  se calibró en función de las propiedades del material de diseño. Estas recomendaciones se dan en la tabla N°16. (ACI 440.2R-17, 2017, p.32)

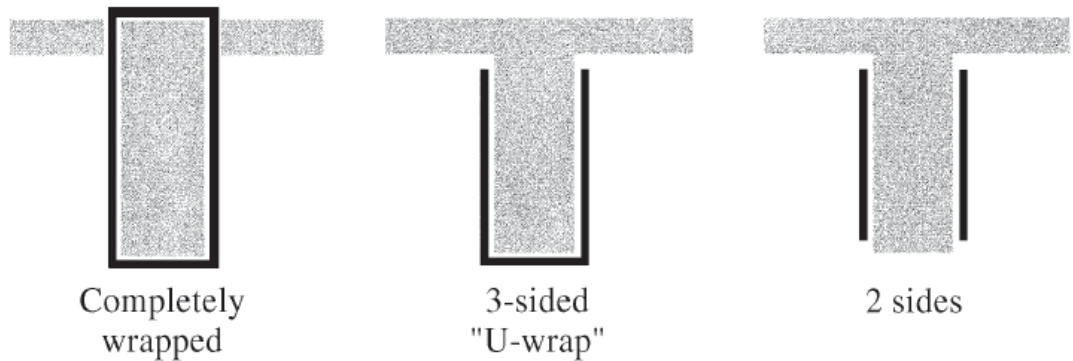


Figura N° 20: Envoltura típicos para el refuerzo de corte con FRP

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

Tabla N° 16: Factores de reducción adicionales recomendados para FRP

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\psi_f = 0.95$ | Miembros completamente envueltos            |
| $\psi_f = 0.85$ | Esquemas de tres lados y dos lados opuestos |

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

### 5.12.3 Contribución a la resistencia de la fibra de carbono al corte

Se ilustra las variables dimensionales utilizadas en los cálculos de resistencia al corte para láminas de fibras de carbono (Ver la fig. N°21). La contribución del sistema de fibras de carbono a la resistencia al corte de miembro se basa en la orientación de la fibra y en un supuesto patrón de grietas. La resistencia al corte proporcionado por el refuerzo de fibras de carbono se puede determinar calculando la fuerza resultante del esfuerzo de tracción en la fibra de carbono a través de la grieta supuesta. Las contribuciones de corte de refuerzo de corte en las fibras de carbono están dadas en la ecuación 19.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \dots\dots\dots(19)$$

Donde:

$V_f$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de fibras de carbono, lb (N)

$A_{fv}$  = Área de refuerzo al corte con fibras de carbono con espacio  $s$ , in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPa)

$\alpha$  = Ángulo de aplicación de la dirección de refuerzo primario de fibra de carbono con respecto al eje longitudinal del miembro.

$d_{fv}$  = Profundidad efectiva del refuerzo de corte con fibra de carbono, in (mm)

$s_f$  = Espaciado de centro a centro de las tiras de fibras de carbono, in (mm)

Y para secciones rectangulares se utiliza la siguiente formula:

$$A_{fv} = 2 * n * t_f * w_f \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

$A_{fv}$  = Área de refuerzo al corte con fibras de carbono con espacio  $s$ , in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)

$w_f$  = Ancho de las capas de refuerzo de las fibras de carbono, in (mm)

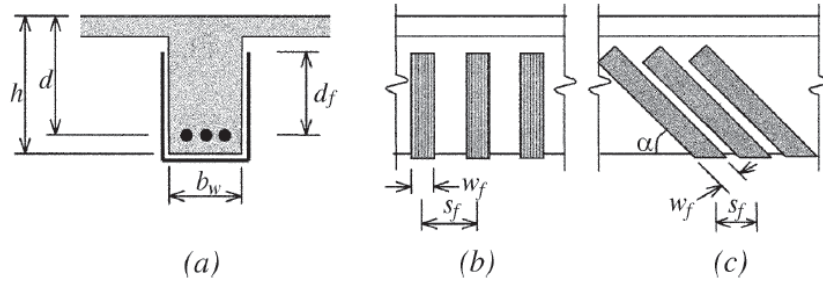


Figura N° 21: Refuerzo utilizando láminas de FRP

Fuente: Norma ACI 440.2R-17

Para secciones circulares,  $d_{fv}$  es tomado como 0.8 veces el diámetro de la sección y también se muestra la siguiente fórmula:

$$A_{fv} = (\pi/2) * n * t_f * w_f \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

$A_{fv}$  = Área de refuerzo al corte con fibras de carbono con espacio  $s$ ,  $\text{in}^2$  ( $\text{mm}^2$ )

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)

$w_f$  = Ancho de las capas de refuerzo de las fibras de carbono, in (mm)

El esfuerzo de tracción en el refuerzo de corte con fibras de carbono a resistencia nominal es directamente proporcional a la deformación que se puede desarrollar en el refuerzo de corte de fibras de carbono a su resistencia nominal.

$$f_{fe} = E_f * \epsilon_{fe} \dots\dots\dots(22)$$

Donde:

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPa)



$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla, in./in. (mm/mm)

### 5.13 Procedimiento para el refuerzo por flexión con CFRP

Paso 1: Calculo de las propiedades del material de diseño del sistema FRP, utilizando las siguientes formulas:

$$\begin{aligned} f_{fu} &= C_E f_{fu}^* & \dots\dots\dots(23) \\ \epsilon_{fu} &= C_E \epsilon_{fu}^* \end{aligned}$$

Donde:

$C_E$  = Factor de reducción ambiental

$f_{fu}$  = Diseño de la máxima resistencia a la tracción de la fibra de carbono, psi (MPA)

$f_{fu}^*$  = Máxima resistencia a la tracción del material de fibras de carbono según lo informado por el fabricante, psi (MPA)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura de deformación de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fu}^*$  = Tensión de ruptura final de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

Paso 2: Propiedades del concreto.

$$\beta_1 = 1.05 - 0.05 * (f'c/1000) \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'c} \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$A_{fv} = n * t_f * w_f \quad \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

$A_{fv}$  = Área de refuerzo al corte con fibras de carbono con espacio  $s$ , in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$E_c$  = módulo de elasticidad del concreto, psi (MPA)

$f'_c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto, psi (MPA)

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)

$w_f$  = Ancho de las capas de refuerzo de las fibras de carbono, in (mm)

$\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro

Paso 3: Se calcula el estado actual de la cepa suponiendo que la viga está agrietada y las únicas cargas que actúan en el momento de la FRP instalación son las cargas muertas permanentes.

$$\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} \dots\dots\dots(26)$$

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$E_c$  = módulo de elasticidad del concreto, psi (MPA)

$I_{cr}$  = Momento de inercia de sección agrietada transformada en concreto, in<sup>4</sup> (mm<sup>4</sup>)

$M_{DL}$  = Momento por la carga muerta, in. -lb (N-mm)

$\epsilon_{bi}$  = deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in. /in. (mm/ mm)

Paso 4: Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi  
(MPA)

$f'_c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto, psi  
(MPA)

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono,  
in. (mm)

$\epsilon_{fd}$  = Deformación de unión de refuerzo de fibras de carbono unidas  
externamente in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura de deformación de refuerzo de fibras de  
carbono, in./in. (mm/mm)

Paso 5: Estimar  $c$ , la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de  $c$  es  $0.20 \cdot d$ . El valor final se ajusta después de comprobar el equilibrio.

$$c = 0.20 * d \quad \dots\dots\dots(28)$$

Donde:

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extremo al eje neutro, in  
(mm)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de  
refuerzo de tensión, in (mm)

Paso 6: Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo  
tenemos en la siguiente expresión:

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right) \quad \dots\dots\dots(29)$$

Donde:

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, in (mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$\epsilon_{bi}$  = deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_c$  = Deformación en el concreto, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{cu}$  = Máxima deformación axial del hormigón no confinado, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fd}$  = Deformación de unión de refuerzo de fibras de carbono unidas externamente, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla, in./in. (mm/mm)

Paso 7: Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de triángulos.

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \dots\dots\dots(30)$$

Donde:

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, in (mm)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión, in (mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$\epsilon_{bi}$  = deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_s$  = deformación en refuerzo de acero sin presión, in./in. (mm/mm)

Paso 8: Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes ecuaciones, en primer lugar, del acero.

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \dots\dots\dots(12)$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \dots\dots\dots(22)$$

Donde:

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$E_s$  = Modulo de elasticidad del acero, psi (MPA)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPA)

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$f_y$  = Límite elástico específico de refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla in./in. (mm/mm)

$\epsilon_s$  = deformación en refuerzo de acero sin presión, in./in. (mm/mm)

Paso 9: Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se verifica comprobando la estimación inicial de c con la siguiente expresión.

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \dots\dots\dots(31)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$$

Donde:

$\alpha_1$  = multiplicador en  $f'_c$  para determinar la intensidad de una distribución de tensión rectangular equivalente para concreto

$\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro

$\varepsilon_c$  = Deformación en el concreto, in./in. (mm/mm)

$\varepsilon'_c$  = Deformación por compresión del concreto no confinado correspondiente a  $f'_c$ , in./in. (mm/mm); puede ser tomado como 0.002

Paso 10: Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \dots\dots\dots(32)$$

Donde:

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$b$  = Ancho de la cara de compresión del miembro, in (mm)

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extremo al eje neutro, in (mm)

$f'_c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto, psi (MPa)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPa)

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$\alpha_1$  = multiplicador en  $f'_c$  para determinar la intensidad de una distribución de tensión rectangular equivalente para concreto

$\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro

Paso 11: Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

$$M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots(33)$$

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots(34)$$

Donde:

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extremo al eje neutro, in (mm)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión, in (mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPA)

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$M_{nf}$  = Contribución del refuerzo de la fibra de carbono de la resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$M_{ns}$  = Contribución del refuerzo del acero a la resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro

Paso 12: Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \psi_f M_{nf}] \dots\dots\dots(35)$$

Donde:

$M_n$  = Resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$M_{nf}$  = Contribución del refuerzo de la fibra de carbono de la resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$M_{ns}$  = Contribución del refuerzo del acero a la resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$\psi_f = 0.85$  para cizalla (basado en análisis de confiabilidad).

$\Phi$  = Factor de reducción de fuerza

Paso 13: Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica.

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)} \dots\dots(36)$$

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)} \dots\dots(37)$$



Donde:

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión, in (mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$E_c$  = módulo de elasticidad del concreto, psi (MPa)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPa)

$E_s$  = Modulo de elasticidad del acero, psi (MPa)

$f_{s,s}$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado en cargas de servicio, psi (MPa)

$h$  = Espesor total o altura de un miembro, in (mm)

$M_s$  = Momento de servicio en la sección, in.-lb (M-mm)

$\epsilon_{bi}$  = deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in. /in. (mm/ mm)

$\rho_f$  = Relación del refuerzo de las fibras de carbono.

$\rho_s$  = Relación del refuerzo no pretensado

Paso 14: El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio.

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left( \frac{E_f}{E_s} \right) \left( \frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - \epsilon_{bi} E_f \quad \dots\dots\dots(38)$$

Donde:

$d$  = distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión, in (mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$E_s$  = Modulo de elasticidad del acero, psi (MPA)

$f_{fs}$  = Tensión en la fibra de carbono causada por un momento dentro del rango elástico del miembro, psi (MPA)

$f_{s,s}$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado en cargas de servicio, psi (MPA)

$\epsilon_{bi}$  = deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in./in. (mm/mm)

Límite de estrés cíclico positivo sostenido =  $0.55 * f_{fu}$

#### 5.14 Procedimiento para la resistencia al corte con CFRP

Paso 1: Calculo de las propiedades del material de diseño del sistema FRP, utilizando las siguientes formulas:

$$\begin{aligned} f_{fu} &= C_E f_{fu}^* \\ \epsilon_{fu} &= C_E \epsilon_{fu}^* \end{aligned} \dots\dots\dots(23)$$

Donde:

$C_E$  = Factor de reducción ambiental

$f_{fu}$  = Diseño de la máxima resistencia a la tracción de la fibra de carbono, psi (MPA)

$f_{fu}^*$  = Máxima resistencia a la tracción del material de fibras de carbono según lo informado por el fabricante, psi (MPA)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura de deformación de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fu}^*$  = Tensión de ruptura final de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

Paso 2: Calcular el nivel de deformación efectivo en el refuerzo de corte con FRP

$$L_e = \frac{416}{(nt_f E_f)^{0.58}} \dots\dots\dots(39)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{254}\right)^{2/3} \dots\dots\dots(40)$$

$$k_2 = \left(\frac{d_{fv} - l_e}{d_{fv}}\right) \dots\dots\dots(41)$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11910 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \dots\dots\dots(42)$$

Donde:

$d_{fv}$  = Profundidad efectiva del refuerzo de corte con fibra de carbono, in (mm)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPa)

$f'_c$  = Resistencia a la compresión específica del concreto, psi (MPa)

$k_1$  = Factor de modificación aplicado a  $k_v$  para tener en cuenta la resistencia del concreto.

$k_2$  = Factor de modificación aplicado a  $k_v$  para tener en cuenta el esquema de ajuste.

$L_e$  = Longitud de unión activa del laminado de fibra de carbono, in (mm)

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura de deformación de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

La tensión efectiva puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{fe} = \kappa_v \epsilon_{fu} \leq 0.004 \quad \dots\dots\dots(43)$$

Donde:

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura de deformación de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

Paso 3: Calculo de la contribución del refuerzo del FRP al esfuerzo de corte.

$$A_{fv} = 2 * n * t_f * w_f \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$f_{fe} = E_f * \epsilon_{fe} \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$\Phi V_n = \Phi (V_c + V_s + \psi_f * V_f) \quad \dots\dots\dots(18)$$

Donde:

$A_{fv}$  = Área de refuerzo al corte con fibras de carbono con espacio s, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$d_{fv}$  = Profundidad efectiva del refuerzo de corte con fibra de carbono, in (mm)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPa)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPa)

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$s_f$  = Espaciado de centro a centro de las tiras de fibras de carbono, in (mm)

$t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)

$V_c$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por hormigón con refuerzo de flexión de acero, lb (N)

$V_f$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de fibras de carbono, lb (N)

$V_n$  = Resistencia al corte nominal, lb (N)

$V_s$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de acero, lb (N)

$w_f$  = Ancho de las capas de refuerzo de las fibras de carbono, in (mm)

$\alpha$  = Ángulo de aplicación de la dirección de refuerzo primario de fibra de carbono con respecto al eje longitudinal del miembro.

$\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla, in./in. (mm/mm)

$\psi_f$  = Factor de reducción de fuerza

$\Phi$  = Factor de reducción de fuerza

### 5.15 Propiedades del FRP a utilizar para el reforzamiento.

En el proyecto se utilizará el refuerzo a base de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) y el adhesivo especial Sikadur-30. (Ver tabla 17 y 18)

Datos técnicos:

Tabla N° 17: Propiedades de CFRP

| Sika CarboDur M           |           |                    |
|---------------------------|-----------|--------------------|
| Modulo E                  | > 210,000 | N/mm <sup>2</sup>  |
| Resistencia a la tracción | > 2,400   | N/mm <sup>2</sup>  |
| Resistencia a la rotura   | 2,900     | N/mm <sup>2</sup>  |
| Elongación a la rotura    | > 1.2     | %                  |
| Densidad                  | 1.6       | gr/cm <sup>3</sup> |

(\*) Valores mecánicos obtenidos según la longitud de las fibras

Fuente: Sika Perú

Tabla N° 18: Tipos de Sika CarboDur M

| Sika CarboDur M E > 210,000 N/mm <sup>2</sup> |            |              |  |
|---|------------|--------------|--|
| Tipo  | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Area de corte transversal (mm <sup>2</sup> ) |
| M614  | 60         | 1.4          | 84   |
| M914  | 90         | 1.4          | 126  |
| M1214   | 120        | 1.4          | 168  |

Fuente: Sika Perú

## CAPÍTULO VI: CÁLCULOS DEL REFORZAMIENTO CON CFRP

### 6.1 Análisis de Vigas Principales

Se realizó el análisis estructural sobre la losa del primer sótano, en el cual se dispondrán los equipos del Data Center, según las indicaciones del plano.

Se obtuvieron los siguientes resultados para los momentos y esfuerzos en las vigas de la estructura, con estos resultados se podrá verificar si se requiere de refuerzos con CFRP. Se observan los momentos flectores y esfuerzos cortantes en los siguientes gráficos en las figuras N°22 y N°23.

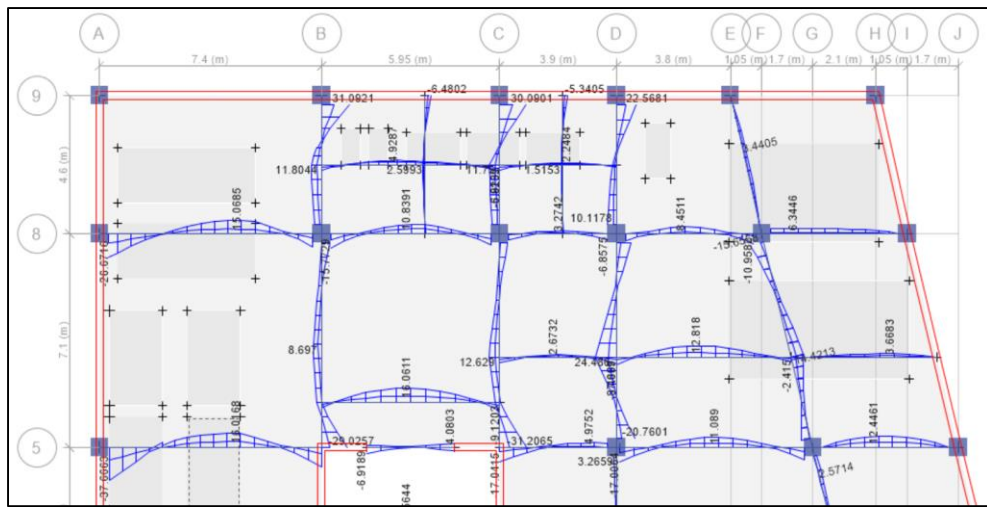


Figura N° 22: Momentos flectores de la losa del primer sótano

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

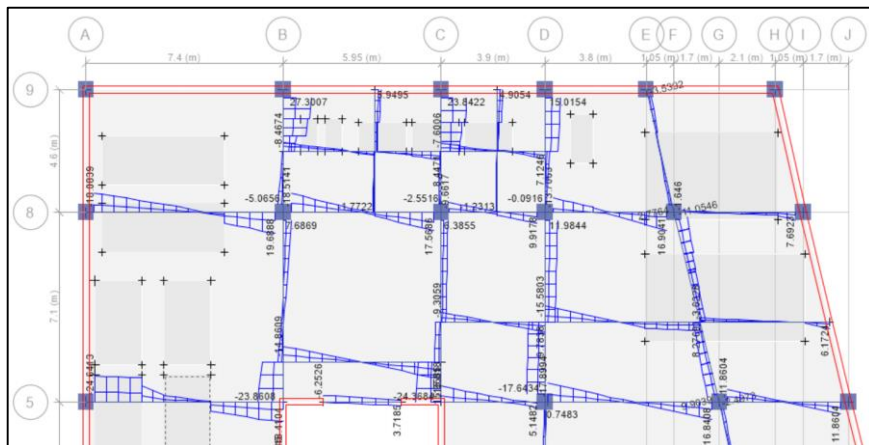


Figura N° 23: Esfuerzos cortantes de la losa del primer sótano

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

### 6.1.1 Comparación de momento actuante y resistente en la estructura

Para el cálculo del momento ultimo de las vigas principales se hizo a través del acero presente en las mismas, estos datos se obtuvieron de los planos estructurales de la edificación. (Ver tabla N° 19)

Tabla N° 19: Momento actuante y resistente en vigas principales (eje x)

| Viga                      | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | M Resistente (Ton-m) | M Aplicado (Ton-m) | Observacion |
|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| B1/S1 - V1 (Eje A - B')   | 30        | 65          | 13.38                 | 28.20                | 16.02              | Ok          |
| B1/S1 - V1 (Eje B' - C')  | 30        | 65          | 5.7                   | 12.66                | 6.91               | Ok          |
| B1/S1 - V1 (Eje C' - D)   | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 5.91               | Ok          |
| B1/S1 - V1 (Eje D - E)    | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 11.1               | Ok          |
| B1/S1 - V1 (Eje E - F)    | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 12.45              | Ok          |
| B1/S1 - V1A (Eje B' - C') | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 16.1               | Ok          |
| B1/S1 - V1B (Eje C' - D)  | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 9.8                | Ok          |
| B1/S1 - V1B (Eje D - E)   | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 12.82              | Ok          |
| B1/S1 - V1B (Eje E - F)   | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 13.67              | Ok          |
| B1/S1 - V2 (Eje A - B')   | 30        | 65          | 13.38                 | 28.20                | 15.1               | Ok          |
| B1/S1 - V2 (Eje B' - C')  | 30        | 65          | 5.7                   | 12.66                | 10.83              | Ok          |
| B1/S1 - V2 (Eje C' - D)   | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 5.34               | Ok          |
| B1/S1 - V2 (Eje D - E)    | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 10.85              | Ok          |
| B1/S1 - V2 (Eje E - F)    | 30        | 65          | 7.68                  | 16.83                | 6.34               | Ok          |

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla N° 19 no se encuentran elementos para reforzamiento con CFRP en las vigas principales horizontales, para este caso se ha considerado un  $f'c=210\text{kg/cm}^2$  y un  $f_y=4221.6\text{ kg/cm}^2$ , con un recubrimiento de 5 cm.

Lo mismo se ha realizado en el eje y. (Ver tabla N° 20)



Tabla N° 20: Momento actuante y resistente en vigas principales verticales (eje y)

|                           |    |    |       |       |       |                      |
|---------------------------|----|----|-------|-------|-------|----------------------|
| B1/S1 - V3<br>(Eje 6 - 7) | 30 | 65 | 10.14 | 21.86 | 8.69  | Ok                   |
| B1/S1 - V3<br>(Eje 7 - 8) | 30 | 65 | 10.14 | 21.86 | 11.82 | Ok                   |
| B1/S1 - V4<br>(Eje 6 - 7) | 30 | 65 | 7.68  | 16.83 | 12.63 | Ok                   |
| B1/S1 - V4<br>(Eje 7 - 8) | 30 | 65 | 7.68  | 16.83 | 14.12 | Ok                   |
| B1/S1 - V5<br>(Eje 6 - 7) | 30 | 65 | 10.14 | 21.86 | 24.48 | <b>Necesita CFRP</b> |
| B1/S1 - V5<br>(Eje 7 - 8) | 30 | 65 | 7.68  | 16.83 | 10.12 | Ok                   |
| B1/S1 - V6<br>(Eje 6 - 7) | 30 | 65 | 10.14 | 21.86 | 14.42 | Ok                   |
| B1/S1 - V6<br>(Eje 7 - 8) | 30 | 65 | 10.14 | 21.86 | 4.50  | Ok                   |

Fuente: Elaboración propia

La viga B1/S1 – V5 requiere reforzamiento con CFRP debido a que el momento positivo actuante es mayor al momento resistente (ver fig. N°24).

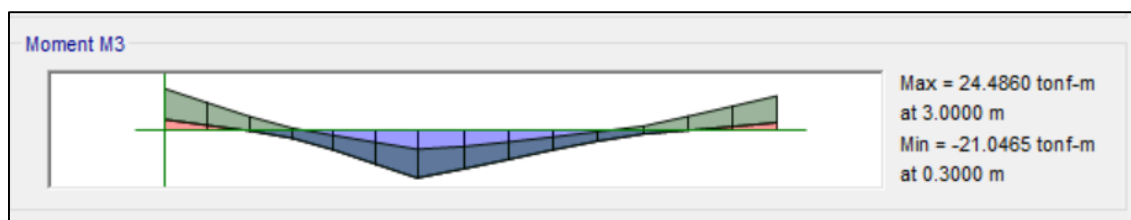


Figura N° 24: Momento flector en la viga B1/S1 – V5

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

#### 6.1.2 Comparación del esfuerzo cortante actuante y resistente en la viga

Para el cálculo del esfuerzo cortante nominal se usó el espaciamiento de los estribos descritos en los planos estructurales, se procedió a calcular la cortante de concreto usándose un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_y = 4221.6 \text{ Kg/cm}^2$ , un recubrimiento de 5 cm y un acero de estribamiento es de  $3/8''$ , y se procedió a comparar la cortante resistente y actuante en las vigas principales. (Ver tabla N° 21)

Tabla N° 21: Esfuerzo cortante actuante y cortante resistente de las vigas principales

| Viga                         | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | V resistente (Ton) | V Aplicado (Ton) | Observacion |
|------------------------------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------|------------------|-------------|
| B1/S1 - V1<br>(Eje A - B')   | 30        | 65          | 13.38                 | 37.21              | 24.64            | Ok          |
| B1/S1 - V1<br>(Eje B' - C')  | 30        | 65          | 5.7                   | 37.21              | 9.5              | Ok          |
| B1/S1 - V1<br>(Eje C' - D)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 17.1             | Ok          |
| B1/S1 - V1<br>(Eje D - E)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 17.9             | Ok          |
| B1/S1 - V1<br>(Eje E - F)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 11.86            | Ok          |
| B1/S1 - V1A<br>(Eje B' - C') | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 15.6             | Ok          |
| B1/S1 - V1B<br>(Eje C' - D)  | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 9.8              | Ok          |
| B1/S1 - V1B<br>(Eje D - E)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 15.6             | Ok          |
| B1/S1 - V1B<br>(Eje E - F)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 16.18            | Ok          |
| B1/S1 - V2<br>(Eje A - B')   | 30        | 65          | 13.38                 | 37.21              | 19.8             | Ok          |
| B1/S1 - V2<br>(Eje B' - C')  | 30        | 65          | 5.7                   | 37.21              | 18.6             | Ok          |
| B1/S1 - V2<br>(Eje C' - D)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 9.84             | Ok          |
| B1/S1 - V2<br>(Eje D - E)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 16.92            | Ok          |
| B1/S1 - V2<br>(Eje E - F)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 7.84             | Ok          |
| B1/S1 - V3<br>(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 10.14                 | 37.21              | 29.30            | Ok          |
| B1/S1 - V3<br>(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 10.14                 | 37.21              | 24.48            | Ok          |
| B1/S1 - V4<br>(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 24.38            | Ok          |
| B1/S1 - V4<br>(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 23.84            | Ok          |
| B1/S1 - V5<br>(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 17.70            | Ok          |
| B1/S1 - V5<br>(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21              | 15.20            | Ok          |
| B1/S1 - V6<br>(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 10.14                 | 37.21              | 11.60            | Ok          |
| B1/S1 - V6<br>(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 10.14                 | 37.21              | 6.50             | Ok          |

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.3 Reforzamiento con CFRP de la Viga B1/S1 – V5

Se muestra el procedimiento aplicado para la viga B1/S1 – V5 en las siguientes hojas de Excel, con los siguientes datos.

#### Propiedades de la seccion

|                 |                            |   |                          |
|-----------------|----------------------------|---|--------------------------|
| b               | 30.00 cm                   | = | 300 mm                   |
| h               | 65.00 cm                   | = | 650 mm                   |
| As              | 10.00 cm <sup>2</sup>      | = | 1000 mm <sup>2</sup>     |
| A's             | 0.00 cm <sup>2</sup>       | = | 0 mm <sup>2</sup>        |
| φ long          | 2.50 cm                    | = | 25 mm                    |
| φ estribo       | 0.95 cm                    | = | 9.5 mm                   |
| Rec             | 4.00 cm                    | = | 40 mm                    |
| ε <sub>cu</sub> | 0.0030                     | = | 0.0030                   |
| es              | 0.0021                     | = | 0.0021                   |
| f'c             | 210.00 kg/cm <sup>2</sup>  | = | 20.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| f <sub>y</sub>  | 4221.60 kg/cm <sup>2</sup> | = | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
| Mom.            | 24.48 tn-m                 | = | 243.82 kN-m              |

#### PROPIEDADES DEL FRP

|          |                             |  |
|----------|-----------------------------|--|
| f*fu     | 2900.00 N/mm <sup>2</sup>   | Esfuerzo de tensión ultima             |
| εf*u     | 0.012                       | Deformacion de ruptura                 |
| tf       | 1.40 mm                     | Espesor                                |
| Ef       | 210000.00 N/mm <sup>2</sup> | Modulo de elasticidad de la lamina FRP |
| C        | 0.95                        |  |
| Nº capas | 2.00 capas                  | Numero de capas de FRP                 |
| bfibra   | 90.00 mm                    | Ancho de cada capa                     |

|                 |                               |   |
|-----------------|-------------------------------|---|
| d               | 588.00 mm                     |   |
| d'              | 52.50 mm                      |   |
| Es              | 197141.68 N/mm <sup>2</sup>   |   |
| n               | 9.24                          |   |
| r               | 0.00                          | $kd = \left[ \sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B :$                           |
| B               | 0.0325                        |   |
| kd              | 162.02                        |   |
| k               | 0.2755                        | $I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d')^2$ |
| I <sub>cr</sub> | 2102526439.03 mm <sup>4</sup> |   |
| ρ <sub>s</sub>  | 0.00567                       | Cuantía de refuerzo de la cara a analizar   |
| ρ <sub>f</sub>  | 0.00143                       | Cuantía de refuerzo de la fibra FRP   |

#### Paso 1

Calculo de las propiedades del FRP

|                 |                           |   |
|-----------------|---------------------------|---|
| ffu             | 2755.00 N/mm <sup>2</sup> | $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$                     |
| ε <sub>fu</sub> | 0.0114                    | $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$ |

### Paso 2

Calculos preliminares

#### Propiedades del concreto

$\beta_1$  0.80

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$$

$E_c$  21328.87 N/mm<sup>2</sup> Modulo de elasticidad del concreto

#### Propiedades del acero existente

$A_s$  1000.00 mm<sup>2</sup>

#### Propiedades de la fibra FRP

$A_f$  252.00 mm<sup>2</sup>

### Paso 3

se calcula el estado actual de la ceja suponiendo que la viga está agrietada y las único cargas que

Calculo de  $\varepsilon_{bi}$

$\varepsilon_{bi}$  0.001244

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c}$$

### Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

$\varepsilon_{fd}$  0.00243 < 0.0103 ==> OK

### Paso 5

Estimar  $c$ , la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de  $c$  es 0'20· $d$ . El valor final se ajusta

$C$  131.70 cm

### Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión

$\varepsilon_{fe}$  0.01056 > 0.00243

$\varepsilon_{fe}$  0.00243

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$\varepsilon_c$  0.0009

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$$

### Paso 7

Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de triángulos

$\varepsilon_s$  0.0032

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

### Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes

|    |        |   |        |                                    |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|
| fs | 637.07 | > | 414.00 | $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|

|    |                          |
|----|--------------------------|
| fs | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
|----|--------------------------|

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| ffe | 509.55 N/mm <sup>2</sup> |
|-----|--------------------------|

### Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se verifica

|           |      |  |
|-----------|------|--|
| $\beta_1$ | 0.75 | $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$ |
|-----------|------|--|

|            |      |  |
|------------|------|--|
| $\alpha_1$ | 0.89 | $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$ |
|------------|------|--|

### Paso 10

Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido

|   |        |
|---|--------|
| C | 131.69 |
|---|--------|

|          |        |
|----------|--------|
| Casumido | 131.70 |
|----------|--------|

|            |       |
|------------|-------|
| Diferencia | -0.01 |
|------------|-------|

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

### Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\Psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

|     |             |   |
|-----|-------------|---|
| Mns | 222.98 kN-m | $M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|-------------|---|

Contribución del FRP a la flexión

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mnf | 77.12 kN-m | $M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|--|

### Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

|            |             |
|------------|-------------|
| $\phi M_n$ | 259.68 kN-m |
|------------|-------------|

|       |             |
|-------|-------------|
| Mact. | 243.82 kN-m |
|-------|-------------|

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}]$$

|            |        |   |        |        |
|------------|--------|---|--------|--------|
| $\phi M_n$ | 259.68 | > | 243.82 | ==> OK |
|------------|--------|---|--------|--------|

### Paso 13

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)$$

$$k = 0.31$$

$$kd = 181.17 \text{ cm}$$

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite

$$f_{s,s} = 215.72 \quad f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} = 215.72 < 331.20 \quad ==> \text{OK}$$

### Paso 14

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio

$$f_{f,s} = 3.53 \quad f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} = 0.55 f_{fu}$$

$$f_{f,s} = 3.53 < 1515.25 \quad ==> \text{OK}$$

## 6.2 Análisis de Viguetas

Las viguetas de las losas aligeradas son de 10cm x 25cm y tienen acero de 3/8", se ha usado para el análisis un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y un  $f_y = 4221.6 \text{ kg/cm}^2$ .

Se tienen paños diferentes los cuales serán analizados en el programa Etabs de forma individual.

6.2.1 El tramo entre los ejes 6-7-8 entre los ejes F y G  
 Metrado de Cargas Vigueta 01. (Ver tabla N°22 y N°23)

**a) Carga Muerta:**

Tabla N° 22: Carga muerta en la vigueta 01

| Carga Muerta                   |      |        |
|--------------------------------|------|--------|
| Peso de la Losa                | 0.35 | Ton/m2 |
| Peso de la vigueta (*)         | 0.00 | Ton/m2 |
| Peso de acabados + falso Suelo | 0.15 | Ton/m2 |
|                                | 0.50 | Ton/m2 |

Fuente: Elaboración propia

(\*) El peso de la vigueta es metrado internamente por el software utilizado

Peso por cada vigueta:  $0.50 \times 0.40 = 0.20$  ton/m (Ver fig. N°25).

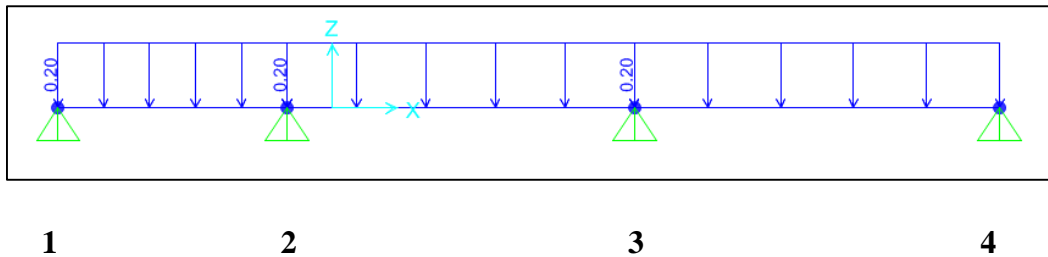


Figura N° 25: Carga muerta repartida vigueta 01 (Eje 6-8 y F-G)

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

**b) Carga Viva:**

Tabla N° 23: Carga muerta en la vigueta 01

| Carga Viva      |      |        |      |        |
|-----------------|------|--------|------|--------|
| Tramo izquierdo | 0.45 | Ton/m2 | 0.18 | Ton/ml |
| Tramo central   | 0.45 | Ton/m2 | 0.18 | Ton/ml |
| Tramo derecho   | 0.25 | Ton/m2 | 0.10 | Ton/ml |

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de carga viva y muerta se introdujeron al Etabs 2016. (Ver Figura N° 26)

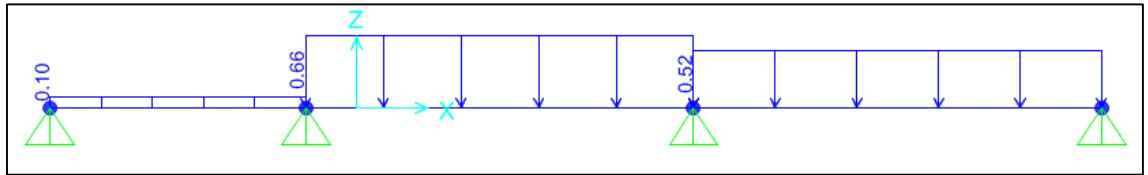


Figura N° 26: Carga viva de la vigueta 01 (Eje 6-8 y F-G)

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Hecho el análisis se tiene los siguientes resultados (Ver fig. N°27 y N°28):

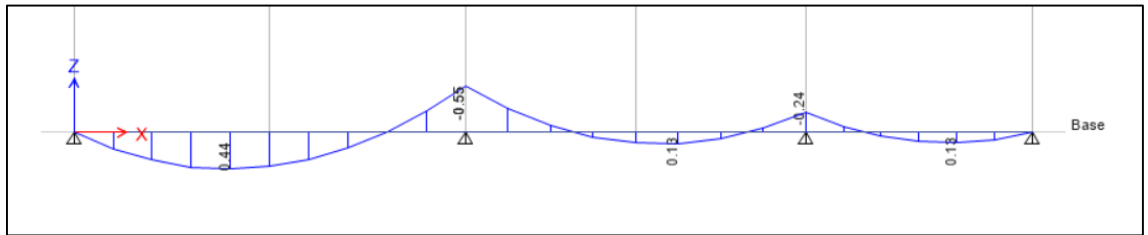


Figura N° 27: Momentos debido a la carga muerta VG 01.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

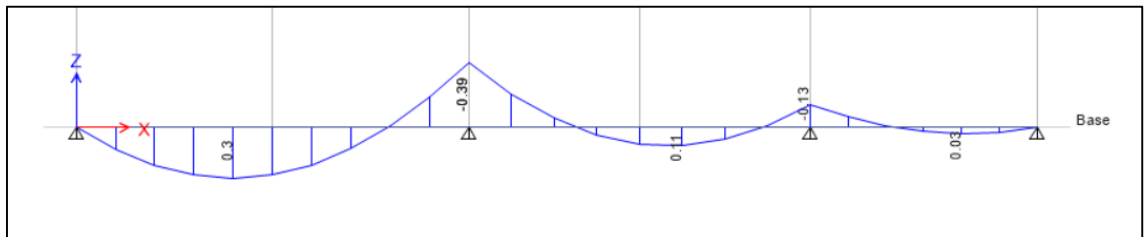


Figura N° 28: Momentos debido a la carga viva VG 01.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Se muestran las tablas con los Momentos y Cortantes. (Ver Tabla N° 24 y N° 25)

Tabla N° 24: Análisis de Momentos Flectores Vigueta 01

| Elemento            | Descripción     | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | M Aplicado (Ton-m) | Reforzamiento |
|---------------------|-----------------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| VIGUETA 1 INCLINADA | Tramo izquierdo | 10        | 25          | 1.52                  | <b>1.13</b>        | CFRP          |
|                     | Apoyo Eje 7     | 10        | 25          | 1.98                  | <b>1.44</b>        | CFRP          |
|                     | Tramo central   | 10        | 25          | 0.71                  | <b>0.37</b>        | No Requiere   |
|                     | Apoyo Eje 6'    | 10        | 25          | 0.71                  | <b>0.56</b>        | CFRP          |
|                     | Tramo derecho   | 10        | 25          | 0.71                  | <b>0.22</b>        | No Requiere   |

Fuente: Elaboración propia



Tabla N° 25: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 01

| Viga                | Referencia   | Base (cm) | Altura (cm) | Vu (Ton) | V Aplicado (Ton) | Observacion | Long de Ensanche (m) |
|---------------------|--------------|-----------|-------------|----------|------------------|-------------|----------------------|
| VIGUETA 1 INCLINADO | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.23</b>      | Ok          |                      |
|                     | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.86</b>      | Ensanche    | 0.80                 |
|                     | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.56</b>      | Ensanche    | 0.35                 |
|                     | APOYO 6' - I | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.13</b>      | Ok          |                      |
|                     | APOYO 6' - D | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.92</b>      | Ok          |                      |
|                     | APOYO 6 - I  | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.5</b>       | Ok          |                      |

Fuente: Elaboración propia

La longitud del ensanche ampliaría el tiempo de ejecución del reforzamiento por lo cual se planteó la colocación de una Viga de Acero Estructural W12x45.

Se realizó la redistribución de momentos y cortantes sobre las viguetas. (Ver tabla N°26 y N° 27)

Tabla N° 26: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 01 - VA

| Elemento                             | Descripción   | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm2) | M Aplicado (Ton-m) | Reforzamiento |
|--------------------------------------|---------------|-----------|-------------|----------|--------------------|---------------|
| VIGUETA 1 CON PERFIL DE ACERO W12X45 | tramo izq. VA | 10        | 25          | 1.52     | <b>0.32</b>        | No Requiere   |
|                                      | Apoyo VA      | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.26</b>        | No Requiere   |
|                                      | tramo der. VA | 10        | 25          | 1.52     | <b>0.15</b>        | No Requiere   |
|                                      | Apoyo Eje 7   | 10        | 25          | 1.98     | <b>0.72</b>        | No Requiere   |
|                                      | tramo central | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.59</b>        | CFRP          |
|                                      | Apoyo Eje 6'  | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.78</b>        | CFRP          |
|                                      | Tramo derecho | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.16</b>        | No Requiere   |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 27: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 01 -VA

| Viga                        | Referencia    | Base (cm) | Altura (cm) | Vu (Ton) | V Aplicado (Ton) | Observación |
|-----------------------------|---------------|-----------|-------------|----------|------------------|-------------|
| VIGUETA 1 CON PERFIL W12X45 | APOYO 8 D     | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.66</b>      | Ok          |
|                             | APOYO VIGA IZ | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.89</b>      | Ok          |
|                             | APOYO VIGA D  | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.58</b>      | Ok          |
|                             | APOYO 7 I     | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.97</b>      | Ok          |
|                             | APOYO 7 D     | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.28</b>      | Ok          |
|                             | APOYO 6' - I  | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.29</b>      | Ok          |
|                             | APOYO 6' - D  | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.05</b>      | Ok          |
|                             | APOYO 6 - I   | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.41</b>      | Ok          |

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.1 Análisis de reforzamiento positivo VG01 (Tramo central)

Se muestra el procedimiento aplicado para la vigueta VG01-  
Tramo control en las siguientes hojas de Excel.

#### PROPIEDADES DE LA SECCIÓN

|           |                            |   |                          |
|-----------|----------------------------|---|--------------------------|
| b         | 10.00 cm                   | = | 100 mm                   |
| h         | 25.00 cm                   | = | 250 mm                   |
| As        | 0.71 cm <sup>2</sup>       | = | 71 mm <sup>2</sup>       |
| A's       | 0.00 cm <sup>2</sup>       | = | 0 mm <sup>2</sup>        |
| φ long    | 0.00 cm                    | = | 0 mm                     |
| φ estribo | 0.95 cm                    | = | 9.5 mm                   |
| Rec       | 4.00 cm                    | = | 40 mm                    |
| εcu       | 0.0030                     | = | 0.0030                   |
| es        | 0.0021                     | = | 0.0021                   |
| f'c       | 210.00 kg/cm <sup>2</sup>  | = | 20.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| fy        | 4221.60 kg/cm <sup>2</sup> | = | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
| Mom. (cm) | 0.22 tn-m                  | = | 2.19 kN-m                |
| Mom. (cv) | 0.17 tn-m                  | = | 1.69 kN-m                |

#### PROPIEDADES DEL FRP

|          |                             |  |
|----------|-----------------------------|--|
| f*fu     | 2900.00 N/mm <sup>2</sup>   | Esfuerzo de tensión ultima             |
| εf*u     | 0.012                       | Deformacion de ruptura                 |
| tf       | 1.40 mm                     | Espesor                                |
| Ef       | 210000.00 N/mm <sup>2</sup> | Modulo de elasticidad de la lamina FRP |
| C        | 0.95                        |  |
| Nº capas | 1.00 capas                  | Numero de capas de FRP                 |
| bfibra   | 90.00 mm                    | Ancho de cada capa                     |

|     |                             |   |
|-----|-----------------------------|---|
| d   | 200.50 mm                   |   |
| d'  | 40.00 mm                    |   |
| Es  | 197141.68 N/mm <sup>2</sup> |   |
| n   | 9.24                        |   |
| r   | 0.00                        | $kd = \left[ \sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B :$                           |
| B   | 0.1524                      |   |
| kd  | 45.15                       |   |
| k   | 0.2252                      | $I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d')^2$ |
| Icr | 18905653.31 mm <sup>4</sup> |   |
| ps  | 0.00354                     | Cuantia de refuerzo de la cara a analizar   |
| pf  | 0.00628                     | Cuantia de refuerzo de la fibra FRP   |

#### Paso 1

Calculo de las propiedades del FRP

|     |                           |
|-----|---------------------------|
| ffu | 2755.00 N/mm <sup>2</sup> |
| εfu | 0.0114                    |

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

## Paso 2

Calculos preliminares

### Propiedades del concreto

$$\beta_1 = 0.80$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$$

$$E_c = 21328.87 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Modulo de elasticidad del concreto}$$

### Propiedades del acero existente

$$A_s = 71.00 \text{ mm}^2$$

### Propiedades de la fibra FRP

$$A_f = 126.00 \text{ mm}^2$$

## Paso 3

se calcula el estado actual de la cepa suponiendo que la viga está agrietada y las único cargas

Calculo de  $\varepsilon_{bi}$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000938$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c}$$

## Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.00343 < 0.0103 \quad \Rightarrow \text{OK}$$

## Paso 5

Estimar c, la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de c es  $0.20 \cdot d$ . El valor final se

$$c = 87.54 \text{ cm}$$

## Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión

$$\varepsilon_{fe} = 0.00463 > 0.00343$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.00343$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_c = 0.0024$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$$

## Paso 7

Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de

$$\varepsilon_s = 0.0027$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

### Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes

|    |        |   |        |                                    |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|
| fs | 532.66 | > | 414.00 | $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|

|    |              |
|----|--------------|
| fs | 414.00 N/mm2 |
|----|--------------|

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

|     |              |
|-----|--------------|
| ffe | 720.61 N/mm2 |
|-----|--------------|

### Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se

|           |      |  |
|-----------|------|--|
| $\beta_1$ | 0.75 | $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$ |
|-----------|------|--|

|            |      |  |
|------------|------|--|
| $\alpha_1$ | 0.89 | $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$ |
|------------|------|--|

### Paso 10

Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido

|   |       |
|---|-------|
| C | 87.54 |
|---|-------|

|           |       |
|-----------|-------|
| C asumido | 87.54 |
|-----------|-------|

|            |      |
|------------|------|
| Diferencia | 0.00 |
|------------|------|

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

### Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\Psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

|     |           |   |
|-----|-----------|---|
| Mns | 4.56 kN-m | $M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|-----------|---|

Contribución del FRP a la flexión

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mnf | 19.72 kN-m | $M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|--|

### Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

|            |            |
|------------|------------|
| $\phi M_n$ | 19.19 kN-m |
|------------|------------|

|       |            |
|-------|------------|
| Mact. | 11.54 kN-m |
|-------|------------|

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}]$$

|            |       |   |       |        |
|------------|-------|---|-------|--------|
| $\phi M_n$ | 19.19 | > | 11.54 | ==> OK |
|------------|-------|---|-------|--------|

### Paso 13

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)$$

$$\begin{aligned} k &= 0.40 \\ kd &= 76.06 \text{ cm} \end{aligned}$$

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite

$$f_{s,s} = 216.56 \quad f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} = 216.56 < 331.20 \quad \Rightarrow \text{OK}$$

### Paso 14

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio

$$f_{f,s} = 161.48 \quad f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} = 0.55 f_{fu}$$

$$f_{f,s} = 161.48 < 1515.25 \quad \Rightarrow \text{OK}$$

### 6.2.1.2 Análisis de reforzamiento positivo VG01 (Apoyo Eje 6)

Se muestra el procedimiento aplicado para la vigueta VG01-  
Apoyo eje 6 en las siguientes hojas de Excel.

#### PROPIEDADES DE LA SECCIÓN

|                 |                            |   |                          |
|-----------------|----------------------------|---|--------------------------|
| b               | 10.00 cm                   | = | 100 mm                   |
| h               | 25.00 cm                   | = | 250 mm                   |
| As              | 0.71 cm <sup>2</sup>       | = | 71 mm <sup>2</sup>       |
| A's             | 0.00 cm <sup>2</sup>       | = | 0 mm <sup>2</sup>        |
| φ long          | 0.00 cm                    | = | 0 mm                     |
| φ estribo       | 0.95 cm                    | = | 9.5 mm                   |
| Rec             | 4.00 cm                    | = | 40 mm                    |
| ε <sub>cu</sub> | 0.0030                     | = | 0.0030                   |
| es              | 0.0021                     | = | 0.0021                   |
| f'c             | 210.00 kg/cm <sup>2</sup>  | = | 20.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| f <sub>y</sub>  | 4221.60 kg/cm <sup>2</sup> | = | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
| Mom. (cm)       | 0.32 tn-m                  | = | 3.19 kN-m                |
| Mom. (cv)       | 0.19 tn-m                  | = | 1.89 kN-m                |

#### PROPIEDADES DEL FRP

|                      |                             |  |
|----------------------|-----------------------------|--|
| f*fu                 | 2900.00 N/mm <sup>2</sup>   | Esfuerzo de tensión ultima             |
| ε <sub>f</sub> *u    | 0.012                       | Deformacion de ruptura                 |
| t <sub>f</sub>       | 1.40 mm                     | Espesor                                |
| E <sub>f</sub>       | 210000.00 N/mm <sup>2</sup> | Modulo de elasticidad de la lamina FRP |
| C                    | 0.95                        |  |
| N <sup>o</sup> capas | 1.00 capas                  | Numero de capas de FRP                 |
| b <sub>fibra</sub>   | 90.00 mm                    | Ancho de cada capa                     |

|                 |                             |  |
|-----------------|-----------------------------|--|
| d               | 200.50 mm                   |  |
| d'              | 40.00 mm                    |  |
| E <sub>s</sub>  | 197141.68 N/mm <sup>2</sup> |  |
| n               | 9.24                        |  |
| r               | 0.00                        | $kd = \left[ \sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B :$                          |
| B               | 0.1524                      |  |
| kd              | 45.15                       |  |
| k               | 0.2252                      | $I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d)^2$ |
| I <sub>cr</sub> | 18905653.31 mm <sup>4</sup> |  |
| ρ <sub>s</sub>  | 0.00354                     | Cuantia de refuerzo de la cara a analizar  |
| ρ <sub>f</sub>  | 0.00628                     | Cuantia de refuerzo de la fibra FRP  |

#### Paso 1

Calculo de las propiedades del FRP

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| ff <sub>u</sub> | 2755.00 N/mm <sup>2</sup> |
| ε <sub>fu</sub> | 0.0114                    |

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

## Paso 2

Calculos preliminares

### Propiedades del concreto

$\beta_1$  0.80

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$$

$E_c$  21328.87 N/mm<sup>2</sup> Modulo de elasticidad del concreto

### Propiedades del acero existente

$A_s$  71.00 mm<sup>2</sup>

### Propiedades de la fibra FRP

$A_f$  126.00 mm<sup>2</sup>

## Paso 3

se calcula el estado actual de la cepa suponiendo que la viga está agrietada y las únicas cargas que

Calculo de  $\varepsilon_{bi}$

$\varepsilon_{bi}$  0.001619

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c}$$

## Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

$\varepsilon_{fd}$  0.00343 < 0.0103 ==> OK

## Paso 5

Estimar  $c$ , la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de  $c$  es  $0.20 \cdot d$ . El valor final se ajusta

$C$  87.54 cm

## Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión

$\varepsilon_{fe}$  0.00395 > 0.00343

$\varepsilon_{fe}$  0.00343

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$\varepsilon_c$  0.0027

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$$

## Paso 7

Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de triángulos

$\varepsilon_s$  0.0035

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

### Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes

|    |        |   |        |                                    |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|
| fs | 692.31 | > | 414.00 | $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|

|    |                          |
|----|--------------------------|
| fs | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
|----|--------------------------|

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| ffe | 720.61 N/mm <sup>2</sup> |
|-----|--------------------------|

### Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se verifica

|           |      |  |
|-----------|------|--|
| $\beta_1$ | 0.75 | $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$ |
|-----------|------|--|

|            |      |  |
|------------|------|--|
| $\alpha_1$ | 0.89 | $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$ |
|------------|------|--|

### Paso 10

Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido

|   |       |
|---|-------|
| C | 87.54 |
|---|-------|

|           |       |
|-----------|-------|
| C asumido | 87.54 |
|-----------|-------|

|            |      |
|------------|------|
| Diferencia | 0.00 |
|------------|------|

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

### Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\Psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

|     |           |   |
|-----|-----------|---|
| Mns | 4.93 kN-m | $M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|-----------|---|

Contribución del FRP a la flexión

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mnf | 19.72 kN-m | $M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|--|

### Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

|            |            |
|------------|------------|
| $\phi M_n$ | 19.52 kN-m |
|------------|------------|

|       |           |
|-------|-----------|
| Mact. | 7.68 kN-m |
|-------|-----------|

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}]$$

|            |       |   |      |        |
|------------|-------|---|------|--------|
| $\phi M_n$ | 19.52 | > | 7.68 | ==> OK |
|------------|-------|---|------|--------|



**Paso 13**

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)}$$

$k$  0.38  
 $kd$  76.92 cm

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite recomendado

$$f_{s,s} = 269.13 \quad f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$f_{s,s}$  269.13 < 331.20 ==> OK

**Paso 14**

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio

$$f_{f,s} = 61.49 \quad f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} = 0.55 f_{fu}$$

$f_{f,s}$  61.49 < 1515.25 ==> OK

Se realizó el mismo análisis para la vigueta 2 ubicada entre los ejes E-F y 6 – 8, el cual también cuenta con tres paños y sobrecargas iguales. También se usó una viga de acero estructural W12x45.

6.2.2 El tramo entre los ejes 6 y 8 entre los ejes B' y C'  
 Metrado de Cargas Vigueta 04. (Ver tabla N° 28 y N° 29)

**a) Carga Muerta:**

Tabla N° 28: Carga muerta en la vigueta 04

| Carga Muerta                   |      |        |
|--------------------------------|------|--------|
| Peso de la Losa                | 0.35 | Ton/m2 |
| Peso de la vigueta (*)         | 0.00 | Ton/m2 |
| Peso de acabados + falso Suelo | 0.15 | Ton/m2 |
|                                | 0.50 | Ton/m2 |

Fuente: Elaboración propia

(\*) El peso de la vigueta es medrado internamente por el software utilizado

Peso por cada vigueta:  $0.50 \times 0.40 = 0.20$  ton/m (ver fig. N°29).

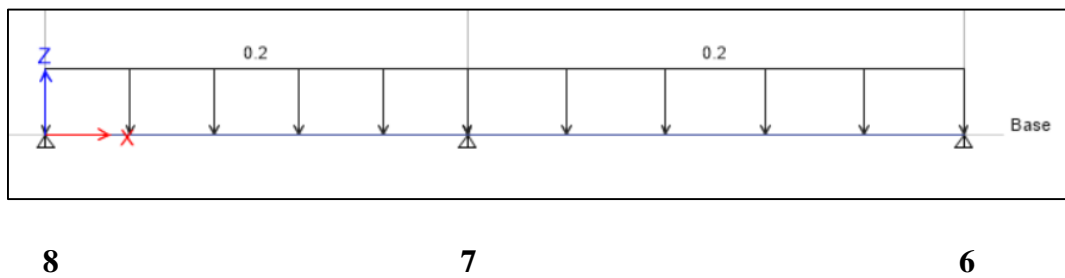


Figura N° 29: Carga muerta repartida vigueta 04 (Eje 6-8 y F-G)

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

**b) Carga Viva:**

Tabla N° 29: Carga muerta en la vigueta 04

| Carga Viva      |      |        |      |        |
|-----------------|------|--------|------|--------|
| Tramo izquierdo | 0.45 | Ton/m2 | 0.18 | Ton/ml |
| Tramo central   | 0.45 | Ton/m2 | 0.18 | Ton/ml |
| Tramo derecho   | 0.25 | Ton/m2 | 0.10 | Ton/ml |

Fuente: Elaboración propia

Con el software Etabs 2016 se realizó a cargar la vigueta 04. (Ver Figura N° 30)

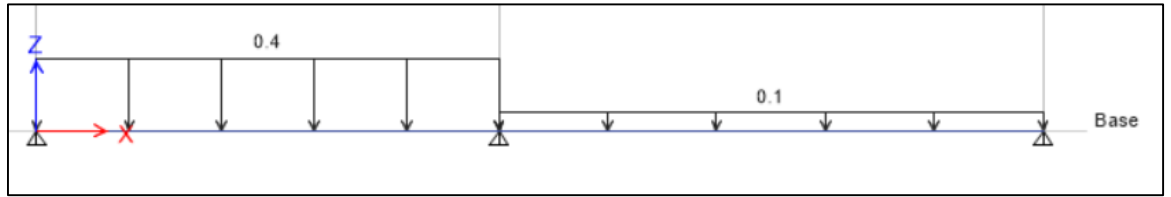


Figura N° 30: Carga viva de la vigueta 04 (Eje 6-8 y F-G)

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Hecho el análisis se tiene los siguientes resultados (Ver fig. N°31 y N°32):

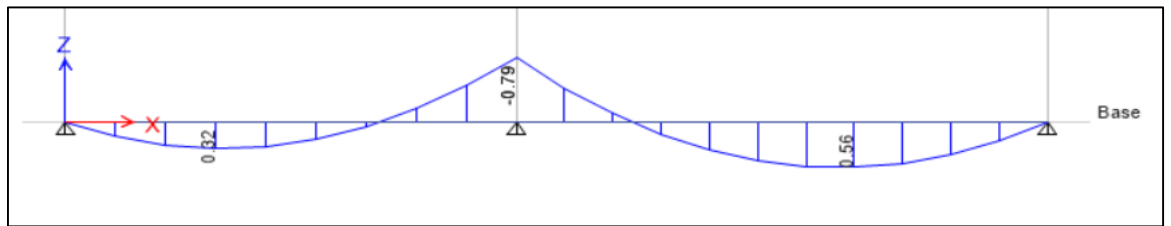


Figura N° 31: Momentos debido a la carga muerta VG 04.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

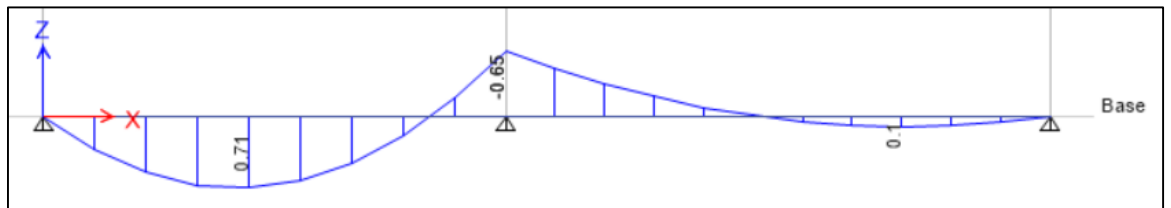


Figura N° 32: Momentos debido a la carga viva VG 04.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Se obtuvieron los siguientes resultados de Momento y cortante y se compararon el actuante y el resistente. (Ver tabla N° 30 y N° 31)

Tabla N° 30: Análisis de Momentos Flectores Vigueta 04

| Elemento  | Descripción     | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | M Aplicado (Ton-m) | Reforzamiento |
|-----------|-----------------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| VIGUETA 4 | Tramo derecho   | 10        | 25          | 1.42                  | <b>1.62</b>        | Necesita CFRP |
|           | Apoyo 7         | 10        | 25          | 1.98                  | <b>2.22</b>        | Necesita CFRP |
|           | Tramo izquierdo | 10        | 25          | 1.42                  | <b>0.93</b>        | Ok            |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 31: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 04

| Viga      | Referencia   | Base (cm) | Altura (cm) | Vu (Ton) | V Aplicado (Ton) | Observacion | Long de Ensanche (m) |
|-----------|--------------|-----------|-------------|----------|------------------|-------------|----------------------|
| VIGUETA 4 | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.86             | Ensanche    | 0.55                 |
|           | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | 2.85             | Ensanche    | 1.50                 |
|           | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.84             | Ensanche    | 0.65                 |
|           | APOYO 6´ - I | 10        | 25          | 1.30     | 1                | Ok          |                      |

Fuente: Elaboración propia

La longitud del ensanche ampliaría el tiempo de ejecución del reforzamiento por lo cual se planteó la colocación de una Viga de Acero Estructural W12x45.

Se realizó la redistribución de momentos y cortantes sobre las viguetas. (Ver tabla N° 32 y N° 33).

Tabla N° 32: Análisis de Momento Flector Vigueta 04 – VA

| Elemento   | Descripción   | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | M Aplicado (Ton-m) | Reforzamiento |
|--|---------------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| VIGUETA 4<br>CON<br>PERFIL DE<br>ACERO<br>W12X45 | Tramo izq. VA | 10        | 25          | 1.52                  | 0.51               | No Requiere   |
|  | Apoyo VA      | 10        | 25          | 0.71                  | 0.30               | No Requiere   |
|  | Tramo der. VA | 10        | 25          | 1.52                  | 0.62               | No Requiere   |
|  | Apoyo Eje 7   | 10        | 25          | 1.98                  | 1.46               | CFRP          |
|  | Tramo der.    | 10        | 25          | 1.42                  | 1.20               | CFRP          |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 33: Análisis de Esfuerzos Cortantes Vigueta 04 – VA

| Viga                              | Referencia   | Base (cm) | Altura (cm) | Vu (Ton) | V Aplicado (Ton) | Observacion | Long de Ensanche (m) |
|-----------------------------------|--------------|-----------|-------------|----------|------------------|-------------|----------------------|
| VIGUETA 4<br>CON PERFIL<br>W12X45 | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.05             | Ok          |                      |
|                                   | APOYO 8-7 I  | 10        | 25          | 1.30     | 1.28             | Ok          |                      |
|                                   | APOYO 8-7 D  | 10        | 25          | 1.30     | 0.66             | Ok          |                      |
|                                   | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | 1.7              | Ensanche    | 0.30                 |
|                                   | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.7              | Ensanche    | 0.30                 |
|                                   | APOYO 6´ - I | 10        | 25          | 1.30     | 1.2              | Ok          |                      |

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2.1 Análisis de reforzamiento negativo VG4 (Apoyo 7)

Se muestra el procedimiento aplicado para la vigueta VG04- Apoyo 7 en las siguientes hojas de Excel.

#### PROPIEDADES DE LA SECCIÓN

|                 |                                   |   |                          |
|-----------------|-----------------------------------|---|--------------------------|
| b               | <b>10.00</b> cm                   | = | 100 mm                   |
| h               | <b>25.00</b> cm                   | = | 250 mm                   |
| As              | <b>1.98</b> cm <sup>2</sup>       | = | 198 mm <sup>2</sup>      |
| A's             | <b>0.00</b> cm <sup>2</sup>       | = | 0 mm <sup>2</sup>        |
| φ long          | <b>0.00</b> cm                    | = | 0 mm                     |
| φ estribo       | <b>0.00</b> cm                    | = | 0 mm                     |
| Rec             | <b>4.00</b> cm                    | = | 40 mm                    |
| ε <sub>cu</sub> | <b>0.0030</b>                     | = | 0.0030                   |
| es              | <b>0.0021</b>                     | = | 0.0021                   |
| f'c             | <b>210.00</b> kg/cm <sup>2</sup>  | = | 20.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| f <sub>y</sub>  | <b>4221.60</b> kg/cm <sup>2</sup> | = | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
| Mom. (cm)       | <b>0.69</b> tn-m                  | = | 6.87 kN-m                |
| Mom. (cv)       | <b>0.29</b> tn-m                  | = | 2.89 kN-m                |

#### PROPIEDADES DEL FRP

|                    |                                    |  |
|--------------------|------------------------------------|--|
| f*fu               | <b>2900.00</b> N/mm <sup>2</sup>   | Esfuerzo de tensión ultima             |
| ε <sub>f</sub> *u  | <b>0.012</b>                       | Deformacion de ruptura                 |
| t <sub>f</sub>     | <b>1.40</b> mm                     | Espesor                                |
| E <sub>f</sub>     | <b>210000.00</b> N/mm <sup>2</sup> | Modulo de elasticidad de la lamina FRP |
| C                  | <b>0.95</b>                        |  |
| Nº capas           | <b>1.00</b> capas                  | Numero de capas de FRP                 |
| b <sub>fibra</sub> | <b>90.00</b> mm                    | Ancho de cada capa                     |

|                 |                             |   |
|-----------------|-----------------------------|---|
| d               | 210.00 mm                   |   |
| d'              | 40.00 mm                    |   |
| E <sub>s</sub>  | 197141.68 N/mm <sup>2</sup> |   |
| n               | 9.24                        |   |
| r               | 0.00                        | $kd = \left[ \sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B :$                           |
| B               | 0.0546                      |   |
| kd              | 71.26                       |   |
| k               | 0.3393                      | $I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d')^2$ |
| I <sub>cr</sub> | 47289199.54 mm <sup>4</sup> |   |
| ρ <sub>s</sub>  | 0.00943                     | Cuantía de refuerzo de la cara a analizar   |
| ρ <sub>f</sub>  | 0.00600                     | Cuantía de refuerzo de la fibra FRP   |

#### Paso 1

Calculo de las propiedades del FRP

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| ff <sub>u</sub> | 2755.00 N/mm <sup>2</sup> |
| ε <sub>fu</sub> | 0.0114                    |

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

## Paso 2

Calculos preliminares

### Propiedades del concreto

$\beta_1$  0.80

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$$

$E_c$  21328.87 N/mm<sup>2</sup> Modulo de elasticidad del concreto

### Propiedades del acero existente

$A_s$  198.00 mm<sup>2</sup>

### Propiedades de la fibra FRP

$A_f$  126.00 mm<sup>2</sup>

## Paso 3

se calcula el estado actual de la cepa suponiendo que la viga está agrietada y las único cargas que

Calculo de  $\varepsilon_{bi}$

$\varepsilon_{bi}$  0.001218

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c}$$

## Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

$\varepsilon_{fd}$  0.00343 < 0.0103 ==> OK

## Paso 5

Estimar c, la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de c es 0'20-d. El valor final se ajusta

C 109.90 cm

## Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión

$\varepsilon_{fe}$  0.00261 < 0.00343

$\varepsilon_{fe}$  0.00261

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$\varepsilon_c$  0.0030

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$$

## Paso 7

Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de triángulos

$\varepsilon_s$  0.0027

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

### Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes

|    |        |   |        |                                    |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|
| fs | 538.69 | > | 414.00 | $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|

|    |              |
|----|--------------|
| fs | 414.00 N/mm2 |
|----|--------------|

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

|     |              |
|-----|--------------|
| ffe | 547.37 N/mm2 |
|-----|--------------|

### Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se verifica

|           |      |  |
|-----------|------|--|
| $\beta_1$ | 0.75 | $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$ |
|-----------|------|--|

|            |      |  |
|------------|------|--|
| $\alpha_1$ | 0.89 | $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$ |
|------------|------|--|

### Paso 10

Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido

|   |        |
|---|--------|
| C | 109.94 |
|---|--------|

|           |        |
|-----------|--------|
| C asumido | 109.90 |
|-----------|--------|

|            |      |
|------------|------|
| Diferencia | 0.04 |
|------------|------|

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

### Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\Psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

|     |            |   |
|-----|------------|---|
| Mns | 13.84 kN-m | $M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|---|

Contribución del FRP a la flexión

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mnf | 14.40 kN-m | $M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|--|

### Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

|            |            |
|------------|------------|
| $\phi M_n$ | 23.47 kN-m |
|------------|------------|

|       |            |
|-------|------------|
| Mact. | 14.53 kN-m |
|-------|------------|

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}]$$

|            |       |   |       |        |
|------------|-------|---|-------|--------|
| $\phi M_n$ | 23.47 | > | 14.53 | ==> OK |
|------------|-------|---|-------|--------|

### Paso 13

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)$$

$$\begin{aligned} k &= 0.43 \\ kd &= 91.08 \text{ cm} \end{aligned}$$

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite recomendado

$$f_{s,s} = 224.62 \quad f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} = 224.62 < 331.20 \quad \Rightarrow \text{OK}$$

### Paso 14

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio

$$f_{f,s} = 64.00 \quad f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} = 0.55 f_{fu}$$

$$f_{f,s} = 64.00 < 1515.25 \quad \Rightarrow \text{OK}$$



### 6.2.2.2 Análisis de reforzamiento positivo VG 04 (Tramo derecho)

Se muestra el procedimiento aplicado para la vigueta VG04-  
Tramo derecho en las siguientes hojas de Excel.

#### PROPIEDADES DE LA SECCIÓN

|                 |                            |   |                          |
|-----------------|----------------------------|---|--------------------------|
| b               | 10.00 cm                   | = | 100 mm                   |
| h               | 25.00 cm                   | = | 250 mm                   |
| As              | 1.42 cm <sup>2</sup>       | = | 142 mm <sup>2</sup>      |
| A's             | 0.00 cm <sup>2</sup>       | = | 0 mm <sup>2</sup>        |
| φ long          | 0.00 cm                    | = | 0 mm                     |
| φ estribo       | 0.00 cm                    | = | 0 mm                     |
| Rec             | 4.00 cm                    | = | 40 mm                    |
| ε <sub>cu</sub> | 0.0030                     | = | 0.0030                   |
| es              | 0.0021                     | = | 0.0021                   |
| f'c             | 210.00 kg/cm <sup>2</sup>  | = | 20.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| f <sub>y</sub>  | 4221.60 kg/cm <sup>2</sup> | = | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
| Mom. (cm)       | 0.60 tn-m                  | = | 5.98 kN-m                |
| Mom. (cv)       | 0.22 tn-m                  | = | 2.19 kN-m                |

#### PROPIEDADES DEL FRP

|                    |                             |  |
|--------------------|-----------------------------|--|
| f*fu               | 2900.00 N/mm <sup>2</sup>   | Esfuerzo de tensión ultima             |
| ε <sub>f</sub> *u  | 0.012                       | Deformacion de ruptura                 |
| t <sub>f</sub>     | 1.40 mm                     | Espesor                                |
| E <sub>f</sub>     | 210000.00 N/mm <sup>2</sup> | Modulo de elasticidad de la lamina FRP |
| C                  | 0.95                        |  |
| Nº capas           | 1.00 capas                  | Numero de capas de FRP                 |
| b <sub>fibra</sub> | 90.00 mm                    | Ancho de cada capa                     |

|                 |                             |   |
|-----------------|-----------------------------|---|
| d               | 210.00 mm                   |   |
| d'              | 40.00 mm                    |   |
| E <sub>s</sub>  | 197141.68 N/mm <sup>2</sup> |   |
| n               | 9.24                        |   |
| r               | 0.00                        | $kd = \left[ \sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B$                             |
| B               | 0.0762                      |   |
| kd              | 62.27                       |   |
| k               | 0.2965                      | $I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d')^2$ |
| I <sub>cr</sub> | 36692684.94 mm <sup>4</sup> |   |
| ρ <sub>s</sub>  | 0.00676                     | Cuantía de refuerzo de la cara a analizar   |
| ρ <sub>f</sub>  | 0.00600                     | Cuantía de refuerzo de la fibra FRP   |

#### Paso 1

Calculo de las propiedades del FRP

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| ffu             | 2755.00 N/mm <sup>2</sup> |
| ε <sub>fu</sub> | 0.0114                    |

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

## Paso 2

Calculos preliminares

### Propiedades del concreto

$\beta_1$  0.80

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$$

$E_c$  21328.87 N/mm<sup>2</sup> Modulo de elasticidad del concreto

### Propiedades del acero existente

$A_s$  142.00 mm<sup>2</sup>

### Propiedades de la fibra FRP

$A_f$  126.00 mm<sup>2</sup>

## Paso 3

se calcula el estado actual de la cepa suponiendo que la viga está agrietada y las único cargas que

Calculo de  $\varepsilon_{bi}$

$\varepsilon_{bi}$  0.001433

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c}$$

## Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de comparar:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

$\varepsilon_{fd}$  0.00343 < 0.0103 ==> OK

## Paso 5

Estimar  $c$ , la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de  $c$  es 0'20-d. El valor final se ajusta

$C$  100.79 cm

## Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión

$\varepsilon_{fe}$  0.00301 < 0.00343

$\varepsilon_{fe}$  0.00301

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$\varepsilon_c$  0.0030

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$$

## Paso 7

Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de triángulos

$\varepsilon_s$  0.0033

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

### Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes

|    |        |   |        |                                    |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|
| fs | 640.83 | > | 414.00 | $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ |
|----|--------|---|--------|------------------------------------|

|    |              |
|----|--------------|
| fs | 414.00 N/mm2 |
|----|--------------|

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

|     |              |
|-----|--------------|
| ffe | 631.62 N/mm2 |
|-----|--------------|

### Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se verifica

|           |      |  |
|-----------|------|--|
| $\beta_1$ | 0.75 | $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$ |
|-----------|------|--|

|            |      |  |
|------------|------|--|
| $\alpha_1$ | 0.89 | $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$ |
|------------|------|--|

### Paso 10

Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido

|   |        |
|---|--------|
| C | 100.79 |
|---|--------|

|           |        |
|-----------|--------|
| C asumido | 100.79 |
|-----------|--------|

|            |      |
|------------|------|
| Diferencia | 0.00 |
|------------|------|

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

### Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\Psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

|     |            |   |
|-----|------------|---|
| Mns | 10.12 kN-m | $M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|---|

Contribución del FRP a la flexión

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mnf | 16.89 kN-m | $M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|--|

### Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

|            |            |
|------------|------------|
| $\phi M_n$ | 22.03 kN-m |
|------------|------------|

|       |            |
|-------|------------|
| Mact. | 12.09 kN-m |
|-------|------------|

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}]$$

|            |       |   |       |        |
|------------|-------|---|-------|--------|
| $\phi M_n$ | 22.03 | > | 12.09 | ==> OK |
|------------|-------|---|-------|--------|

**Paso 13**

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)$$

$k$  0.41  
 $kd$  85.68 cm

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite recomendado

$$f_{s,s} = 254.68 \quad f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$f_{s,s}$  254.68 < 331.20 ==> OK

**Paso 14**

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio

$$f_{f,s} = 57.54 \quad f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} = 0.55 f_{fu}$$

$f_{f,s}$  57.54 < 1515.25 ==> OK

Se realizó el mismo análisis para la vigueta 2 ubicada entre los ejes E-F y 6 – 8, el cual también cuenta con tres paños y sobrecargas iguales. También se usó una viga de acero estructural W12x45.

### 6.3 Análisis del reforzamiento de la losa sólida

#### 6.3.1 Diseño de la losa entre los ejes 6-8 y A-B´

Esta losa es sólida de 20 cm. de espesor y el acero distribuido es de malla de 3/8” @0.20 inferior, el acero superior en los apoyos de 2 varillas 3/8” @ 0.20. (Ver fig. N°33 y N°34).

Las cargas muertas aplicadas a la losa se muestran en la tabla N° 34.

#### a) Carga Muerta

Tabla N° 34: Carga muerta en la losa

| Carga Muerta     |      |        |
|------------------|------|--------|
| Peso de la Losa  | 0.48 | Ton/m2 |
| Peso Falso piso  | 0.10 | Ton/m2 |
| Peso Piso Tramex | 0.10 | Ton/m2 |
|                  | 0.68 | Ton/m2 |

Fuente: Elaboración Propia

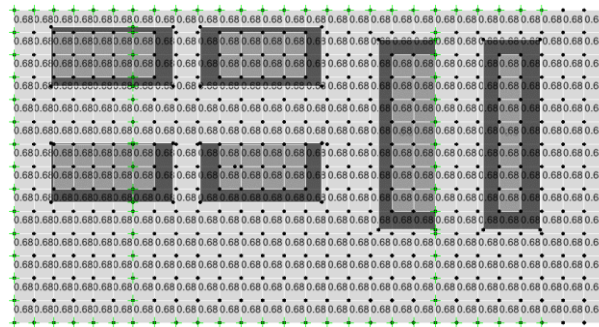


Figura N° 33: Ilustración de las cargas muertas en la losa

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

#### b) Carga Viva

Carga viva aplicada es de 0.25 Tn/m2

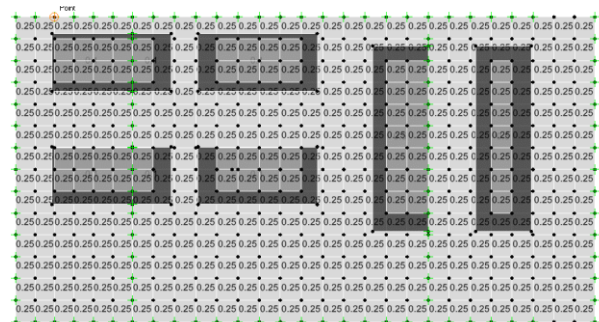


Figura N° 34: Ilustración de las cargas vivas en la losa.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Hecho el análisis se tienen los siguientes resultados para una franja de 1m de longitud, este resultado corresponde a un sentido de la losa (ver fig. N°35 y N°36).

### 6.3.1.1 Sentido X-X (Tramo 6-7)

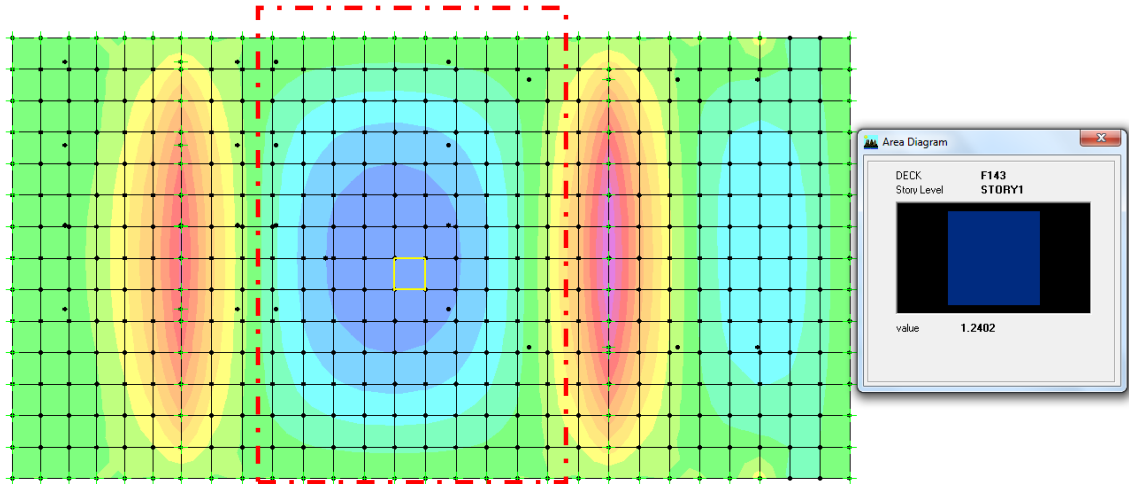


Figura N° 35: Momento debido a carga muerta losa

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

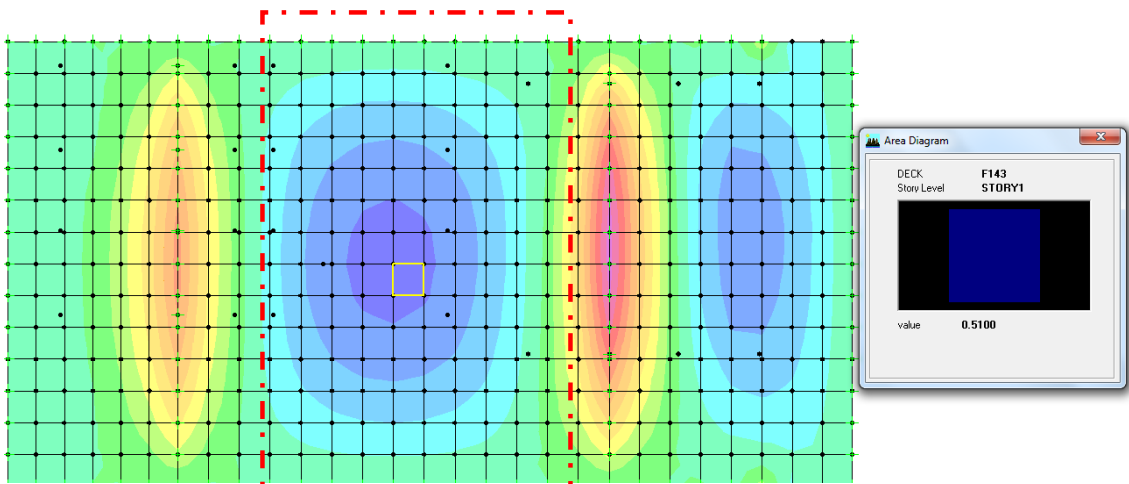


Figura N° 36: Momento debido a carga viva losa.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

### 6.3.1.1.1 Análisis del reforzamiento Losa (Tramo Inferior)

Se muestra el procedimiento aplicado para la losa tramo inferior en las siguientes hojas de Excel.

#### Propiedades de la seccion

|           |                                   |   |                          |
|-----------|-----------------------------------|---|--------------------------|
| b         | <b>100.00</b> cm                  | = | 1000 mm                  |
| h         | <b>20.00</b> cm                   | = | 200 mm                   |
| As        | <b>3.55</b> cm <sup>2</sup>       | = | 355 mm <sup>2</sup>      |
| A's       | <b>0.00</b> cm <sup>2</sup>       | = | 0 mm <sup>2</sup>        |
| φ long    | <b>0.95</b> cm                    | = | 9.5 mm                   |
| φ estribo | <b>0.01</b> cm                    | = | 0.1 mm                   |
| Rec       | <b>2.50</b> cm                    | = | 25 mm                    |
| εcu       | <b>0.0030</b>                     | = | 0.0030                   |
| es        | <b>0.0021</b>                     | = | 0.0021                   |
| f'c       | <b>210.00</b> kg/cm <sup>2</sup>  | = | 20.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| fy        | <b>4221.60</b> kg/cm <sup>2</sup> | = | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |
| Mom. (cm) | <b>1.24</b> tn-m                  | = | 12.35 kN-m               |
| Mom. (cv) | <b>0.51</b> tn-m                  | = | 5.08 kN-m                |

#### PROPIEDADES DEL FRP

|          |                                    |  |
|----------|------------------------------------|--|
| f*fu     | <b>2900.00</b> N/mm <sup>2</sup>   | Esfuerzo de tensión ultima             |
| εf*u     | <b>0.012</b>                       | Deformacion de ruptura                 |
| tf       | <b>1.40</b> mm                     | Espesor                                |
| Ef       | <b>210000.00</b> N/mm <sup>2</sup> | Modulo de elasticidad de la lamina FRP |
| C        | <b>0.95</b>                        |  |
| Nº capas | <b>2.00</b> capas                  | Numero de capas de FRP                 |
| bfibra   | <b>90.00</b> mm                    | Ancho de cada capa                     |

|     |                             |
|-----|-----------------------------|
| d   | 170.15 mm                   |
| d'  | 29.75 mm                    |
| Es  | 197141.68 N/mm <sup>2</sup> |
| n   | 9.24                        |
| r   | 0.00                        |
| B   | 0.3048                      |
| kd  | 30.30                       |
| k   | 0.1780                      |
| Icr | 73447418.00 mm <sup>4</sup> |
| ρs  | 0.00209                     |
| ρf  | 0.00148                     |

$$kd = \left[ \sqrt{2 \cdot b \cdot B \cdot (1 + r \cdot d'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right] / B :$$

$$I_{cr} = b \cdot (k \cdot d)^3 / 3 + n \cdot A_{s1} \cdot (d - k \cdot d)^2 + (n - 1) \cdot A_{s2} \cdot (k \cdot d - d')^2$$

Cuantía de refuerzo de la cara a analizar

Cuantía de refuerzo de la fibra FRP

### Paso 1

Calculo de las propiedades del FRP

ffu 2755.00 N/mm<sup>2</sup>  
εfu 0.0114

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$
$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

### Paso 2

Calculos preliminares

**Propiedades del concreto**

β1 0.80

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$$

Ec 21328.87 N/mm<sup>2</sup> Modulo de elasticidad del concreto

**Propiedades del acero existente**

As 355.00 mm<sup>2</sup>

**Propiedades de la fibra FRP**

Af 252.00 mm<sup>2</sup>

### Paso 3

se calcula el estado actual de la cepa suponiendo que la viga está agrietada y las único cargas

Calculo de εbi

εbi 0.001338

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr} E_c}$$

### Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión se calcula en función del valor resultante de

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu}$$

εfd 0.00243 < 0.0103 ==> OK

### Paso 5

Estimar c, la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de c es 0'20·d. El valor final se

C 20.06 cm



### Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente

|                 |         |   |         |   |
|-----------------|---------|---|---------|---|
| $\epsilon_{fe}$ | 0.02558 | > | 0.00243 |   |
| $\epsilon_{fe}$ | 0.00243 |   |         | $\epsilon_{fe} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$ |
| $\epsilon_c$    | 0.0004  |   |         | $\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$             |

### Paso 7

Calcular la deformación en el armado existente. Puede calcularse utilizando la semejanza de

|              |        |  |  |   |
|--------------|--------|--|--|---|
| $\epsilon_s$ | 0.0031 |  |  | $\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$ |
|--------------|--------|--|--|---|

### Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las

|          |                          |   |        |                                 |
|----------|--------------------------|---|--------|---------------------------------|
| $f_s$    | 619.00                   | > | 414.00 | $f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$ |
| $f_s$    | 414.00 N/mm <sup>2</sup> |   |        |                                 |
|          |                          |   |        | $f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$    |
| $f_{fe}$ | 509.55 N/mm <sup>2</sup> |   |        |                                 |

### Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de fuerzas se

|            |      |  |  |  |
|------------|------|--|--|--|
| $\beta_1$  | 0.75 |  |  | $\beta_1 = \frac{4\epsilon'_c - \epsilon_c}{6\epsilon'_c - 2\epsilon_c}$           |
| $\alpha_1$ | 0.89 |  |  | $\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \epsilon_c'^2}$ |

### Paso 10

Verificación de "C", el "C" calculado debe ser igual al "C" asumido

|            |       |  |  |  |
|------------|-------|--|--|--|
| C          | 20.06 |  |  |  |
| Casumido   | 20.06 |  |  | $c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$ |
| Diferencia | 0.00  |  |  |  |

### Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional  $\Psi_f = 0.85$  a la contribución del CFRP.

|     |            |   |
|-----|------------|---|
| Mns | 23.90 kN-m | $M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|---|

Contribución del FRP a la flexión

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mnf | 24.72 kN-m | $M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ |
|-----|------------|--|

### Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica:

|            |            |  |       |        |
|------------|------------|--|-------|--------|
| $\phi M_n$ | 40.42 kN-m | $\phi M_n = \phi [M_{ns} + \psi_f M_{nf}]$ |       |        |
| Mact.      | 22.95 kN-m |  |       |        |
| $\phi M_n$ | 40.42      | >  | 22.95 | ==> OK |

### Paso 13

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede simplificarse para una viga rectangular sin contabilizar el refuerzo a compresión, como se indica

$$k = \sqrt{\left( \rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \right)^2 + 2 \left( \rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \left( \frac{h}{d} \right) \right) - \left( \rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \right)}$$

|    |          |
|----|----------|
| k  | 0.24     |
| kd | 40.52 cm |

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificaremos que es inferior al límite

$$f_{s,s} \quad 261.39 \quad f_{s,s} = \frac{\left[ M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left( d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left( d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left( d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} \quad 261.39 \quad < \quad 331.20 \quad ==> \text{OK}$$

#### Paso 14

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP es estado de servicio

$$f_{f,s} \quad 61.59 \quad f_{f,s} = f_{s,s} \left( \frac{E_f}{E_s} \right) \left( \frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} = 0.55 f_{fu}$$

$$f_{f,s} \quad 61.59 \quad < \quad 1515.25 \quad ==> \text{OK}$$

#### 6.3.1.2 Sentido X-X. (Tramo 7-8)

Del software Etabs 2016 se obtuvieron los momentos por acción de la carga muerta y viva. Ver figura N° 37 y N° 38

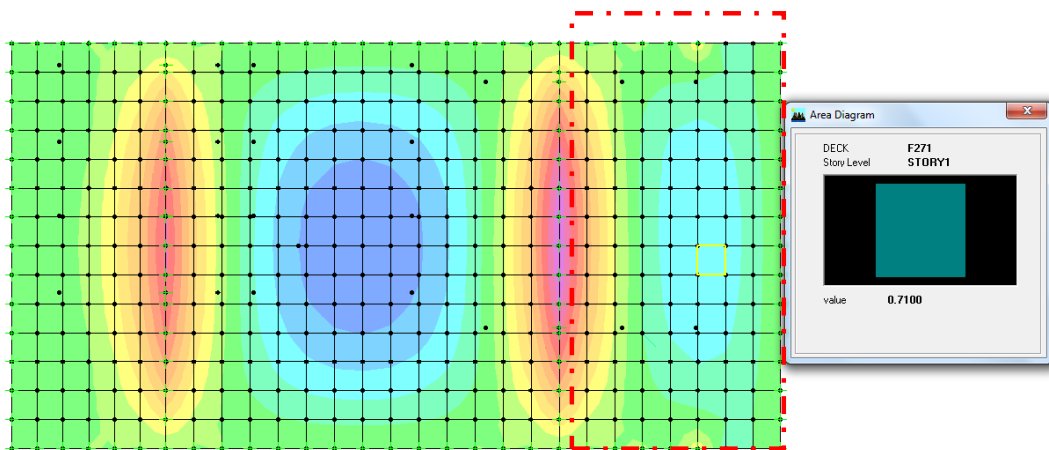


Figura N° 37: Momento debido a carga muerta.

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

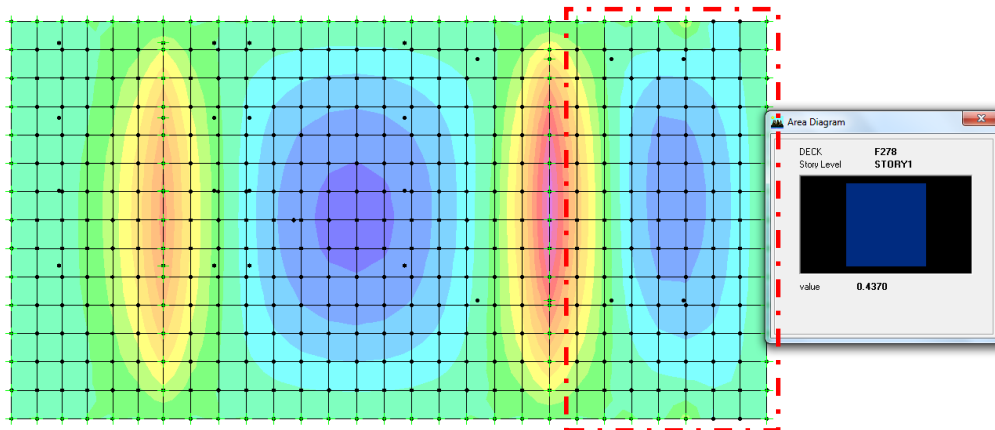


Figura N° 38: Momento debido a carga viva

Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

Se realizo la comparacion del momento resistente y actuante, dando que solo el tramo central es el que requiere reforzamiento en ambos sentidos. (Ver tabla N° 35)

Tabla N° 35: Análisis de la losa Tramo 7-8

| Elemento | Descripcion            | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | Mu (Ton-m) | M Aplicado (Ton-m) | FRP |
|----------|------------------------|-----------|-------------|-----------------------|------------|--------------------|-----|
| LOSA     | Losa Tramo derecho X-X | 100       | 20          | 3.55                  | 2.29       | <b>1.83</b>        | No  |

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4 Acero estructural como reforzamiento

En los tramos de losa aligerada donde los momentos flectores exceden el 160% de incremento por la inclusión de la CFRP se deberán incorporar vigas de acero estructural W12x45 con un  $F_y = 36$  Ksi, con el fin de que la redistribución de los momentos flectores no sobrepase lo indicado en la ACI 440.R17.

Los diagramas de momento flector y esfuerzo cortante de las vigas de acero estructuras se muestran en las figuras N° 39 y N° 40, para los tramos B-C y C-D respectivamente.

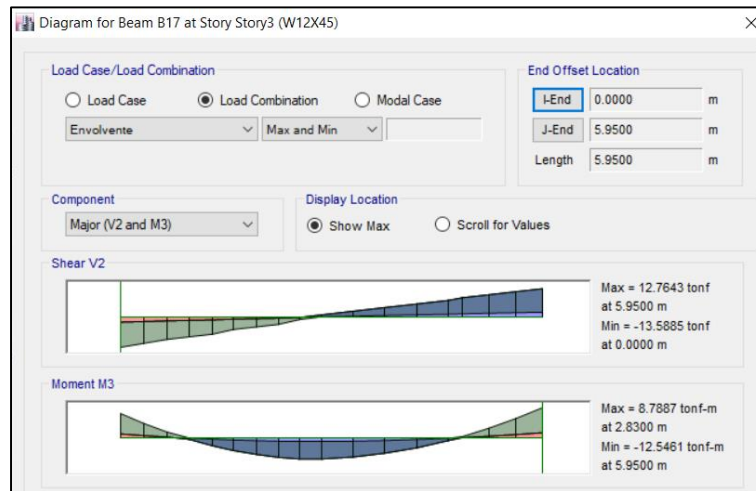


Figura N° 39: Diagrama de Momento Viga W12x45 Eje B'-C'  
 Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

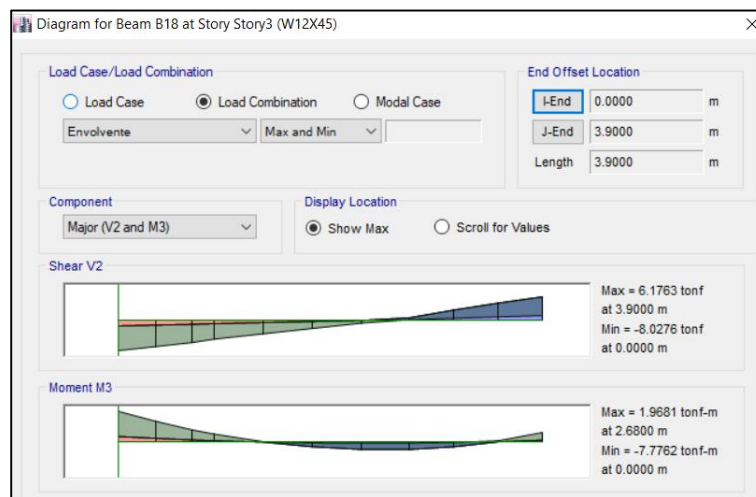


Figura N° 40: Diagrama de Momento Viga W12x45 Eje C'- D'  
 Fuente: Etabs 2016 (versión 16.2.1)

La comprobación del dimensionamiento de la viga W12x45 se realizó en base al diagrama de momento admisible. (Ver figuras N° 41 y N° 42)

### Available Moment vs. Unbraced Length

per AISC 13th Ed. Manual Tables 3-11 & 3-10

#### Inputs

Lb = 1 ft

Type W

Size W12X45

Fy = 36 ksi

Cb = 1.0

#### Results

Plastic Unbraced Length, Lp = 8.12 ft

Inelastic LTB Unbraced Length, Lr = 29.07 ft

Nominal Plastic Flexural Strength, Mp = 192.60 kip-ft

Nominal Inelastic LTB Flexural Strength, Mr = 121.17 kip-ft

Nominal Moment Strength, Mn = 192.60 kip-ft

Design Moment Strength,  $\phi M_n$  = 173.34 kip-ft

Allowable Moment Strength, Mn/ $\Omega$  = 115.33 kip-ft

Figura N° 41: Excel de diseño de Acero Estructural

Fuente: Q&A Ingenieros SAC

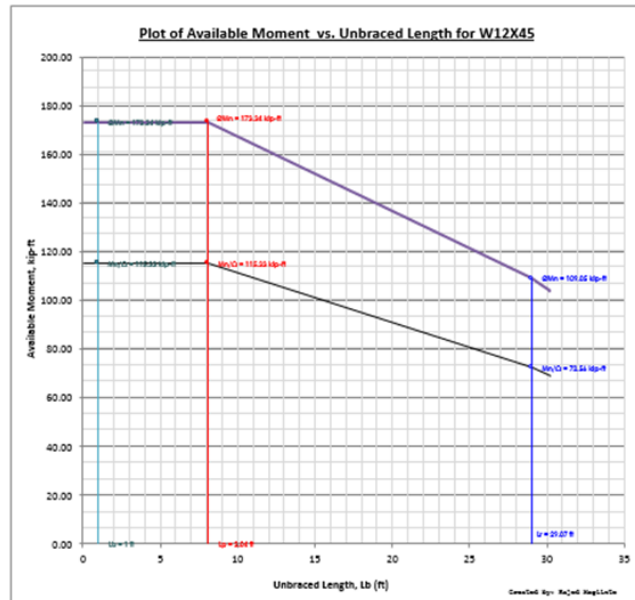


Figura N° 42: Diagrama de Momento Admisible para W12x45

Fuente: Q&A Ingenieros SAC

## CAPÍTULO VII: PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se realizó una comparación de los datos obtenidos del Capítulo VI, el incremento de las propiedades de la estructura por la aplicación de la fibra de carbono. También hacemos incidencia en el factor económico y los plazos de ejecución.

### 7.1 Momento y Esfuerzo Cortante en Vigas Principales

En nuestro caso aplicativo los cortantes aplicados fueron inferiores a los cortantes últimos por lo cual no fue necesario el usar refuerzo de fibra de carbono. (Ver tabla N° 37)

Se realizó un comparativo porcentual entre el nuevo momento resistente y el momento actuante (Ver tabla N° 36)

Tabla N° 36: Momento Flector en Viga Principal

| Elemento | Descripcion | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | Mr (Ton-m) | M Actuante (Ton-m) | FRP           | N° de Capas FRP | Nuevo Mr (Ton-m) | Porcentaje |
|----------|-------------|-----------|-------------|-----------------------|------------|--------------------|---------------|-----------------|------------------|------------|
| VIGA     | B1/S1-V5    | 30        | 65          | 10.14                 | 21.86      | 24.48              | Necesita CFRP | 1               | 25.95            | 12.0%      |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 37: Esfuerzo Cortante de Vigas Principales

| Viga                     | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm <sup>2</sup> ) | Vresist (Ton) | V Actuante (Ton) | Observacion      |
|--------------------------|-----------|-------------|-----------------------|---------------|------------------|------------------|
| B1/S1 - V1(Eje A - B')   | 30        | 65          | 13.38                 | 37.21         | 24.64            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1(Eje B' - C')  | 30        | 65          | 5.7                   | 37.21         | 9.5              | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1(Eje C' - D)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 17.1             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1(Eje D - E)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 17.9             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1(Eje E - F)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 11.86            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1A(Eje B' - C') | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 15.6             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1B(Eje C' - D)  | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 9.8              | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1B(Eje D - E)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 15.6             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V1B(Eje E - F)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 16.18            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V2(Eje A - B')   | 30        | 65          | 13.38                 | 37.21         | 19.8             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V2(Eje B' - C')  | 30        | 65          | 5.7                   | 37.21         | 18.6             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V2(Eje C' - D)   | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 9.84             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V2(Eje D - E)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 16.92            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V2(Eje E - F)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 7.84             | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V3(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 10.14                 | 37.21         | 29.30            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V3(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 10.14                 | 37.21         | 24.48            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V4(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 24.38            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V4(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 23.84            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V5(Eje 6 - 7)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 17.70            | No necesita CFRP |
| B1/S1 - V5(Eje 7 - 8)    | 30        | 65          | 7.68                  | 37.21         | 15.20            | No necesita CFRP |

Fuente: Elaboración Propia

## 7.2 Momentos y cortantes sin la incorporación de Viga de Acero

Se realizó el cálculo del refuerzo de CFRP, pero la sobrecarga de los equipos y las luces de las losas aligeradas nos dio como resultado la necesidad de ensanches de concreto, La disposición de Repsol fue que la intervención se lo más corto posible por lo cual se colocaron Vigas de Acero W12x45. (Ver tablas N° 38 y N° 39)

Tabla N° 38: Nuevos Momentos con CFRP

| Elemento            | Descripcion     | Base (cm) | Altura (cm) | As (cm2) | Mr (Ton-m)  | CFRP          | Mr con CFRP (Ton-m) | Porcentaje de Incremento de Mr |
|---------------------|-----------------|-----------|-------------|----------|-------------|---------------|---------------------|--------------------------------|
| VIGUETA 1 INCLINADA | tramo izquierdo | 10        | 25          | 1.52     | <b>1.13</b> | CFRP          | <b>1.93</b>         | 2.4%                           |
|                     | Apoyo Eje 7     | 10        | 25          | 1.98     | <b>1.44</b> | CFRP          | <b>1.93</b>         | 3.0%                           |
|                     | tramo central   | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.37</b> | No Requiere   |                     |                                |
|                     | Apoyo Eje 6´    | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.56</b> | CFRP          | <b>1.93</b>         | 3.5%                           |
|                     | tramo derecho   | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.22</b> | No Requiere   |                     |                                |
| VIGUETA 2           | tramo izquierdo | 10        | 25          | 1.52     | <b>1.35</b> | CFRP          | <b>1.93</b>         | 22.3%                          |
|                     | Apoyo Eje 7     | 10        | 25          | 1.98     | <b>1.50</b> | CFRP          | <b>1.93</b>         | 7.3%                           |
|                     | tramo central   | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.21</b> | No Requiere   |                     |                                |
|                     | Apoyo Eje 6´    | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.38</b> | No Requiere   |                     |                                |
|                     | tramo derecho   | 10        | 25          | 0.71     | <b>0.27</b> | No Requiere   |                     |                                |
| VIGUETA 3           | Tramo derecho   | 10        | 25          | 1.42     | <b>1.77</b> | Necesita CFRP | <b>2.20</b>         | 70.6%                          |
|                     | Apoyo 7         | 10        | 25          | 1.98     | <b>1.88</b> | Necesita CFRP | <b>2.11</b>         | 34.5%                          |
|                     | Tramo izquierdo | 10        | 25          | 1.42     | <b>0.29</b> | Ok            |                     |                                |
| VIGUETA 4           | Tramo derecho   | 10        | 25          | 1.42     | <b>1.62</b> | Necesita CFRP | <b>2.20</b>         | 56.1%                          |
|                     | Apoyo 7         | 10        | 25          | 1.98     | <b>2.22</b> | Necesita CFRP | <b>2.11</b>         | 58.9%                          |
|                     | Tramo izquierdo | 10        | 25          | 1.42     | <b>0.93</b> | Ok            | <b>2.42</b>         | 0.0%                           |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 39: Nuevos Cortantes con CFRP

| Viga                | Referencia   | Base (cm) | Altura (cm) | Vr (Ton) | Vr Aplicado (Ton) | Observacion | Long de Ensanche (m) |
|---------------------|--------------|-----------|-------------|----------|-------------------|-------------|----------------------|
| VIGUETA 1 INCLINADO | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.23</b>       | Ok          |                      |
|                     | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.86</b>       | Ensanche    | 0.80                 |
|                     | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.56</b>       | Ensanche    | 0.35                 |
|                     | APOYO 6´ - I | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.13</b>       | Ok          |                      |
|                     | APOYO 6´ - D | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.92</b>       | Ok          |                      |
|                     | APOYO 6 - I  | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.5</b>        | Ok          |                      |
| VIGUETA 2           | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.48</b>       | Ensanche    | 0.25                 |
|                     | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | <b>2.15</b>       | Ensanche    | 1.05                 |
|                     | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.4</b>        | Ensanche    | 0.20                 |
|                     | APOYO 6´ - I | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.82</b>       | Ok          |                      |
|                     | APOYO 6´ - D | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.84</b>       | Ok          |                      |
|                     | APOYO 6 - I  | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.55</b>       | Ok          |                      |
| VIGUETA 3           | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.93</b>       | Ensanche    | 0.65                 |
|                     | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | <b>2.77</b>       | Ensanche    | 1.45                 |
|                     | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.53</b>       | Ensanche    | 0.30                 |
|                     | APOYO 6´ - I | 10        | 25          | 1.30     | <b>0.56</b>       | Ok          |                      |
| VIGUETA 4           | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.86</b>       | Ensanche    | 0.55                 |
|                     | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | <b>2.85</b>       | Ensanche    | 1.50                 |
|                     | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | <b>1.84</b>       | Ensanche    | 0.65                 |
|                     | APOYO 6´ - I | 10        | 25          | 1.30     | <b>1</b>          | Ok          |                      |

Fuente: Elaboración Propia



### 7.3 Comparación de los Momentos Actuante vs Resistente con CFRP

Con la incorporación de las vigas de acero estructural se realizó nuevamente el comparativo de los momentos y cortantes. (Ver tabla N° 40 y N° 41)

Tabla N° 40: Nuevos Momentos con CFRP y Viga de acero

| Elemento                                      | Descripcion                        | Mr Aplicado Inicial (Ton-m) | Mr Aplicado con Equipo (Ton-m) | Porcentaje Incr. de M aplicado | Mr (Ton-m) | CFRP          | N° de Capas FRP | Mr con CFRP (Ton-m) | Porcentaje de Incremento de Mr |
|---|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|---------------|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| VIGA  | B1/S1-V5                           | 20.69                       | 24.48                          | 15.5%                          | 21.86      | CFRP          | 1               | 25.95               | 12.0%                          |
| VIGUETA 1<br>CON PERFIL<br>DE ACERO<br>W12X45 | tramo izquierdo / Viga de acero    | 0.14                        | 0.32                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Viga de acero                | 0.12                        | 0.26                           | 55.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo derecho / Viga de acero      | 0.07                        | 0.15                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Eje 7                        | 0.19                        | 0.72                           | 74.0%                          | 1.40       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo central                      | 0.27                        | 0.59                           | 55.0%                          | 0.54       | CFRP          | 1               | 1.93                | 9.0%                           |
|   | Apoyo Eje 6´                       | 0.27                        | 0.78                           | 65.0%                          | 0.54       | CFRP          | 1               | 1.93                | 44.1%                          |
|   | tramo derecho                      | 0.04                        | 0.16                           | 75.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
| VIGUETA 2<br>CON PERFIL<br>DE ACERO<br>W12X45 | tramo izquierdo / Viga de acero    | 0.16                        | 0.35                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Viga de acero                | 0.16                        | 0.36                           | 55.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo derecho / Viga de acero      | 0.01                        | 0.03                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Eje 7                        | 0.16                        | 0.60                           | 74.0%                          | 1.40       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo central                      | 0.22                        | 0.48                           | 55.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Eje 6´                       | 0.23                        | 0.65                           | 65.0%                          | 0.54       | CFRP          | 1               | 1.93                | 20.1%                          |
|   | tramo derecho                      | 0.05                        | 0.19                           | 75.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
| VIGUETA 3<br>CON PERFIL<br>DE ACERO<br>W12X45 | tramo izquierdo / Viga de acero    | 0.20                        | 0.45                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Viga de acero                | 0.21                        | 0.46                           | 55.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo derecho / Viga de acero      | 0.02                        | 0.04                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Eje 7                        | 0.21                        | 0.80                           | 74.0%                          | 1.40       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo central                      | 0.29                        | 0.65                           | 55.0%                          | 1.04       | No Requiere   |                 |                     |                                |
| VIGUETA 4<br>CON PERFIL<br>DE ACERO<br>W12X45 | tramo izquierdo / Viga de acero    | 0.23                        | 0.51                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Viga de acero                | 0.14                        | 0.30                           | 55.0%                          | 0.54       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | tramo derecho / Viga de acero      | 0.28                        | 0.62                           | 55.0%                          | 1.10       | No Requiere   |                 |                     |                                |
|   | Apoyo Eje 7                        | 0.38                        | 1.46                           | 74.0%                          | 1.40       | CFRP          | 1               | 2.11                | 4.5%                           |
|   | tramo central                      | 0.54                        | 1.20                           | 55.0%                          | 1.04       | CFRP          | 1               | 2.11                | 15.7%                          |
| LOSA  | Losa Tramo eje 6 - 7 y A - B / X-X | 2.33                        | 2.60                           | 10.5%                          | 2.29       | Necesita CFRP | 2               | 4.06                | 13.6%                          |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 41: Nuevos esfuerzos cortantes de viguetas

| Viga                                 | Referencia   | Base (cm) | Altura (cm) | Vr (Ton) | V Aplicado (Ton) | Observacion | Long de Ensanche (m) |
|--------------------------------------|--------------|-----------|-------------|----------|------------------|-------------|----------------------|
| VIGUETA 1<br>CON<br>PERFIL<br>W12X45 | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | 0.66             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 I  | 10        | 25          | 1.30     | 0.89             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 D  | 10        | 25          | 1.30     | 0.58             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | 0.97             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.28             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 6' - I | 10        | 25          | 1.30     | 1.29             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 6' - D | 10        | 25          | 1.30     | 0.05             | Ok          |                      |
| VIGUETA 2<br>CON<br>PERFIL<br>W12X45 | APOYO 6 - I  | 10        | 25          | 1.30     | 0.41             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | 0.75             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 I  | 10        | 25          | 1.30     | 1.07             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 D  | 10        | 25          | 1.30     | 0.81             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | 1.02             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.1              | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 6' - I | 10        | 25          | 1.30     | 1.12             | Ok          |                      |
| VIGUETA 3<br>CON<br>PERFIL<br>W12X45 | APOYO 6' - D | 10        | 25          | 1.30     | 0.94             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 6 - I  | 10        | 25          | 1.30     | 0.45             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | 0.97             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 I  | 10        | 25          | 1.30     | 1.27             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 D  | 10        | 25          | 1.30     | 1.09             | Ok          |                      |
| VIGUETA 4<br>CON<br>PERFIL<br>W12X45 | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | 1.35             | Ensanche    | 0.30                 |
|                                      | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.25             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 6' - I | 10        | 25          | 1.30     | 0.84             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.05             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 8-7 I  | 10        | 25          | 1.30     | 1.28             | Ok          |                      |
| VIGUETA 4<br>CON<br>PERFIL<br>W12X45 | APOYO 8-7 D  | 10        | 25          | 1.30     | 0.66             | Ok          |                      |
|                                      | APOYO 7 I    | 10        | 25          | 1.30     | 1.7              | Ensanche    | 0.30                 |
|                                      | APOYO 7 D    | 10        | 25          | 1.30     | 1.7              | Ensanche    | 0.30                 |
|                                      | APOYO 6' - I | 10        | 25          | 1.30     | 1.2              | Ok          |                      |

Fuente: Elaboración Propia

## 7.4 Cronograma de ejecución del reforzamiento

Se realizaron los cronogramas comparando el plazo de ejecución del reforzamiento con FRP y Platina de acero. (Ver figura N° 43 y N° 44)

Para más detalles ver anexo N° 7 y N° 8.

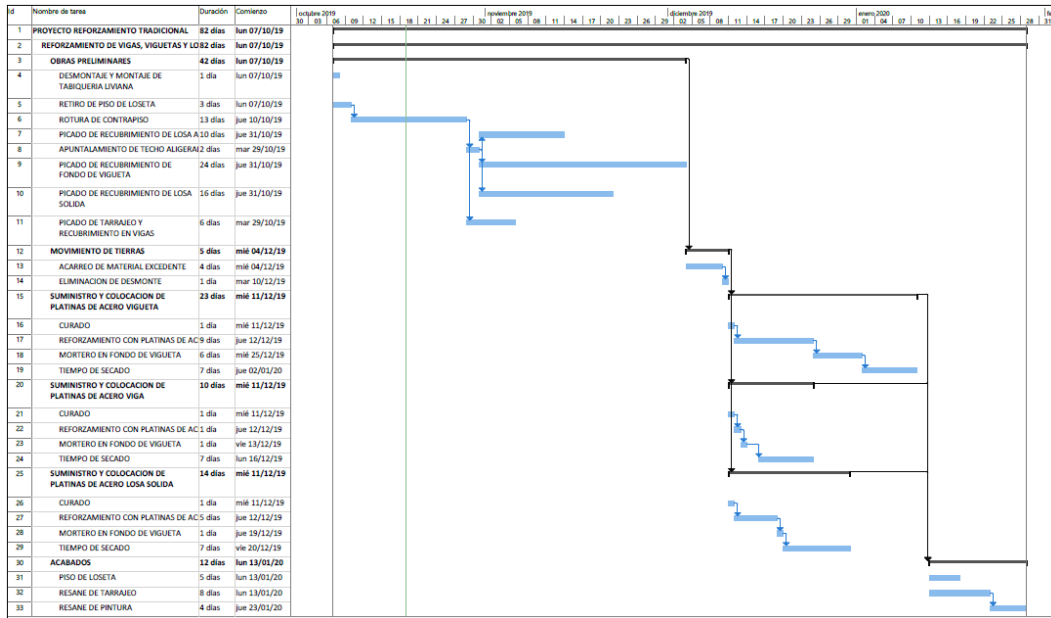


Figura N° 43: Cronograma Reforzamiento con Platina de acero

Fuente: Elaboración Propia

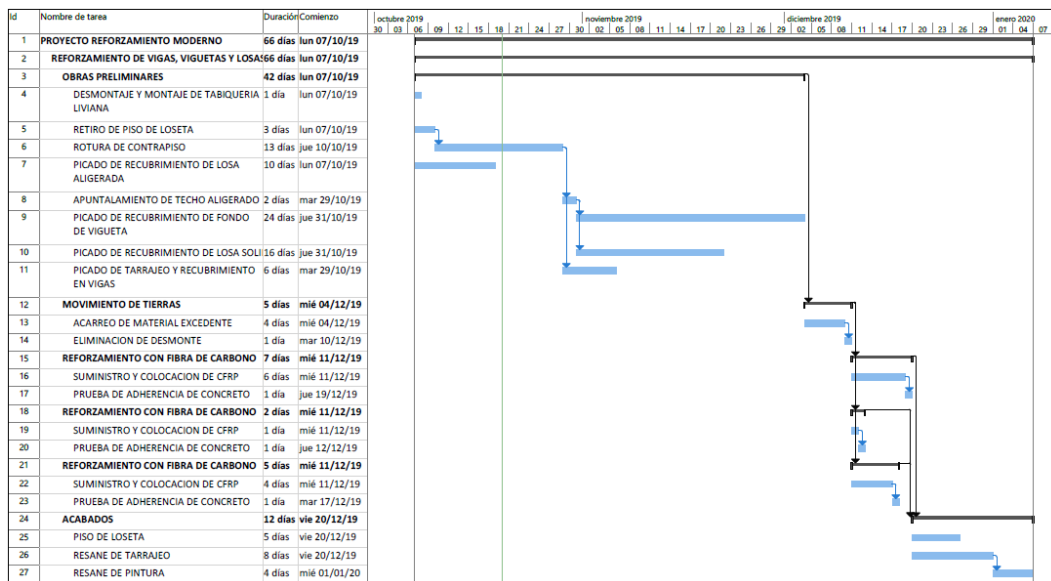


Figura N° 44: Cronograma Reforzamiento con CFRP

Fuente: Elaboración Propia

## 7.5 Comparativo del reforzamiento con CFRP y Platina Acero

Se muestra un cuadro comparativo con los lineamientos generales a tener en cuenta para el reforzamiento con CFRP y Platina de Acero. (Ver Tabla N° 42)

Tabla N° 42: Cuadro Comparativo Platina Acero vs CFRP

| <b>Descripción</b>   | <b>Reforzamiento estructural – Utilizando materiales tradicionales (Platina Acero)</b>   | <b>Reforzamiento estructural – Utilizando materiales modernos (CFRP)</b>   |
|--|--|--|
| <b>Mano de obra</b>  | Obreros especializados en reparación y reforzamiento estructural es escaso en el Perú, pero muchos tienen experiencia con materiales tradicionales. Se debe considerar tiempo de capacitación. | Obreros especializados en reparación y reforzamiento estructural es muy escaso en el Perú, no muchos conocen estos materiales modernos. Se debe considerar tiempo de capacitación. |
| <b>Disponibilidad de equipos maquinarias y herramientas necesarias</b> | En el Perú existen varias empresas que venden o alquilan los equipos necesarios para los reforzamientos de estructuras de concreto.  | En el Perú solamente existen muy pocas empresas, se deben pedir importaciones de las láminas de FRP y deben pedirse con mínimo 2 semanas de anticipación.                          |
| <b>Materiales</b>  | Cemento Portland tipo I, soldadura tenacito, mortero, Platina de acero 2"x1/4"x6m, malla de 2"x1/2".   | Láminas de fibras de carbono, Pegamento epóxico.   |
| <b>Tiempo de ejecución</b>   | Días hábiles = 82 días (Ver Anexo Cronograma Refuerzo Tradicional)   | Días hábiles = 66 días (Ver Anexo Cronograma Refuerzo Moderno)   |
| <b>Interferencia con los usuarios</b>                                  | Habrá interferencias con los usuarios, se realizarán traslados de oficinas por un espacio de aproximadamente 3 meses y medio.  | Habrá pocas interferencias con los usuarios, el edificio seguirá su servicio, trabajando fines de semana se reducirá el impacto a terceros.  |
| <b>Confiabilidad en la eficacia del método</b>                         | Estos materiales son menos eficaces en reparación y reforzamiento de estructuras de concreto armado.   | La utilización de las fibras de carbono asegura que la reparación impedirá el progreso de los deterioros en el edificio. Son más eficaces  |

Fuente: Elaboración Propia

## 7.6 Comparación económica uso de CFRP vs Platinas de Acero

Se muestran unas tablas de comparación económica entre la platina metálica y la platina CFRP. (Ver las tablas N°43 y N°44).

Se realizaron Análisis de Precios Unitarios (Ver anexo N° 5 y N° 6)

Tabla N° 43: Refuerzo exterior con CFRP

| Metodo Moderno (CFRP)                                  | Cantidad | Unidad         | Precio Unitario | Total (S/)          |
|--|----------|----------------|-----------------|---------------------|
| <b>Obras Preliminares</b>                              |          |                |                 | <b>S/ 15 569.82</b> |
| Desmontaje y montaje de tabiquería liviana             | 18.50    | M <sup>2</sup> | 4.36            | S/80.66             |
| retiro de piso de loseta                               | 98.90    | M <sup>2</sup> | 2.93            | S/289.78            |
| rotura de contrapiso                                   | 98.90    | M <sup>2</sup> | 10.21           | S/1 009.77          |
| Picado de recubrimiento de losa aligerada              | 59.34    | M <sup>2</sup> | 13.62           | S/808.21            |
| Apuntalamiento de losa                                 | 98.90    | M <sup>2</sup> | 20.45           | S/2 022.51          |
| Picado de recubrimiento de fondo de vigueta            | 46.55    | M <sup>2</sup> | 109.81          | S/5 112.02          |
| Picado de recubrimiento de losa sólida                 | 39.56    | M <sup>2</sup> | 127.51          | S/5 044.30          |
| Picado de tarrajeo y recubrimiento en vigas            | 2.30     | M <sup>2</sup> | 522.86          | S/1 202.58          |
| <b>Movimiento de Materiales y desmonte</b>             |          |                |                 | <b>S/ 1 410.74</b>  |
| Acarreo de material excedente                          | 17.54    | M <sup>3</sup> | 33.89           | S/594.43            |
| Eliminación de desmonte                                | 17.54    | M <sup>3</sup> | 46.54           | S/816.31            |
| <b>Suministro y colocación de FRP Vigueta</b>          |          |                |                 | <b>S/ 29 337.21</b> |
| Suministro y colocación FRP                            | 210.04   | M              | 139.07          | S/29 210.54         |
| Prueba de Adherencia                                   | 1        | UND            | 126.67          | S/126.67            |
| <b>Suministro y colocación de platinas de FRP Viga</b> |          |                |                 | <b>S/ 2 560.88</b>  |
| Suministro y colocación FRP                            | 17.50    | M              | 139.07          | S/2 434.21          |
| Prueba de Adherencia                                   | 1        | UND            | 126.67          | S/126.67            |
| <b>Suministro y colocación de FRP losa sólida</b>      |          |                |                 | <b>S/ 17 166.15</b> |
| Suministro y colocación FRP                            | 122.52   | M              | 139.07          | S/17 039.48         |
| Prueba de Adherencia                                   | 1        | UND            | 126.67          | S/126.67            |
| <b>Acabados</b>  |          |                |                 | <b>S/ 2 986.64</b>  |
| Piso de loseta   | 98.90    | M <sup>2</sup> | 9.3             | S/919.77            |
| Resane de tarrajeo                                     | 46.99    | M <sup>2</sup> | 26.77           | S/1 257.79          |
| Resane de pintura                                      | 98.67    | M <sup>2</sup> | 8.2             | S/809.08            |
|  |          |                |                 | <b>S/ 69 031.44</b> |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 44: Refuerzo con Platinas Metálicas

| Tradicional (Platina de Acero)                                  | Cantidad | Unidad         | Precio Unitario | Total (S/)          |
|---|----------|----------------|-----------------|---------------------|
| <b>Obras Preliminares</b>                                       |          |                |                 | <b>S/ 15 569.82</b> |
| Desmontaje y montaje de tabiquería liviana                      | 18.50    | M <sup>2</sup> | 4.36            | S/80.66             |
| retiro de piso de loseta  | 98.90    | M <sup>2</sup> | 2.93            | S/289.78            |
| rotura de contrapiso  | 98.90    | M <sup>2</sup> | 10.21           | S/1 009.77          |
| Picado de recubrimiento de losa                                 | 59.34    | M <sup>2</sup> | 13.62           | S/808.21            |
| Apuntalamiento de techo aligerado                               | 98.90    | M <sup>2</sup> | 20.45           | S/2 022.51          |
| Picado de recubrimiento de fondo de vigueta                     | 46.55    | M <sup>2</sup> | 109.81          | S/5 112.02          |
| Picado de recubrimiento de losa sólida                          | 39.56    | M <sup>2</sup> | 127.51          | S/5 044.30          |
| Picado de tarrajeo y recubrimiento en vigas                     | 2.30     | M <sup>2</sup> | 522.86          | S/1 202.58          |
| <b>Movimiento de Materiales y desmonte</b>                      |          |                |                 | <b>S/ 1 410.74</b>  |
| Acarreo de material excedente                                   | 17.54    | M <sup>3</sup> | 33.89           | S/594.43            |
| Eliminación de desmonte   | 17.54    | M <sup>3</sup> | 46.54           | S/816.31            |
| <b>Suministro y colocación de platinas de acero Vigueta</b>     |          |                |                 | <b>S/ 11 182.29</b> |
| Reforzamiento con platinas de acero                             | 210.04   | M              | 47.56           | S/9 989.60          |
| Mortero en fondo de vigueta                                     | 46.55    | M <sup>2</sup> | 25.62           | S/1 192.70          |
| <b>Suministro y colocación de platinas de acero Viga</b>        |          |                |                 | <b>S/ 837.08</b>    |
| Reforzamiento con platinas de acero                             | 17.50    | M              | 47.56           | S/832.47            |
| Mortero en fondo de vigueta                                     | 0.18     | M3             | 25.62           | S/4.61              |
| <b>Suministro y colocación de platinas de acero losa sólida</b> |          |                |                 | <b>S/ 5 874.97</b>  |
| Reforzamiento con platinas de acero                             | 122.52   | M              | 47.56           | S/5 827.27          |
| Mortero en fondo de losa  | 1.86     | M3             | 25.62           | S/47.71             |
| <b>Acabados</b>   |          |                |                 | <b>S/ 2 986.64</b>  |
| Piso de loseta  | 98.90    | M <sup>2</sup> | 9.3             | S/919.77            |
| Resane de tarrajeo  | 46.99    | M <sup>2</sup> | 26.77           | S/1 257.79          |
| Resane de pintura   | 98.67    | M <sup>2</sup> | 8.2             | S/809.08            |
|   |          |                |                 | <b>S/ 37 861.54</b> |

Fuente: Elaboración Propia

#### 7.7 Contrastación de objetivos y resultados

- Se logró que los elementos en infradiseño vigas, losa sólida y aligerada aumenten su momento resistente, no se ha sobrepasado el 160% del momento resistente inicial según lo estipulado en ACI 440 2R17.
- El plazo de ejecución con reforzamiento CFRP fue más corto que el de Platina de Acero en 16 días, lo cual fue uno de los puntos más incidentes para la elección de este método.
- Si bien el tiempo de ejecución fue menor, el costo de esta implementación resultó ser mayor en un 82.33% comparado con el método por platinas de acero.
- El plazo de ejecución está relacionado con el impacto a terceros, indirectamente se reduce la intervención en vías y los ruidos generados solo fueron durante las obras preliminares.

## CONCLUSIONES

- 1) Los valores del reforzamiento para la viga B1/S1-V5 se obtuvo un incremento en el momento resistente 12.0%, este no supera a lo estipulado en la ACI 440.2R17 (160% como máximo), no se requirió reforzamiento por fuerza cortante. En el caso de las viguetas en las losas aligeradas, se incorporaron vigas de acero W12x45 sobre los ejes 7 y 8 debido a los altos esfuerzos cortantes generados por la sobrecarga de los equipos, se re distribuyo los momentos flectores y esfuerzos cortantes y se obtuvo un incremento de momento resistente desde 4.5% a 44.1% y los esfuerzos de corte por debajo del cortante resistente ( $V_r$ ) de 1.3 ton.
- 2) El plazo de ejecución del proyecto con el uso de la CRFP se redujo de 83 días en el caso de Platinas de acero a 66 días, representando una reducción porcentual del 20.48%. Cabe resaltar que en la etapa de obras preliminares y acabados los tiempos son los mismos, la diferencia de los días se aprecia en el periodo de instalación de la fibra de carbono la cual cuenta con un rendimiento de 40 ml/día. (Ver Anexo N°7 y N°8)
- 3) En la comparación económica realizada entre el reforzamiento de platinas de acero y la fibra de carbono, se tiene una diferencia de S/. 31 169.90 soles que representa un incremento del 82.33% del valor del reforzamiento con Platina de acero, esta alternativa debe usarse cuando el tiempo es más incidente que el costo. (Ver Anexo N°5 y N°6)
- 4) Al ser la zona de intervención un centro empresarial da a la fibra de carbono la opción más idónea debido a que no es tan invasivo como otros métodos, no se requiere de equipos y herramientas de gran tamaño que interrumpan el tránsito de las avenidas cercanas y debido a su menor tiempo de ejecución lo hace más receptivo a las personas involucradas indirectamente.
- 5) Después de realizar una comparación de beneficios entre el reforzamiento con pletinas de acero y fibras de carbono, se concluyó que las fibras de carbono brindan más beneficios, a la hora de ejecución del reforzamiento su ligereza y sus propiedades mecánicas, adicionalmente cuenta con espesores muy pequeño por lo que facilita su transporte, no presenta corrosión, entre otros beneficios.

## RECOMENDACIONES

- 1) En el reforzamiento con fibra de carbono se pueden realizar para flexión y corte, pero en el caso de losas la cual su geometría dificulta el reforzamiento en corte se recomienda la incorporación de ensanches de concreto y vigas de acero estructural con el fin de reducir las luces de la estructura.
- 2) Se recomienda el uso de la fibra de carbono en proyectos de reforzamiento por cambio de uso donde se priorice los plazos de ejecución que el factor económico, como son el caso de centros comerciales o proyectos en avenidas concurridas, esta reducción en el plazo viene ligado a la disminución de inconvenientes con terceros involucrados ya que se verán implicados en la ejecución de las obras preliminares al refuerzo, una vez terminado esta etapa los equipos y materiales utilizados no son tan invasivos como los métodos tradicionales.
- 3) El caso de análisis de la investigación se basó en el reforzamiento debido al cambio de uso del área de interés, pero cuando la edificación se tiene la presencia de patología en la construcción se requiere de un diagnóstico y el reforzamiento con CFRP es una de las opciones más viables.
- 4) La fibra de carbono es un material con buenas características mecánicas, uno de los puntos que se están investigando es su uso ya no como reforzamiento, sino como material de construcción. Se recomienda el análisis del comportamiento estructural de elementos pretensados que contengan varillas de fibra de carbono (viguetas).



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alegre Gago, Gianfranco (2017). Estudio de la Influencia en la Resistencia y Ductilidad de las Fibras de Carbono Utilizadas como Reforzamiento de Vigas de Concreto Armado (Tesis de Grado de título). Pontifica Universidad Católica del Perú, Lima-Perú.
- Bazán Serrano, Jorge Luis (2015). Estudio Experimental y Numérico del Comportamiento de Flexión de Vigas de Concreto Armado Reforzadas Con Bandas de FRP (Tesis de Grado de Maestro en Ciencias). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
- Belizario Pacompia, Christian Florencio (2017). “Reforzamiento Estructural de una Edificación de Concreto Armado de dos Pisos con Fines de Ampliación”  
TEMA: REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL (Tesis de Grado de título). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo-Perú.
- Hernández Farrera, Ximena (2014). Conceptos de edificación, sistemas constructivos y normatividad de construcción. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/237808013/Concepto-Edificacion>
- Hoja técnica Sika® CarboDur® (2014, 19 de noviembre). Sistema de Refuerzo a base de polímeros reforzados con fibra carbono. Recuperado de: <file:///D:/HT-SIKA%20CARBODUR.pdf>
- Manufacturing Terms (2009, 17 de octubre). Resistencia a la tracción. Recuperado de: [https://www.manufacturingterms.com/Spanish/Tensile-strength-\(TS\).html](https://www.manufacturingterms.com/Spanish/Tensile-strength-(TS).html)
- Norma ACI 440.2R-17 “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”
- Norma E.030. (2018). “Diseño sismoresistente”. (Norma, Lima – Perú)
- Norma E.020. (2006). “Cargas”
- Norma E.060. (2009) “Concreto Armado”.
- OKDIARIO (2018, 25 de julio) ¿Qué es y para qué sirve la fibra de carbono? Recuperado de: <https://okdiario.com/curiosidades/que-que-sirve-fibra-carbono-2777714>

- Sandoval Bonhomme, Pablo Andrés (2014). Evaluación experimental del comportamiento mecánico de refuerzos de fibra de carbono con matriz cementícea (FRCM), Influencia del tipo de Matriz (Tesis de Grado de título) Universidad de Chile, Santiago de Chile-Chile.
- Silva Vera, Pedro Alejandro (2016). Refuerzo Estructural con Fibra de Carbono (Tesis de Grado de título). Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito-Lima.
- Yauli Paredes, José Paul (2014). Desempeño Sísmico de una viga reparada con fibras de carbono (Tesis de Grado de título). Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador.

## ANEXOS

Anexo N° 1: Notación de los términos usados en las ecuaciones

$A_c$  = Área transversal del concreto en el miembro de compresión, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_f$  = Área de refuerzo externo de fibras, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_{fv}$  = Área de refuerzo al corte con fibras de carbono con espacio  $s$ , in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_p$  = Área de refuerzo pretensado en zona de tensión, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$A_s$  = Área de refuerzo de acero no pretensado, in<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>)

$b$  = Ancho de la cara de compresión del miembro, in (mm)

$b_w$  = Ancho del diámetro de la sección circular, in (mm)

$c$  = Distancia de la fibra de compresión extremo al eje neutro, in (mm)

$C_E$  = Factor de reducción ambiental

$d$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo de tensión, in (mm)

$d_f$  = Profundidad efectiva del refuerzo de fibras de carbono, in (mm)

$d_{fv}$  = Profundidad efectiva del refuerzo de corte con fibra de carbono, in (mm)

$d_p$  = Distancia de la fibra de compresión extrema al centroide de refuerzo pretensado

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto, psi (MPA)

$E_f$  = Módulo de elasticidad a la tracción de fibras de carbono, psi (MPA)

$E_s$  = Modulo de elasticidad del acero, psi (MPA)

$f'_c$  = Resistencia a la compresión especifica del concreto, psi (MPA)

$f_{fe}$  = Tensión efectiva en las fibras; estrés alcanzado en la falla de la sección, psi (MPA)

$f_{fs}$  = Tensión en la fibra de carbono causada por un momento dentro del rango elástico del miembro, psi (MPA)

$f_{fu}$  = Diseño de la máxima resistencia a la tracción de la fibra de carbono, psi (MPA)

$f_{fu}^*$  = Máxima resistencia a la tracción del material de fibras de carbono según lo informado por el fabricante, psi (MPA)

$f_s$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$f_{s,s}$  = Tensión en refuerzo de acero no pretensado en cargas de servicio.

$f_y$  = Límite elástico específico de refuerzo de acero no pretensado, psi (MPA)

$h$  = Espesor total o altura de un miembro, in (mm)

$I_{cr}$  = Momento de inercia de sección agrietada transformada en concreto, in<sup>4</sup> (mm<sup>4</sup>)

$k_1$  = Factor de modificación aplicado a  $k_v$  para tener en cuenta la resistencia del concreto.

$k_2$  = Factor de modificación aplicado a  $k_v$  para tener en cuenta el esquema de ajuste.

$L_e$  = Longitud de unión activa del laminado de fibra de carbono, in (mm)

$M_{DL}$  = Momento por la carga muerta, in.-lb (N-mm)

$M_n$  = Resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$M_{nf}$  = Contribución del refuerzo de la fibra de carbono de la resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$M_{ns}$  = Contribución del refuerzo del acero a la resistencia a la flexión nominal, in.-lb (N-mm)

$M_s$  = Momento de servicio en la sección, in.-lb (M-mm)

$M_s$  = Momento de servicio en la sección, in.-lb (N-mm)

$M_u$  = Momento factorizado en una sección, in.-lb (N-mm)

$n$  = Número de capas de refuerzo de fibras de carbono

$R_n$  = Fuerza nominal de un miembro

$S_{DL}$  = Carga muerta efectiva

$S_{LL}$  = Carga viva efectiva

$s_f$  = Espaciado de centro a centro de las tiras de fibras de carbono, in (mm)  
 $t_f$  = Espesor nominal de una capa de refuerzo de fibras de carbono, in. (mm)  
 $V_c$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por hormigón con refuerzo de flexión de acero, lb (N)  
 $V_f$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de fibras de carbono, lb (N)  
 $V_n$  = Resistencia al corte nominal, lb (N)  
 $V_s$  = Resistencia al corte nominal proporcionado por estribos de acero, lb (N)  
 $V_u$  = Resistencia al corte último, lb (N)  
 $w_f$  = Ancho de las capas de refuerzo de las fibras de carbono, in (mm)  
 $\alpha$  = Ángulo de aplicación de la dirección de refuerzo primario de fibra de carbono con respecto al eje longitudinal del miembro.  
 $\alpha_1$  = Multiplicador en  $f'_c$  para determinar la intensidad de una distribución de tensión rectangular equivalente para concreto  
 $\beta_1$  = Relación de profundidad del bloque de tensión rectangular equivalente a la profundidad del eje neutro  
 $\epsilon_{bi}$  = Deformación en el sustrato de concreto desarrollado por un momento flector dado, in. /in. (mm/ mm)  
 $\epsilon_c$  = Deformación en el concreto, in./in. (mm/mm)  
 $\epsilon_c'$  = Deformación por compresión del concreto no confinado correspondiente a  $f'_c$ , in./in. (mm/mm); puede ser tomado como 0.002  
 $\epsilon_{cu}$  = Máxima deformación axial del hormigón no confinado, in./in. (mm/mm)  
 $\epsilon_{fd}$  = Deformación de unión de refuerzo de fibras de carbono unidas externamente in./in. (mm/mm)  
 $\epsilon_{fe}$  = Esfuerzo efectivo en el refuerzo de fibras alcanzado en la falla in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{fu}$  = Diseño ruptura de deformación de refuerzo de fibras de carbono, in./in.  
(mm/mm)

$\epsilon_{fu}^*$  = Tensión de ruptura final de refuerzo de fibras de carbono, in./in. (mm/mm)

$\epsilon_{pi}$  = Tensión inicial en refuerzo de cero pretensado, in. (mm/mm)

$\epsilon_s$  = Deformación en refuerzo de acero sin presión, in./in. (mm/mm)

$\rho_f$  = Relación del refuerzo de las fibras de carbono.

$\rho_s$  = Relación del refuerzo no pretensado

$\psi_f$  = Factor de reducción de fuerza

$\psi_f = 0.85$  para flexión (calibrado en función de las propiedades del material de diseño).

$\psi_f = 0.85$  para cizalla (basado en análisis de confiabilidad).

$\Phi$  = Factor de reducción de fuerza

Anexo N° 2: Matriz de consistencia



**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Nombre de Tesis:** Uso de Fibras de Carbono en reforzamiento de estructuras de edificaciones, Centro Empresarial Real, San Isidro

**Integrantes:** Manrique Siles, Diego Arturo  
Pauca Berrocal, Miguel Dirceu

**Matriz de Consistencia**

| FORMULACION DEL PROBLEMA | PROBLEMAS   | OBJETIVOS   | HIPÓTESIS   | VARIABLES  | INDICADORES  | METODOLOGIA   |
|--------------------------|---|---|---|--|--|---|
| <b>GENERAL</b>           | ¿En qué medida el uso de la fibra de carbono (FRP) mejorará el comportamiento (momento y cortante) de las vigas, losa sólida y las viguetas de la losa aligerada que se encuentran en infradiseño por cambio de uso de la edificación frente a un sismo, en el uso de la edificación frente a un sismo, en el Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?  | Mejorar el comportamiento (momento y cortante) de las vigas, losa sólida y las viguetas de la losa aligerada que se encuentran en infradiseño por cambio de uso de la edificación, frente a un sismo, utilizando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.   | Usando fibras de carbono se mejorará el comportamiento estructural de los elementos en infradiseño que conforman las edificaciones construidas antes de la vigencia de la norma técnica de sistemesistencia.  | <b>Variables Independientes:</b><br>- Edificaciones en la zona de Lama Metropolitana<br><b>Variables dependientes:</b><br>- Refuerzo de fibra de carbono | <b>Indicadores de las independientes:</b><br>- Dimensiones de los elementos estructurales<br>- Geometría y características físicas del edificio<br><b>Indicadores de las dependientes:</b><br>- Especificaciones de la fibra de carbono<br>- Momentos y Esfuerzo Cortante<br>- Cuanía de acero | Tipo de investigación:<br>Aplicada, ya que se busca usar el reforzamiento de fibras de carbono para resolver el problema de sobrecarga en una edificación la cual fue modificado su uso.<br><br>Nivel: Experimental, debido a que por el cambio de uso del piso de la edificación las cargas aumentan, variando los valores de momentos y cortantes últimos. Por lo tanto debemos realizar el reforzamiento para que la edificación sea capaz de resistir los nuevos momentos y cortantes últimos y no muestre futuros daños estructurales. |
| <b>ESPECÍFICO</b>        | ¿De qué manera el uso de la fibra de carbono (FRP) reducirá el tiempo ejecución del reforzamiento de los elementos estructurales en infradiseño de la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?<br><br>¿En qué medida el uso de la fibra de carbono (FRP) incidirá en los costos de un reforzamiento de los elementos estructurales en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro?<br><br>¿De qué manera el uso de la fibra de carbono (FRP) reducirá el impacto a terceros durante el reforzamiento de elementos estructurales en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro? | Acortar el tiempo de ejecución del reforzamiento de los elementos estructurales usando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.<br><br>Costear la ejecución del reforzamiento de los elementos estructurales usando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro.<br><br>Reducir el impacto a terceros durante el reforzamiento de los elementos estructurales utilizando fibras de carbono (FRP) en la edificación del Centro Empresarial Camino Real - San Isidro. | La propuesta del uso de fibras de carbono reducirá el plazo de ejecución y mejorará el rendimiento del personal en el reforzamiento de edificaciones.<br><br>Utilizando fibras de carbono se reducirá los costos generados en el reforzamiento de edificaciones.<br><br>El uso de fibras de carbono reducirá el impacto a terceros durante la ejecución del reforzamiento de edificaciones. |  |  |   |

### Anexo N° 3: Procedimiento para el reforzamiento por flexión con FRP

| Procedure  | Calculation in in.-lb units   | Calculation in SI metric units  |
|--|---|---|
| <p><b>Step 1—Calculate the FRP system design material properties</b></p> <p>The beam is located in an interior space and a carbon FRP (CFRP) material will be used. Therefore, per Table 9.4, an environmental reduction factor of 0.95 is suggested.</p> $f_{fu} = C_{pf} f_u^*$ $\epsilon_{fu} = C_{pe} \epsilon_u^*$  | $f_{fu} = (0.95)(90 \text{ ksi}) = 85 \text{ ksi}$ $\epsilon_{fu} = (0.95)(0.015 \text{ in./in.}) = 0.0142 \text{ in./in.}$   | $f_{fu} = (0.95)(621 \text{ N/mm}^2) = 590 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{fu} = (0.95)(0.015 \text{ mm/mm}) = 0.0142 \text{ mm/mm}$   |
| <p><b>Step 2—Preliminary calculations</b></p> <p>Properties of the concrete:</p> <p><math>\beta_1</math> from ACI 318-14, Section 22.2.2.4.3</p> $E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$ <p>Properties of the existing reinforcing steel:</p> <p>Properties of the externally bonded FRP reinforcement:</p> $A_f = n_f w_f$   | $\beta_1 = 1.05 - 0.05(f'_c/1000) = 0.80$ $E_c = 57,000 \sqrt{5000 \text{ psi}} = 4,030,000 \text{ psi}$ $A_s = 3(1.00 \text{ in.}^2) = 3.00 \text{ in.}^2$ $A_f = (2 \text{ plies})(0.040 \text{ in./ply})(12 \text{ in.}) = 0.96 \text{ in.}^2$ | $\beta_1 = 1.05 - 0.05(f'_c/1000) = 0.80$ $E_c = 4700 \sqrt{34.5 \text{ N/mm}^2} = 27,600 \text{ N/mm}^2$ $A_s = 3(645 \text{ mm}^2) = 1935 \text{ mm}^2$ $A_f = (2 \text{ plies})(1.02 \text{ mm/ply})(305 \text{ mm}) = 619 \text{ mm}^2$ |
| <p><b>Step 3—Determine the existing state of strain on the soffit</b></p> <p>The existing state of strain is calculated assuming the beam is cracked and the only loads acting on the beam at the time of the FRP installation are dead loads. A cracked section analysis of the existing beam gives <math>k = 0.334</math> and <math>I_{cr} = 5937 \text{ in.}^4 = 2471 \times 10^6 \text{ mm}^4</math></p> $\epsilon_{su} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr} E_c}$ | $\epsilon_{su} = \frac{(864 \text{ kip-in.})[24 \text{ in.} - (0.334)(21.5 \text{ in.})]}{(5937 \text{ in.}^4)(4030 \text{ ksi})}$ $= 0.00061$  | $\epsilon_{su} = \frac{(97.6 \text{ kN-mm})[609.6 \text{ mm} - (0.334)(546.1 \text{ mm})]}{(2471 \times 10^6 \text{ mm}^4)(27.6 \text{ kN/mm}^2)}$ $= 0.00061$  |
| <p><b>Step 4—Determine the design strain of the FRP system</b></p> <p>The design strain of FRP accounting for debonding failure mode <math>\epsilon_{fd}</math> is calculated using Eq. (10.1.1)</p> <p>Because the design strain is smaller than the rupture strain, debonding controls the design of the FRP system.</p>   | $\epsilon_{fd} = 0.083 \sqrt{\frac{5000 \text{ psi}}{2(5,360,000 \text{ psi})(0.04 \text{ in.})}}$ $= 0.009 \leq 0.9(0.0142) = 0.0128$  | $\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{34.5 \text{ N/mm}^2}{2(37,000 \text{ N/mm}^2)(1.02 \text{ mm})}}$ $= 0.009 \leq 0.9(0.0142) = 0.0128$   |



|   |  |   |
|---|--|---|
| <p><b>Step 5—Estimate <math>c</math>, the depth to the neutral axis</b></p> <p>A reasonable initial estimate of <math>c</math> is <math>0.20d</math>. The value of the <math>c</math> is adjusted after checking equilibrium.</p> $c = 0.20d$   | $c = (0.20)(21.5 \text{ in.}) = 4.30 \text{ in.}$  | $c = (0.20)(546.1 \text{ mm}) = 109 \text{ mm}$   |
| <p><b>Step 6—Determine the effective level of strain in the FRP reinforcement</b></p> <p>The effective strain level in the FRP may be found from Eq. (10.2.5).</p> $\epsilon_{fr} = 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) = \epsilon_{st} \leq \epsilon_{fu}$ <p>Note that for the neutral axis depth selected, FRP debonding would be in the failure mode because the second expression in this equation controls. If the first expression governed, then concrete crushing would be in the failure mode. Because FRP controls the failure of the section, the concrete strain at failure <math>\epsilon_c</math> may be less than 0.003 and can be calculated using similar triangles:</p> $\epsilon_c = (\epsilon_{fr} + \epsilon_{st}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$ | $\epsilon_{fr} = 0.003 \left( \frac{24 \text{ in.} - 4.3 \text{ in.}}{4.3 \text{ in.}} \right) - 0.00061 \leq 0.009$ $\epsilon_{fr} = 0.0131 > 0.009$ $\epsilon_{st} = \epsilon_{fu} = 0.009$ $\epsilon_c = (0.09 + 0.00061) \left( \frac{4.3 \text{ in.}}{24 \text{ in.} - 4.3 \text{ in.}} \right) = 0.0021$ | $\epsilon_{fr} = 0.003 \left( \frac{609.6 \text{ mm} - 109.2 \text{ mm}}{109.2 \text{ mm}} \right) - 0.00061 \leq 0.009$ $\epsilon_{fr} = 0.0131 > 0.009$ $\epsilon_{st} = \epsilon_{fu} = 0.009$ $\epsilon_c = (0.009 + 0.00061) \left( \frac{109.2 \text{ mm}}{609.6 \text{ mm} - 109.2 \text{ mm}} \right) = 0.0021$ |
| <p><b>Step 7—Calculate the strain in the existing reinforcing steel</b></p> <p>The strain in the reinforcing steel can be calculated using similar triangles according to Eq. (10.2.6).</p> $\epsilon_s = (\epsilon_{fr} + \epsilon_{st}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$   | $\epsilon_s = (0.09 + 0.00061) \left( \frac{21.5 \text{ in.} - 4.3 \text{ in.}}{24 \text{ in.} - 4.3 \text{ in.}} \right) = 0.0084$  | $\epsilon_s = (0.09 + 0.00061) \left( \frac{546.1 \text{ mm} - 109.2 \text{ mm}}{609.6 \text{ mm} - 109.2 \text{ mm}} \right) = 0.0084$   |
| <p><b>Step 8—Calculate the stress level in the reinforcing steel and FRP</b></p> <p>The stresses are calculated using Eq. (10.2.10b) and Hooke's Law.</p> $f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$ $f_{fr} = E_{fr} \epsilon_{fr}$   | $f_s = (29,000 \text{ ksi})(0.0084) \leq 60 \text{ ksi}$ $f_s = 244 \text{ ksi} \leq 60 \text{ ksi}$ <p>Hence, <math>f_s = 60 \text{ ksi}</math></p> $f_{fr} = (5360 \text{ ksi})(0.009) = 48.2 \text{ ksi}$   | $f_s = (200 \text{ kN/mm}^2)(0.0084) \leq 0.414 \text{ kN/mm}^2$ $f_s = 1.68 \text{ kN/mm}^2 \leq 0.414 \text{ kN/mm}^2$ <p>Hence, <math>f_s = 0.414 \text{ kN/mm}^2</math></p> $f_{fr} = (37 \text{ kN/mm}^2)(0.009) = 0.33 \text{ kN/mm}^2$   |

|   |  |  |
|---|--|--|
| <p><b>Step 9—Calculate the internal force resultants and check equilibrium</b></p> <p>Concrete stress block factors may be calculated using ACI 318. Approximate stress block factors may also be calculated based on the parabolic stress-strain relationship for concrete as follows:</p> $\beta_1 = \frac{4\epsilon'_c - \epsilon_c}{6\epsilon'_c - 2\epsilon_c}$ $\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \epsilon_c'^2}$ <p>where <math>\epsilon'_c</math> is strain corresponding to <math>f'_c</math> calculated as</p> $\epsilon'_c = \frac{1.7f'_c}{E_c}$ <p>Force equilibrium is verified by checking the initial estimate of <math>c</math> with Eq. (10.3.1.6g).</p> $c = \frac{A_s f_s + A_f f_f}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$ | $\beta_1 = \frac{4(0.0021) - 0.0021}{6(0.0021) - 2(0.0021)} = 0.749$ $\alpha_1 = \frac{3(0.0021)(0.0021) - (0.0021)^2}{3(0.749)(0.0021)^2} = 0.886$ $\epsilon'_c = \frac{1.7(5000)}{4.03 \times 10^6} = 0.0021$ $c = \frac{(3.00 \text{ in.}^2)(60 \text{ ksi}) + (0.96 \text{ in.}^2)(48.2 \text{ ksi})}{(0.886)(5 \text{ ksi})(0.749)(12 \text{ in.})}$ $c = 5.68 \text{ in.} \neq 4.30 \text{ in. n.g.}$ <p>∴ revise estimate of <math>c</math> and repeat Steps 6 through 9 until equilibrium is achieved.</p> | $\beta_1 = \frac{4(0.0021) - 0.0021}{6(0.0021) - 2(0.0021)} = 0.749$ $\alpha_1 = \frac{3(0.0021)(0.0021) - (0.0021)^2}{3(0.749)(0.0021)^2} = 0.886$ $\epsilon'_c = \frac{1.7(34.5)}{27,600} = 0.0021$ $c = \frac{(1935.48 \text{ mm}^2)(414 \text{ N/mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(330 \text{ N/mm}^2)}{(0.886)(34.5 \text{ N/mm}^2)(0.749)(304.8 \text{ mm})}$ $c = 149 \text{ mm} \neq 109 \text{ mm n.g.}$ <p>∴ revise estimate of <math>c</math> and repeat Steps 6 through 9 until equilibrium is achieved.</p> |
| <p><b>Step 10—Adjust <math>c</math> until force equilibrium is satisfied</b></p> <p>Steps 6 through 9 were repeated several times with different values of <math>c</math> until equilibrium was achieved. The results of the final iteration are</p> <p><math>c = 5.17 \text{ in.}</math>; <math>\epsilon_c = 0.0083</math>; <math>f_s = f_y = 60 \text{ ksi}</math>; <math>\beta_1 = 0.786</math>; <math>\alpha_1 = 0.928</math>; and <math>f_{fd} = 48.2 \text{ ksi}</math></p>   | $c = \frac{(3.00 \text{ in.}^2)(60 \text{ ksi}) + (0.96 \text{ in.}^2)(48.2 \text{ ksi})}{(0.928)(5 \text{ ksi})(0.786)(12 \text{ in.})}$ $c = 5.17 \text{ in.}$ <p>∴ the value of <math>c</math> selected for the final iteration is correct.</p>   | $c = \frac{(1935.5 \text{ mm}^2)(414 \text{ N/mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(330 \text{ N/mm}^2)}{(0.928)(34.5 \text{ N/mm}^2)(0.786)(304.8 \text{ mm})}$ $c = 131 \text{ mm}$ <p>∴ the value of <math>c</math> selected for the final iteration is correct.</p>  |

|  |  |  |
|--|--|--|
| <p><b>Step 11—Calculate flexural strength components</b></p> <p>The design flexural strength is calculated using Eq. (10.2.10d). An additional reduction factor, <math>\psi_f = 0.85</math>, is applied to the contribution of the FRP system.</p> <p>Steel contribution to bending:</p> $M_w = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ <p>FRP contribution to bending:</p> $M_{fr} = A_f f_{fr} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ | $M_w = (3.00 \text{ in.}^2)(60 \text{ ksi}) \left( 21.5 \text{ in.} - \frac{0.786(5.17 \text{ in.})}{2} \right)$ $M_w = 3504 \text{ kip-in.} = 292 \text{ kip-ft}$ $M_{fr} = (0.96 \text{ in.}^2)(48.2 \text{ ksi}) \left( 24 \text{ in.} - \frac{0.786(5.17 \text{ in.})}{2} \right)$ $M_{fr} = 1020 \text{ kip-in.} = 85 \text{ kip-ft}$ | $M_w = (1935.5 \text{ mm}^2)(414 \text{ N/mm}^2) \left( 546.1 \text{ mm} - \frac{0.786(131 \text{ mm})}{2} \right)$ $M_w = 3.963 \times 10^8 \text{ N-mm} = 396.3 \text{ kN-m}$ $M_{fr} = (619 \text{ mm}^2)(330 \text{ N/mm}^2) \left( 609.6 \text{ mm} - \frac{0.786(131 \text{ mm})}{2} \right)$ $M_{fr} = 1.140 \times 10^8 \text{ N-mm} = 114 \text{ kN-m}$ |
|--|--|--|

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p><b>Step 12—Calculate design flexural strength of the section</b></p> <p>The design flexural strength is calculated using Eq. (10.1) and (10.2.10d). Because <math>\epsilon_s = 0.0083 &gt; 0.005</math>, a strength reduction factor of <math>\phi = 0.90</math> is appropriate per Eq. (10.2.7).</p> $\phi M_n = \phi[M_u + \nu_r M_{ur}]$  | $\phi M_n = 0.9[292 \text{ kip-ft} + 0.85(85 \text{ kip-ft})]$ $\phi M_n = 327 \text{ kip-ft} \geq M_u = 294 \text{ kip-ft}$ <p>∴ the strengthened section is capable of sustaining the new required moment strength.</p>   | $\phi M_n = 0.9[396.3 \text{ kN-m} + 0.85(114 \text{ kN-m})]$ $\phi M_n = 443 \text{ kN-m} \geq M_u = 399 \text{ kN-m}$ <p>∴ the strengthened section is capable of sustaining the new required moment strength.</p>  |
| <p><b>Step 13—Check service stresses in the reinforcing steel and the FRP.</b></p> <p>Calculate the elastic depth to the cracked neutral axis. This can be simplified for a rectangular beam without compression reinforcement as follows:</p> $k = \frac{\left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)}{\left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left( \frac{d_f}{d} \right) \right) + \left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)}$ <p>Calculate the stress level in the reinforcing steel using Eq. (10.2.10.1) and verify that it is less than the recommended limit per Eq. (10.2.8a).</p> $f_{rs} = \frac{\left[ M_u + \nu_r M_{ur} \left( d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left( d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left( d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd)}$ $f_{rs} \leq 0.80 f_y$ | $k = 0.343$ $kd = (0.343)(21.5 \text{ in.}) = 7.37 \text{ in.}$ $f_{rs} = 40.4 \text{ ksi} \leq (0.80)(60 \text{ ksi}) = 48 \text{ ksi}$ <p>∴ the stress level in the reinforcing steel is within the recommended limit.</p>  | $k = 0.343$ $kd = (0.343)(546.1 \text{ mm}) = 187 \text{ mm}$ $f_{rs} = 279 \text{ N/mm}^2 \leq (0.80)(410 \text{ N/mm}^2) = 330 \text{ N/mm}^2$ <p>∴ the stress level in the reinforcing steel is within the recommended limit.</p>  |
| <p><b>Step 14—Check creep rupture limit at service of the FRP</b></p> <p>Calculate the stress level in the FRP using Eq. (10.2.10.2) and verify that it is less than creep-rupture stress limit given in Table 10.2.9. Assume that the full service load is sustained.</p> $f_{fs} = f_{rs} \left( \frac{E_f}{E_s} \right) \left( \frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - \nu_r E_f$ <p>For a carbon FRP system, the sustained plus cyclic stress limit is obtained from Table 10.2.9:</p> <p>Sustained plus cyclic stress limit = <math>0.55 f_{ps}</math></p>   | $f_{fs} = 40.4 \text{ ksi} \left( \frac{5360 \text{ ksi}}{29,000 \text{ ksi}} \right) \left( \frac{24 \text{ in.} - 7.37 \text{ in.}}{21.5 \text{ in.} - 7.37 \text{ in.}} \right) - (0.00061)(5360 \text{ ksi})$ $f_{fs} = 5.60 \text{ ksi} \leq (0.55)(85 \text{ ksi}) = 47 \text{ ksi}$ <p>∴ the stress level in the FRP is within the recommended sustained plus cyclic stress limit.</p> | $f_{fs} = 0.278 \text{ kN/mm}^2 \left( \frac{37 \text{ kN/mm}^2}{200 \text{ kN/mm}^2} \right) \left( \frac{609.6 \text{ mm} - 187 \text{ mm}}{546 \text{ mm} - 187 \text{ mm}} \right) - (0.00061)(38 \text{ N/mm}^2)$ $f_{fs} = 38 \text{ N/mm}^2 \leq (0.55)(590 \text{ N/mm}^2) = 324 \text{ N/mm}^2$ <p>∴ the stress level in the FRP is within the recommended sustained plus cyclic stress limit.</p> |

## Anexo N° 4: Procedimiento para el reforzamiento por corte con FRP

| Procedure  | Calculation in in.-lb units   | Calculation in SI metric units   |
|--|---|--|
| <p><b>Step 1—Compute the design material properties</b></p> <p>The beam is located in an enclosed and conditioned space and a CFRP material will be used. Therefore, per Table 9.4, an environmental-reduction factor of 0.95 is suggested.</p> $f_{fu} = C_{sf} f_u^*$ $\epsilon_{fu} = C_{\epsilon} \epsilon_{fu}^*$   | $f_{fu} = (0.95)(550 \text{ ksi}) = 522.5 \text{ ksi}$ $\epsilon_{fu} = (0.95)(0.017) = 0.016$  | $f_{fu} = (0.95)(3.79 \text{ kN/mm}^2) = 3.60 \text{ kN/mm}^2$ $\epsilon_{fu} = (0.95)(0.017) = 0.016$   |
| <p><b>Step 2—Calculate the effective strain level in the FRP shear reinforcement</b></p> <p>The effective strain in FRP U-wraps should be determined using the bond-reduction coefficient <math>\kappa_v</math>. This coefficient can be computed using Eq. (11.4.1.2b) through (11.4.2.1e).</p> $L_w = \frac{2500}{(n_t E_f)^{0.58}}$ $k_1 = \left( \frac{f_{fu}'}{4000} \right)^{2/3}$ $k_2 = \left( \frac{d_p - L_w}{d_p} \right)$ $\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_w}{468 E_{fu}} \leq 0.75$ <p>The effective strain can then be computed using Eq. (11.4.1.2a) as follows:</p> $\epsilon_{fu} = \kappa_v \epsilon_{fu} \leq 0.004$ | $L_w = \frac{2500}{[(1)(0.0065 \text{ in.})(33 \times 10^4 \text{ psi})]^{0.58}} = 2.0 \text{ in.}$ $k_1 = \left( \frac{3000 \text{ psi}}{4000} \right)^{2/3} = 0.825$ $k_2 = \left( \frac{16 \text{ in.} - 2.0 \text{ in.}}{16 \text{ in.}} \right) = 0.875$ $\kappa_v = \frac{(0.82)(0.875)(2 \text{ in.})}{468(0.016)} = 0.193 \leq 0.75$ $\epsilon_{fu} = 0.193(0.016) = 0.0031 \leq 0.004$ | $L_w = \frac{416}{[(1)(0.1651 \text{ mm})(227.5 \times 10^3 \text{ kN/mm}^2)]^{0.58}} = 50.8 \text{ mm}$ $k_1 = \left( \frac{20.7 \text{ kN/mm}^2}{254} \right)^{2/3} = 0.825$ $k_2 = \left( \frac{406 \text{ mm} - 50.8 \text{ mm}}{406 \text{ mm}} \right) = 0.875$ $\kappa_v = \frac{(0.82)(0.875)(50.8 \text{ mm})}{11,910(0.016)} = 0.193 \leq 0.75$ $\epsilon_{fu} = 0.193(0.016) = 0.0031 \leq 0.004$ |
| <p><b>Step 3—Calculate the contribution of the FRP reinforcement to the shear strength</b></p> <p>The area of FRP shear reinforcement can be computed as:</p> $A_{fv} = 2n_t n_w f$ <p>The effective stress in the FRP can be computed from Hooke's law.</p> $f_{fv} = \epsilon_{fv} E_f$ <p>The shear contribution of the FRP can be then calculated from Eq. (11.4a):</p> $V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_p}{s_f}$  | $A_{fv} = 2(1)(0.0065 \text{ in.})(10 \text{ in.}) = 0.13 \text{ in.}^2$ $f_{fv} = (0.0031)(33,000 \text{ ksi}) = 102 \text{ ksi}$ $V_f = \frac{(0.13 \text{ in.}^2)(102 \text{ ksi})(1)(16 \text{ in.})}{(12 \text{ in.})}$ $V_f = 17.7 \text{ kip}$   | $A_{fv} = 2(1)(0.1651 \text{ mm})(254 \text{ mm}) = 83.87 \text{ mm}^2$ $f_{fv} = (0.0031)(227.6 \text{ kN/mm}^2) = 0.703 \text{ kN/mm}^2$ $V_f = \frac{(83.87 \text{ mm}^2)(0.703 \text{ kN/mm}^2)(1)(406 \text{ mm})}{(304.8 \text{ mm})}$ $V_f = 78.5 \text{ kN}$   |
| <p><b>Step 4—Calculate the shear strength of the section</b></p> <p>The design shear strength can be computed from Eq. (11.3b) with <math>\psi_f = 0.85</math> for U-wraps.</p> $\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f)$  | $\phi V_n = 0.75[44.2 + 19.6 + (0.85)(17.7)]$ $\phi V_n = 59 \text{ kip} > V_u = 57 \text{ kip}$ <p>∴ the strengthened section is capable of sustaining the required shear strength.</p>  | $\phi V_n = 0.75[196.6 + 87.2 + (0.85)(78.5)]$ $\phi V_n = 263 \text{ kN} > V_u = 253.3 \text{ kN}$ <p>∴ the strengthened section is capable of sustaining the required shear strength.</p>  |

Anexo N° 5: Análisis de Precios Unitarios reforzamiento con platinas de acero

|                    |                           |   |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|---|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.1                       | <b>MONTAJE Y DESMONTAJE DE TABIQUERIA LIVIANA, RETIRO DE ALFOMBRA DE LA ZONA DE TRABAJO</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 112.0 M2/DIA              | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 4.36           |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.0071          | 12.96         | 0.09           |
|                    | OPERARIO                  | HH  | 2.00             | 0.1429          | 11.57         | 1.65           |
|                    | PEON                      | HH  | 4.00             | 0.2857          | 8.43          | 2.41           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>4.15</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 4.15          | 0.21           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.21</b>    |
| <b>Partida</b>     | 1.2                       | <b>RETIRO DE PISO DE LOSETA</b>   |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 40.0 M2/DIA               | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 2.93           |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.0200          | 12.96         | 0.26           |
|                    | PEON                      | HH  | 1.50             | 0.3000          | 8.43          | 2.53           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>2.79</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 2.79          | 0.14           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.14</b>    |
| <b>Partida</b>     | 1.3                       | <b>ROTURA DE CONTRAPISO E=5CM</b>   |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 8.0 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 10.21          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.1000          | 12.96         | 1.30           |
|                    | PEON                      | HH  | 1.00             | 1.0000          | 8.43          | 8.43           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>9.73</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 9.73          | 0.49           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.49</b>    |
| <b>Partida</b>     | 1.4                       | <b>PICADO DE RECUBRIMIENTO DE LOSA ALIGERADA E=5CM</b>                                      |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 6.0 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 13.62          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.1333          | 12.96         | 1.73           |
|                    | PEON                      | HH  | 1.00             | 1.3333          | 8.43          | 11.24          |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>12.97</b>   |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 12.97         | 0.65           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.65</b>    |

|                    |                                 |                                       |                  |                 |               |                |  |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------|---------------|----------------|--|
| <b>Partida</b>     | 1.5                             | <b>APUNTALAMIENTO DE LOSA</b>         |                  |                 |               |                |  |
| <b>Rendimiento</b> | 80.0 M2/DIA                     | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b> |                  |                 |               | 20.45          |  |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>       | <b>UNIDAD</b>                         | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |  |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>             |                                       |                  |                 |               |                |  |
|                    | CAPATAZ                         | HH                                    | 0.15             | 0.0071          | 12.96         | 0.09           |  |
|                    | OFICIAL                         | HH                                    | 1.00             | 0.1429          | 9.31          | 1.33           |  |
|                    | PEON                            | HH                                    | 2.00             | 0.2857          | 8.43          | 2.41           |  |
|                    |                                 |                                       |                  |                 |               | <b>3.83</b>    |  |
|                    | <b>MATERIALES</b>               |                                       |                  |                 |               |                |  |
|                    | MADERA TORNILLO                 | P2                                    |                  | 4.4000          | 2.23          | 9.81           |  |
|                    |                                 |                                       |                  |                 |               | <b>9.81</b>    |  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                  |                                       |                  |                 |               |                |  |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES           | %MO                                   |                  | 5.0000          | 3.83          | 0.19           |  |
|                    | PUNTAL METALICO TELESCOPICO N°5 | DIA                                   | 27.00            | 0.3375          | 19.60         | 6.62           |  |
|                    |                                 |                                       |                  |                 |               | <b>6.81</b>    |  |

|                    |                            |   |                  |                 |               |                |  |
|--------------------|----------------------------|---|------------------|-----------------|---------------|----------------|--|
| <b>Partida</b>     | 1.6                        | <b>PICADO DE RECUBRIMIENTO DE FONDO DE VIGUETAS PARA ADICION DE REFUERO E=3CM</b> |                  |                 |               |                |  |
| <b>Rendimiento</b> | 2.0 M2/DIA                 | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 109.81         |  |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>  | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |  |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>        |   |                  |                 |               |                |  |
|                    | CAPATAZ                    | HH  | 0.10             | 0.4000          | 12.96         | 5.18           |  |
|                    | OFICIAL                    | HH  | 0.50             | 2.0000          | 9.31          | 18.62          |  |
|                    | PEON                       | HH  | 2.00             | 8.0000          | 8.43          | 67.44          |  |
|                    |                            |   |                  |                 |               | <b>91.24</b>   |  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>             |   |                  |                 |               |                |  |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES      | %MO   |                  | 5.0000          | 91.24         | 4.56           |  |
|                    | CUERPO DE ANDAMIO METALICO | DIA   | 4.00             | 2.0000          | 7.00          | 14.00          |  |
|                    |                            |   |                  |                 |               | <b>18.56</b>   |  |

|                    |                            |  |                  |                 |               |                |  |
|--------------------|----------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|--|
| <b>Partida</b>     | 1.6                        | <b>PICADO DE RECUBRIMIENTO DE FONDO DE LOSA SOLIDA E=3CM</b> |                  |                 |               |                |  |
| <b>Rendimiento</b> | 2.5 M2/DIA                 | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>                        |                  |                 |               | 109.81         |  |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>  | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |  |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>        |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | CAPATAZ                    | HH   | 0.10             | 0.4000          | 12.96         | 5.18           |  |
|                    | OFICIAL                    | HH   | 0.50             | 2.0000          | 9.31          | 18.62          |  |
|                    | PEON                       | HH   | 2.00             | 8.0000          | 8.43          | 67.44          |  |
|                    |                            |  |                  |                 |               | <b>91.24</b>   |  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>             |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES      | %MO  |                  | 5.0000          | 91.24         | 4.56           |  |
|                    | CUERPO DE ANDAMIO METALICO | DIA  | 4.00             | 2.0000          | 7.00          | 14.00          |  |
|                    |                            |  |                  |                 |               | <b>18.56</b>   |  |

|                    |                            |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|----------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.7                        | <b>PICADA DE TARRAJEO Y RECUBRIMIENTO EN VIGAS (E=5cm)</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 0.42 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>                      |                  |                 | 522.86        |                |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>  | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>        |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                    | HH   | 0.10             | 1.9048          | 12.96         | 24.69          |
|                    | OFICIAL                    | HH   | 0.50             | 9.5238          | 9.31          | 88.67          |
|                    | PEON                       | HH   | 2.00             | 38.0920         | 8.43          | 321.12         |
|                    |                            |  |                  |                 |               | <b>434.47</b>  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>             |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES      | %MO  |                  | 5.0000          | 434.47        | 21.72          |
|                    | CUERPO DE ANDAMIO METALICO | DIA  | 4.00             | 9.5238          | 7.00          | 66.67          |
|                    |                            |  |                  |                 |               | <b>88.39</b>   |

|                    |                           |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 2.1                       | <b>ACARREO DE MATERIALES EXCEDENTE DE LOS PISOS DIFERENTES AL PRIMER NIVEL</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 4.5 M3/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M3</b>  |                  |                 | 33.89         |                |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH   | 0.10             | 0.1778          | 12.96         | 2.30           |
|                    | PEON                      | HH   | 2.00             | 3.5556          | 8.43          | 29.97          |
|                    |                           |  |                  |                 |               | <b>32.28</b>   |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO  |                  | 5.0000          | 32.28         | 1.61           |
|                    |                           |  |                  |                 |               | <b>1.61</b>    |

|                    |                                |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|--------------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 2.2                            | <b>ELIMINACION DE DESMONTE. CARGUIO MANUAL/VOLQ 6M3 D=15KM</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 30.0 M2/DIA                    | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M3</b>                          |                  |                 | 46.54         |                |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>      | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>            |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                        | HH   | 0.10             | 0.0267          | 12.96         | 0.35           |
|                    | PEON                           | HH   | 4.00             | 1.0667          | 8.43          | 8.99           |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>9.34</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                 |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO  |                  | 3.0000          | 9.34          | 0.28           |
|                    | CAMION VOLQUETE 4X2 140-210 HP | HM   | 1                | 0.2667          | 138.44        | 36.92          |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>37.20</b>   |

|                    |                            |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|----------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 3.1                        | <b>REFORZAMIENTO CON PLATINAS DE ACERO</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 25.0 M/DIA                 | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M</b>       |                  |                 | 47.56         |                |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>  | <b>UNIDAD</b>                              | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>        |  |                  |                 |               |                |
|                    | OPERARIO DE EQUIPO LIVIANO | HH   |                  | 1               | 0.1905        | 16.69          |
|                    | CAPATAZ                    | HH   | 0.10             | 0.0190          | 12.96         | 0.25           |
|                    | OPERARIO                   | HH   | 2.00             | 0.3810          | 11.57         | 4.41           |



|                                 |     |      |        |        |              |
|---------------------------------|-----|------|--------|--------|--------------|
| PEON                            | HH  | 1.00 | 0.1905 | 8.43   | 1.61         |
|                                 |     |      |        |        | <b>9.44</b>  |
| <b>MATERIALES</b>               |     |      |        |        |              |
| SOLDADURA TENACITO              | KG  |      | 0.8000 | 13.90  | 11.12        |
| MALLA DE ACERO 1/2"X1/2"        | M2  |      | 0.0856 | 125.00 | 10.70        |
| PLATINA DE ACERO DE 2"X1/4"X6M  | UND |      | 0.1750 | 72.28  | 12.65        |
|                                 |     |      |        |        | <b>34.47</b> |
| <b>EQUIPOS</b>                  |     |      |        |        |              |
| HERRAMIENTAS MANUALES           | %MO |      | 5.0000 | 9.44   | 0.47         |
| CIZALLA P/FIERRO CONST HASTA 1" | HM  | 0.60 | 0.1143 | 7.00   | 0.80         |
| CUERPO ANDAMIO METALICO         | DIA | 4.00 | 0.0952 | 7.00   | 0.67         |
| MOTOSOLDADORA DE 250 AMP        | HM  | 1.00 | 0.1905 | 9.00   | 1.71         |
|                                 |     |      |        |        | <b>3.65</b>  |

---

|                    |                           |                                      |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | <b>3.2</b>                | <b>MORERO EN FONDO C:A: 1:4</b>      |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | <b>8.0 M2/DIA</b>         | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M</b> |                  |                 |               | <b>25.62</b>   |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>                        | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |                                      |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH                                   | 0.10             | 0.1000          | 12.96         | 1.30           |
|                    | OPERARIO                  | HH                                   | 1.00             | 1.0000          | 11.57         | 11.57          |
|                    | PEON                      | HH                                   | 0.50             | 0.5000          | 8.43          | 4.22           |
|                    |                           |                                      |                  |                 |               | <b>17.08</b>   |
|                    | <b>MATERIALES</b>         |                                      |                  |                 |               |                |
|                    | CLAVOS PARA MADERA C/C 3" | KG                                   |                  | 0.0043          | 2.50          | 0.01           |
|                    | ARENA FINA                | M3                                   |                  | 0.0158          | 16.10         | 0.25           |
|                    | CEMENTO PORTLAND TIPO I   | BOL                                  |                  | 0.1402          | 13.98         | 1.96           |
|                    | AGUA                      | M3                                   |                  | 0.0042          | 9.00          | 0.04           |
|                    | REGLA DE MADERA           | PZA                                  |                  | 0.5500          | 3.5           | 1.93           |
|                    |                           |                                      |                  |                 |               | <b>4.19</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |                                      |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO                                  |                  | 5.0000          | 17.08         | 0.85           |
|                    | CUERPO ANDAMIO METALICOS  | DIA                                  | 4.00             | 0.5000          | 7.00          | 3.50           |
|                    |                           |                                      |                  |                 |               | <b>4.35</b>    |

---

|                    |                           |                                      |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | <b>4.1</b>                | <b>PISO VINILICO E=2MM 25X25CM</b>   |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | <b>20 M2/DIA</b>          | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M</b> |                  |                 |               | <b>9.30</b>    |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>                        | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |                                      |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH                                   | 0.10             | 0.0400          | 12.96         | 0.52           |
|                    | OPERARIO                  | HH                                   | 1.00             | 0.4000          | 11.57         | 4.63           |
|                    | PEON                      | HH                                   | 0.50             | 0.2000          | 8.43          | 1.69           |
|                    |                           |                                      |                  |                 |               | <b>6.83</b>    |
|                    | <b>MATERIALES</b>         |                                      |                  |                 |               |                |
|                    | PEGAMENTO ASFALTICO       | KG                                   |                  | 0.0043          | 2.50          | 0.01           |
|                    | VINILICO E=2MM 25X25CM    | M3                                   |                  | 0.0158          | 16.10         | 0.25           |
|                    |                           |                                      |                  |                 |               | <b>0.27</b>    |

| <b>EQUIPOS</b>         |     |      |  |        |      |             |
|------------------------|-----|------|--|--------|------|-------------|
| HERRAMIENTAS MANUALES  | %MO |      |  | 3.0000 | 6.83 | 0.20        |
| CORTADORA DE MADERA 2" | HM  | 1.00 |  | 0.4000 | 5.00 | 2.00        |
|                        |     |      |  |        |      | <b>2.20</b> |

**Partida** 4.2 **RESANE DE TARRAJEO**

**Rendimiento** 6.48 M2/DIA **COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M** 26.77

| CODIGO              | DESCRIPCION INSUMO        | UNIDAD | CUADRILLA | CANTIDAD | PRECIO | PARCIAL      |
|---------------------|---------------------------|--------|-----------|----------|--------|--------------|
| <b>MANO DE OBRA</b> |                           |        |           |          |        |              |
|                     | CAPATAZ                   | HH     | 0.10      | 0.1235   | 12.96  | 1.60         |
|                     | OPERARIO                  | HH     | 1.00      | 1.2345   | 11.57  | 14.28        |
|                     | PEON                      | HH     | 0.33      | 0.4074   | 8.43   | 3.43         |
|                     |                           |        |           |          |        | <b>19.32</b> |
| <b>MATERIALES</b>   |                           |        |           |          |        |              |
|                     | CLAVOS PARA MADERA C/C 3" | KG     |           | 0.0220   | 2.50   | 0.06         |
|                     | ARENA FINA                | M3     |           | 0.0160   | 16.10  | 0.26         |
|                     | CEMENTO PORTLAND TIPO I   | BOL    |           | 0.1170   | 13.98  | 1.64         |
|                     | MADERA TORNILLO           | M3     |           | 0.8500   | 2.23   | 1.90         |
|                     |                           |        |           |          |        | <b>3.84</b>  |
| <b>EQUIPOS</b>      |                           |        |           |          |        |              |
|                     | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO    |           | 3.0000   | 19.32  | 0.58         |
|                     | CUERPO ANDAMIO METALICOS  | DIA    | 3.00      | 0.4330   | 7.00   | 3.03         |
|                     |                           |        |           |          |        | <b>3.61</b>  |

**Partida** 4.3 **RESANE DE PINTURA**

**Rendimiento** 25.0 M2/DIA **COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M** 8.20

| CODIGO              | DESCRIPCION INSUMO       | UNIDAD | CUADRILLA | CANTIDAD | PRECIO | PARCIAL     |
|---------------------|--------------------------|--------|-----------|----------|--------|-------------|
| <b>MANO DE OBRA</b> |                          |        |           |          |        |             |
|                     | CAPATAZ                  | HH     | 0.10      | 0.0320   | 12.96  | 0.41        |
|                     | OPERARIO                 | HH     | 1.00      | 0.3200   | 11.57  | 3.70        |
|                     | PEON                     | HH     | 0.33      | 0.1058   | 8.43   | 0.89        |
|                     |                          |        |           |          |        | <b>5.01</b> |
| <b>MATERIALES</b>   |                          |        |           |          |        |             |
|                     | IMPRIMANTE               | KG     |           | 0.3000   | 2.50   | 0.75        |
|                     | LUA                      | M3     |           | 0.0600   | 16.10  | 0.97        |
|                     | PINTURA LATEX            | BOL    |           | 0.0550   | 13.98  | 0.77        |
|                     |                          |        |           |          |        | <b>2.48</b> |
| <b>EQUIPOS</b>      |                          |        |           |          |        |             |
|                     | HERRAMIENTAS MANUALES    | %MO    |           | 3.0000   | 5.01   | 0.15        |
|                     | CUERPO ANDAMIO METALICOS | DIA    | 2.00      | 0.0800   | 7.00   | 0.56        |
|                     |                          |        |           |          |        | <b>0.71</b> |

Anexo N° 6: Análisis de Precios Unitarios reforzamiento de FRP

|                    |                           |   |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|---|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.1                       | <b>MONTAJE Y DESMONTAJE DE TABIQUERIA LIVIANA, RETIRO DE ALFOMBRA DE LA ZONA DE TRABAJO</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 112.0 M2/DIA              | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 4.36           |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.0071          | 12.96         | 0.09           |
|                    | OPERARIO                  | HH  | 2.00             | 0.1429          | 11.57         | 1.65           |
|                    | PEON                      | HH  | 4.00             | 0.2857          | 8.43          | 2.41           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>4.15</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 4.15          | 0.21           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.21</b>    |
| <b>Partida</b>     | 1.2                       | <b>RETIRO DE PISO DE LOSETA</b>   |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 40.0 M2/DIA               | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 2.93           |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.0200          | 12.96         | 0.26           |
|                    | PEON                      | HH  | 1.50             | 0.3000          | 8.43          | 2.53           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>2.79</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 2.79          | 0.14           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.14</b>    |
| <b>Partida</b>     | 1.3                       | <b>ROTURA DE CONTRAPISO E=5CM</b>   |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 8.0 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 10.21          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.1000          | 12.96         | 1.30           |
|                    | PEON                      | HH  | 1.00             | 1.0000          | 8.43          | 8.43           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>9.73</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 9.73          | 0.49           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.49</b>    |
| <b>Partida</b>     | 1.4                       | <b>PICADO DE RECUBRIMIENTO DE LOSA ALIGERADA E=5CM</b>                                      |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 6.0 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 13.62          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH  | 0.10             | 0.1333          | 12.96         | 1.73           |
|                    | PEON                      | HH  | 1.00             | 1.3333          | 8.43          | 11.24          |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>12.97</b>   |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO   |                  | 5.0000          | 12.97         | 0.65           |
|                    |                           |   |                  |                 |               | <b>0.65</b>    |

|                    |                                 |                                       |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.5                             | <b>APUNTALAMIENTO DE LOSA</b>         |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 80.0 M2/DIA                     | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b> |                  |                 |               | 20.45          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>       | <b>UNIDAD</b>                         | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>             |                                       |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                         | HH                                    | 0.15             | 0.0071          | 12.96         | 0.09           |
|                    | OFICIAL                         | HH                                    | 1.00             | 0.1429          | 9.31          | 1.33           |
|                    | PEON                            | HH                                    | 2.00             | 0.2857          | 8.43          | 2.41           |
|                    |                                 |                                       |                  |                 |               | <b>3.83</b>    |
|                    | <b>MATERIALES</b>               |                                       |                  |                 |               |                |
|                    | MADERA TORNILLO                 | P2                                    |                  | 4.4000          | 2.23          | 9.81           |
|                    |                                 |                                       |                  |                 |               | <b>9.81</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                  |                                       |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES           | %MO                                   |                  | 5.0000          | 3.83          | 0.19           |
|                    | PUNTAL METALICO TELESCOPICO N°5 | DIA                                   | 27.00            | 0.3375          | 19.60         | 6.62           |
|                    |                                 |                                       |                  |                 |               | <b>6.81</b>    |

|                    |                            |   |                  |                 |               |                |
|--------------------|----------------------------|---|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.6                        | <b>PICADO DE RECUBRIMIENTO DE FONDO DE VIGUETAS PARA ADICION DE REFUERO E=3CM</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 2.0 M2/DIA                 | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>   |                  |                 |               | 109.81         |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>  | <b>UNIDAD</b>   | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>        |   |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                    | HH  | 0.10             | 0.4000          | 12.96         | 5.18           |
|                    | OFICIAL                    | HH  | 0.50             | 2.0000          | 9.31          | 18.62          |
|                    | PEON                       | HH  | 2.00             | 8.0000          | 8.43          | 67.44          |
|                    |                            |   |                  |                 |               | <b>91.24</b>   |
|                    | <b>EQUIPOS</b>             |   |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES      | %MO   |                  | 5.0000          | 91.24         | 4.56           |
|                    | CUERPO DE ANDAMIO METALICO | DIA   | 4.00             | 2.0000          | 7.00          | 14.00          |
|                    |                            |   |                  |                 |               | <b>18.56</b>   |

|                    |                            |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|----------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.6                        | <b>PICADO DE RECUBRIMIENTO DE FONDO DE LOSA SOLIDA E=3CM</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 2.5 M2/DIA                 | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>                        |                  |                 |               | 127.51         |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>  | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>        |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                    | HH   | 0.10             | 0.4000          | 12.96         | 5.18           |
|                    | OFICIAL                    | HH   | 0.50             | 2.0000          | 9.31          | 18.62          |
|                    | PEON                       | HH   | 2.00             | 10.0000         | 8.43          | 84.30          |
|                    |                            |  |                  |                 |               | <b>108.10</b>  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>             |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES      | %MO  |                  | 5.0000          | 108.10        | 5.41           |
|                    | CUERPO DE ANDAMIO METALICO | DIA  | 4.00             | 2.0000          | 7.00          | 14.00          |
|                    |                            |  |                  |                 |               | <b>19.41</b>   |

|                    |                           |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 1.7                       | <b>PICADA DE TARRAJEO Y RECUBRIMIENTO EN VIGAS (E=3cm)</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 0.8 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M2</b>                      |                  |                 |               | 522.86         |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |  |                  |                 |               |                |

|                            |     |      |         |        |               |
|----------------------------|-----|------|---------|--------|---------------|
| CAPATAZ                    | HH  | 0.10 | 1.9048  | 12.96  | 24.69         |
| OFICIAL                    | HH  | 0.50 | 9.5238  | 9.31   | 88.67         |
| PEON                       | HH  | 2.00 | 38.0920 | 8.43   | 321.12        |
|                            |     |      |         |        | <b>434.47</b> |
| <b>EQUIPOS</b>             |     |      |         |        |               |
| HERRAMIENTAS MANUALES      | %MO |      | 5.0000  | 434.47 | 21.72         |
| CUERPO DE ANDAMIO METALICO | DIA | 4.00 | 9.5238  | 7.00   | 66.67         |
|                            |     |      |         |        | <b>88.39</b>  |

---

|                    |                           |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|---------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 2.1                       | <b>ACARREO DE MATERIALES EXCEDENTE DE LOS PISOS DIFERENTES AL PRIMER NIVEL</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 4.5 M2/DIA                | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M3</b>  |                  |                 |               | 33.89          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b> | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>       |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                   | HH   | 0.10             | 0.1778          | 12.96         | 2.30           |
|                    | PEON                      | HH   | 2.00             | 3.5556          | 8.43          | 29.97          |
|                    |                           |  |                  |                 |               | <b>32.28</b>   |
|                    | <b>EQUIPOS</b>            |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES     | %MO  |                  | 5.0000          | 32.28         | 1.61           |
|                    |                           |  |                  |                 |               | <b>1.61</b>    |

---

|                    |                                |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|--------------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 2.2                            | <b>ELIMINACION DE DESMONTE. CARGUIO MANUAL/VOLQ 6M3 D=15KM</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 30.0 M2/DIA                    | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M3</b>                          |                  |                 |               | 46.54          |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>      | <b>UNIDAD</b>  | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>            |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                        | HH   | 0.10             | 0.0267          | 12.96         | 0.35           |
|                    | PEON                           | HH   | 4.00             | 1.0667          | 8.43          | 8.99           |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>9.34</b>    |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                 |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO  |                  | 3.0000          | 9.34          | 0.28           |
|                    | CAMION VOLQUETE 4X2 140-210 HP | HM   | 1                | 0.2667          | 138.44        | 36.92          |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>37.20</b>   |

---

|                    |                                |  |                  |                 |               |                |
|--------------------|--------------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| <b>Partida</b>     | 3.1                            | <b>SUMINISTRO Y COLOCACION DE FIBRA DE CARBONO</b> |                  |                 |               |                |
| <b>Rendimiento</b> | 40.0 M/DIA                     | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M</b>               |                  |                 |               | 139.07         |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>      | <b>UNIDAD</b>                                      | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>            |  |                  |                 |               |                |
|                    | PEON                           |  |                  |                 |               |                |
|                    | CAPATAZ                        | HH   | 0.10             | 0.0190          | 12.96         | 0.25           |
|                    | OPERARIO                       | HH   | 2.00             | 0.3810          | 11.57         | 4.41           |
|                    | PEON                           | HH   | 1.00             | 0.1905          | 8.43          | 1.61           |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>6.26</b>    |
|                    | <b>MATERIALES</b>              |  |                  |                 |               |                |
|                    | PEGAMENTO EPOXICO (4KG)        | JGO  |                  | 0.1760          | 154.00        | 27.10          |
|                    | MORTERO DE REPARACION (30KG)   | JGO  |                  | 0.0250          | 73.15         | 1.83           |
|                    | FIBRA DE CARBONO SIKACARBODOUR | M  |                  | 1.0500          | 98            | 102.90         |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>131.83</b>  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                 |  |                  |                 |               |                |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO  |                  | 5.0000          | 6.26          | 0.31           |
|                    | CUERPO ANDAMIO METALICO        | DIA  | 4.00             | 0.0952          | 7.00          | 0.67           |
|                    |                                |  |                  |                 |               | <b>0.98</b>    |

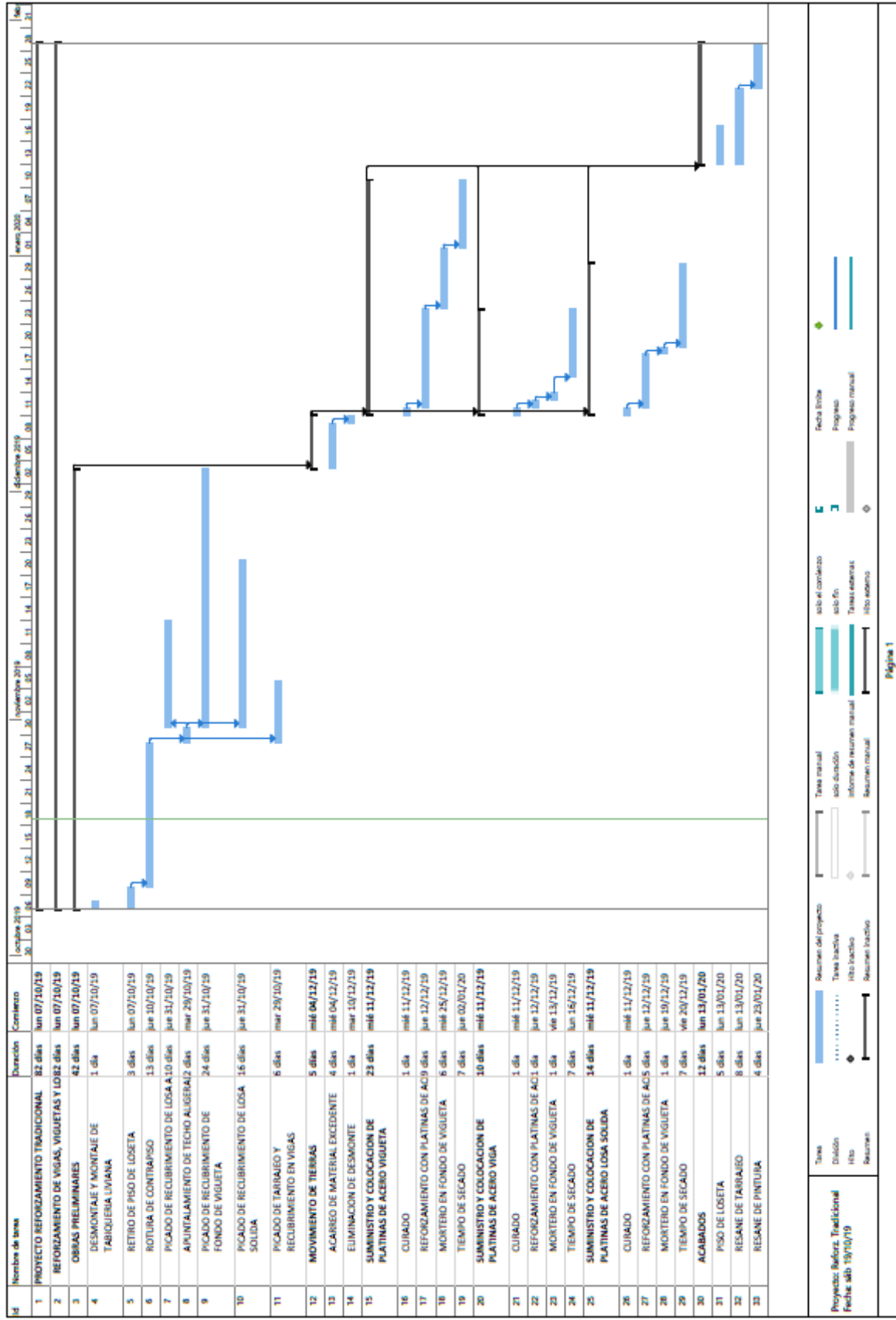
|                    |                                |  |                  |                 |               |                |  |
|--------------------|--------------------------------|--|------------------|-----------------|---------------|----------------|--|
| <b>Partida</b>     | 3.2                            | <b>PRUEBA DE ADHERENCIA DEL CONCRETO</b> |                  |                 |               |                |  |
| <b>Rendimiento</b> | 20 UND/DIA                     | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: UND</b>   |                  |                 |               | 126.67         |  |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>      | <b>UNIDAD</b>                            | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |  |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>            |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO     | HH                                       | 1.00             | 0.1000          | 16.69         | 1.67           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 1.67           |  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                 |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | EQUIPO ENSAYO DE ARRANCAMIENTO | HM                                       | 2.5              | 1.0000          | 125.00        | 125.00         |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 125.00         |  |
| <hr/>              |                                |  |                  |                 |               |                |  |
| <b>Partida</b>     | 4.1                            | <b>PISO VINILICO E=2MM 25X25CM</b>       |                  |                 |               |                |  |
| <b>Rendimiento</b> | 20 M2/DIA                      | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M</b>     |                  |                 |               | 9.30           |  |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>      | <b>UNIDAD</b>                            | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |  |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>            |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | CAPATAZ                        | HH                                       | 0.10             | 0.0400          | 12.96         | 0.52           |  |
|                    | OPERARIO                       | HH                                       | 1.00             | 0.4000          | 11.57         | 4.63           |  |
|                    | PEON                           | HH                                       | 0.50             | 0.2000          | 8.43          | 1.69           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 6.83           |  |
|                    | <b>MATERIALES</b>              |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | PEGAMENTO ASFALTICO            | KG                                       |                  | 0.0043          | 2.50          | 0.01           |  |
|                    | VINILICO E=2MM 25X25CM         | M2                                       |                  | 0.0158          | 16.10         | 0.25           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 0.27           |  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                 |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO                                      |                  | 3.0000          | 6.83          | 0.20           |  |
|                    | CORTADORA DE MADERA 2"         | HM                                       | 1.00             | 0.4000          | 5.00          | 2.00           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 2.20           |  |
| <hr/>              |                                |  |                  |                 |               |                |  |
| <b>Partida</b>     | 4.2                            | <b>RESANE DE TARRAJEO</b>                |                  |                 |               |                |  |
| <b>Rendimiento</b> | 6.48 M2/DIA                    | <b>COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M</b>     |                  |                 |               | 26.77          |  |
| <b>CODIGO</b>      | <b>DESCRIPCION INSUMO</b>      | <b>UNIDAD</b>                            | <b>CUADRILLA</b> | <b>CANTIDAD</b> | <b>PRECIO</b> | <b>PARCIAL</b> |  |
|                    | <b>MANO DE OBRA</b>            |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | CAPATAZ                        | HH                                       | 0.10             | 0.1235          | 12.96         | 1.60           |  |
|                    | OPERARIO                       | HH                                       | 1.00             | 1.2345          | 11.57         | 14.28          |  |
|                    | PEON                           | HH                                       | 0.33             | 0.4074          | 8.43          | 3.43           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 19.32          |  |
|                    | <b>MATERIALES</b>              |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | CLAVOS PARA MADERA C/C 3"      | KG                                       |                  | 0.0220          | 2.50          | 0.06           |  |
|                    | ARENA FINA                     | M3                                       |                  | 0.0160          | 16.10         | 0.26           |  |
|                    | CEMENTO PORTLAND TIPO I        | BOL                                      |                  | 0.1170          | 13.98         | 1.64           |  |
|                    | MADERA TORNILLO                | M3                                       |                  | 0.8500          | 2.23          | 1.90           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 3.84           |  |
|                    | <b>EQUIPOS</b>                 |  |                  |                 |               |                |  |
|                    | HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO                                      |                  | 3.0000          | 19.32         | 0.58           |  |
|                    | CUERPO ANDAMIO METALICOS       | DIA                                      | 3.00             | 0.4330          | 7.00          | 3.03           |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               |                |  |
|                    |                                |  |                  |                 |               | 3.61           |  |
| <hr/>              |                                |  |                  |                 |               |                |  |

| Partida     | 4.3                      | RESANE DE PINTURA             |           |          |        |         |  |
|-------------|--------------------------|-------------------------------|-----------|----------|--------|---------|--|
| Rendimiento | 25.0 M2/DIA              | COSTO UNITARIO DIRECTO POR: M |           |          |        | 8.20    |  |
| CODIGO      | DESCRIPCION INSUMO       | UNIDAD                        | CUADRILLA | CANTIDAD | PRECIO | PARCIAL |  |
|             | <b>MANO DE OBRA</b>      |                               |           |          |        |         |  |
|             | CAPATAZ                  | HH                            | 0.10      | 0.0320   | 12.96  | 0.41    |  |
|             | OPERARIO                 | HH                            | 1.00      | 0.3200   | 11.57  | 3.70    |  |
|             | PEON                     | HH                            | 0.33      | 0.1058   | 8.43   | 0.89    |  |
|             |                          |                               |           |          |        | 5.01    |  |
|             | <b>MATERIALES</b>        |                               |           |          |        |         |  |
|             | IMPRIMANTE               | KG                            |           | 0.3000   | 2.50   | 0.75    |  |
|             | LIJA                     | M3                            |           | 0.0600   | 16.10  | 0.97    |  |
|             | PINTURA LATEX            | BOL                           |           | 0.0550   | 13.98  | 0.77    |  |
|             |                          |                               |           |          |        | 2.48    |  |
|             | <b>EQUIPOS</b>           |                               |           |          |        |         |  |
|             | HERRAMIENTAS MANUALES    | %MO                           |           | 3.0000   | 5.01   | 0.15    |  |
|             | CUERPO ANDAMIO METALICOS | DIA                           | 2.00      | 0.0800   | 7.00   | 0.56    |  |
|             |                          |                               |           |          |        | 0.71    |  |



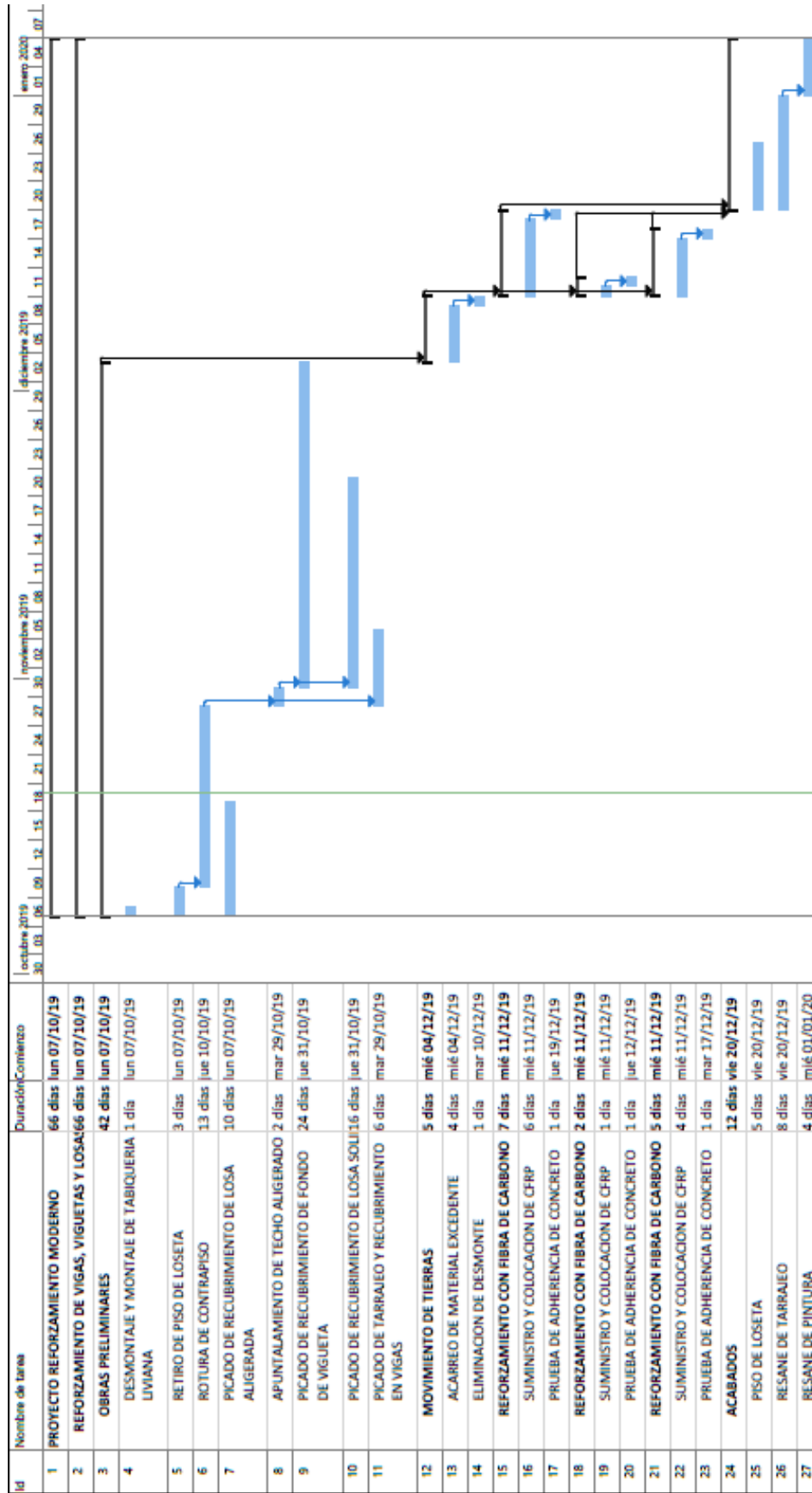
Anexo N° 7: Cronograma Reforzamiento con Platina de Acero

| Tradicional (Platina de Acero)                                  | Metrado | Unidad         | Rendimiento | Tiempo      |
|---|---------|----------------|-------------|-------------|
| <b>Obras Preliminares</b>                                       |         |                |             | <b>dias</b> |
| Desmontaje y montaje de tabiquería liviana                      | 18.50   | M <sup>2</sup> | 112         | 1           |
| retiro de piso de loseta  | 98.90   | M <sup>2</sup> | 40          | 3           |
| rotura de contrapiso  | 98.90   | M <sup>2</sup> | 8           | 13          |
| Picado de recubrimiento de losa                                 | 59.34   | M <sup>2</sup> | 6           | 10          |
| Apuntalamiento de techo aligerado                               | 98.90   | M <sup>2</sup> | 80          | 2           |
| Picado de recubrimiento de fondo de vigueta                     | 46.55   | M <sup>2</sup> | 2           | 24          |
| Picado de recubrimiento de losa sólida                          | 39.56   | M <sup>2</sup> | 2.5         | 16          |
| Picado de tarrajeo y recubrimiento en vigas                     | 2.30    | M <sup>2</sup> | 0.42        | 6           |
| <b>Movimiento de Materiales y desmonte</b>                      |         |                |             |             |
| Acarreo de material excedente                                   | 17.54   | M <sup>3</sup> | 4.5         | 4           |
| Eliminación de desmonte   | 17.54   | M <sup>3</sup> | 30          | 1           |
| <b>Suministro y colocación de platinas de acero Vigueta</b>     |         |                |             |             |
| Reforzamiento con platinas de acero                             | 210.04  | M              | 25          | 9           |
| Mortero en fondo de vigueta                                     | 46.55   | M <sup>2</sup> | 8           | 6           |
| <b>Suministro y colocación de platinas de acero Viga</b>        |         |                |             |             |
| Reforzamiento con platinas de acero                             | 17.50   | M              | 25          | 1           |
| Mortero en fondo de vigueta                                     | 0.18    | M3             | 8           | 1           |
| <b>Suministro y colocación de platinas de acero losa sólida</b> |         |                |             |             |
| Reforzamiento con platinas de acero                             | 122.52  | M              | 25          | 5           |
| Mortero en fondo de losa  | 1.86    | M3             | 8           | 1           |
| <b>Acabados</b>   |         |                |             |             |
| Piso de loseta  | 98.90   | M <sup>2</sup> | 20          | 5           |
| Resane de tarrajeo  | 46.99   | M <sup>2</sup> | 6.48        | 8           |
| Resane de pintura   | 98.67   | M <sup>2</sup> | 25          | 4           |



Anexo N° 8: Cronograma Reforzamiento con FRP

| <b>Tradicional (Platina de Acero)</b>                  | <b>Metrado</b> | <b>Unidad</b>  | <b>Rendimiento</b> | <b>Tiempo</b> |
|--|----------------|----------------|--------------------|---------------|
| <b>Obras Preliminares</b>                              |                |                |                    |               |
| Desmontaje y montaje de tabiquería liviana             | 18.50          | M <sup>2</sup> | 112                | 1             |
| retiro de piso de loseta                               | 98.90          | M <sup>2</sup> | 40                 | 3             |
| rotura de contrapiso                                   | 98.90          | M <sup>2</sup> | 8                  | 13            |
| Picado de recubrimiento de losa aligerada              | 59.34          | M <sup>2</sup> | 6                  | 10            |
| Apuntalamiento de losa                                 | 98.90          | M <sup>2</sup> | 80                 | 2             |
| Picado de recubrimiento de fondo de vigueta            | 46.55          | M <sup>2</sup> | 2                  | 24            |
| Picado de recubrimiento de losa sólida                 | 39.56          | M <sup>2</sup> | 2.5                | 16            |
| Picado de tarrajeo y recubrimiento en vigas            | 2.30           | M <sup>2</sup> | 0.42               | 6             |
| <b>Movimiento de Materiales y desmonte</b>             |                |                |                    |               |
| Acarreo de material excedente                          | 17.54          | M <sup>3</sup> | 4.5                | 4             |
| Eliminación de desmonte                                | 17.54          | M <sup>3</sup> | 30                 | 1             |
| <b>Suministro y colocación de FRP Vigueta</b>          |                |                |                    |               |
| Suministro y colocación FRP                            | 210.04         | M              | 40                 | 6             |
| Prueba de Adherencia                                   | 1              | UND            | 1                  | 1             |
| <b>Suministro y colocación de platinas de FRP Viga</b> |                |                |                    |               |
| Suministro y colocación FRP                            | 17.50          | M              | 40                 | 1             |
| Prueba de Adherencia                                   | 1              | UND            | 1                  | 1             |
| <b>Suministro y colocación de FRP losa sólida</b>      |                |                |                    |               |
| Suministro y colocación FRP                            | 122.52         | M              | 40                 | 4             |
| Prueba de Adherencia                                   | 1              | UND            | 1                  | 1             |
| <b>Acabados</b>  |                |                |                    |               |
| Piso de loseta   | 98.90          | M <sup>2</sup> | 20                 | 5             |
| Resane de tarrajeo                                     | 46.99          | M <sup>2</sup> | 6.48               | 8             |
| Resane de pintura                                      | 98.67          | M <sup>2</sup> | 25                 | 4             |



■ Tarea inactiva   
 ⬇ Hito inactivo   
 ⬆ Informe de resumen manual   
 ⬆ Hito externo   
 ⬆ Fecha Emite   
 ⬆ Progreso   
 ⬆ Progreso manual

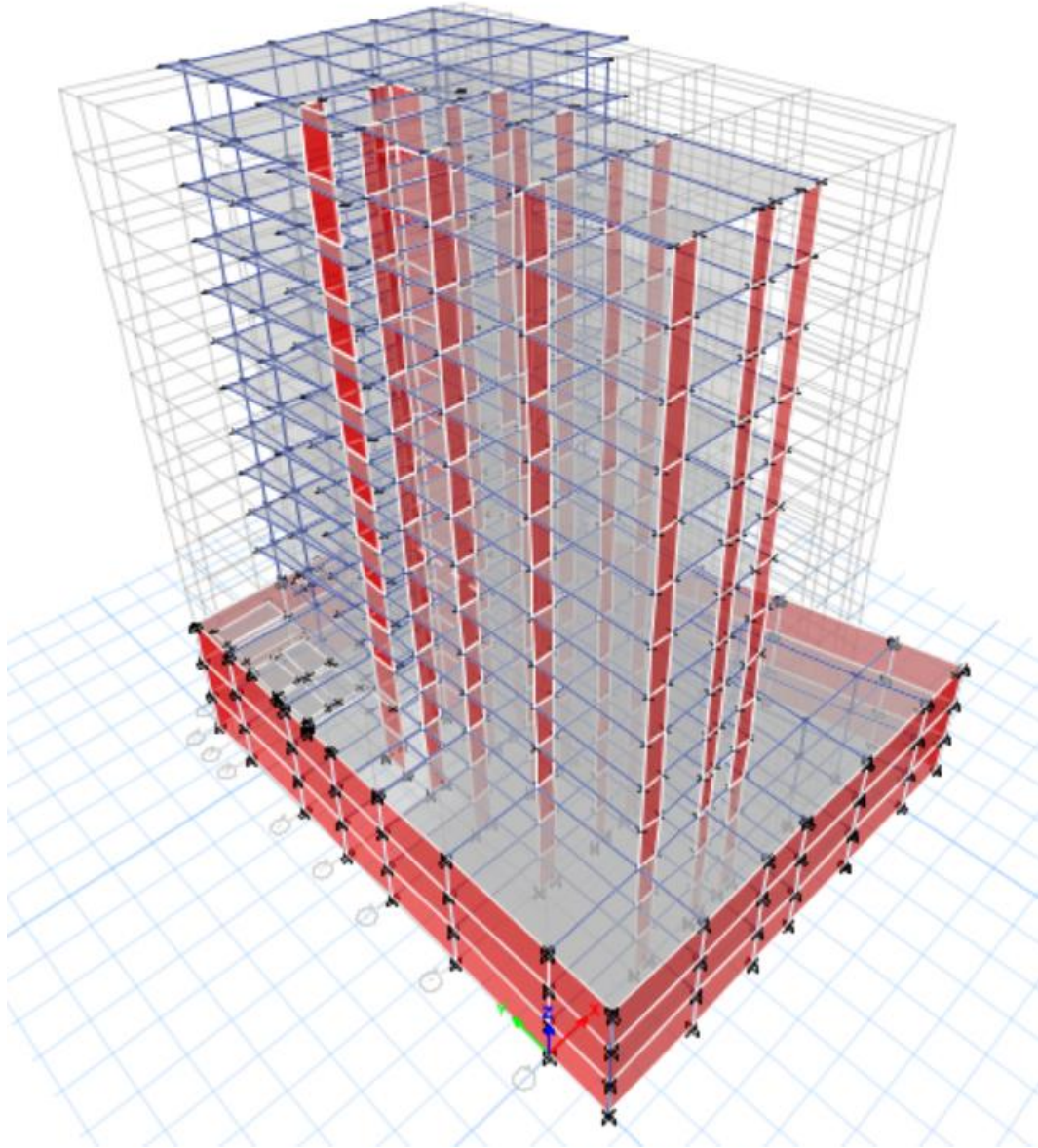
⬆ Tarea manual   
 ⬆ Resumen manual   
 ⬆ solo el comienzo   
 ⬆ solo fin   
 ⬆ Tareas externas

■ Tarea   
⬆ División   
⬆ Hito   
⬆ Resumen   
⬆ Resumen del proyecto

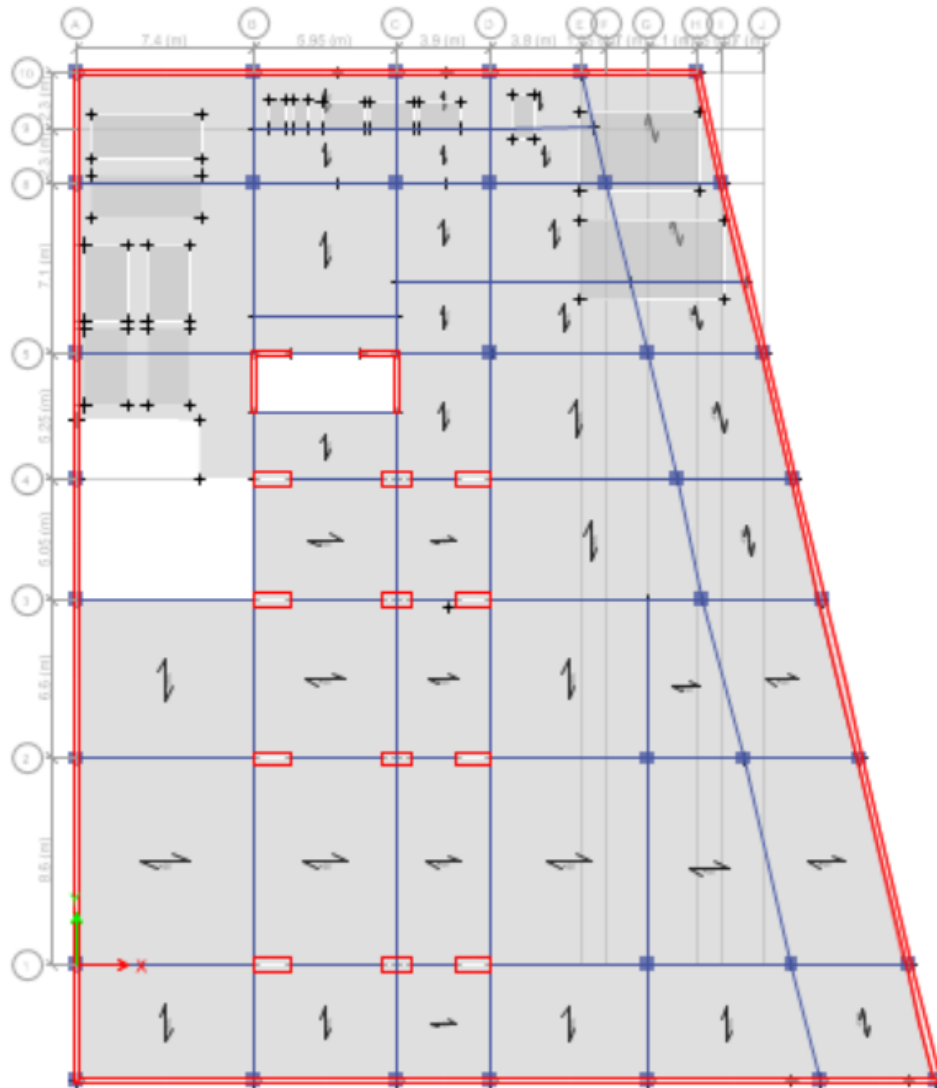
Proyecto: Reforz. Moderno  
 Fecha: dom 20/10/19

Página 1

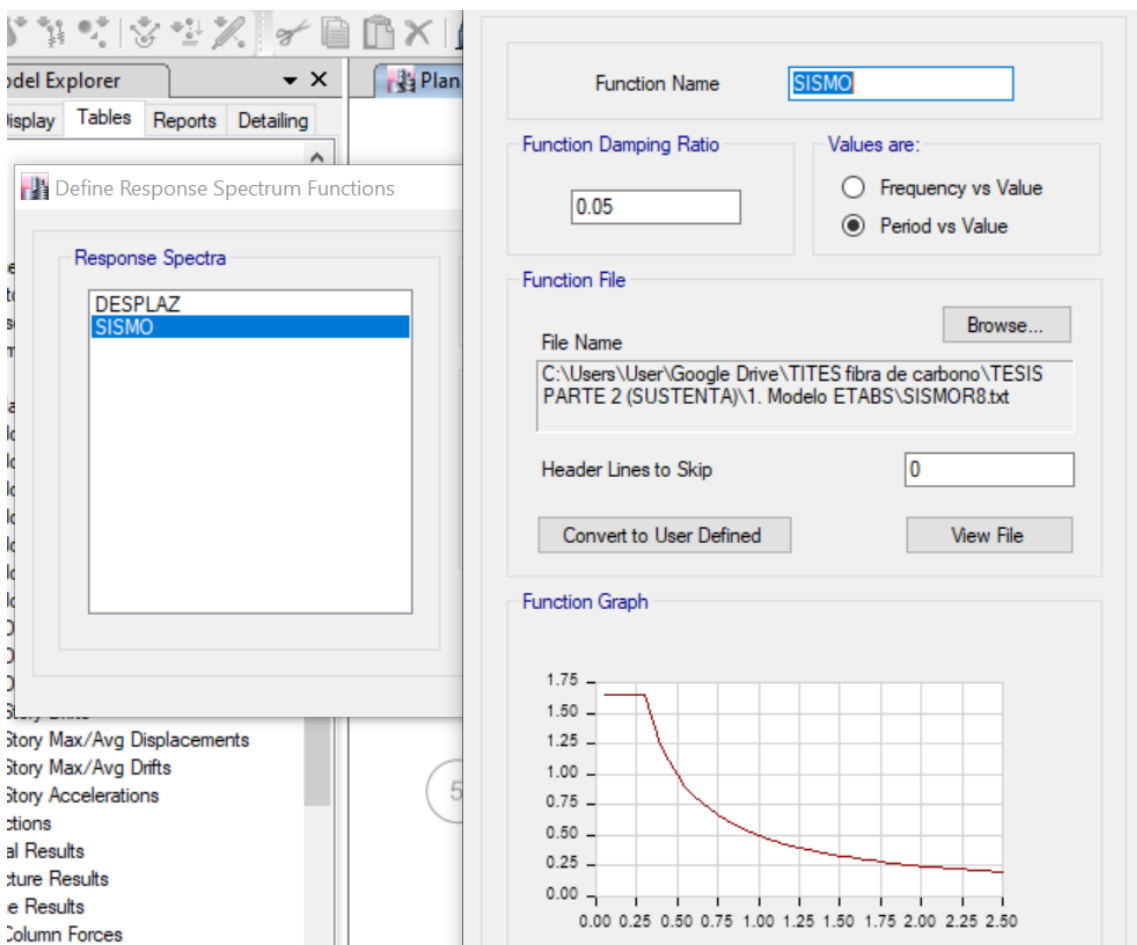
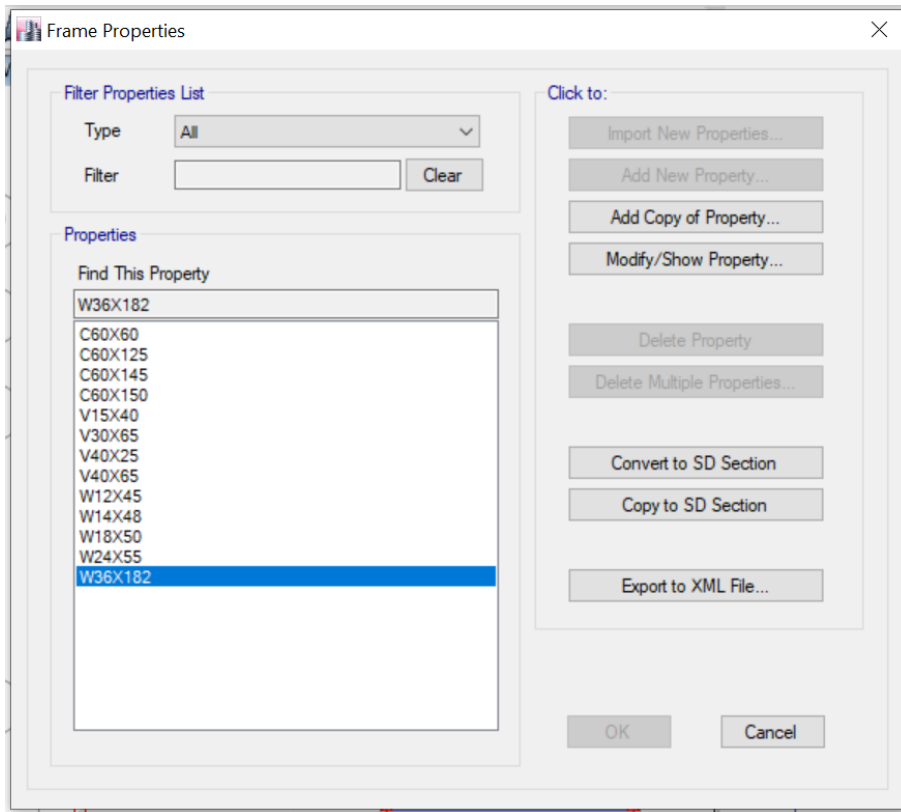
Anexo N° 9: Modelo Matemático de la Edificación

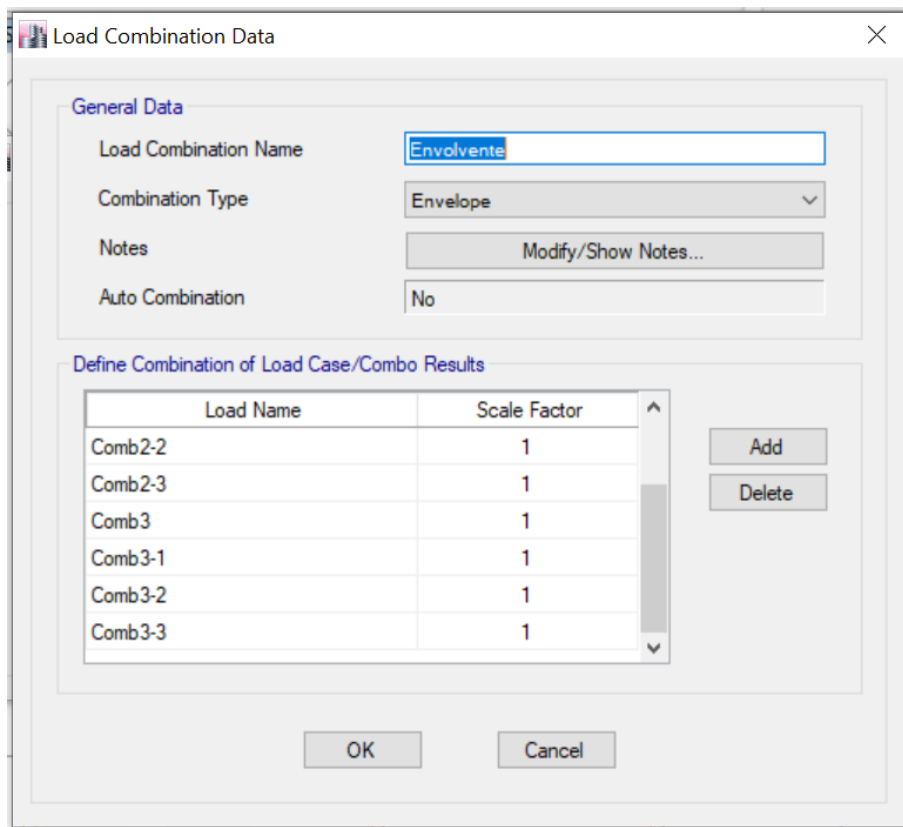
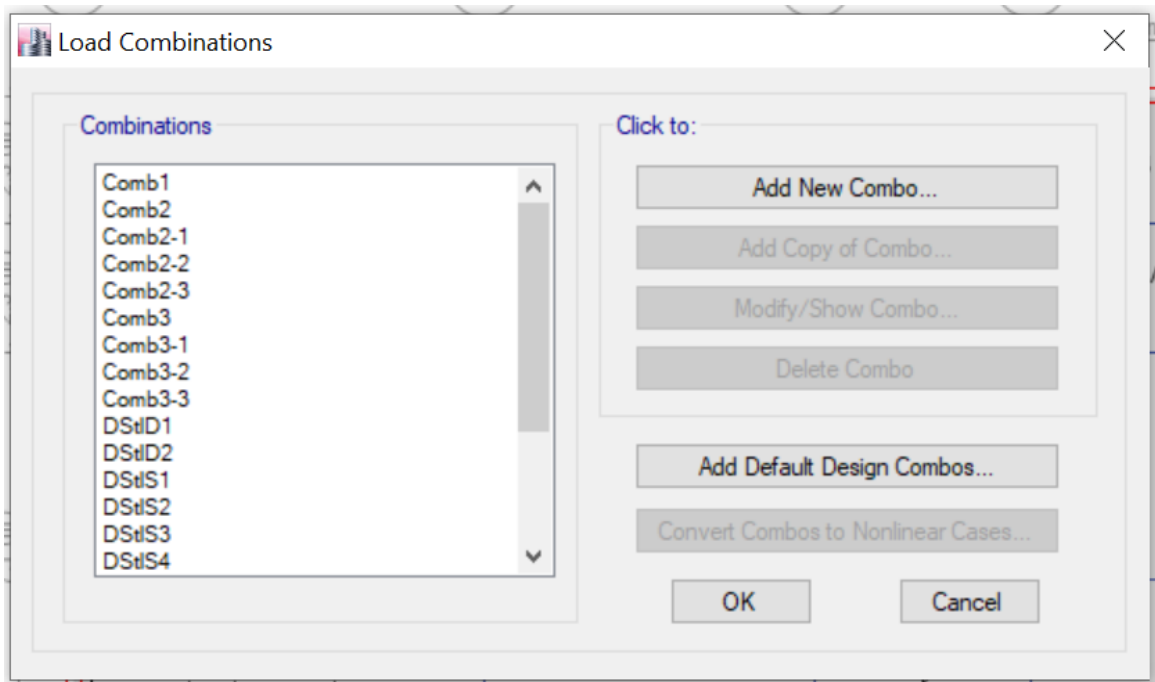


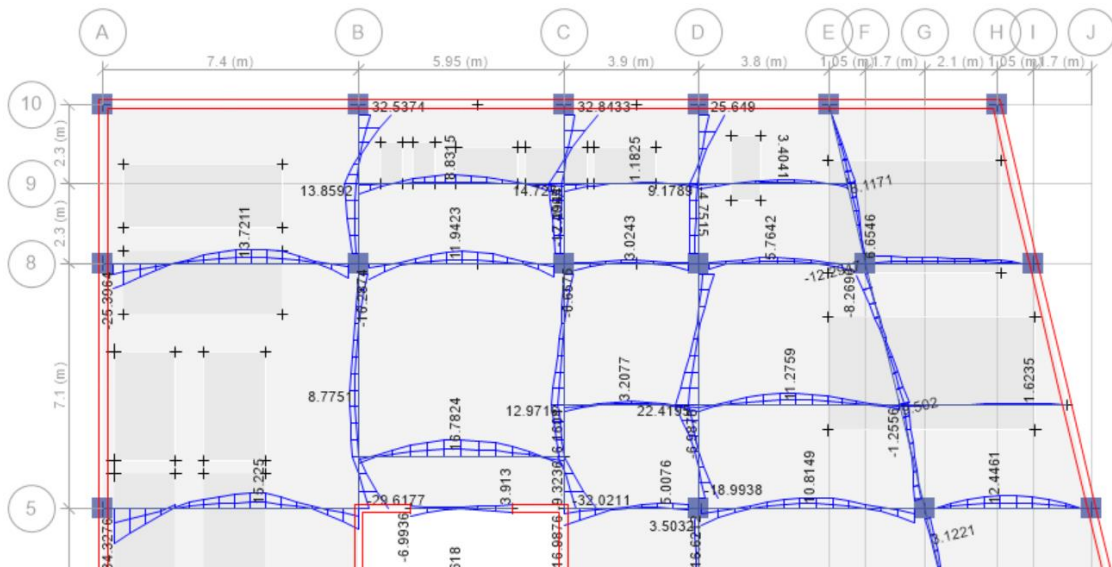
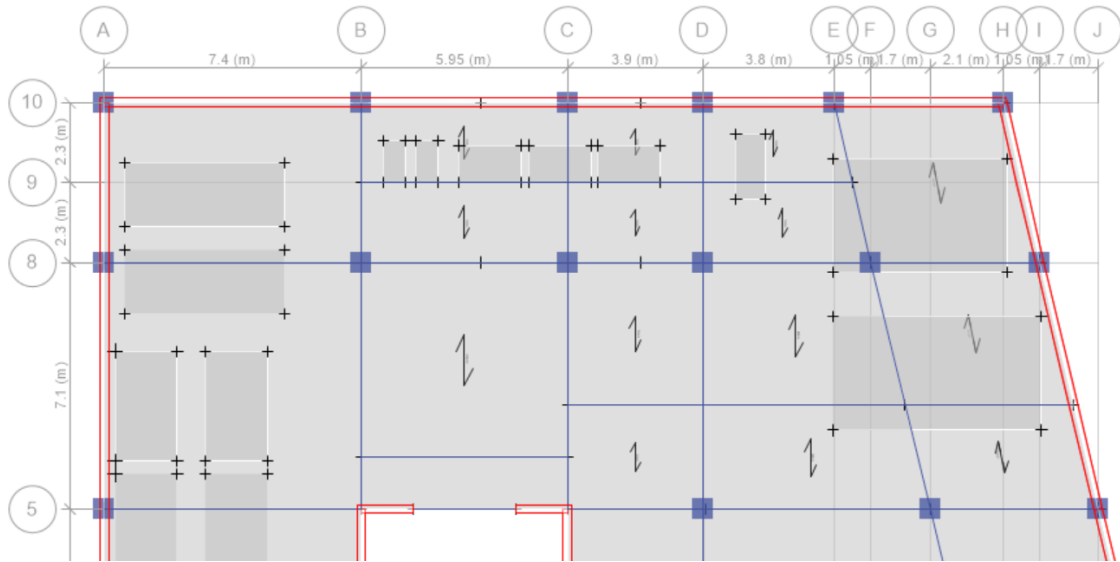
Plan View - Story3 - Z = 10.5 (m)

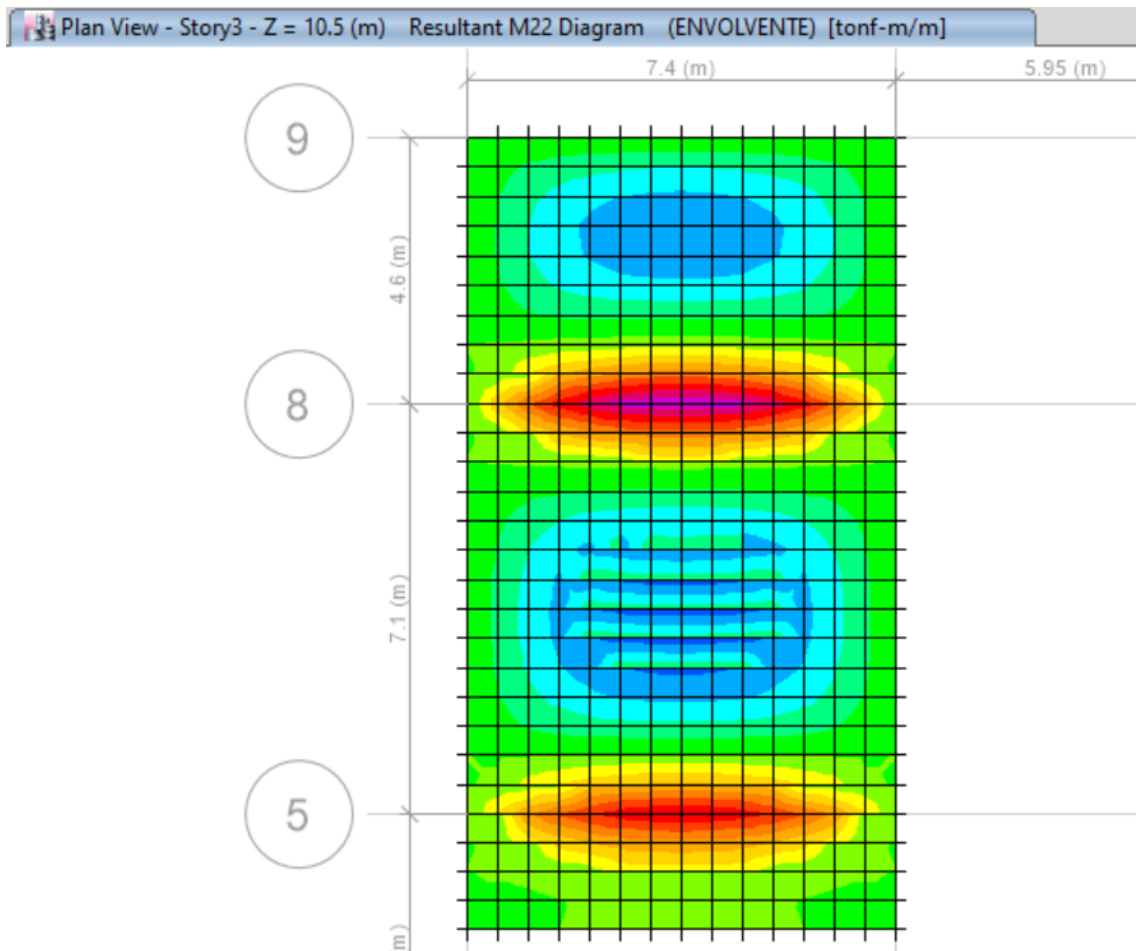
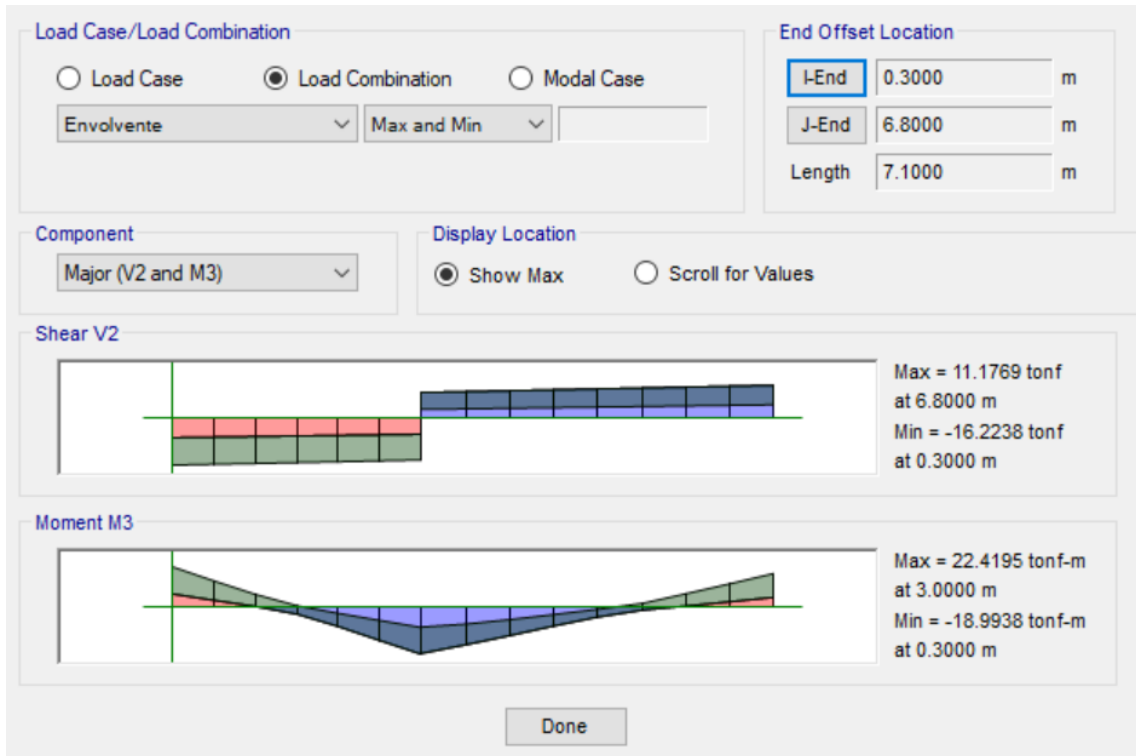




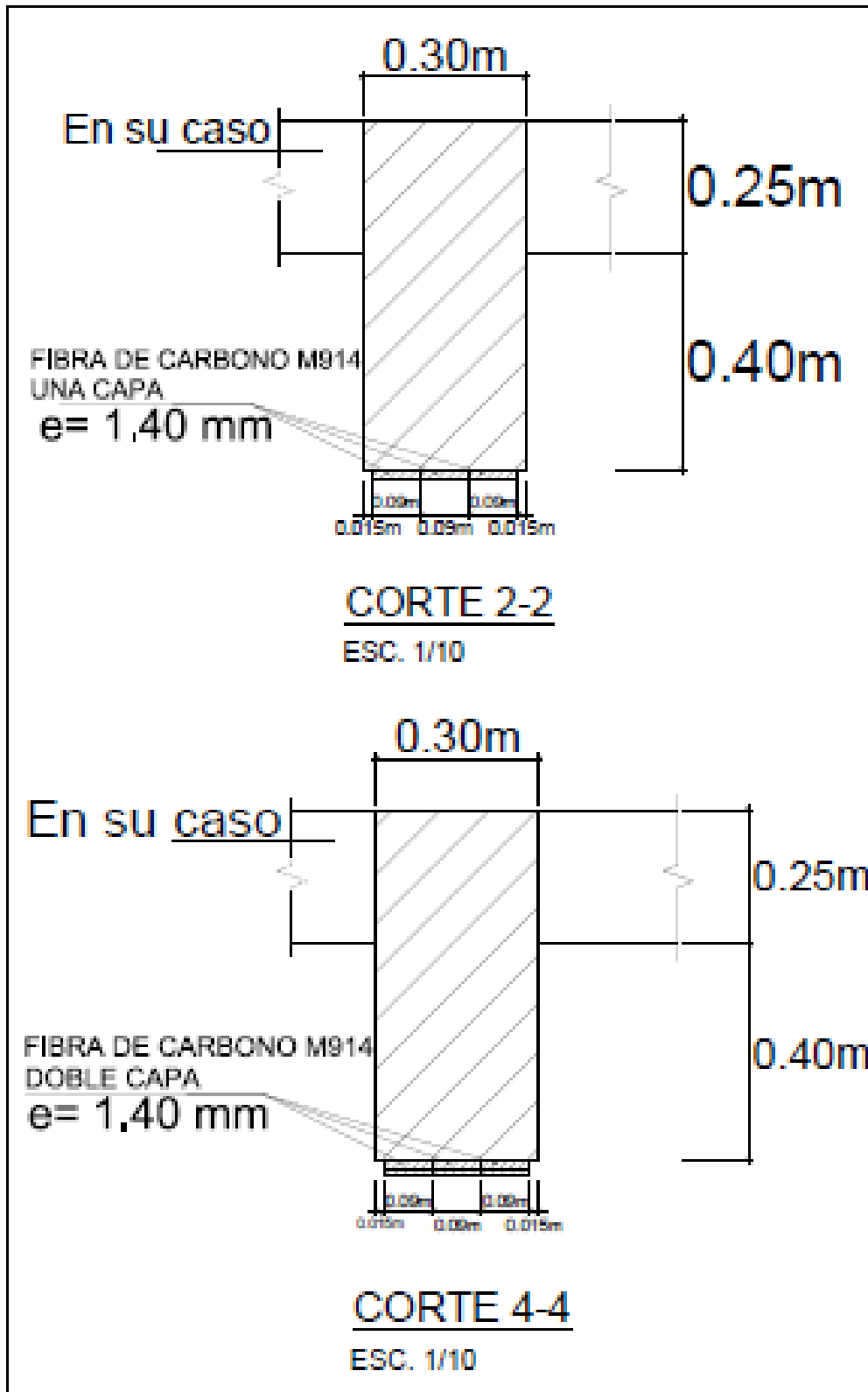


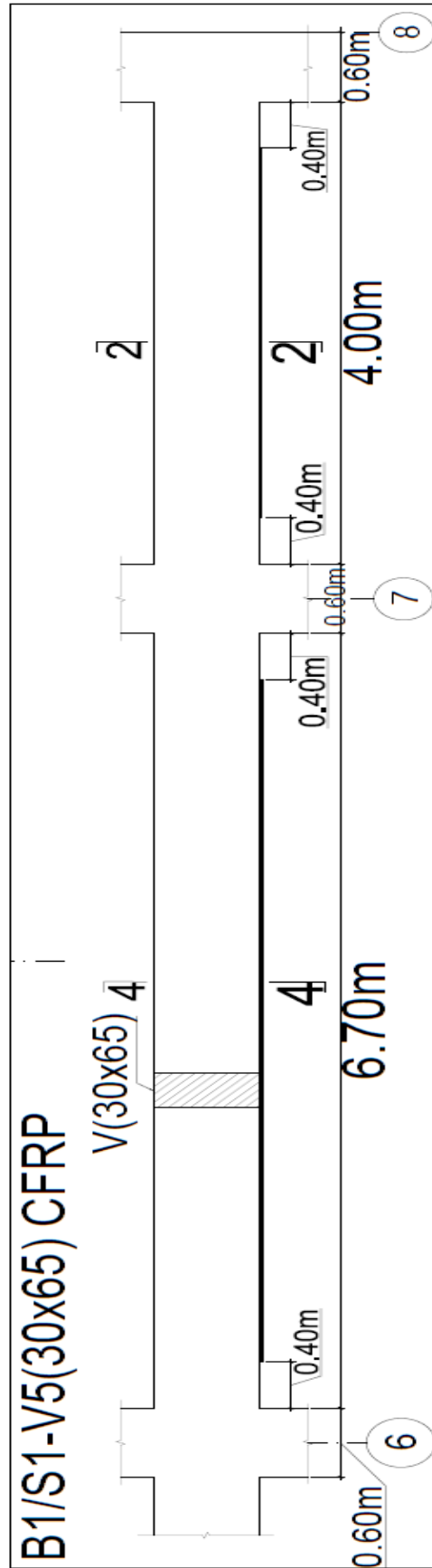






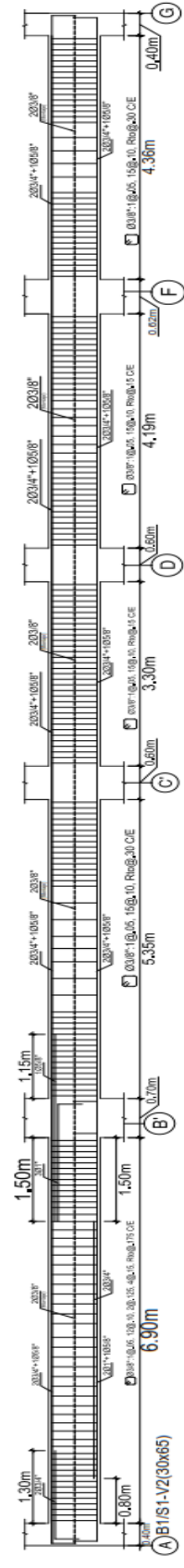
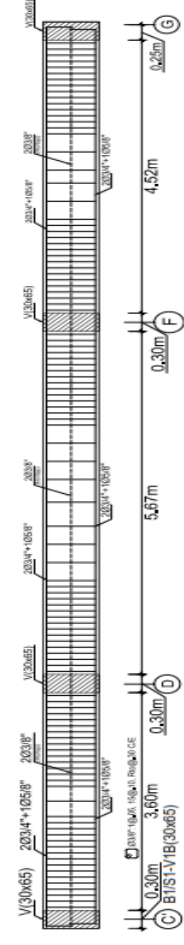
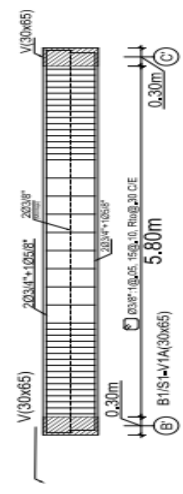
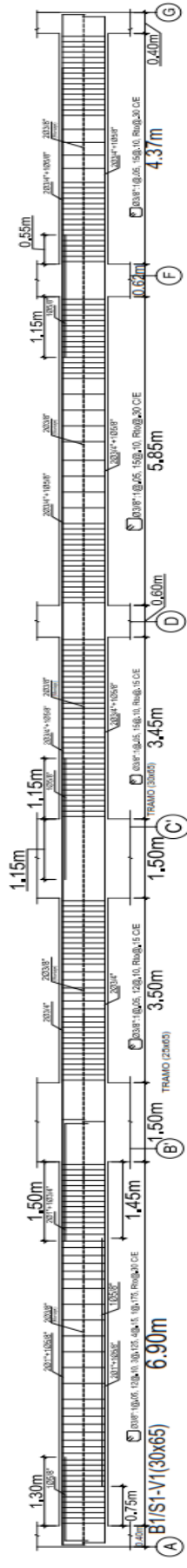
# VISTAS DE CORTES



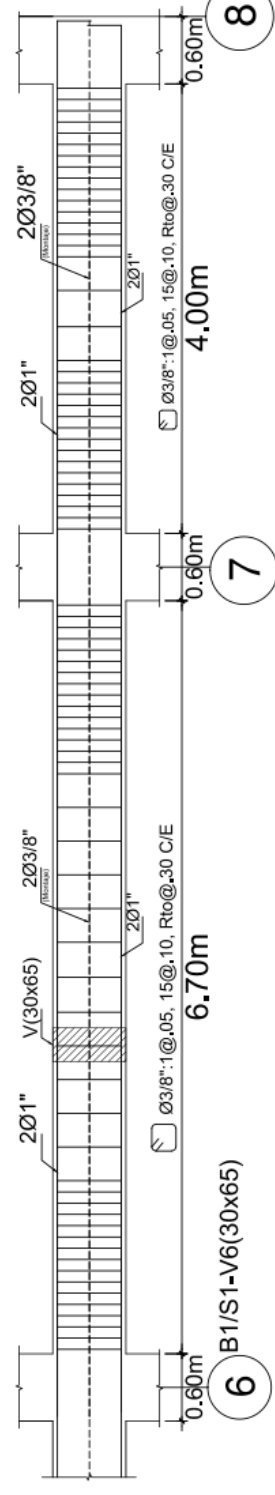
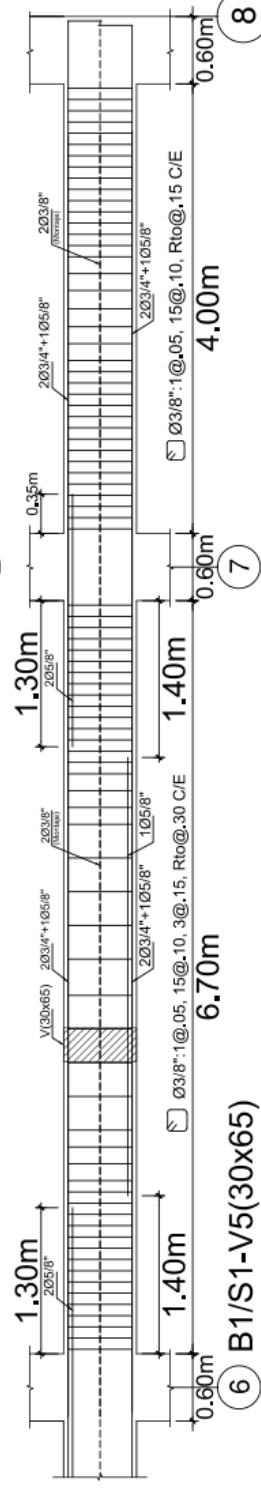
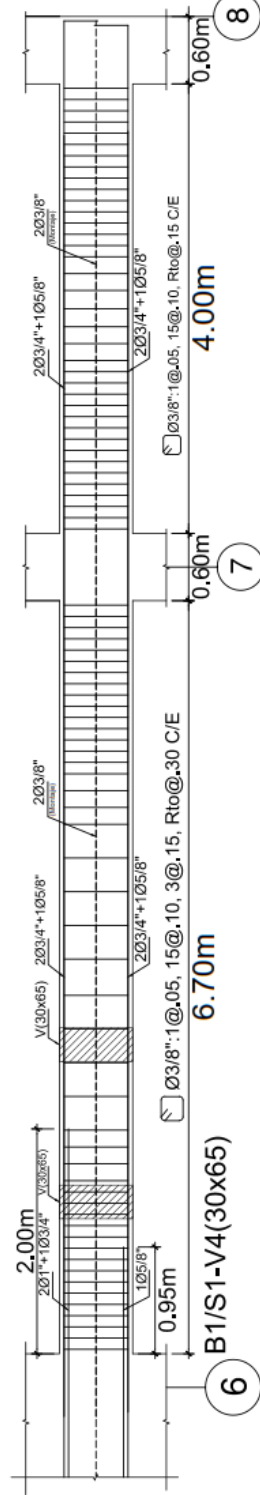
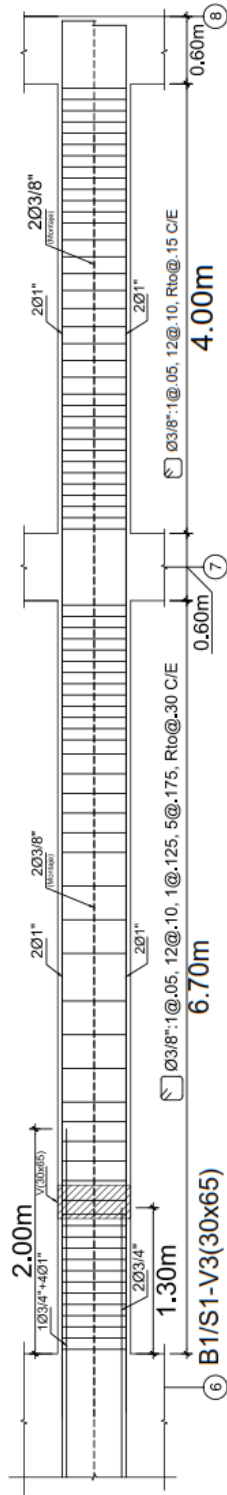


Vista de la viga B1/S1-V5(30x65) CFRP

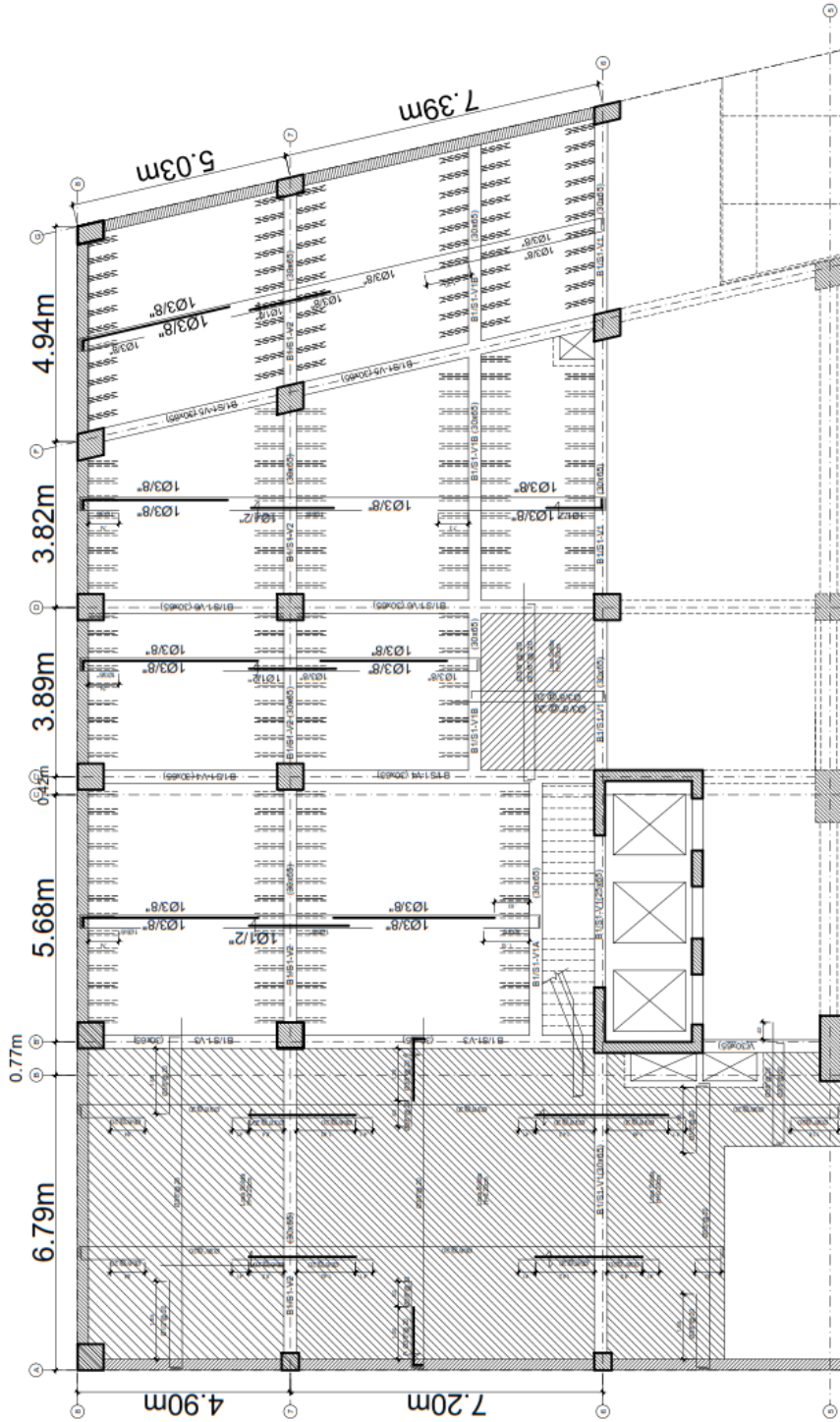
Anexo N° 12: Vistas de las vigas en la planta








Anexo N° 13: Plano estructural As Built de la planta a reforzar



|   |  |              |  |
|---|--|--------------|--|
| PROYECTO:   | REFORZ ESTRUCTURAL                       | PROPIETARIO: | REPSOL   |
| CAD:  | REFORZ ESTRUCTURAL                       | DESCRIPCIÓN: | PLANO ESTRUCTURAL DE LA PLANTA A REFORZAR                              |
| PROFESIONAL:  | Edwin José Arauz Rojas<br>ING. CIP. 0387 | DIRECCIÓN:   | C/ Víctor Andrés Beltrando, 147, Centro empresarial San Isidro Torre 5 |
| <br><b>Universidad Ricardo Palma</b> |  | ESCALA:      | 1/100  |
|   |  | FECHA:       | OCTUBRE 2019   |
|   |  |              | PLANO NO. <b>E - 01</b>  |

Anexo N° 14: Reforzamiento con fibras de carbono

