

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LA FIBRA DE CARBONO COMO ALTERNATIVA
PARA REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN VIGAS DE
HORMIGÓN ARMADO”**

Elaborado por

DIANA MADELEINE CABALLERO CÁCERES

Tutor

Prof. Msc. Ing. Fredy Gabriel Ramírez Villanueva

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2022

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniera Civil aprobado en representación de la Facultad de Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Acta N°: _____

Fecha: _____

Calificación Obtenida: _____

DEDICATORIA:

Dedico este Proyecto Final de Grado a Dios todo poderoso, a la Virgencita de Caacupé, a mis abuelos y a mi hermanito Ariel que siempre me acompañan y me cuidan desde arriba.

También a mi mamá y papá; Aurora y Adelfo porque es más triunfo de ellos que mío.

AGRADECIMIENTOS:

Doy gracias a Dios y a mis ángeles que me acompañaron siempre.

Agradezco de corazón a mis Padres, Hermanas y Hermano por el apoyo constante a lo largo de la carrera.

Agradecimiento especial a mis facu amigos, el grupito de metan en su $g(x)$ y las maravillas por los años de estudio y sacrificio que conlleva esta hermosa carrera de Ingeniería Civil.

“ANÁLISIS DE LA FIBRA DE CARBONO COMO ALTERNATIVA PARA REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO”

DIANA MADELEINE CABALLERO CÁCERES

RESUMEN

En la actualidad muchos países alrededor del mundo buscan alternativas de solución y/o reparación, de manera a no llegar a perder cuantiosas inversiones económicas como son las edificaciones de toda construcción civil. Comúnmente se piensa que las edificaciones conformadas de hormigón armado tienen larga vida útil y que no necesitan mantenimientos, sin embargo, a pesar de los crecientes avances en la tecnología del hormigón, es cada vez mayor, el número de estructuras que precisan ser reparadas por daños o reforzadas para obtener mayor desempeño.

Como respuesta a estas necesidades, nace la importancia del reforzamiento, por tanto en el presente proyecto de fin de grado se estudió a un material compuesto por Fibra de Carbono como una alternativa para reforzar en un componente de la estructura de hormigón armado, esta es la viga, para que al implementar el método de refuerzo, mejore y cumpla con las solicitaciones, ya sea a flexión, con el objeto de incrementar el valor del momento último inicial de la sección, como también a cortante, con el objeto de incrementar la respuesta a esfuerzos cortantes de dicho elemento estructural.

Palabras claves:

- Reparación
- Reforzar
- Fibra de Carbono
- Viga
- Hormigón Armado

“CARBON FIBER ANALYSIS AS AN ALTERNATIVE FOR STRUCTURAL REINFORCEMENT IN REINFORCED CONCRETE BEAMS”

DIANA MADELEINE CABALLERO CÁCERES

ABSTRACT

At the present time, many countries around the world are looking for alternative solutions and/or repairs, so as not to lose large financial investments as are the buildings of all civil construction. It is commonly thought that the buildings formed reinforced concrete have a long service life and they do not need maintenance, but nevertheless despite increasing advances in technology of the concrete, it is growing, the number of structures that need to be repaired for damage or reinforced for better performance.

In response to these needs, the importance of reinforcement is born, therefore, in this end-of-degree Project was studied a material composed of Carbon fiber as an alternative to reinforce in a component of the reinforced concrete structure, this is the beam, so that when implementing the reinforcement method, improve and meet requests, either bending, in order to increase the value of the last initial moment of the section, as well as shear, in order to increase the response to shear stresses of said structural element.

Keywords:

- Repair
- Reinforcement
- Carbon fiber
- Beam
- Reinforced concrete

INDICE

1. CAPITULO I	11
1.1 INTRODUCCION GENERAL	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.3 JUSTIFICACION	15
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.4.1 Objetivo General	17
1.4.2 Objetivo Especifico	17
2. CAPITULO II: LA FIBRA DE CARBONO	18
2.1 ANTECEDENTES	18
2.2 Proceso de Obtención	19
2.3 Características de las Fibras de Carbono	20
2.3.1 Propiedad Mecánica	21
2.3.2 La Densidad	22
2.3.3 Capacidad de resistencia al Calor.....	23
2.4 La Fibra de Carbono y sus Aplicaciones	23
2.4.1 Campo de Aplicación	23
2.4.2 Aplicación a Vigas de Hormigón Armado.....	23
2.5 Cálculo	24
3. CAPITULO 3: LA NECESIDAD DE REFORZAR LA VIGA DE HORMIGON ARMADO.....	26
3.1 ¿Cómo y cuándo es rentable reforzar una Estructura con Fibra de Carbono?	26
3.2 Análisis Patológico: Evaluación y diagnóstico de Estructuras de Hormigón Armado.....	28
3.2.1 Evaluación.....	29
3.2.2 Diagnóstico	31
3.2.3 Intervenciones de Reparación; Rehabilitación y Refuerzo	34

3.2.4	Tipos de Daño según el grado de deterioro de la Estructura	34
3.2.5	Clasificación de las Reparaciones según el nivel de degradación previsto.....	34
3.3	Causas de Daños Estructurales.....	35
3.3.1	Causas de riesgo de daños estructural en Vigas	36
3.3.2	Medio Ambiente Agresivo.....	37
3.3.3	Efecto de la Fatiga y las cargas de impacto.....	38
3.3.4	Factores de Riesgo en el Diseño y Ejecución.....	39
3.4	Cuando reforzar una estructura.....	41
4.	CAPITULO 4: METODO DE REFUERZO A VIGA DE HORMIGÓN ARMADO.....	42
4.1	Reparaciones de vigas de hormigón armado asociadas a los refuerzos ..	42
4.1.1	Resina Epoxi	43
4.2	Reparación de Fisuras por Inyección Epoxi.....	45
4.2.1	Problemas generales asociados a las fisuras.....	45
4.2.2	Fases de reparación de una fisura.....	45
4.3	Reparación de Vigas causado por la Corrosión.....	46
4.4	Refuerzo a Flexión de Vigas de Hormigón Armado	47
4.4.1	Sistema Construcción	48
4.4.2	Colocación de nueva armadura sin recrecido del canto de la viga	48
4.4.3	Calculo del refuerzo a flexión de vigas de hormigón armado por recrecido.....	49
4.5	Refuerzos a Cortante de Vigas de Hormigón Armado	50
5.	CAPITULO V: BASES DEL CÁLCULO DE LA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO	51
5.1	Ecuaciones de Equilibrio y Compatibilidad de deformaciones	51
5.1.1	Consideraciones Iniciales – Hipótesis Generales	51
5.1.2	Verificación en estados límite últimos.....	54
5.1.3	Verificación en estados límite de servicio.....	54
5.1.4	Calculo en el Estado Límite Último de Agotamiento	55

5.1.5	Modelo Constitutivo del hormigón.....	56
5.2	Bases del Cálculo.....	67
5.2.1	Datos de partida.....	67
5.2.2	Predimensionado.....	68
5.2.3	Determinación de Momento Flector y Fuerza Cortante.....	68
5.2.4	Verificación del canto mínimo	69
5.2.5	Cálculo de sección de acero.....	70
5.2.6	Determinación de armadura de Corte.....	71
5.2.7	Determinación de estribos.....	72
5.2.8	Detalle de Viga	73
5.2.9	Diagrama de Interacción	74
5.3	Dimensionamiento de Refuerzo para Viga de Hormigón Armado con Fibras de Carbono – Refuerzo a Flexión.....	75
5.3.1	Consideraciones Iniciales.....	75
5.3.2	Determinación del momento flector máximo	76
5.3.3	Determinación de momento flector debido solo a la carga permanente	76
5.3.4	Determinación de momento flector máximo en la sección de la viga .	76
5.3.5	Comparación de momentos.....	77
5.3.6	Cálculo de la deformación inicial debida a cargas permanentes.....	78
5.3.7	Dimensionamiento del refuerzo	79
5.3.8	Ecuaciones de Equilibrio de momento	79
5.4	Dimensionamiento de Refuerzo para Viga de Hormigón Armado con Fibras de Carbono – Refuerzo a Cortante	82
5.4.1	Datos de punto de partida.....	82
5.4.2	Verificación de la capacidad resistente a esfuerzo cortante – Tensión de corte de calculo	83
5.4.3	Verificación de la capacidad resistente de la sección al esfuerzo	

cortante	83
5.4.4 Determinación del diseño del refuerzo	83
5.4.5 Determinación de la resistencia al cizallamiento pretendida	84
5.4.6 Relación entre el ancho y separación de las láminas de Fibra de Carbono	84
5.5 Plan de Práctica.....	85
5.5.1 Pasos a seguir	85
5.5.2 Pasos a seguir para la impregnación de la Fibra de Carbono.....	89
6. CAPITULO VI: FACTORES A CONSIDERAR EN UN PROYECTO DE REFUERZO	92
6.1 Momento en que se interviene la estructura.....	92
6.2 Fase de Proyecto.....	92
6.3 Fase de Ejecución	92
6.4 Fase de Utilización. Mantenimiento preventivo	92
6.5 Fase de Utilización. Intervención correctiva.....	93
7. Capítulo VII: RESULTADOS	94
7.1 Probeta Cilíndrica.....	94
7.2 Probeta de Viga de Hormigón Armado.....	98
8. CAPITULO VIII: ANÁLISIS ECONÓMICO	103
8.1 Resumen de Costos generales	103
8.2 Análisis de Precios Unitarios	104
8.2.1 Resumen de Análisis Precios Unitarios	108
9. CAPITULO IX: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
9.1 Conclusiones.....	109
9.2 Recomendaciones.....	109
10. CAPITULO IX: BIBLIOGRAFIA	110
11. CAPITULO X: ANEXOS.....	112

1. CAPITULO I

1.1 INTRODUCCION GENERAL

Tradicionalmente, el refuerzo de estructuras existentes de hormigón armado, se lleva a cabo mediante la incorporación tanto de elementos de acero, como del aumento de la sección de trabajo, esto implica una ejecución muy cuidada a la vez trabajosa, un aumento del peso de la estructura y por último, la forma en que condiciona fuertemente la estética global de la construcción.

Las investigaciones y también los adelantos tecnológicos, fueron encontrando múltiples aplicaciones de refuerzos en las estructuras de hormigón armado, la cual ayuda en la creación de nuevos materiales o el perfeccionamiento de algunos ya existentes. El reforzamiento estructural en viga de hormigón armado con fibras de carbono de alta resistencia, es una solución a la que se llega a partir de una fuerte investigación y desarrollo del uso del mismo.

Por ello, se estudia y analiza, el sistema compuesto por la Fibra de Carbono y la resina de Epoxi, ya que la fibra de carbono, por si sola, no presenta fluencia notable o pérdida de tensión como resultado de la relajación, bajo los niveles de carga mantenida predominante en Estado de Servicio. En contraste, la matriz de resina Epoxi es un material visco elástico – lineal, para la compatibilidad y adherencia al sistema compuesto ya que posee una resistencia adecuada a los agentes ambientales.

El refuerzo con láminas de fibras de carbono se ha implementado hace años en la industria aeroespacial y en áreas de industrias donde se requieren propiedades de peso ligero, alta resistencia a tensión y el uso de materiales no corrosivos. Sin embargo, con el paso del tiempo la construcción civil también se ha convertido en una industria de poder, tanto tecnológica como monetaria, donde el porte de los proyectos impone un criterio cada vez más exigente, ya sea en materiales como en el tiempo de ejecución.

Hoy en día existe un porcentaje de la producción de fibra de carbono y resinas compatibles destinado a la fabricación de refuerzos de estructuras de hormigón armado.

Se ha tratado sobre las estructuras de hormigón armado, sus patologías y las distintas maneras de recuperar o cuando es posible, superar, mediante reparaciones de refuerzo, su capacidad resistente.

Cuando es aplicada en vigas de hormigón, las láminas refuerzan ante deficiencias a flexión o a cortante, este elemento estructural es vital ya que pueden estar situados, indistintamente, en puentes (peatonales, prefabricados y de acero), estructuras para garaje, aplicaciones industriales y estructuras elevadas.

Por tanto, se desarrollará el dimensionamiento del refuerzo con Fibra de Carbono a flexión y cortante con las ecuaciones de compatibilidad de tensiones y deformaciones, obteniendo como resultado un modelo matemático que permite evaluar de manera general, la tensión que debe resistir el elemento de refuerzo y dimensionar el área necesaria para resistir esa sollicitación.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estructura de hormigón armado debe ser calculada y construida para ser capaz de soportar toda acción que la puedan solicitar durante el periodo de vida útil, manteniendo condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto. La viga de hormigón armado cumple un rol muy importante en la vida de una construcción civil de cualquier envergadura, es una estructura capaz de soportar cargas lineales, concentradas o uniformes en una sola dirección, por ello debida a las fuerzas que soporta al correr del tiempo se ve afectada ya que son atacadas por agentes deteriorantes y eso ocasiona múltiples daños por flexión y por cortante. Sin embargo, cada edificación necesita intervenciones de recuperación, rehabilitación, reforzamiento y/o protección, para ello se debe de entender los procesos de recuperación y de esta manera la viga pueda cumplir con la solicitante. El empleo de fibras de carbono, dada su gran resistencia, constituye un excelente procedimiento para aumentar la capacidad resistente de elementos de hormigón ya construidos. Como la resistencia unitaria a tracción de la fibra de carbono es muy alta (unas diez veces la del acero y unas tres veces la de la fibra de vidrio), se necesita mucho menos material, por lo que resultan refuerzos de muy poco espesor y tremendamente ligeros. Por tanto, su manipulación es más fácil y tiene buena adherencia. [1]

La viga de hormigón armado al estar sometido permanentemente a ciertas cargas, llega al punto que la serie de acciones causa un riesgo de no cumplir con la solicitante ya sea de carácter accidental o por los agentes que afecta negativamente a la capacidad resistente de la misma, tanto que pueden llevar incluso al colapso.

De acuerdo a todo lo expuesto, se lleva acabo las siguientes preguntas de investigación.

- ¿Cómo y cuándo es necesario intervenir una estructura cuando la misma se ve comprometida?
- ¿Qué causa un daño estructural?
- ¿Cuál es el límite de seguridad de una viga?
- ¿Qué tipo de intervenciones se pueden realizar en una viga de hormigón armado?
- ¿De qué manera la aplicación de Fibras de Carbono en vigas mejora su capacidad?

- ¿Cuál es el comportamiento de la Fibra de Carbono en la viga de hormigón?
- ¿Cómo se logra el diagnóstico de una viga a través de la inspección visual?

1.3 JUSTIFICACION

La Patología de la Construcción es definida por el Dr. Ing. José Calavera como el tratamiento sistemático de los defectos de las construcciones, sus causas, sus consecuencias y sus remedios.

Las manifestaciones patológicas que se presentan en vigas tienen un importante impacto en la construcción de estructuras de hormigón armado, ya que al verse afectada la integridad mecánica de las mismas, donde en el momento de que empiecen a fallar o presentar fisuras que a simple vista no sean agradables, requerirán inmediatamente de refuerzos o soluciones para que la estructura no se vea comprometida al punto de fallar totalmente y colapsar. El uso de la fibra de carbono como refuerzo estructural tiene un papel esencial frente a los esfuerzos generados, tanto por efectos de flexión como a los esfuerzos de cortante. Las fibras proporcionan sus características de resistencia y espesor ya que son livianas lo que facilita su transporte y manipuleo, a la vez que no “engordan” a la estructura reforzada, lo cual es interesante desde el punto de vista estético y arquitectónico.

La implementación de refuerzo y reparación en una estructura o parte de la estructura es una intervención delicada que requiere un alto nivel de conocimiento de ingeniería o bien, el conocimiento en el área, que garantice así la seguridad del resultado. Algunos de los motivos más comunes para realizarla son:

- Aparición de patologías que afectan a elementos fundamentales de la estructura.
- Accidente o catástrofe que haya provocado daños.
- Errores en el proyecto inicial de la edificación.
- Necesidad de adaptar la construcción a un nuevo uso.
- Corrección o variación de alguna normativa que provoque que el estado de la estructura pase a ser irregular.

Es necesario que los Ingenieros tengan el criterio, la preparación y asesoramiento suficiente para decidir cómo y en qué momento utilizar la fibra de carbono como

refuerzo, conviene tener en cuenta, que en cualquier intervención, que la eficacia del método elegido puede ser muy variable dependiendo del fin que se busque con la rehabilitación o el refuerzo. Se puede indicar que no hay un método único de refuerzo para estructuras de hormigón armado, al igual que no existe un solo material adecuado para el refuerzo, dado que estos serán función de si los daños han sido provocados por acciones mecánicas (impactos, sobrecargas, asentamientos diferenciales, etc.), o si no son consecuencia de acciones químicas, electroquímicas, o biológicas (ataque por sulfatos, aguas ácidas, corrosión de armaduras, etc.), también podría ser de acciones físicas (fisuración térmica, erosión, etc.).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Identificar los déficits más comunes existentes en una viga de hormigón e implementar una solución utilizando como material de refuerzo la Fibra de Carbono.

1.4.2 Objetivo Especifico

- Estudiar la patología de la viga de hormigón armado la cual hace que se requiera de refuerzo.
- Analizar ventajas y desventajas del refuerzo en vigas de hormigón armado con Fibras de Carbono.
- Comparar los beneficios que posee al reforzar con fibras de carbono la viga de hormigón con respecto a los aumentos de secciones que se implementa en la viga de hormigón convencional.

2. CAPITULO II: LA FIBRA DE CARBONO

2.1 ANTECEDENTES

El estudio titulado “Refuerzos de estructuras de Hormigón Armado con Fibras de Carbono. Factibilidad de su aplicación en Paraguay”, año 2005 realizado por Gloria Paredes, Oscar Loncharich y Álvaro Carrón, tuvo como objetivo principal la contribución al mejor conocimiento local de la Fibra de Carbono en su aplicación al área de la Ingeniería Civil como solución de refuerzo para estructuras de hormigón armado [2]. Este explicativo se desarrollo de manera a ser un aporte de base investigativa para la factibilidad técnica del método y en el ámbito económico, y del mismo modo llegar a ofrecer relaciones de carácter comparativo con otros métodos de refuerzos empleados en el país.

Otro estudio con el proyecto titulado “Evaluación Técnica y económica de reforzamiento estructural de concreto armado con fibras de carbono en el edificio multifamiliar Huaraz Breña” [3], Lima Perú 2019, realizado por Mayra Estrada y Jovi Yoplac con objetivo principal, fue la de realizar la evaluación técnica y económica de reforzamiento estructural en vigas de concreto armado con fibras de carbono en el Edificio Multifamiliar Huaraz Breña Lima, 2019. El motivo de la investigación, fue plantear la evaluación técnica y económica del reforzamiento estructural en vigas de concreto armado con fibras de carbono de un edificio existente ante la presencia de patologías, que conlleva a los profesionales involucrados del sector inmobiliario, a tomar las mejores decisiones acerca de la viabilidad del proyecto, teniendo como finalidad la seguridad de sus clientes y su inversión.

El Trabajo titulado “Implantación de la fibra de carbono en arquitectura, los estudios sobre cemento reforzado con fibra de carbono” [4], realizado por Jaime Morán Arias, enero 2019, Madrid España. Se realizó un estudio sobre el comportamiento de placas de cemento de canto reducido y reforzadas mediante fibras de carbono. Este refuerzo, permitirá la creación de placas ligeras de fibrocemento, resistentes, aptas para su uso en la arquitectura. Se parte de una primera aproximación mediante el estudio de fibra de carbono, partiendo de su definición hasta sus actuales usos en diferentes ámbitos.

2.2 Proceso de Obtención

El Carbono es un elemento químico, no metálico, de símbolo C, su masa atómica es de 12,01115 y sus electrones libres para combinarse pueden ser 2 o 4 (valencia), su número atómico es 6. El Carbono tiene la capacidad única de enlazarse con otros átomos de carbono para formar compuestos en cadena y cíclicos muy complejos. [5]

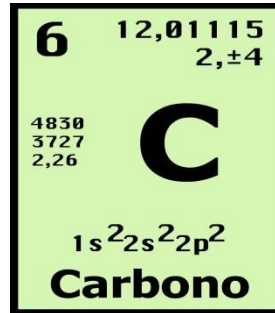


Ilustración 1 – Tabla Periódica del Carbono

Este elemento es importante para la existencia de los organismos vivos, ya que tiene muchas aplicaciones industriales significativos para los mismos.

A través del tratamiento térmico de una fibra precursora se obtiene como resultado una perfecta alineación molecular del Carbono a la cual se le define como **Fibra de Carbono**.

En (Quero, 2017) y (Ávila, s.f.) se explica que existen dos posibles fuentes de obtención de la fibra de carbono: las derivadas de brea y las derivadas de poliacrilonitrilo (PAN). Las fibras procedentes del poliacrilonitrilo tienden a una alta resistencia a la tracción, mientras que la brea deriva en fibras de carbono de baja elasticidad (módulo de Young) y alta conductividad térmica.

En particular, PAN, es una fibra plástica formada por largas cadenas de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Calentando el PAN en las condiciones adecuadas de atmosfera inerte, las cadenas de moléculas de carbono se juntan fuertemente y a su vez se separan de los demás componentes.

El proceso (Ávila, s.f.), comienza con la estabilización, el cual consiste en estirar el poliacrilonitrilo y pasarlo por un horno a baja temperatura para obtener la estabilidad dimensional. A continuación, se produce la carbonización, en la cual la estructura interna se convierte en anillos hexagonales de carbono continuo. Es en esta fase en la

que se separan los restos de componentes del carbono y además estos se orientan al eje longitudinal. Es en este punto en el que se obtienen las fibras de alta resistencia. Para obtener fibras de baja resistencia y alto modulo se realiza la grafitación en la que los cristales de carbono aumentan de tamaño y mejora la orientación de estos en la fibra. El proceso final de ambos sería el tratamiento de la superficie a través de una cámara que promueve la adhesión a la fibra. [6]

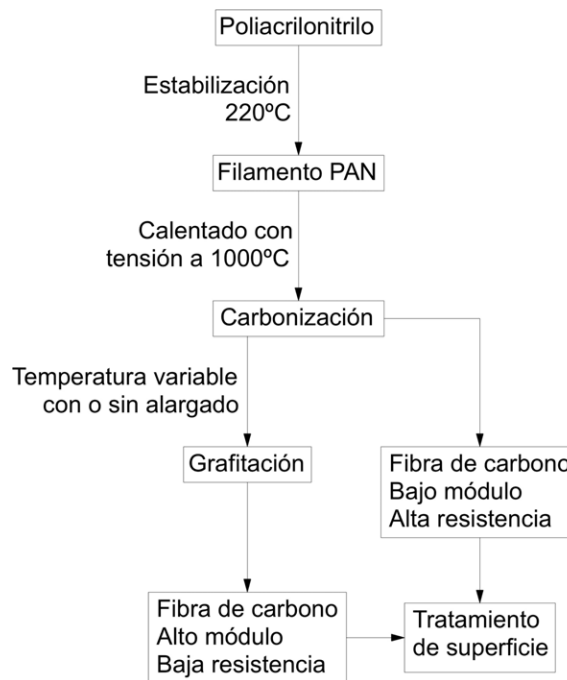


Ilustración 2 - Proceso de obtención (Ávila, s.f.) (Quero, 2017) (Pérez, 1996)

2.3 Características de las Fibras de Carbono

Las fibras pueden servirse en láminas o conformadas. Las primeras son, simplemente, fibras de carbono sin ningún otro material, a diferencia de la segunda, cuyas fibras van unidas a una matriz de resina. Las láminas pueden estar formada simplemente por un haz unidireccional, o por dos haces perpendiculares (fibras bidireccionales), con un espesor de una o dos décimas de milímetro y un ancho que varía según el fabricante entre 10 y 50 cm. Una vez pegada la lámina a la superficie de hormigón, teniendo en cuenta el espesor de las imprimaciones y resinas, el conjunto no suele alcanzar el centímetro de espesor. Por su parte, las fibras conformadas son unidireccionales y

tienen un espesor mayor, del orden del centímetro. La clara ventaja de este tipo de material es su facilidad de puesta en obra, debida a que la matriz de resina proporciona rigidez durante la colocación, rigidez que la lámina por sí sola no tiene, ya que esta tiene la “rigidez” de una hoja de papel. Las fibras son, a grandes rasgos, de dos clases: de módulo de elasticidad normal y de alto módulo de elasticidad.

Las primeras tienen un módulo similar al del acero, alrededor de 200.000 N/mm², mientras que las de alto modulo alcanzan valores del doble, algo más de 400.000 N/mm². [7]

2.3.1 Propiedad Mecánica

La fibra de carbono posee características la cual hace que sea un material capaz de aportar de manera positiva, al ámbito de la arquitectura e ingeniería, más allá de los refuerzos estructurales. Estas son:

- Alta resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Posee alta flexibilidad.
- Tiene buena conductividad eléctrica.
- Baja conductividad térmica, respecto al acero y el hormigón.
- Baja densidad comparada con materiales como el acero
- No es un material corrosivo.

Sin embargo, la fibra de carbono, aún presenta una tasación de producción y de compra elevada respecto a otros materiales que son utilizadas para las aplicaciones similares, como el acero.

Por tanto, los aceros donde hay unos standards para que entre productores no haya diferencias a la hora de producir un mismo tipo, la fibra de carbono, al basarse en las características de la propia fibra y de las resinas, hacen que cada fabricante tenga su propio producto con las características que ellos dispongan, y estas serán similares, pero no idénticos. Así pues, en el mercado podemos encontrar que las fibras de carbono pueden variar el módulo de elasticidad, la rigidez y la resistencia a la compresión y a fatiga, por ejemplo, podemos encontrar fibras de carbono con un Módulo de elasticidad (E) menor de 220,5 kN/m² que son las más bajas, hasta las que tienen una (E) de 965 kN/m².

		Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de Elasticidad E (Gpa)
Fibra de Carbono	Baja Alta Ultra	2000-4000	200 - 350 - 350 - 450 > 450
Acero		200-300	210
Hormigón		1 - 4	20 - 50
Aluminio	Blando Duro	50 - 90 - 130 - 195	70

Tabla 1; Capacidades mecánicas de la Fibra de Carbono, Acero, Hormigón y Aluminio; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de varias publicaciones.

2.3.2 La Densidad

La mayor ventaja que posee la lámina de fibra de carbono es la relación que tiene de rigidez-peso, y su baja densidad y su alta resistencia respecto a los demás materiales. En la siguiente tabla se muestran las densidades de la fibra de carbono respecto a las densidades de los metales más comunes.

	Densidad g/cm ³
Fibra de Carbono	1,55
Acero	7,9
Aluminio	2,7
Titanio	4,54
Hormigón	2,3

Tabla 2; Detalle de densidades de la Fibra de Carbono respecto a los metales; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de varias publicaciones.

Observamos que el acero es 6 veces más denso que la fibra de carbono. Esto significa 6 veces más pesado para una misma pieza realizada con los dos materiales. Pongamos de ejemplo una plancha de 1m² por 6mm de espesor, en acero esta plancha pesa 47,4kg, mientras que en fibra de carbono pesa solamente 9,3kg; en aluminio, que es el segundo más ligero, la misma plancha pesaría 16,2kg. [8]

Esta ligereza junto a la gran capacidad mecánica que tiene la fibra de carbono, demuestra que es un material muy capaz, respecto a los refuerzos estructurales dentro

del ámbito de la arquitectura e ingeniería.

2.3.3 Capacidad de resistencia al Calor

Las láminas de fibra de carbono tiene una conductividad térmica muy baja comparado con el acero o el aluminio. Este factor beneficiaría a la hora de hacer los cálculos de una estructura o parte de la estructura al ser un material con menos dilatación.

	Dilatación cm/C°	Conductividad térmica W/m ²
Fibra de Carbono	3,6	5 - 7
Acero	12,6	50
Aluminio	23,4	230
Hormigón	-	2,5

Tabla 3; Factor de calor en materiales estructurales; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de varias informaciones.

2.4 La Fibra de Carbono y sus Aplicaciones

2.4.1 Campo de Aplicación

El refuerzo con Fibras de Carbono puede utilizarse en todos los campos de la construcción civil e industrial tales como; edificios habitacionales y comerciales, puentes para carretera, obras marítimas, silos reservorios, plantas de producción, depósitos, etc. Su inercia la corrosión y a diversos agentes químicos hace de las fibras de carbono un material de refuerzo ideal para estructuras en ambientes agresivos.

2.4.2 Aplicación a Vigas de Hormigón Armado

Cuando las Fibras de Carbono son aplicadas a vigas de hormigón armado, las láminas refuerzan ante las deficiencias a flexión o a cortante.

Por ejemplo, la viga posee una grieta de 5 mm de profundidad, esta reduciría la capacidad de carga de la viga y la posibilidad de soportar mayor deflexión, sin embargo, reforzada de extremo a extremo, la capacidad de una de ellas puede igualar, o sobrepasar, a la capacidad de su diseño de origen.



Ilustración 3 - Refuerzo de viga a cortante



Ilustración 4 - Refuerzo de estribos

2.5 Cálculo

La gran ventaja de las fibras es que su comportamiento es lineal hasta la rotura, la cual se alcanza, en las fibras de módulo de deformación normal (230.000 N/mm^2), con deformaciones de, aproximadamente, un 1,5 %, es decir, vez y media la deformación de

rotura del acero. Por lo tanto, la resistencia de la fibra alcanza valores de unos 3.500 N/mm².

Las fibras de alto módulo (400.000 N/mm²) tienen deformaciones máximas del orden de un 0,5% y, en consecuencia, su resistencia oscila alrededor de 2.000 N/mm². A estos valores nominales, que pueden entenderse como característicos, hay que aplicarles el coeficiente de seguridad del material, que habitualmente se toma igual a 1,4. Por ello, los valores de la resistencia de proyecto oscilan entre 2.500 N/mm² para las fibras de modulo normal y 1.400 N/mm² para las fibras de alto módulo.

Las deformaciones maximas de proyecto correspondientes son: 0,6 % para las fibras de modulo normal y 0,35 % para las de alto módulo.

En la ilustracion 5 se muestran las características mecánicas de los dos tipos de fibras (Alto módulo y módulo normal) y del acero. [9]

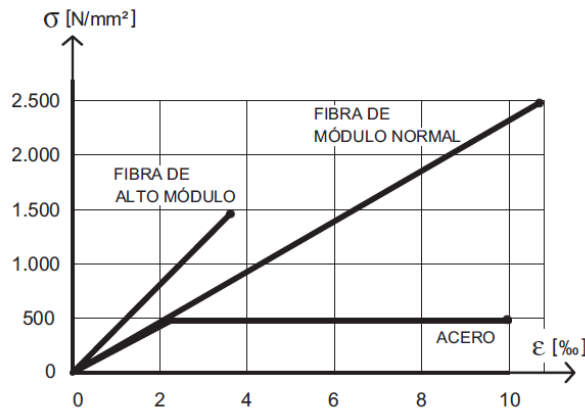


Ilustración 5 - Ecuaciones constitutivas del acero y de fibras de alto módulo y de módulo normal

Es importante tener en cuenta una serie de precauciones antes de ejecutar un proyecto relacionado a refuerzo, según el libro de Hormigón Armado Jiménez Montoya:

- La resistencia del hormigón a reforzar debe ser superior a 15 N/mm² para evitar uno de los principales problemas de este tipo de refuerzos, que es la rotura del hormigón del recubrimiento debido a un insuficiente anclaje.
- Las caras donde se aplique la fibra deben ser lo mas planas posibles y libres de defectos que perjudicarian el comportamiento de las fibras, hasta llegar a anularlo.

- c) La fibra de carbono, por sí misma, tiene una elevada resistencia al fuego; sin embargo, el compuesto, que tiene resina, pierde sus propiedades resistentes si se le aplican temperaturas superiores a los 60 o 70 °C, precisamente porque la resina no soporta temperaturas superiores.
- d) Igualmente, frente a estados de soleamiento prolongados, la resina adquiere una rigidez superficial exagerada, llegando a cuartearse y a perder también parte de sus propiedades resistentes.
- e) Para poder proyectar el refuerzo de una estructura con este sistema debe garantizarse que, antes del refuerzo, el coeficiente de seguridad global frente a cargas características es, al menos, 1. Con esta condición se puede garantizar que la estructura resiste al menos las acciones características si se produjese un acto de vandalismo o una circunstancia accidental, como, por ejemplo, fuego.
- f) En el caso de necesitar una gran cantidad de refuerzo, este puede disponerse en varias capas. En este caso, la eficacia del esfuerzo resulta disminuida porque la compatibilidad de deformaciones se ve afectada por la disposición de un espesor mayor. Este hecho deberá tenerse en cuenta en el cálculo siguiendo las indicaciones de cada fabricante.

3. CAPITULO 3: LA NECESIDAD DE REFORZAR LA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1 ¿Cómo y cuándo es rentable reforzar una Estructura con Fibra de Carbono?

La Fibra de Carbono refuerza la estructura de hormigón armado, por ello decir que “refuerza” significa que da apoyo para que la estructura cumpla con las solicitaciones requeridas debido a las cargas sometidas, en síntesis la fibra de carbono, sólo refuerza y no resuelve problemas de deformaciones. En una viga de concreto los problemas principales o fallos abarcan directamente por efectos de flexión y por cortante, las fibras de carbono pueden llegar a reforzar en ambas posiciones, sólo que se torna un tanto difícil reforzar a cortante, pero no imposible.

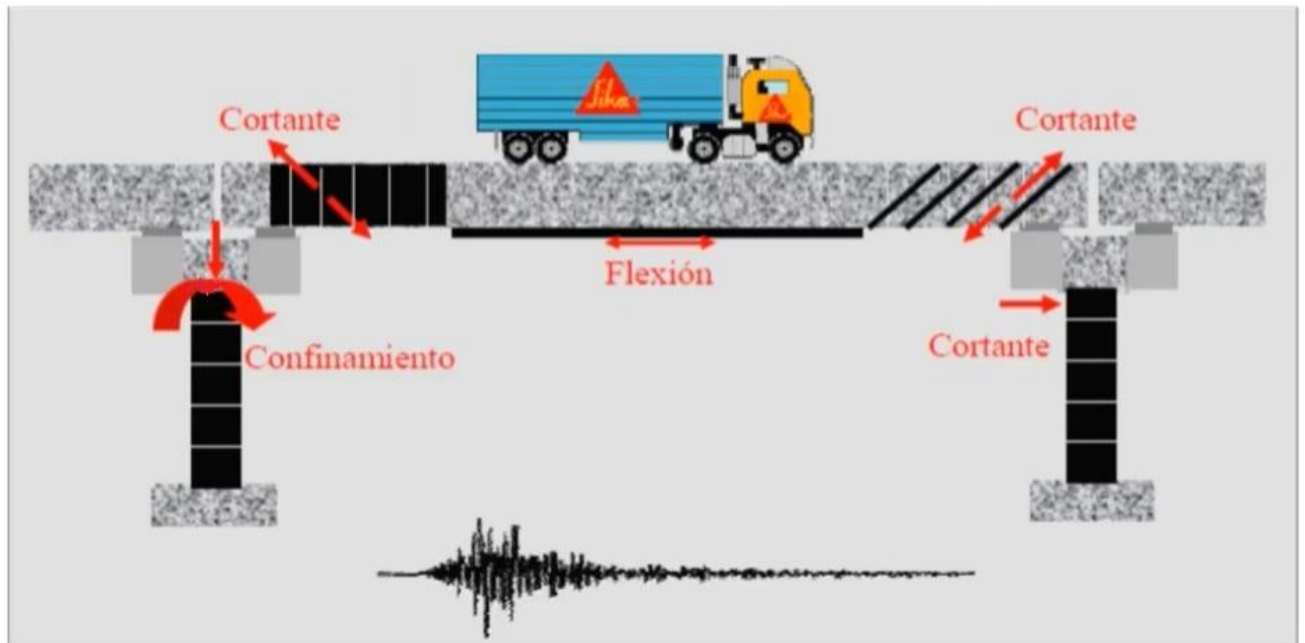


Ilustración 6 – Esfuerzos en una estructura sometida a cargas.

Para dimensionar las fibras de carbono, hay que tener en cuenta, los dominios de deformación, para saber los Estados límites de la estructura como un dato fundamental ya que varios factores amenazan constantemente a la viga de hormigón armado como al conjunto estructural. La corrosión es un problema muy común, es una de las patologías que tiene una existencia e incidencia en las estructuras de hormigón armado, que hasta hoy en día se sigue estudiando de manera a reducir su impacto ya sea con inhibidores u otros componentes químicos.

La carbonatación es un problema de las estructuras de concreto reforzado el cual afecta el funcionamiento estructural por la pérdida de resistencia a cargas que debe de resistir la armadura de acero. La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. [10]

Si queremos una estructura de viga de hormigón armado que no tenga fisuras, o sea si se quiere llegar a controlar la fisura, lo que se debe de hacer en vez de calcular para resolver los problemas, sería más factible que se haga bien, hacerlo bien implica un buen hormigón con poca agua, bien vibrado, bien curado y esto es fundamental ya que

la poca agua de dosificación y mucha agua después, sería hacer lo más conveniente para impedir las apariciones de fisuras en un corto tiempo por problemas que no sean las cargas sometidas.

El 80 o 90% de las fisuras que aparecen en las estructuras convencionales, son por esas razones, las razones mal hechas, material mal expuesto, y el 10% de las fisuras que aparecen son debido a las cargas, que son las únicas que si se deben de calcular. Por ello lo recomendable y a lo que debemos de darle enfoque, será a la parte constructiva, o sea, dejemos de meterle energías al “Estado Límite de fisuración” y nos enfoquemos al “Estado Límite de Construcción”, y de esta forma requeriría manejar cautelosamente los criterios necesarios a la hora de la construcción como fundamental rol para cumplir con las solicitudes sin dañar la viga de hormigón o cualquier estructura de hormigón armado.

3.2 Análisis Patológico: Evaluación y diagnóstico de Estructuras de Hormigón Armado

El Análisis Patológico para estructuras de hormigón armado es una metodología de estudio que busca valorar las estructuras para conocer sus condiciones, con el propósito de encontrar algún indicativo de daño o de cuantificar un daño que ya existe en términos de resistencia estructural. Consta de dos etapas: Evaluación y Diagnóstico, que ocupan respectivamente, la determinación de la resistencia estructural y las causas que han producido daño si éstos existen, en cuyo caso el patólogo, quien realiza el análisis, recomienda el curso de acción a seguir, como resultado de todo el análisis.

La Patología del Hormigón Armado abarca un tema muy extenso que ha impactado y estudiado como asignatura o áreas en las facultades de ingeniería ya que hablar sobre cualquier problema del hormigón deriva a infinidad de artículos escritos fruto de investigaciones serias y, por supuesto, códigos, libros, etc., y son incontables el número de ponencias presentadas en congresos, muchos de ellos monográficos sobre este tema.

Mucho se ha aprendido de los errores y de los imprevistos. Con el avance en el estudio del análisis patológico en el hormigón hoy se sabe mucho más sobre durabilidad de las

estructuras, pudiendo decirse que actualmente existe un conocimiento tan amplio y profundo sobre el comportamiento mecánico y de durabilidad del hormigón armado, y que ya no existe justificación alguna para hacerlo mal. Sin embargo, siempre surgen los problemas.

3.2.1 Evaluación

Son los inconvenientes que no afectan a la parte mecánica de la estructura y cuya solución puede realizarse sin entrar en un análisis estructural.

Estos casos suelen producirse con algún tipo de fisuras estabilizadas provocadas por retracción de secado, coqueas menores en las que el hormigón ha penetrado mal en la pieza, etc., sin embargo, hay otros casos mucho más complejos en los que hay que realizar una evaluación de la capacidad mecánica resistente de la estructura, o más frecuentemente de partes de las estructuras de hormigón armado, a fin de conocer la importancia, el tipo de intervención a realizar y las medidas de seguridad que habrá que tomar durante la realización de la misma.

La determinación de la resistencia residual de la estructura puede llevarse a efecto mediante: métodos empíricos, métodos analíticos o, mediante pruebas de carga. Los métodos empíricos están basados en observaciones directas y conllevan un número de ensayos mínimo. El nivel de precisión obtenido es escaso como también lo es el costo de su aplicación.

Los métodos analíticos se fundamentan en el recálculo de la estructura y más frecuentemente de elementos de la misma, a fin de conocer la probabilidad de que se produzca un fallo bien en estados límites últimos o de servicio. Son mucho más precisos que los empíricos pero a veces tan complejos que es imposible su aplicación. Son de alto costo y duración, aunque necesarios cuando la información dada por los primeros no es concluyente.

Se puede tener una idea precisa del comportamiento de una estructura mediante el empleo de Pruebas de carga. Estas pruebas se hacen en escalones sucesivos, cada uno de mayor valor que el precedente, y midiendo las deformaciones existentes.

Las Pruebas de Carga únicamente se realizan sobre elementos trabajando a flexión, con ellos se puede conocer la carga máxima que se puede aplicar a una estructura y sin

correr el riesgo de llevarla a un estado límite último.

Alguno de estos métodos se puede aplicar a los casos de:

- Estructuras dañadas por acciones mecánicas
- a. Cargas accidentales (fuego, explosiones, impactos, etc.)
- b. Cargas excesivas
- c. Cambio de uso de la estructura (aumento de sobrecargas de uso, etc.)
- d. Modificación de estructuras (eliminación de un pilar, aumento del número de plantas etc.)
 - Acciones químicas sobre el hormigón (reacción árido-álcali, sulfatos, etc.)
- a. Corrosión de armaduras.

El tiempo máximo disponible o tolerable para realizar una reparación o refuerzo es función de la "relación de capacidad", dependiendo de los valores obtenidos de "relación de capacidad" se pueden adoptar medidas para llevar la relación de capacidad a valores próximos a la unidad.

- Algunas de estas medidas pueden ser:
 - a. Limitación de uso para reducir sobrecargas
 - b. Modificación del sistema estructural (redistribución de solicitaciones)
 - c. Demolición de las partes altas de la estructura
 - d. Demolición y Sustitución de elementos dañados
 - e. Implementación de técnicas para recuperar la capacidad resistente
 - f. Implementación de técnicas para elevar la capacidad resistente

El método analítico está basado en el cálculo de las solicitaciones que resiste una estructura en el estado actual y las que producirían las cargas actuantes en proyecto a fin de determinar un nuevo coeficiente de mayoración de acciones y a la vista del mismo poder tomar las decisiones adecuadas, en este caso pueden emplearse cualquier tipo de hipótesis de cálculo lo que permite mayor libertad de acción al proyectista.

En la evaluación de la seguridad se tienen en cuenta las cargas permanentes que son las que actúan sobre la estructura y las sobrecargas que establecen las normas de acuerdo con el destino de la estructura, las ventajas de tener un buen conocimiento de las cargas permanentes, de poder limitar las sobrecargas de uso, de poseer la información experimental que precise a modo de aplicar métodos de cálculo

sofisticados, teniendo además acceso directo a las características de los materiales y a las dimensiones de todos los elementos que componen la estructura, daños y deformaciones que presentan los elementos sean estructurales o no, en tanto la evaluación teórica de la seguridad se toman como acciones las cargas permanentes y las sobrecargas definidas por las normas o códigos, calculando las solicitaciones sobre la base del modelo estructural y las tensiones teniendo en cuenta las características mecánicas obtenidas en los ensayos de laboratorio.

De esta manera nos permite el cálculo de las solicitaciones y la estimación, basándose generalmente en diversos métodos, del coeficiente de seguridad de la estructura, es decir, de la relación entre la carga de agotamiento y la carga actuante.

Las pruebas de carga en estructuras dañadas son escalonadas, se aplican cuando no se tienen antecedentes de la estructura (proyecto, normativa, etc.) y no se puede realizar un análisis teórico.

Para las pruebas de carga estructurales, sólo se emplean en elementos sometidos a flexión y, cuando están dañadas, se realizan mediante escalones sucesivos de carga con descargas intermedias, suspendiendo los escalones de carga cuando se superan determinados valores de la flecha o cuando la estructura presenta una deformación excesiva remanente después de la descarga, es decir, cuando deja de recuperarse elásticamente

3.2.2 Diagnóstico

La función del ingeniero aparte de resolver problemas es proyectar, calcular y construir estructuras para que cumplan una determinada misión, durante un tiempo predeterminado y con el menor costo posible.

Muchas veces las estructuras no sólo no llegan a cumplir su misión durante el tiempo previsto, sino que además exigen gastos excesivos de mantenimiento y remiendo tras remiendo. Se puede decir que estas estructuras nacieron enfermas siendo muy incómoda y gravosa la atención que hay que aplicarles. Al igual que ocurre con los seres vivos, en los que cualquier enfermedad o lesión se manifiesta mediante una serie de síntomas, en las estructuras los fallos se ponen de manifiesto, en general, con la aparición de una serie de señales o de cambios de aspecto que se engloban dentro de

la sintomatología.

Ante estos síntomas el técnico especialista, o patólogo, debe establecer un diagnóstico de la enfermedad que sufre la estructura y que ha, o sigue, motivando sus anomalías.

Esta es una parte complicada e imprescindible del análisis Patológico, dado que aplicar una terapia sin un conocimiento amplio del diagnóstico puede ser arriesgado cuando no ineficaz.

Las acciones que pueden provocar perjuicios o inconvenientes en una viga de hormigón armado pueden ser muchas y muy variadas, las causas de las fallas, pueden proceder de acciones de tipo mecánico, físico, químico, o biológico.

Por supuesto que las lesiones producidas a edades cortas suelen tener su origen en acciones de tipo mecánico y físico.

Las de origen químico precisan del paso del tiempo para que sus efectos se manifiesten, aunque también es cierto que una vez que han aparecido éstos, es mucho más difícil encontrar soluciones.

El proceso de diagnóstico, como se ha indicado, es imprescindible dado que va a permitir conocer la enfermedad, determinar el estado en que se encuentra el enfermo, es decir, evaluar sus reservas o su capacidad resistente para, basándose en todo esto poder realizar un pronóstico que puede ser optimista, en cuyo caso evolucionará favorablemente mediante la aplicación de una terapia adecuada, o, el pronóstico podrá ser pesimista en cuyo caso nuestra estructura tendrá que sufrir amputaciones o en el último caso su demolición.

La intervención de reparación (rehabilitación o refuerzo) es la fase última de cualquier proceso patológico y, por consiguiente, está sujeta al diagnóstico y a la evaluación, es decir, a la fase de Análisis Patológico, fase que es muy importante y que debe desarrollarse sin premura de tiempo, pues hay que "Analizar lo máximo para intervenir lo mínimo" (Ing. Fernández Canovas).

Uno de los síntomas más significativo en cualquier estructura dañada o que tengan fisuras dependiendo de su localización, forma, evolución en el tiempo, que sean "muertas" o "vivas" es decir, estabilizadas o no, condiciones ambientales, etc., es fácil, en la mayoría de los casos, establecer un diagnóstico, o bien, tener una buena base de partida para seguir investigando. Las fisuras pueden tener su origen en acciones de tipo

mecánico (tracción, cortante, torsión, flexión, compresión); en acciones de tipo químico (ataque por ácidos, reacción árido-álcali, ataque por sulfatos, etc.); en acciones de tipo electroquímico (corrosión de armaduras); en acciones de tipo físico (contracciones y dilataciones térmicas, heladas, fuego, cristalización interna de sales, etc.); en acciones de tipo reológicas (retracción plástica o de secado, etc.).

Generalmente las fisuras se encuentran catalogadas, y, con la ayuda del catálogo se puede tener una idea bastante acertada de su posible origen como en la ilustración siguiente:

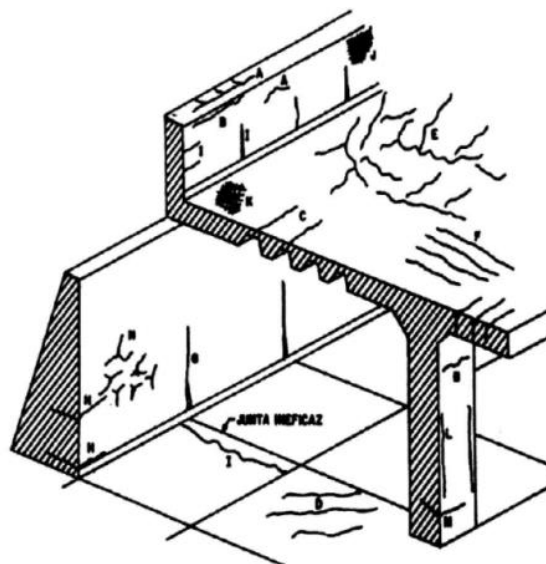


Ilustración 7 – Catálogo de fisuras

En la etapa de diagnóstico, el patólogo se enfrenta con el enfermo o con el muerto, en el primer caso realiza un estudio de la estructura dañada que concede una intervención con gran probabilidad de éxito; en el segundo, se convierte en forense y estudia la estructura colapsada ya sea por sobrecargas, por corrosión, por fuego, por una acción terrorista, etc. El estudio de estas estructuras suele ser una fuente muy valiosa y productiva en base a los conocimientos que se extraen del resultado. El estudio en que se fundamenta la palabra "diagnóstico" sería básicamente "Saber para curar", de esta forma actuar de otra forma conlleva el que las causas que provocaron las lesiones sigan actuando después de una intervención hecha a "ciegas".

3.2.3 Intervenciones de Reparación; Rehabilitación y Refuerzo

Eliminadas las causas que producen daños, la reparación consiste en intervenir la estructura, si es esto posible, para aplicar algún procedimiento que permita rectificar el deterioro sufrido, abriendo la posibilidad de obtener otros beneficios adicionales, como mayor seguridad, o vida útil.

3.2.4 Tipos de Daño según el grado de deterioro de la Estructura

Según el grado de deterioro de una estructura, los daños sufridos se pueden clasificar en:

a. Daños irreparables

Puede ocurrir que el daño ocasionado a una construcción sea tan grave que supere los límites permitidos por norma, o, que el costo de la reparación resulte excesivamente oneroso, tal situación ocurre en edificios débiles bajo sismos fuertes, en edificios ubicados bajo suelos que deslizan, o en zonas con medio ambiente intensamente agresivo. También, cuando se cometen errores inadmisibles de diseño o ejecución defectuosa, que dan lugar a derrumbes parciales o globales, o, en el caso de sobrecargas fuertes o impactos no contemplados en el análisis, como explosiones con voraces incendios, grandes impactos y ríos desbordados que arrastran construcciones. Cuando la reparación se vuelve impracticable, se procede a la demolición parcial o total de la estructura.

b. Daños reparables

Pueden realizarse las intervenciones de reparación. Estas se llevan a cabo dependiendo de la gravedad del deterioro, así como de las condiciones ambientales y las características propias de la estructura.

3.2.5 Clasificación de las Reparaciones según el nivel de degradación previsto

a. Rehabilitación

El objetivo de la rehabilitación es recuperar las condiciones de servicio de la estructura previstas para un tiempo determinado.

b. Refuerzo

El objetivo del refuerzo es aumentar las condiciones de servicio previstas para un tiempo determinado.

Para ilustrar los conceptos de rehabilitación y refuerzo por razón de procesos patológicos naturales o accidentales, podemos decir que:

- Una estructura se proyecta para una vida útil determinada, cumpliendo un estado de servicio adecuado y sin haber tenido que realizar en ella mantenimientos para su permanencia, ni intervenciones de otro tipo, tales como reparaciones, etc.
- El estado resistente de la estructura discurrirá de acuerdo con lo indicado por una curva descendente de degradación, decreciente en el tiempo, pero prevista de acuerdo con las condiciones del entorno.
- Si por influencias accidentales del entorno (atmósfera agresiva, etc.), o por acciones accidentales (fuego, etc.), se produce un descenso mayor de la curva de degradación, la vida útil de la estructura se acortará, salvo que en un momento determinado se realice una intervención de reparación.
- Si con la intervención realizada elevamos la capacidad resistente de la estructura sobre la que debería tener en un tiempo determinado estaríamos realizando un refuerzo.

3.3 Causas de Daños Estructurales

Cuando hablamos de proyecto, uno de los primeros parámetros que definimos es el periodo de diseño del mismo, es decir el tiempo que durará.

Muchos factores influyen en la elección de este parámetro, uno de los cuales íntimamente ligado al costo del proyecto es, la vida útil de los dispositivos y estructuras que se integran para hacerlo posible.

Por lo tanto, como primera medida, adoptamos la definición del Ing. Fernández Cánovas de “Vida Útil”; que es el periodo, usualmente fijado por el fabricante o constructor, durante el cual, se supone que la edificación o sus componentes, se van a utilizar, según los documentos del proyecto, cumpliéndose un mantenimiento adecuado. [11]

Durante este periodo, diferentes causas pueden afectar su normal funcionamiento, alternando y deteriorando su desempeño. Sin embargo, la vida en servicio de las construcciones en general, puede prolongarse considerablemente, según sus

características estructurales, los materiales empleados, y el medio ambiente circundante.

Los daños ocasionados dependen de innumerables factores y varían desde leves fallas, fácilmente controlables, hasta la pérdida total de la funcionalidad que origina el colapso de la construcción.

Por ello, la inspección y el mantenimiento periódico y sistemático de los edificios en general, así como la pronta reparación de los desórdenes que pueden presentarse, debe formar parte de la práctica usual de los profesionales de la construcción.

La inspección y mantenimiento de las estructuras debe ser prácticas de rutina regular, lográndose con ello, una medida eficaz de evitar el deterioro estructural y debe promoverse desde el punto de vista organizativo, técnico y económico.

Un mantenimiento irregular facilita el avance de los daños, y si la inspección se lleva a cabo únicamente cuando el detrimento comienza a hacerse visible por haber alcanzado una etapa considerable, la solución puede resultar muy onerosa o acarrear problemas técnicos difíciles de resolver. En nuestra realidad nos encontramos a menudo con los daños justo en esa etapa.

Las preguntas que debemos de responder cuando existen estos tipos de inconvenientes son: “qué hacer y cómo”, para volver a la normalidad con el deber cumplido.

Antes que nada se debe de emplear un análisis Patológico, partiendo del primer escalón: conocer y comprender los fenómenos que se nos presentan, desde sus causas, para elegir el camino a seguir y encontrar la solución más óptima.

Es necesario destacar, que las patologías tienen diferentes orígenes, no solo causas relativas a los materiales, un mal proyecto o ejecución, o un medio agresivo, también el envejecimiento natural de los materiales e incrementos en el uso de la estructura son factores a considerar. Pero, casi siempre, cuando la estructura es aun joven y de gran porte, por más costosa que resulte la reparación de una dañada, siempre resultara más económica que la demolición y la construcción de una nueva estructura.

3.3.1 Causas de riesgo de daños estructural en Vigas

- a. Riesgos químicos: medio ambiente agresivo, polución ambiental, y suelos contaminados.

- b. Fatiga y carga cíclicas: paso de vehículos pesados de carga, en elevado número de ciclos y repetidos.
- c. Errores de diseño y ejecución: errores u omisiones en el cálculo, normas inadecuadas, mala ejecución en obra, y Materiales de baja calidad.
- d. Riesgos fortuitos: incendios, carga de impacto por choque o frenado, y explosiones.
- e. Riesgos hidrometeorológicos: variaciones climáticas, vientos huracanados, inundaciones.

A continuación se detalla, entre estas causas, las que más problemas ocasionan a nuestras estructuras y sobre todo, sus efectos en la resistencia del hormigón armado.

- ✓ Medio ambiente agresivo
- ✓ Efecto de las altas temperaturas y acción del fuego
- ✓ La acción del viento
- ✓ Efecto de la fatiga
- ✓ Errores en el proceso de diseño y ejecución

3.3.2 Medio Ambiente Agresivo

Muchas estructuras deben de soportar durante su vida de servicio la acción de medio ambiente agresivo, que menoscaba su resistencia e integridad. El resultado de esta paulatina agresión es, en las estructuras de hormigón armado, una desintegración de la pasta de cemento y la posterior corrosión de las armaduras de acero.

El daño estructural que origina por causa de un medio agresivo es generalmente de la naturaleza compleja y muchas veces no se puede establecer con seguridad el grado de influencia de cada una de las causas potenciales de deterioro.

Entre los diferentes tipos de medio ambiente agresivo se pueden mencionar: El agua salada, las aguas carbonatadas, las aguas que contienen sulfatos de sodio, magnesio o calcio, las aguas residuales de carácter ácido, con aceites, aguas servidas o con desechos de la agricultura, materia orgánica de descomposición como también bacterias orgánicas.

El deterioro por corrosión, por ejemplo, no se hace visible hasta que el daño alcanza niveles críticos, los síntomas típicos del problema incluyen decoloración superficial, eflorescencias, fisuración y en etapas avanzadas, pérdida de masa.

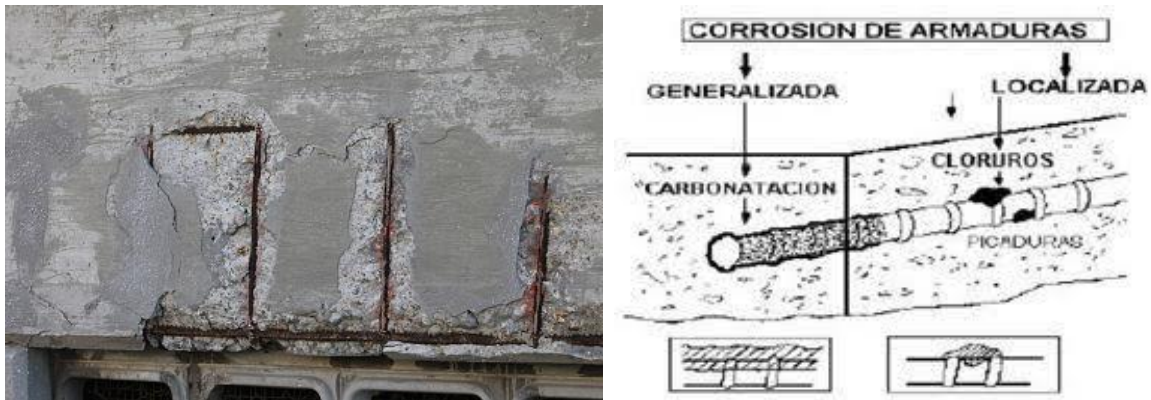


Ilustración 8 – Vigas de Hormigon Armado, daños por corrosión.

3.3.3 Efecto de la Fatiga y las cargas de impacto

a) Efecto de la fatiga

Se define fatiga en un sistema estructural, al proceso de cambio progresivo y permanente, de las características resistentes del material sujeto a fluctuaciones de esfuerzos y deformaciones. La resistencia a la fatiga es una fracción de la resistencia estática límite en un determinado número de ciclos. Si un elemento de hormigón se somete a cargas repetidas, puede producirse una fisuración excesiva y eventualmente la falla, luego de un número elevado de repeticiones, aún en el caso en que los esfuerzos máximos sean inferiores a los correspondientes a la resistencia estática del mismo.

El proceso de deterioro interno por fatiga conlleva a un progresivo crecimiento de las fisuras y a la fractura posterior, si el nivel de las cargas actuantes es suficientemente grande en las fluctuaciones de los esfuerzos. Si un miembro de hormigón cede por fatiga, la fisuración producida es notablemente mayor que la correspondiente al nivel de deformaciones en rango elástico, bajo cargas estáticamente aplicadas.

En general, las estructuras de concreto armado se diseñan para cargas estáticas, pero la falla por fatiga es usual en ciertos casos como por ejemplo en pavimentos, puentes, rampas y estructuras que soporten cargas oscilantes.

Diferentes factores influyen en el comportamiento a la fatiga en miembros de hormigón

armado, como ser: la relación agua/cemento, curado, contenido de aire y tipos de agregados.

Un problema de importancia en miembros de concreto armado es la resistencia a la fatiga de la adherencia entre la masa del concreto y las varillas. Este tipo de fatiga es un progresivo deterioro de la adherencia y un deslizamiento de las barras en tracción, bajo cargas repetidas.

En muchos tipos de estructuras, el análisis por fatiga, gobierna el diseño.

Las cargas variables, aplicadas cíclicamente a las estructuras pueden ser de tres tipos:

- ✓ Pulsantes: Son las que actúan en un mismo sentido durante el ciclo, produciendo variación de esfuerzos entre cero y un máximo.
- ✓ Fluctuantes: No se produce una inversión completa de esfuerzos.
- ✓ Alternadas: Originan una distribución de esfuerzos en los cuales el máximo es igual al mínimo en módulo.

Los daños por fatiga afectan directamente en particular a las estructuras de acero. Y son preponderantes.

b) Resistencia a las cargas de Impacto

Las cargas que se aplican en un rango de más de 700 kg/cm²/seg., se consideran cargas de impacto.

La resistencia a la compresión dinámica del concreto es en general superior a su resistencia estática, y aumenta, a medida que la duración del impacto disminuye.

Diferentes tipos de cargas de impacto pueden sufrir en general los puentes y estructuras, tales como choques de vehículos que circulan a alta velocidad camiones sin frenos, explosiones por escape de gas y otros accidentes. Todas ellas son acciones aisladas que se toman en cuenta cuando existe posibilidad de ocurrencia.

3.3.4 Factores de Riesgo en el Diseño y Ejecución

3.3.4.1 Causas relativas al diseño

- Inexactitud de las hipótesis de cálculo
- a. Sobre la magnitud de las acciones y sus combinaciones
- b. Sobre la resistencia y capacidad de carga de las secciones
- c. Sobre la magnitud de las deformaciones consideradas

- d. Con relación a las características mecánicas de los materiales
 - Poca rigurosidad en los métodos de análisis
- a. Para determinar los esfuerzos bajo solicitaciones simples y combinadas
- b. Para definir las condiciones de estabilidad local y global
- c. Para tomar en cuenta los fenómenos reológicos y térmicos bajo acción de gradientes de temperatura
 - Errores del diseño
- a. En el dimensionado y ausencia de verificación
- b. Factores de seguridad insuficientes
- c. Omisión en las variaciones de dimensión
- d. Carencia de previsión en los mecanismos de transmisión de esfuerzos
- e. Falta de exactitud en la ubicación de las juntas de construcción

3.3.4.2 Causas relativas a la ejecución

- Documentación insuficiente
- a. Insuficiente verificación de la documentación que se entregan en obra
- b. Errores en las cotas y niveles o las indicaciones de tolerancia
- c. Ausencia de planos de detalle y forma de ejecución
- d. Falta de información sobre las secuencias de ejecución
 - Deficiencias del control de calidad
- a. Baja calidad de los materiales
- b. Ausencia de control del acero y el concreto en el momento de la ejecución
- c. Incumplimiento de las exigencias sobre aditivos, calidad del agua, curado, temperatura de vaciado, tiempo de desencofrado
 - Debidas a las condiciones de la puesta en obra
- a. Falta de adecuada inspección en la ejecución
- b. Deterioro de los materiales por exposición inadecuada al medio ambiente agresivo
- c. Diferir los trabajos de urgente reparación
- d. Causas imprevistas o intencionales relativas a obreros
- e. Falta de puntualidad en la entrega de los materiales
- f. Mano de obra defectuosa o poco capacitada

3.3.4.3 Causas dependientes del paso del tiempo

- Disminución de la vida útil de servicio remanente
- a. Medio ambiente agresivo
- b. Envejecimiento natural de los materiales
- c. Fatiga y cargas alternadas repetidas

3.3.4.4 Causas debidas a las condiciones de uso y funcionalidad

- Acciones abusivas
- a. Incremento de carga, vehículos pesados, etc.
- b. Acopio excesivo de materiales en algunas áreas construidas
- c. Aumento posterior de pisos
- d. Vaciado en forma defectuosa en silos o estructuras de contención, lo cual aumenta la temperatura u ocasiona desgaste

3.3.4.5 Efectos naturales o acciones fortuitas

- Problemas de suelo y fundaciones
- a. Sedimento de fundaciones, deslizamiento de taludes, descensos diferenciales de los cimientos, erosiones
- b. Suelos agresivos o con desechos contaminantes
- c. Ascenso imprevisto del nivel freático
- d. Filtraciones del agua de lluvia, inundaciones
- Acciones fortuitas
- a. Incendios, rotura de tuberías de gas, o acopio de materiales inflamables
- b. Tifones, ciclones o vientos huracanados
- c. Cargas de impacto en general

3.4 Cuando reforzar una estructura

- a. Si una estructura se encuentra dañada se pueden tomar muchas decisiones, se podría intervenir, se podría demoler, se podría limitar su uso, se podría abandonar y no intervenir en absoluto, todo depende de los daños y los recursos.
- b. Si la estructura no está dañada y sigue normalmente su régimen de servicio, pueden surgir otras necesidades que son de uso y también muy importantes.

c. Cuando el realizar una intervención de reparación es la premisa, suele muy a menudo aprovecharse la oportunidad y la calidad de los materiales disponibles para realizar no solo una rehabilitación, sino un refuerzo e incrementar la vida útil.

Entonces, en general, se refuerza una estructura, por una o varias de las siguientes causas:

- ✓ Reparar la degradación causada por patologías
- ✓ Agregar nuevas solicitaciones
- ✓ Reducir secciones
- ✓ Eliminar apoyos
- ✓ Cumplir exigencias de las Normativas

Con el método de refuerzo se pueden llegar a producir dos efectos actuando separada o conjuntamente:

- ✓ Aumentar la capacidad resistente de la estructura
- ✓ Prolongar la vida útil de la estructura

Reforzar es: Aumentar el rendimiento estructural.

Existen, muchos métodos de refuerzo. Se utilizan diferentes materiales, en diferentes formas y con diferentes procesos constructivos, según el ingenio y la evolución de la técnica.

4. CAPITULO 4: METODO DE REFUERZO A VIGA DE HORMIGÓN ARMADO

4.1 Reparaciones de vigas de hormigón armado asociadas a los refuerzos

Para poder llegar a la reparación del elemento estructural, en nuestro caso es la viga de hormigón armado, es preciso diagnosticar la patología y una vez determinada la necesidad de un refuerzo, antes que nada hacer las reparaciones previas a la ejecución del refuerzo.

Es necesario hacer referencia a estos procedimientos porque se hablara de las condiciones de aplicación del método de refuerzo ya que todos los materiales deben ser compatibles entre sí, para evitar interacciones indeseables entre ellos.

4.1.1 Resina Epoxi

La resina epoxi, es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o “endurecedor”. Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre bisfenol-a y la epiclohidrina, el bisfenol-a se obtiene de fenol y acetona. Las resinas epoxi están constituidas comúnmente de dos componentes que se mezclan previamente antes de ser usados; al mezclarse reaccionan causando la solidificación de la resina, su curado se realiza a temperatura ambiente, durante ese curado o secado se forma enlaces cruzados lo que hace que su peso molecular sea elevado. [12]

4.1.1.1 Propiedades

Introducimos a la resina epoxi, para tratamiento de fisuras, ya que las fisuras interesan de manera especial, porque junto con las flechas excesivas, componen el estado usual a reparar, en las vigas para ser reforzadas a flexión o esfuerzo cortante. Al implementar la resina, se puede determinar las siguientes propiedades.

- Su humectación y de adherencia son óptima.
- Posee buena resistencia mecánica.
- Es resistente a la humedad.
- Resisten el ataque de fluidos corrosivos.
- Resisten temperaturas elevadas.
- Excelente resistencia química.
- Poca contracción al curar.
- Excelentes propiedades Adhesivas

Resistencia a tracción (N/mm ²)	30 - 90
Resistencia a compresión (N/mm ²)	120 - 210
Viscosidad (centipoises a 250°C)	100 – 15.000
Módulo de Elasticidad (N/mm ²)	1.500 – 30.000
Alargamiento en rotura (sin carga)	2% - 5%
Alargamiento en rotura de morteros	0,5% - 1%
Coefficiente de dilatación (m/m ó C°)	2.100 – 6.100

Tabla 4; Propiedad de la resina epoxi; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de varias publicaciones.

4.1.1.2 Características

La resina soporta aproximadamente una temperatura máxima de 100°C sin llegar a deformarse, pero sin considerar la aplicación de fuego directo, ya que es un compuesto orgánico. También tiene una elevada resistencia al contacto con el agua.

Debido a su elevada resistencia, brillo y dureza que sus aplicaciones son casi ilimitadas, tan amplias como la imaginación abarca: desde la realización y encapsulación de figuras, elementos decorativos (por ejemplo, mesas con resina epoxi) y creación de moldes, hasta su utilización en elementos náuticos (tablas de surf, piezas para barcos, etc.), reparación de superficies dañadas y rellenado de huecos u oclusiones, entre muchos otros. [13]

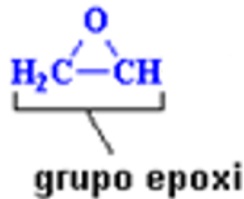
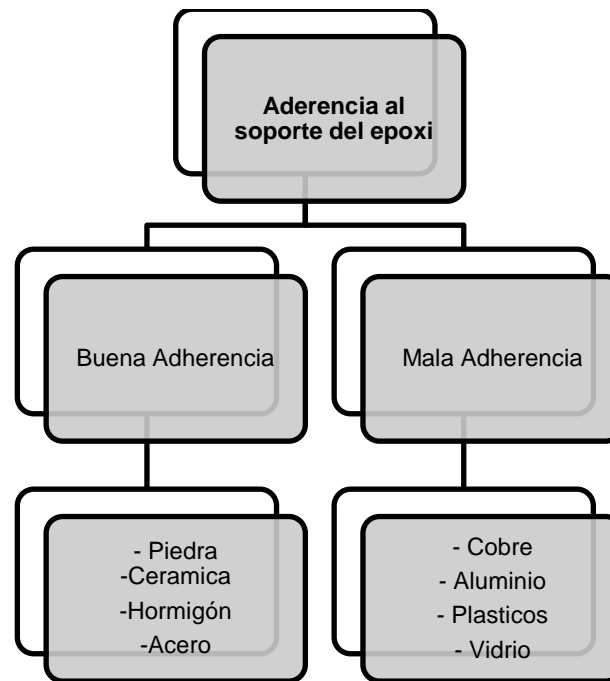


Ilustración 9 – Grupo epoxi

La resina epoxi posee una adherencia al soporte con respecto a su composición y es de la manera siguiente:



4.2 Reparación de Fisuras por Inyección Epoxi

4.2.1 Problemas generales asociados a las fisuras

- Las posibles pérdidas de rigidez y resistencia en la viga de hormigón armado
- Los ataques químicos en las vías de penetración
- El aspecto antiestético que representa dicha fisura, presenta inseguridad al usuario.

4.2.2 Fases de reparación de una fisura

1. **Primera fase:** Analizar y resolver la patología que produjo la fisura, caso contrario volverá a abrirse.
2. **Segunda Fase:** Determinar las cargas y clasificar en cargas vivas o cargas muertas. Con las cargas vivas normalmente es recomendable trabajar con resinas que sean elásticas; y las cargas muertas con resinas normales.
3. **Tercera Fase:** Buscar la formulación epoxi adecuada, cuanto mayor sea la fisura que

posea la viga de hormigón armado, mayor debe ser la viscosidad de la resina a ser implementada.

4. **Cuarta Fase:** Preparar la superficie, si se tiene superficie húmeda se implementa aire caliente; si se dispone de una superficie sucia, se debe de limpiar con cepillo de alambre para que se pueda retirar las impurezas del concreto, pero si se tiene superficie sucia, no puede inyectarse. Ese criterio es importante para que el sellado pueda adherirse correctamente a la fisura.
5. **Quinta Fase:** La inyección del epoxi, la forma de hacerla depende del ancho de la fisura, se le coloca unas boquillas (entradas parte baja, salidas parte altas) y luego se sella el perímetro de esta para evitar la fuga de la resina, también se sella la grieta para poder contener toda la presión de la inyección del epoxi en su interior.
Las presiones de inyección dependen del ancho de la grieta; por ejemplo, las boquillas entre 5 y 10 mm de diámetro.

$$a > 0,6 \text{ mm}$$

$$p < 1 \text{ kp/cm}^2 = 0,1 \text{ N/mm}^2$$

$$a > 0,1 \text{ mm}$$

$$p < 6 - 7 \text{ kp/cm}^2 = 0,6 - 0,7 \text{ N/mm}^2$$

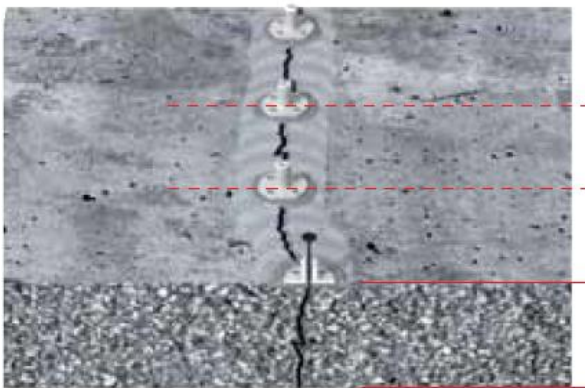


Ilustración 10 – Colocación de las boquillas

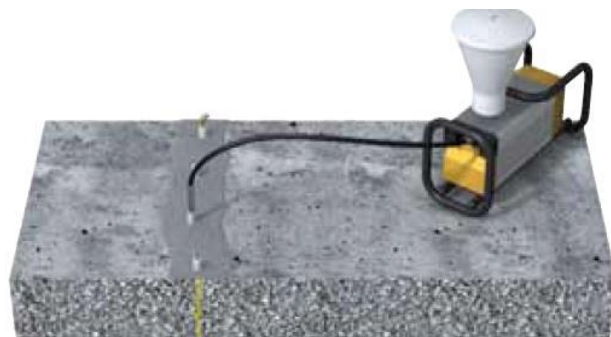


Ilustración 11 – Inyección de la resina, equipo a presión

4.3 Reparación de Vigas causado por la Corrosión

- a. **Remoción del Hormigón que rodea las armaduras corroídas:** la cantidad de armadura a remover depende de cuan afectada este, serán removidas las partes débiles, sueltas que rodean a las armaduras corroídas.

- b. Inspección de armaduras: este paso es importante de realizar, a través de ella podemos someterle a procedimientos según la condición precisa.
- c. Limpieza de armaduras corroídas: si la corrosión es menor.
- d. Reparación de armaduras corroídas: si la corrosión llega a afectar la sección resistente.
- e. Reforzar el acero: se realiza a través de reemplazo de armaduras, adición de armaduras como también cortando las armaduras.
- f. Recomposición del hormigón según proyecto de estudio: utilizando el mortero correspondiente.

4.4 Refuerzo a Flexión de Vigas de Hormigón Armado

Puede ser por recrecido del canto de la viga de hormigón adicionando la armadura que sea precisa.

Este refuerzo llega a ser necesario, en caso de que exista carencia de armadura de tracción, que son las que causan fisuras en el centro de la viga. Existen problemas que se presentan:

No será posible aligerar totalmente la viga, por lo que la armadura existente estará sometida a tensión. Cuando se construye el refuerzo, la nueva armadura está descargada, por lo que al entrar en carga la antigua armadura tendrá que soportar las tensiones residuales anteriores más las que se producen del nuevo equilibrio.

Por lo general, no se plantea ningún tipo de problemas, pero en todo caso debe ser comprobado.

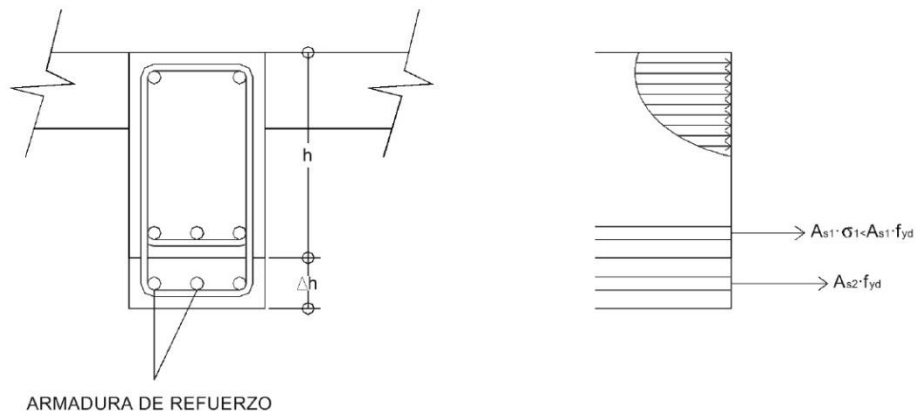


Ilustración 12 – Recreido de viga con adición de armadura para refuerzo a flexión.

4.4.1 Sistema Construcción

- Colocar unos nuevos estribos que sean capaces de absorber los esfuerzos de desgarramiento entre el hormigón antiguo y el hormigón nuevo.
- Enflaquecer o descarnar la capa inferior de la viga de hormigón
- Hacer una buena unión entre hormigones, con epoxi.
- Colocar las armaduras longitudinales y hormigonar.
- Normalmente la armadura anterior no puede alcanzar su límite, por ello la armadura nueva se calcula para el momento total.

4.4.2 Colocación de nueva armadura sin recrecido del canto de la viga

La ejecución de este método debe ser muy cuidadosa, la armadura antigua puede trabajar hasta su límite elástico:

Comprobación detallada de sus tensiones.

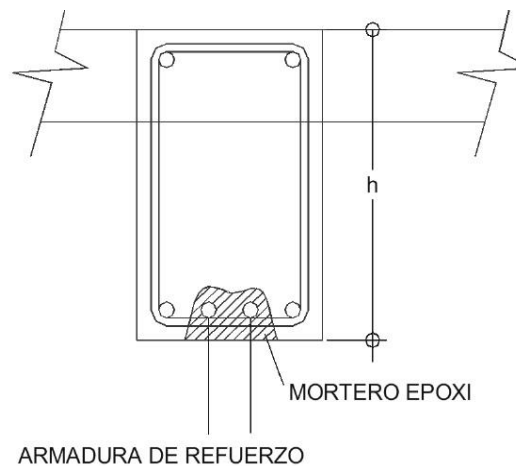


Ilustración 13 – Adición de armaduras de refuerzo sin recrecido de la sección de la viga para refuerzo a flexión, esta se cierra con mortero epoxi.

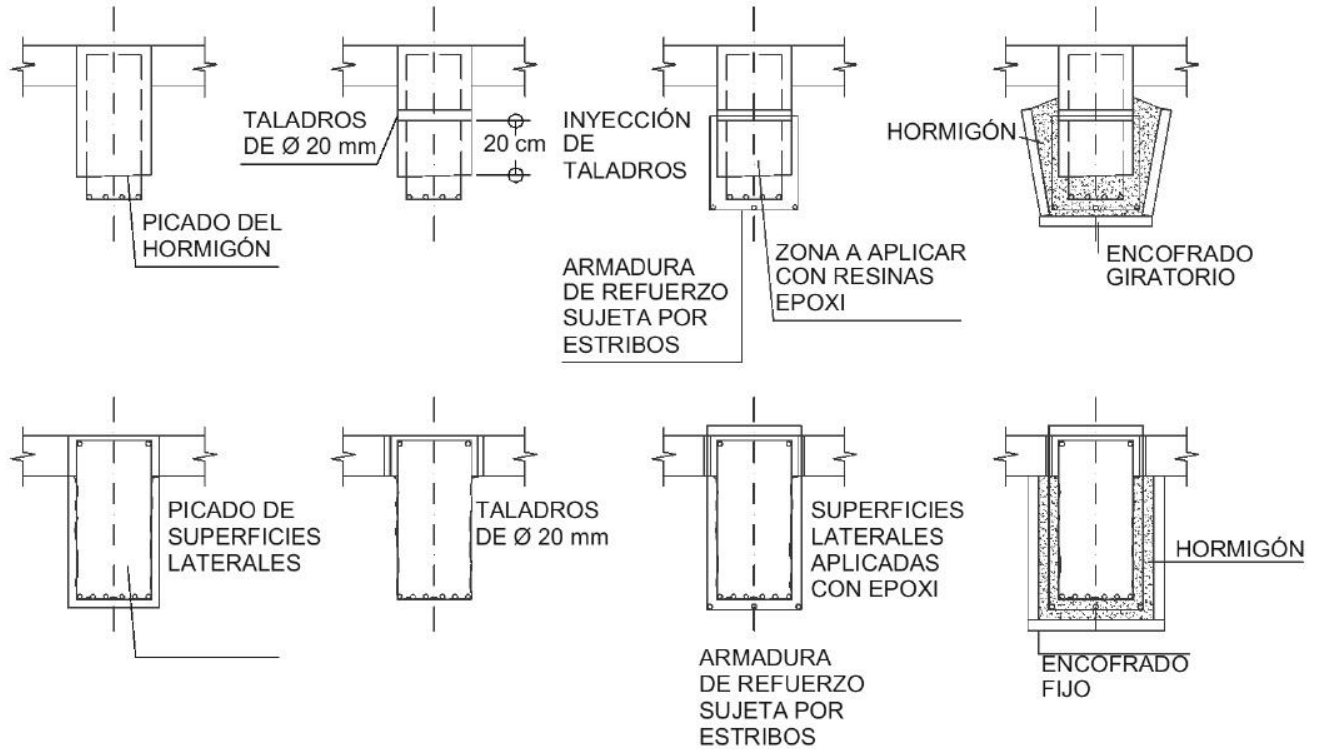


Ilustración 14 – Adición de armaduras de refuerzo con recrecido de la sección de la viga.

4.4.3 Cálculo del refuerzo a flexión de vigas de hormigón armado por recrecido

El cálculo de una sección rectangular con la armadura inicial y la de refuerzo según el dominio es posible que la armadura inicial no se deforme lo suficiente para alcanzar su límite elástico.

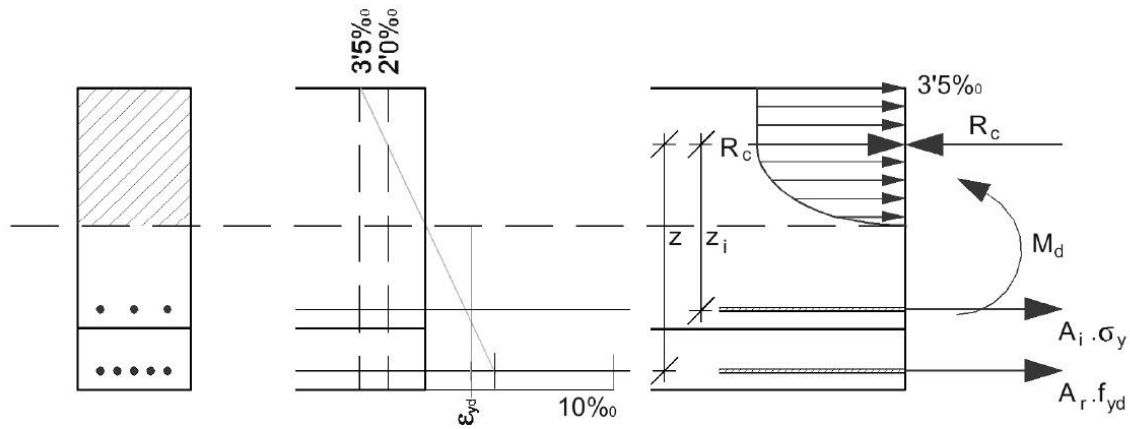


Ilustración 15 – Cálculo del refuerzo de vigas a flexión con hormigón armado. Fuerzas y deformaciones en el hormigón y el acero. Diagrama Parábola rectángulo

Es aconsejable utilizar el diagrama rectangular:

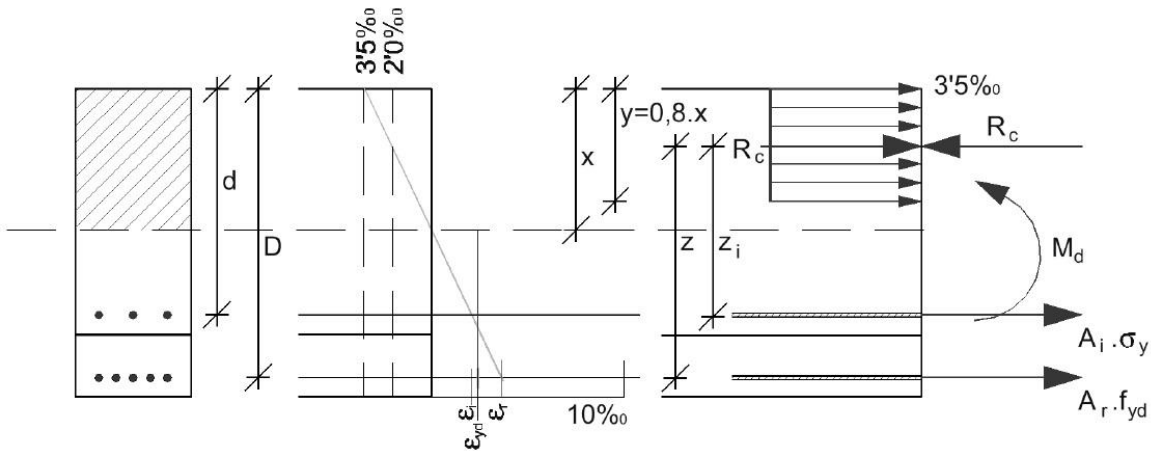


Ilustración 16 – Cálculo del refuerzo de vigas a flexión con hormigón armado. Fuerzas y deformaciones en el hormigón y el acero. Diagrama Parábola rectángulo

Cálculo de $A_r \cdot f_{yd}$ excluyendo de la armadura existente

$$A_r \cdot f_{yd} = b \cdot y \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \quad \alpha = \epsilon_i / \epsilon_r = (d - x) / (D - x)$$

$$M_d = b \cdot y \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (D - y/2) \quad \sigma = \alpha \cdot f_{yd}$$

Habiendo que $y = 0,8 \cdot x$ con la contribución de $A_i \cdot \sigma_y$, y en su caso se disminuye el armado de refuerzo.

4.5 Refuerzos a Cortante de Vigas de Hormigón Armado

El refuerzo puede ser requerido por ausencia o mala colocación de la armadura transversal, debidos a errores de proyecto o de ejecución.

Consiste en introducir la armadura y los estribos necesarios para completar la función resistente del elemento estructural, para ello se abren surcos verticales en todo el contorno de la viga, desde el espesor más pequeño posible pero de suficiente profundidad para alcanzar las armaduras originales. En estos surcos se introducen los nuevos estribos, que se atarán a las armaduras principales, a ser posible mediante soldadura, tras este proceso se cierran los huecos empleando morteros especiales.

El refuerzo más fácil y práctico está en añadir los estribos que sean necesarios y cerrar con mortero de epoxi. Es importante el correcto apeo (apuntalamiento) de la viga.

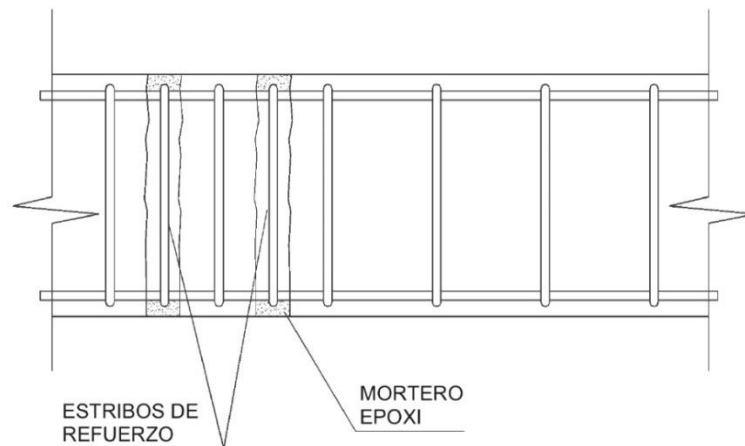


Ilustración 17 – Adición de estribos para el refuerzo a cortante en vigas de hormigón armado.

5. CAPITULO V: BASES DEL CÁLCULO DE LA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO

5.1 Ecuaciones de Equilibrio y Compatibilidad de deformaciones

A continuación, las definiciones son dadas en UNE-EN: 1990 (2002) gracias al Prof. Ing Fredy Ramírez con su Tesis de Maestría *“Técnicas de aprendizaje automático para análisis a flexión en vigas rectangulares de hormigón armado”*, UNA 2019, logró recopilar datos y hacer un resumen muy importante la cual se tiene en cuenta para este estudio.

5.1.1 Consideraciones Iniciales – Hipótesis Generales

- a) **Estados Límite:** Estados más allá de los cuales la estructura deja de satisfacer los criterios de proyectos correspondientes.
- b) **Estado Límite Último (ELU):** corresponde a la máxima capacidad resistente de la estructura, se relacionan con la seguridad de la estructura y son independientes de la función que ella cumpla. Son los de
 - Equilibrio
 - Agotamiento
 - Pandeo
 - Fatiga

- Adherencia
 - Anclaje
- c) **Estado Límite de Servicio (ELS):** este estado corresponde a la máxima capacidad de servicio de la estructura, se relacionan con la funcionalidad, la estética y la durabilidad de la estructura, dependen de la función que ella debe de cumplir; entre esas funciones tenemos:
- Deformación excesiva
 - Fisuración controlada
 - Vibraciones excesivas

Es el Estado que corresponde a condiciones más allá de las cuales no se cumplen los requisitos de aptitud al servicio especificados para una estructura o elemento estructural, también citamos lo siguiente:

Capacidad Portante: Capacidad de un elemento, o componente, o de una sección transversal de un elemento o componente de una estructura de soportar acciones sin fallos mecánicos, por ejemplo, resistencia a la flexión, resistencia al pandeo, resistencia a la tracción,

Resistencia: Propiedad mecánica de un material que indica su habilidad de resistir acciones, normalmente dadas en unidades de tensión;

Acción (F): Conjunto de fuerzas (cargas) aplicadas a la estructura;

Efecto de la acción (E): Efecto de las acciones (o efecto de la acción) sobre los elementos estructurales (por ejemplo, fuerza interna, momento, tensión, deformación) o sobre la totalidad de la estructura (por ejemplo, flexión, rotación);

Acción permanente (G): Acción que previsiblemente va a actuar durante un período de referencia dado y cuya variación de magnitud en el tiempo es despreciable, o cuya variación es siempre en la misma dirección (monotónica) hasta que la acción alcance un cierto valor límite;

Acción variable (Q): Acción cuya variación de magnitud en el tiempo no es despreciable ni monotónica;

Acción accidental (A): Acción, normalmente de corta duración pero de magnitud significativa, que no es previsible que ocurra en una estructura dada durante su vida útil de cálculo;

Valor característico de una acción (F_k): Principal valor representativo de una acción;

Periodo de referencia: Periodo de tiempo elegido que se usa como base para valorar estadísticamente acciones variables y, posiblemente, acciones accidentales.

Valor de combinación de una acción variable ($\psi_0 Q$): Valor escogido, en tanto en cuanto pueda fijarse sobre bases estadísticas, de forma que la probabilidad de los efectos causados por la combinación vayan a ser excedidos sea aproximadamente la misma que los causados por el valor característico de una acción concreta. Puede expresarse como una parte determinada del valor característico empleando un factor $\psi_0 \leq 1$;

Valor frecuente de una acción variable ($\psi_1 Q$): Valor determinado, en tanto en cuanto pueda fijarse sobre bases estadísticas, de forma que bien el tiempo total, dentro del período de frecuencia durante el cual esté superado, sea solo una parte pequeña dada del periodo de referencia, o bien que la frecuencia con la que se exceda esté limitada a un valor dado. Puede expresarse como una parte determinada del valor característico empleando un factor $\psi_1 \leq 1$;

Valor cuasi-permanente de una acción variable ($\psi_2 Q$): Valor determinado de manera que el periodo total de tiempo durante el cual vaya a ser superado sea una fracción grande del período de referencia. Puede expresarse como una parte determinada del valor característico empleando un factor $\psi_2 \leq 1$;

Valor representativo de una acción (F_{rep}): Valor utilizado para la verificación de un estado límite. Un valor representativo puede ser un valor característico (F_k) o un valor asociado (ψF_k);

Valor de cálculo de una acción (F_d): Valor obtenido al multiplicar el valor representativo por el coeficiente parcial γ_f ;

Los valores de γ_f que se utilizan, de conformidad a UNE-EN:1990, 2002, se muestra en la siguiente tabla:

Tipo de accion	γ_f
Permanente	1.35
Variable	1.50

Tabla 5; Coeficientes parciales para mayoración de acciones; Fuente: UNE- EN: 1990 (2002)

Análisis estructural: procedimiento o algoritmo para la determinación de los efectos de las acciones en cada punto de la estructura;

Análisis no lineal de primer orden: Análisis estructural, llevado a cabo sobre la geometría inicial, que tiene en cuenta las propiedades de deformación no lineal de los materiales.

5.1.2 Verificación en estados límite últimos

Al considerar un estado límite de rotura o deformación excesiva, se debe verificar:

$$E_d \leq R_d$$

En donde:

E_d → valor de cálculo de los efectos de las acciones

R_d → valor de cálculo de la resistencia correspondiente

El valor de cálculo de los efectos de las acciones puede expresarse como:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Dónde:

+ significa “a combinarse con”

\sum significa “el efecto combinado de”

5.1.3 Verificación en estados límite de servicio

Se debe de verificar que: $E_d \leq C_d$

En donde:

E_d → Es el valor de cálculo de los efectos de las acciones especificados en el criterio de aptitud al servicio, determinado sobre la base de la combinación correspondiente.

C_d → Es el valor de cálculo límite del criterio correspondiente de aptitud al servicio.

El valor de cálculo de los efectos de las acciones puede expresarse como:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Dónde:

+ significa “a combinarse con”

Σ significa “el efecto combinado de”

En este caso, los coeficientes γ_f son todos iguales a 1

5.1.4 Cálculo en el Estado Límite Último de Agotamiento

El estudio de las secciones de hormigón armado tiene por objeto comprobar que, bajo las solicitaciones mayoradas o de cálculo, la pieza no supere cada uno de los Estados Límites, en el supuesto de que ambos materiales, hormigón y acero, tuviesen como resistencias reales las resistencias minoradas o de cálculo.

El Estado Límite Último de Agotamiento está caracterizado por el agotamiento resistente de una o varias secciones, sea por rotura o deformación plástica excesiva. Se estudia a nivel de sección de elemento estructural, está siempre debe ser verificada.

Una sección de hormigón armado sometida a solicitaciones normales puede alcanzar el Estado Límite de Agotamiento de tres formas diferentes:

- Por exceso de deformación plástica del acero.
- Por aplastamiento del hormigón a flexión.
- Por aplastamiento del hormigón a compresión.

Luego:

- Se admite que, en piezas sometidas a tracción o a flexión con pequeñas cuantías, el Estado Límite Último de Agotamiento se origina como consecuencia de una deformación plástica excesiva del acero, que se fija en un 10 por mil.
- En piezas sometidas a flexión con cuantías medias o grandes, el Estado Límite de Agotamiento se origina por aplastamiento del hormigón con deformaciones del orden de 3,5 por mil.
- En piezas sometidas a compresión simple o compuesta, el Estado Límite de Agotamiento se origina por aplastamiento del hormigón con deformaciones del orden 2 por mil.

5.1.5 Modelo Constitutivo del hormigón

Una curva típica de tensión-deformación del hormigón a compresión es mostrada a continuación

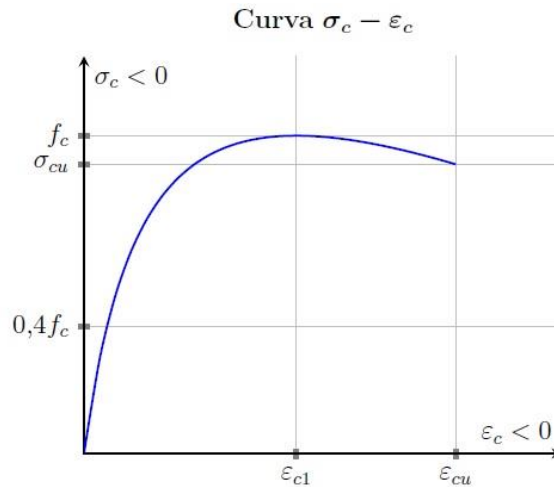


Ilustración 18 – Curva típica de tensión-deformación del hormigón a compresión. Fuente: Tesis de Maestría realizado por el Ing. Fredy Ramírez, San Lorenzo 2019.

Existen varias propuestas de curvas tensión-deformación del hormigón para el análisis no lineal, algunas de las cuales se muestran en la tabla 6 (Kmiecik y Kaminski. 2011)

Nombre / Fuente	Fórmula	Variables
Parábola de Madrid	$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right) \right]$	$\sigma_c = f(E_c, \varepsilon_{c1})$
Desay & Krishnan	$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}$	$\sigma_c = f(E_c, \varepsilon_{c1})$
EN 1992-1-1	$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}$ $k = 1,1 E_{cm} \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}}; \quad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$	$\sigma_c = f(E_{cm}, f_{cm}, \varepsilon_{c1})$
Majewski	$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \text{ si } \sigma_c \leq e_{lim} f_{cm}$ $\left. \begin{aligned} \sigma_c = f_{cm} \frac{(e_{lim} - 2)^2}{4(e_{lim} - 1)} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 + \\ - f_{cm} \frac{(e_{lim} - 2)^2}{2(e_{lim} - 1)} + \\ f_{cm} \frac{e_{lim}^2}{4(e_{lim} - 1)} \end{aligned} \right\} E_c = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_c} (2 - e_{lim}) \text{ si } \sigma_c > e_{lim} f_{cm}$ $e_{lim} = 1 - \exp\left(-\frac{f_c}{80}\right)$	$\sigma_c = f(E_c, f_{cm}, \varepsilon_{c1})$
Wang & Hsu	$\sigma_c = \zeta f_{cm} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\zeta \varepsilon_{c1}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] \text{ si } \frac{\varepsilon_c}{\zeta \varepsilon_{c1}} \leq 1$ $\sigma_c = \zeta f_{cm} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_c / \zeta \varepsilon_{c1} - 1}{2/\zeta - 1} \right)^2 \right] \text{ si } \frac{\varepsilon_c}{\zeta \varepsilon_{c1}} \geq 1$	$\sigma_c = f(f_{cm}, \varepsilon_{c1})$
Fórmula de Sáenz	$\sigma_c = \frac{\varepsilon_c}{A + B\varepsilon_c + C\varepsilon_c^2 + D\varepsilon_c^3}$	$\sigma_c = f(E_c, f_{cm}, f_{cu}, \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{cu1})$

Tabla 6: Relaciones de tensión-deformación del hormigón para análisis no lineal. Fuente: Kmieciak y Kaminski (2011)

5.1.5.1 Diagrama $\sigma_c - \varepsilon_c$ para el análisis Estructural

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k_c - 2)\eta} & \text{si } 0 \geq \varepsilon_c > \varepsilon_{cu1} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$$k_c = 1,05 E_{cm} \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}; \quad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}; \quad f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad \dots\dots(1)$$

$$E_{cm} = \underbrace{1,2}_{\text{basalto}} \times 22 \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \text{ (GPa)} \quad (f_{cm} \text{ en MPa})$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \text{ ‰}$$

Dónde:

σ_c tensión de compresión del hormigón

ε_c deformación unitaria del concreto a compresión, ($\varepsilon_c \leq 0$)

η coeficiente para simplificar la fórmula

ε_{c1} deformación unitaria correspondiente a la tensión máxima f_{cm} en las fórmulas entra con valor negativo

ε_{cu1} deformación unitaria ultima a compresión del hormigón, usualmente -3,5‰

f_{cm} resistencia media de compresión a los 28 días

E_{cm} módulo de elasticidad secante, el cual está definido por $\sigma_c = 0$ y $\sigma_c = 0,4f_{cm}$

El factor 1,2 que aparece en la fórmula es debido a que en Paraguay el agregado grueso más utilizado es el basáltico.

Derivando el diagrama $\sigma_c - \varepsilon_c$ para el análisis estructural, tenemos el módulo de elasticidad tangente del hormigón en la zona de compresión:

$$\frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_c} = E_c = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c1}} \left(\frac{k - (k^2 - 4k + 2)\eta + 3(k - 2)\eta^2}{[1 + (k - 2)\eta]^2} \right)$$

Que para $\varepsilon_c = 0 \rightarrow \eta = 0$ se convierte en:

$$E_{c0} = 1,05E_{cm} \quad \dots (2)$$

5.1.5.2 Diagrama Parábola-Rectángulo para $f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{si } 0 \leq |\varepsilon_c| \leq |\varepsilon_{c2}| \text{ (parábola)} \\ f_{cd} & \text{si } |\varepsilon_{c2}| \leq |\varepsilon_c| \leq |\varepsilon_{cu2}| \text{ (rectángulo)} \end{cases} \quad \dots (3)$$

Dónde:

ε_{cu2} deformación unitaria ultima a compresión del hormigón -3,5‰

ε_{c2} deformación unitaria en el vértice de la parábola, igual a -2‰

α_{cc} coeficiente de “cansancio” a compresión, generalmente $\alpha_{cc} = 1,00$ sin embargo este valor (y el correspondiente α_{ct} para tracción) debería ser reducido por un factor $k_t = 0,85$ para edades del hormigón $t > 28$ días

γ_c coeficiente parcial de seguridad del hormigón

η grado de la parábola usualmente 2

Diagrama bilineal

$$\sigma_c = \begin{cases} \frac{f_{cd}}{\epsilon_{c3}} \epsilon_c & \text{si } |\epsilon_c| \leq |\epsilon_{c3}| \\ f_{cd} & \text{si } |\epsilon_c| > |\epsilon_{c3}| \end{cases} \quad \dots\dots(4)$$

Todas las ecuaciones puestas en un gráfico, la representación se presenta en lo siguiente:

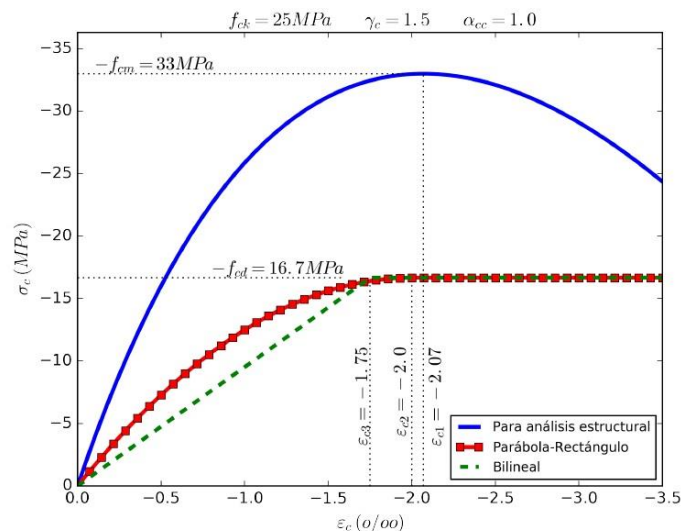


Ilustración 19 – Diagramas tensión-deformación del hormigón. Fuente: Tesis de Maestría realizado por el Ing. Fredy Ramírez, San Lorenzo 2019.

5.1.5.3 Curvas de tracción

La obtención del diagrama tensión-deformación del hormigón a tracción resulta más difícil experimentalmente hablando, por las dificultades que envuelve su ejecución. El

EC2 define a la resistencia a tracción del hormigón como la *máxima tensión que el hormigón puede soportar cuando está sometido a tracción uniaxial*, y propone la siguiente ecuación:

$$f_{ctm} = 0,30f_{ck}^{2/3} \quad f_{ck} \text{ en MPa}$$

La ecuación $\sigma_t - \varepsilon_t$ del hormigón, es decir en tracción uniaxial, adoptada, es la propuesta por Wang y Hsu, 2001:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_{cm}\varepsilon_t & \text{si } 0 \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \\ f_{ctm} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t}\right)^{0,4} & \text{si } \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \end{cases}$$

Esta ecuación toma en cuenta el fenómeno de tensión-stiffning, es decir, la colaboración del hormigón a tracción entre fisuras. La deformación crítica a tracción ε_{cr} se tiene cuando $\sigma_t = f_{ctm}$ consecuentemente $f_{ctm} = \sigma_{cr} = E_{cm}\varepsilon_{cr}$ el cual combinado con (1) y (2) nos permite averiguar que:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{0,30f_{ck}^{2/3}}{1,2 \times 22(f_{ck} + 8)^{0,3}} \approx 0,068\% \quad f_{ck} = 25\text{MPa}$$

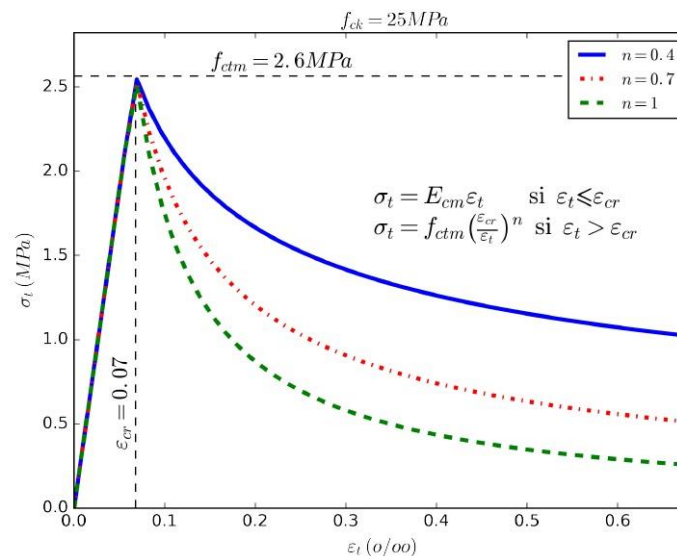


Ilustración 20 – Diagrama de tracción de Wang y Hsu (2001). Se adopta diagrama original con $n = 0,4$. Fuente; Tesis de Maestría realizado por el Ing. Fredy Ramírez, San Lorenzo 2019.

Diagrama Adoptado:

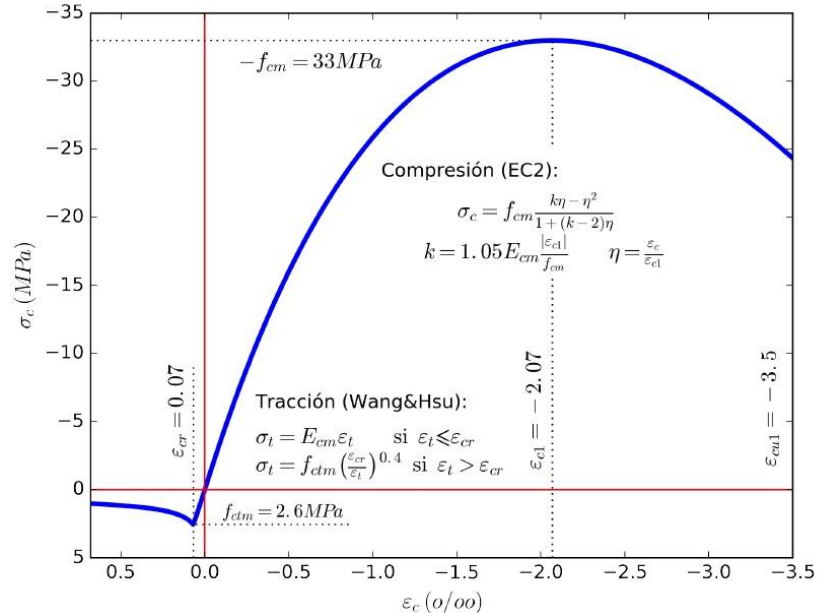


Ilustración 21 – Diagrama de Hormigón. Rama de compresión según el UNE-EN: 1992 (2004) y la rama de tracción según Wang y Hsu (2001). Fuente: Tesis de Maestría realizado por el Ing. Fredy Ramírez, San Lorenzo 2019.

5.1.5.4 Acero

Para el acero, se adopta directamente el diagrama propuesto en el UNE-EN: 1992(2004). A continuación se describen las variables utilizadas:

f_{yk} resistencia característica del acero

f_{ym} resistencia media

γ_s coeficiente de seguridad, igual a 1,15. Tabla 5

f_{yd} resistencia de cálculo

E_s módulo de elasticidad de diseño, igual a 200 MPa

ϵ_{uk} deformación unitaria característica en fuerza máxima, igual a 10‰

ϵ_{ud} deformación unitaria ultima de diseño

k valor característico de la relación entre la tensión máxima de rotura y el límite elástico, es decir, $(f_t/f_y)_k = 1,10$. Igual a su valor medio UNE-EN: 1992,2004

ρ_s densidad del acero, igual a 7.850 kg/m^3

La resistencia media del acero es UNE-EN: 1992, 2004:

$$f_{ym} = f_{yk} + 10MPa$$

La deformación unitaria de diseño se obtiene de:

$$\varepsilon_{ud} = 0,9 \varepsilon_{uk}$$

Diagrama del Acero

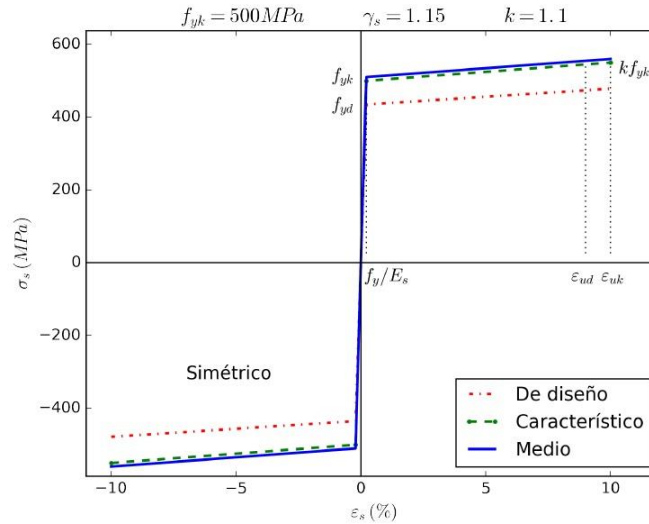


Ilustración 22- Diagrama Tensión-Deformación del acero. Fuente: Tesis de Maestría realizado por el Ing. Fredy Ramírez, San Lorenzo 2019.

5.1.5.5 Dominios de deformación. Diagrama de pivotes

En Jiménez Montoya y col. (2009) cita lo siguiente: Las deformaciones límite de las secciones, según la naturaleza de la solicitación, conducen a admitir varios dominios de deformación, estos dominios se muestran a continuación:

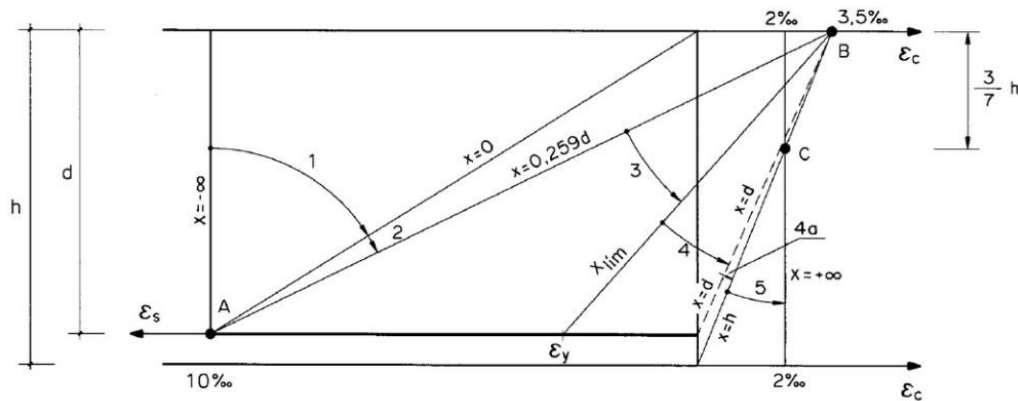


Ilustración 23- Diagrama de Pivotes. Fuente: Jiménez Montoya y col. (2009)

La capacidad última de la sección es la suma de los aportes del hormigón y del acero, por lo que requiere un equilibrio de fuerzas y momentos.

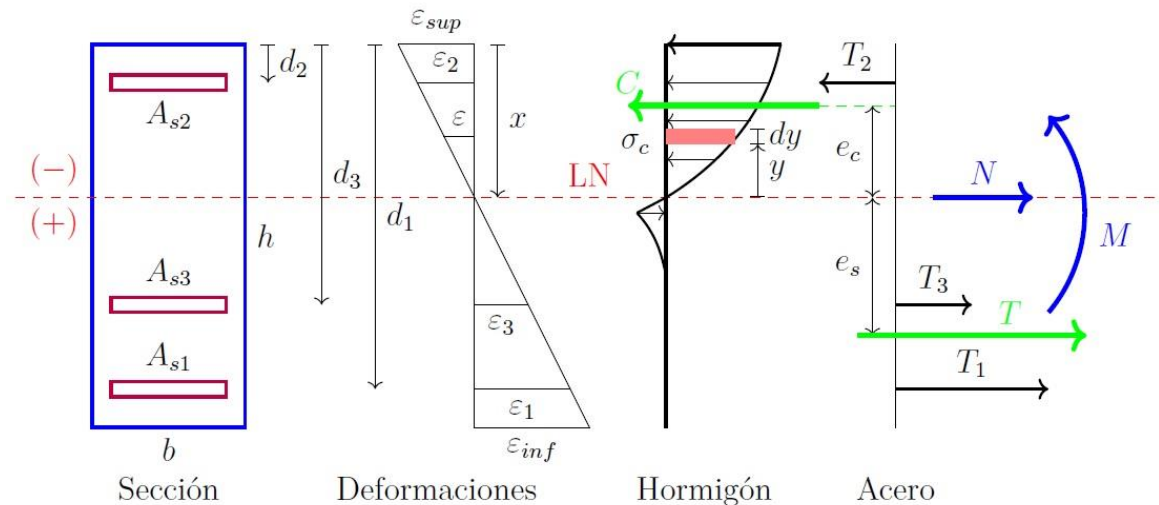


Ilustración 24- Comportamiento esquemático de una sección de hormigón armado. Fuente: Tesis de Maestría realizado por el Ing. Fredy Ramírez, San Lorenzo 2019.

Teniendo en cuenta la Ilustración 24 y algunas hipótesis asumidas para el análisis se describe las ecuaciones siguientes:

- Secciones planas y perpendiculares al eje de la viga antes de la deformación permanecen planas y perpendiculares al eje, después de la deformación (Viga de Euler – Bernoulli)
- No hay deslizamiento relativo entre hormigón y acero de armado (adherencia perfecta)
- El hormigón no está confinado
- Se considera que los desplazamientos son muy pequeños en relación a las dimensiones de la viga, por lo que no será necesario considerar la no-linealidad geométrica
- Se limita el análisis a sección rectangular
- No se consideran efectos de fluencia y retracción

Compatibilidad: $k = \frac{-\varepsilon_{sup}}{x} = \frac{\varepsilon_{inf}}{h-x}$ $k = \frac{-\varepsilon}{y} = \frac{\varepsilon_i}{d_i-x}$

Acero: $T = \sum T_i = \sum \sigma_{si} A_{si}$ $e_s = \frac{\sum T_i d_i}{T} - x$

Hormigón: $C = \int_{x-h}^x b \sigma_c dy$ $e_c = \frac{\int_{x-h}^x b \sigma_c y dy}{C}$

Equilibrio: $T + C = N$ $M = T e_s + C e_c$

En flexión simple $N = 0$, entonces $T + C = 0$. Queda de la siguiente manera

$$|T + C| \leq tol$$

Donde tol es la tolerancia adoptada es suficiente para los propósitos establecidos

$$tol := \frac{b h f_{cm}}{4000}$$

Fuerzas Normales: $N_u = \sum (\sigma_{si} A_{si}) + \int_{x-h}^x b \sigma_c dy$

Momento: $M_u = \sum \left[\sigma_{si} A_{si} \left(d_i - \frac{h}{2} \right) \right] + \int_{x-h}^x b \sigma_c \left(\frac{h}{2} - x + y \right) dy$

Dónde:

- k Curvatura
- b, h Dimensiones de la sección transversal
- A_{si} Armaduras longitudinales
- d_i Posiciones de las armaduras respecto a la fibra superior de la sección
- $\varepsilon_{inf}, \varepsilon_{sup}$ Deformaciones unitarias de las fibras superior e inferior
- ε_i Deformaciones unitarias de las armaduras longitudinales
- ε Deformación unitaria genérica
- LN Línea neutra
- x Profundidad de la línea neutra
- σ_c Tensión en el hormigón

σ_s	Tensión en el acero
y	Posición de una fibra cualquiera respecto a la línea neutra
C	Resultante de las fuerzas en el hormigón
e_c	Posición de la resultante de las fuerzas del hormigón respecto a la línea neutra
T_i	Fuerzas en las armaduras longitudinales
T	Resultante de las fuerzas en el acero
e_s	Posición de la resultante de las fuerzas del acero respecto a la LN
M	Momento flector externo
N_u	Fuerza Normal última resistente de la sección
M_u	Momento Flector último resistente de la sección

Las ecuaciones de compatibilidad que fueron indicadas, con las consideraciones adecuadas a cada plano de rotura definido en cada dominio presenta de la siguiente manera según (Calavera, 1985).

DOMINIO 1: Tracción simple o compuesta

Profundidad de LN: $-\infty < x \leq 0$

El plano de deformación gira alrededor del punto A, la armadura inferior, en estas condiciones, experimenta una deformación constante ε_{su} denominada deformación unitaria máxima permitida al acero en el interior del hormigón, generalmente $\varepsilon_{su} = 1\%$ Jiménez Montoya y col. (2009). Toda la sección esta traccionada. En el límite, cuando $x \rightarrow -\infty$, tenemos tracción simple.

DOMINIO 2: Flexión simple o compuesta

Profundidad de LN: $0 < \frac{x}{d_1} \leq \frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{su}}$

El pivote sigue siendo A, pero la sección comienza a soportar tensiones de compresión, hasta la rotura del hormigón, en el que llega a la deformación ε_{cu1} . En el límite de este dominio y el 3, se tienen al hormigón y al acero, ambos a su capacidad máxima.

DOMINIO 3: Flexión simple o compuesta

$$\text{Profundidad de LN: } \frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{su}} < \frac{x}{d_1} \leq \frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_y}$$

La profundidad máxima de la LN en este dominio es: $x_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_y} d_1$

El plano de deformación, esta vez gira alrededor de B, con lo que la fibra superior del hormigón se encuentra a una deformación unitaria constante ε_{cu1} y la del acero decrece desde ε_{su} hasta $\varepsilon_y = f_y/E_s$ que es la correspondiente al límite clásico.

DOMINIO 4: Flexión simple o compuesta

$$\text{Profundidad del LN: } \frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_y} < \frac{y}{d_1} \leq 1$$

Los planos de deformación siguen girando alrededor de B hasta que la profundidad de la LN alcance el valor $x = d_1$ en la que la armadura inferior no trabaja.

DOMINIO 4a: Flexión compuesta

$$\text{Profundidad de LN: } d_1 < x \leq h$$

Los planos de deformación siguen girando alrededor de B hasta que la profundidad de la LN alcance el valor $x = h$, en este instante toda la sección se encuentra a compresión.

DOMINIO 5: Compresión simple o compuesta

$$\text{Profundidad de LN: } h < x < +\infty$$

Los planos de deformación giran alrededor de C y se tiene compresión compuesta. En el límite $x \rightarrow +\infty$ se tiene compresión simple con $\varepsilon_c = \varepsilon_{c1}$

$$\text{La profundidad de C es: } x_c = \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{cu}} h$$

Dónde:

d_1 Canto útil, distancia desde la fibra superior hasta el centro de gravedad de las armaduras de tracción

ε_{cu1} Deformación unitaria última del hormigón (usualmente 3,5‰)

ε_{su} Deformación unitaria última del acero (usualmente 1‰)

ε_y	Deformación unitaria en el límite elástico del acero
x_{lim}	Profundidad máxima de la línea neutra en el dominio 3
f_y	Tensión del acero en su límite elástico

5.2 Bases del Cálculo.

5.2.1 Datos de partida

5.2.1.1 Resistencia de Cálculo de materiales

f_{ck}	resistencia característica del hormigón
f_{cd}	resistencia de cálculo del hormigón
f_{yk}	resistencia característica del acero
f_{yd}	resistencia de cálculo del acero

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad ; \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \dots \text{ En } \frac{N}{mm^2}$$

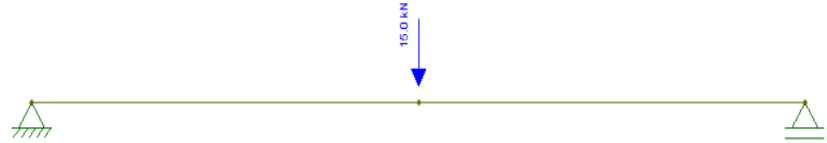
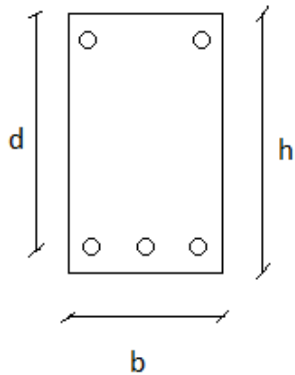
5.2.1.2 Coeficientes de seguridad

Según tabla 15.3 EHE, para cargas persistentes o transitorias

$$\gamma_c = 1,5 \quad ; \quad \gamma_s = 1,15$$

5.2.2 Predimensionado

En el siguiente cálculo se adoptó la Norma Española EHE-08, y a continuación de los datos de punto de partida:



$b = 12\text{cm}$	$f_{ck} = 25\text{MPa}$
$h = 20\text{cm}$	$f_{yk} = 500\text{MPa}$
$log_{viga} = 2\text{m}$	$f_{cd} = 16,66\text{MPa}$
$rec.g = 2\text{cm}$	$f_{yd} = 434,78\text{MPa}$
$rec.m = 4\text{cm}$	$P = 1,5\text{Tn.}$

Dónde:

b = base de análisis de viga de hormigón armado.

h = altura de análisis de viga de hormigón armado.

rec = recubrimiento geométrico de viga de hormigón armado.

P = carga puntual P

5.2.3 Determinación de Momento Flector y Fuerza Cortante

Por estática tenemos el Momento Flector: $M = \frac{PL}{4}$ debido a la carga puntual que se le somete a la viga.

Primeramente la carga P está en toneladas, se convierte en kN ;

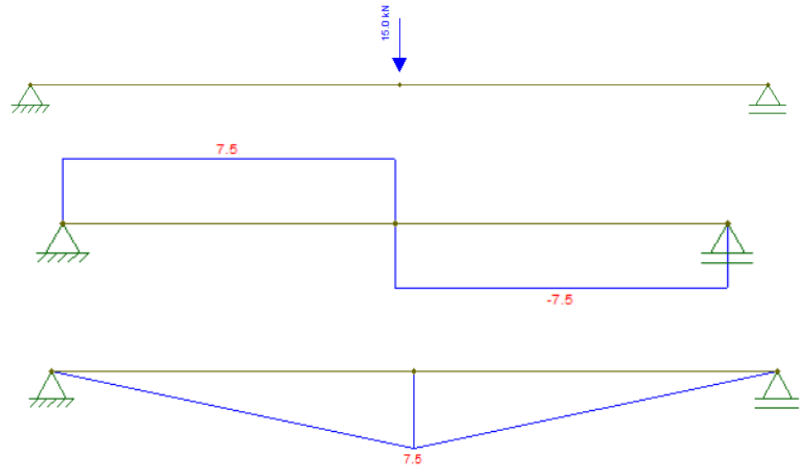
$$\therefore 1,5\text{ Tn} = 15\text{kN}$$

se obtiene el momento flector de la siguiente manera

$$M = \frac{PL}{4} = \frac{15 \times 2}{4} = 7,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

la fuerza cortante debida a las reacciones se obtiene:

$$V = \frac{P}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ kN}$$



5.2.4 Verificación del canto mínimo

$$d_{min} = 1,84 \times \sqrt{\frac{M_d}{b \times f_{cd}}} =$$

$$d_{min} = 1,84 \times \sqrt{\frac{7,5 \times 10^3 \times 1,35}{0,12 \times 16,66 \times 10^6}} = 0,131 \text{ m}$$

$$d_{min} = 0,131 \text{ m} = 13 \text{ cm}$$

$$r_{mec} = rec_{geo} + \emptyset e + \frac{\emptyset l}{2} = 2 + 0,6 + \frac{1}{2} = 3,1 \cong 4 \text{ cm}$$

$$h_{min} = d_{min} + r_{mec} = 13 \text{ cm} + 4 \text{ cm} = 17 \text{ cm}$$

$$h_{adop} \geq h_{min} \rightarrow h_{adop} = 20 \text{ cm}; 0,20 \text{ m}$$

$$d = h_{adop} - r_{mec} = 20 \text{ cm} - 4 \text{ cm} = 16 \text{ cm}; 0,16 \text{ m}$$

Dónde:

M_d → Momento de diseño....N · m

b → Ancho de análisis....m

f_{cd} → $\frac{f_{ck}}{1,5}$ $\frac{N}{m^2}$

1,35 → Coeficiente de mayoración, es multiplicado al M_d para obtener un momento de

diseño.

$d \rightarrow$ canto útil m

5.2.5 Cálculo de sección de acero

5.2.5.1 Armadura longitudinal por flexión

Momento reducido: $\mu = \frac{M_d}{b \times d^2 \times f_{cd}}$

$$\mu = \frac{7,5 \times 10^3}{0,12 \times 0,16^2 \times 16,66 \times 10^6} = 0,146$$

Cuantía mecánica:

$$\omega \approx \mu \times (1 + 0,77 \times \mu)$$

$$\omega \approx 0,146 \times (1 + 0,77 \times 0,146)$$

$$\omega \approx 0,163$$

Sección de Acero:

$$A_s = \frac{\omega \times b \times d \times f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = \frac{0,163 \times 0,12 \times 0,16 \times 16,66 \times 10^6}{434,78 \times 10^6} = 1,1997 \times 10^{-4} m^2$$

$$A_s = 1,1997 cm^2$$

Sección mínima de Acero:

$$A_{smin} = \frac{3,3}{1000} \times b \times h \rightarrow \text{por retracción y temperatura Tabla 42.3.5 EHE}$$

$$A_{smin} = \frac{3,3}{1000} \times 0,12 \times 0,20 = 7,92 \times 10^{-5} m^2$$

$$A_{smin} = 0,79 cm^2$$

∴ se adopta A_s para la sección del calculo

Disposición de varilla:

$$n = \frac{1,1997}{\pi \times \frac{1^2}{4}} = 1,528 \cong 2\text{Ø}10$$

Separación de varilla:

$$S = \frac{b - 2 \times \text{rec} - 2 \times \text{est} - n\phi}{n - 1} \dots \text{Art. 69.4.1 EHE}$$

$$S = \frac{12 - 2 \times 2 - 2 \times 0,6 - 2 \times 1}{2 - 1} = 4,8 \text{ cm}$$

Observación: Como no se tiene momento flector negativo, se toma la Armadura mínima (A_s) para el armado superior de la viga de hormigón.

5.2.6 Determinación de armadura de Corte

Verificación del agotamiento por compresión del alma

$$V_{u1} = 0,30 \times f_{cd} \times b \times d$$

$$V_{u1} = 0,30 \times 16,66 \times 10^6 \times 0,12 \times 0,16$$

$$V_{u1} = 96 \text{ kN}$$

$$V_{u1} = 96.000 \text{ N}$$

La fuerza cortante máxima: $V_{m\acute{a}x} = 7,5 \text{ kN}$ por tanto se cumple la siguiente condición:

$$V_{u1} \geq V_{m\acute{a}x}$$

Separación máxima y cuantía mínima:

$$\frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{u1}} = \frac{7,5 \times 10^3}{96 \times 10^3} = 0,078$$

5.2.6.1 Condición para la separación máxima y cuantía mínima:

$$S_t \leq 0,75 \times d \times (1 + \cot \alpha) \geq 600 \text{ mm} \quad \text{sí} \quad V_{rd} \leq 0,2V_{u1}$$

$$S_t \leq 0,6 \times d \times (1 + \cot \alpha) \geq 450 \text{ mm} \quad \text{sí} \quad 0,2V_{u1} < V_{rd} \leq 0,67V_{u1}$$

$$S_t \leq 0,3 \times d \times (1 + \cot \alpha) \geq 300 \text{ mm} \quad \text{sí} \quad 0,67V_{u1} < V_{rd}$$

Adoptamos la primera condición y seguimos con el cálculo:

$$S_{\text{máx}} = 0,75 \times d = 0,75 \times 0,16 = 0,12 = \mathbf{12 \text{ cm}}$$

Si existen armaduras comprimidas se tiene que cumplir la condición siguiente:

Armadura mínima;

$$A_{s_{\text{min}}} = 0,04 \times b \times \frac{f_{ck}^2}{f_{yd}}$$

$$A_{s_{\text{min}}} = 0,04 \times 0,12 \times \frac{25^{\frac{2}{3}}}{434,78} \times 10^4 = 0,944 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

5.2.7 Determinación de estribos

Resistencia del Hormigón a Cortante:

$$f_{cv} = 0,10 \times \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \times \left(100 \times \frac{A_s}{b \times d} \times f_{ck}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{cv} = 0,10 \times \left(1 + \sqrt{\frac{200}{160}}\right) \times \left(100 \times \frac{1,1997}{12 \times 16} \times 25 \times 10^6\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{cv} = 52,94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Fuerza que aporta el Hormigón para resistir la cortante:

$$V_{cu} = f_{cv} \times b \times d = 52,94 \times 0,12 \times 0,16 = \mathbf{1,016 \text{ kN}}$$

Fuerza Cortante efectiva que debe resistir la armadura transversal:

$$V_{su} = V_{\text{máx}} - V_{cu} = 7,5 - 1,016 = \mathbf{6,48 \text{ kN}}$$

Separación del estribo:

$$S = \frac{0,9 \times d}{V_{su}} \times A_{se} \times f_{yd}$$

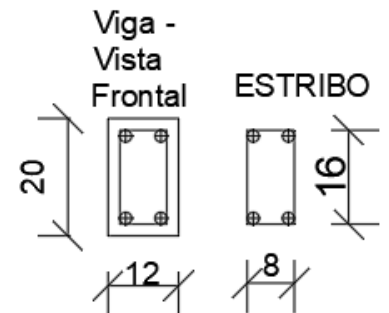
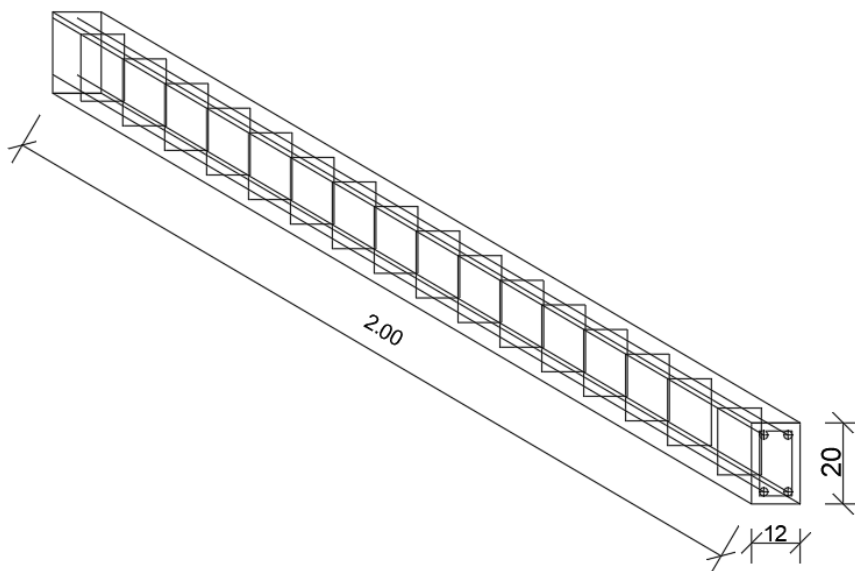
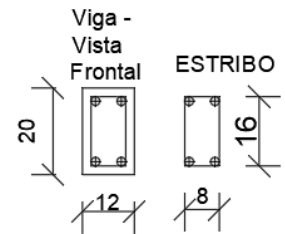
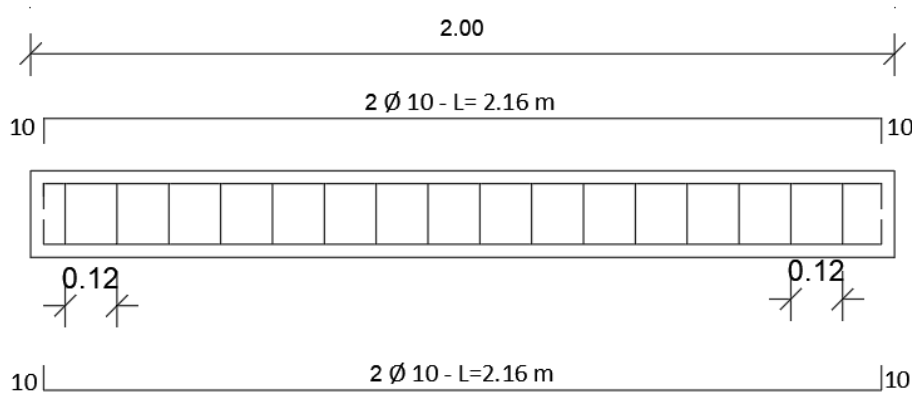
$$S = \frac{0,9 \times 0,16}{6,48 \times 10^3} \times \left(2 \times \frac{\pi \times 6^2}{4}\right) \times 434,78 \times 10^6$$

$$S = 0,546 \text{ m} \rightarrow \mathbf{\text{se adopta separación mínima de estribos; } \varnothing 6 \text{ cada } 12 \text{ cm}}$$

	CORTANTES kN	F_{cv} kN/m^2	V_{cu} kN	V_{su} kN	Disposición
V1	7,5	52,94	1,016	6,48	$\emptyset 6c/ 12cm$

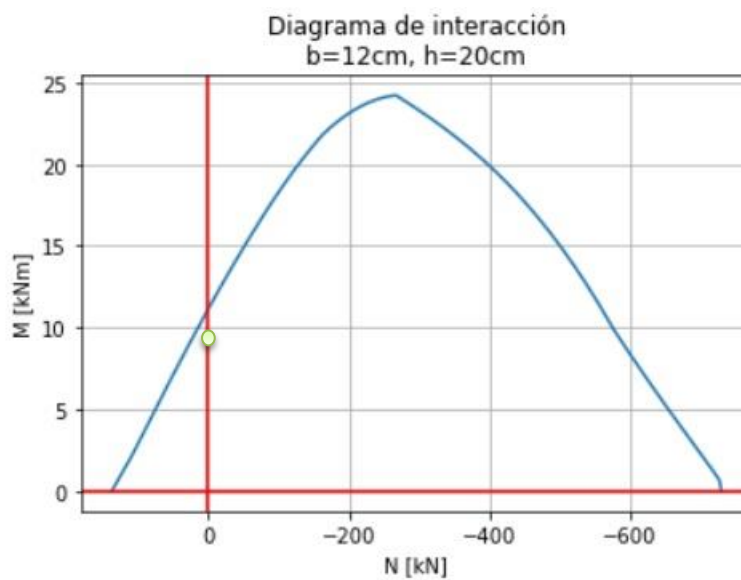
Tabla 5; Determinación y disposición de los estribos

5.2.8 Detalle de Viga



5.2.9 Diagrama de Interacción

El Diagrama de Interacción es para mostrar de forma gráfica la capacidad resistente que tiene la sección de la viga de hormigón que se tomó de base para el estudio, todo lo que puede resistir en una combinación de esfuerzos entre compresión y momento flector, por ello, tomando en cuenta la sección que adoptamos para el cálculo, se ha desarrollado un programa en Python que realiza el diagrama de interacción de cualquier sección rectangular de hormigón armado.



Referencias:

- Línea de falla
- Flexión simple máxima = 1.1170,57581 kN.m

5.3 Dimensionamiento de Refuerzo para Viga de Hormigón Armado con Fibras de Carbono – Refuerzo a Flexión

5.3.1 Consideraciones Iniciales

Una viga de hormigón armado simplemente apoyada, de 12x20 y de 2m de longitud, desea ser utilizada a un nivel de carga de 1,5Tn. Otros datos verificados son los siguientes; $F_{ck} = 25MPa$; $F_{yk} = 500MPa$; $r_{mec} = 4cm$; $A_s = 1,1997cm^2$; $A'_s = 1,1997cm^2$

<i>Datos de punto de Partida</i>	<i>Conversión de Unidad de medida</i>
$b = 12 \text{ cm}$	$b = 0,12 \text{ m}$
$h = 20 \text{ cm}$	$h = 0,20 \text{ m}$
$L = 200 \text{ cm}$	$L = 2,00 \text{ m}$
$P = 1,5 \text{ Tn}$	$P = 1.500 \text{ N}$
$d = 16\text{cm}$	$d = 0,16 \text{ m}$
$F_{ck} = 25 \text{ MPa}$	$F_{ck} = 250 \text{ kg/cm}^2$
$F_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$F_{yk} = 5.000 \text{ kg/cm}^2$
$Coef_{may} = 1,35$	$F_{cd} = 166,7 \text{ kg/cm}^2$
$\gamma_c = 1,15$	$F_{cd} = 16.666.666,67 \text{ N/m}^2$
$\gamma_s = 1,5$	$F_{yd} = 4.347,83 \text{ kg/cm}^2$
$PH^\circ A^\circ = 2,3 \text{ Tn}$	$A_s = 0,00011997m^2$
$E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$	$A'_s = 0,00011997m^2$

Dónde:

b = base de análisis de viga de hormigón armado.

h = altura de análisis de viga de hormigón armado.

P = carga puntual P

F_{ck} = resistencia característica del hormigón

F_{yk} = resistencia característica del acero

F_{cd} = resistencia de cálculo del hormigón

F_{yd} = resistencia de cálculo del acero

$Coef_{may}$ = coeficiente de mayoración, es multiplicado al M_d para obtener un momento de diseño

$PH^\circ A^\circ$ = peso específico del hormigón en masa

E = módulo de elasticidad

5.3.2 Determinación del momento flector máximo

$$M = \frac{P \times L}{4} = \frac{1,5 \times 2}{4} =$$

$$M = 0,75 \text{ Tn.m}$$

$$M_{may} = M \times Coef_{may}$$

$$M_{may} = 0,75 \times 1,35 = 1,0125 \text{ Tn.m}$$

5.3.3 Determinación de momento flector debido solo a la carga permanente

$$Mg = \frac{Pp \times L^2}{8} = \frac{(0,12 \times 0,20 \times 2 \times 2,3) \times 2^2}{8} =$$

$$Mg = 0,0552 \text{ Tn.m}$$

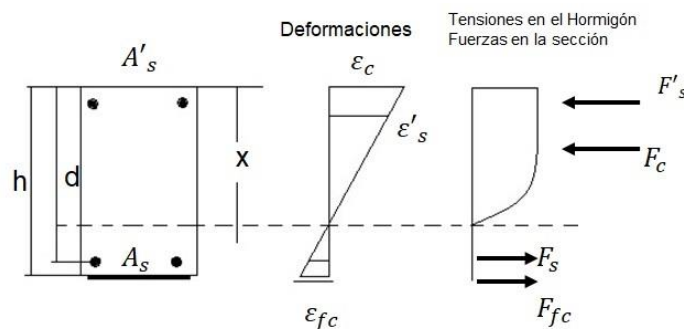
Dónde:

Mg = momento debido a la carga permanente, en este caso el peso propio de la viga

Pp = peso propio

5.3.4 Determinación de momento flector máximo en la sección de la viga

Ecuación de Equilibrio: Llevando al límite de su capacidad resistente a la sección en estudio, considerando una flexión simple.



$$Md = 0,85 \times F_{cd} \times b \times d^2 \times \left[\left(0,8 \times \frac{x}{d} \times \left(1 - 0,4 \times \frac{x}{d} \right) \right) + \left(\omega \times (1 - \rho_s) \phi'_s \times \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \right) \right]$$

Para; $\frac{x}{d} = 0,185$

$$\omega = \frac{(A_s + A'_s) \times F_{yd}}{0,85 \times F_{cd} \times b \times d} = \frac{(1,1997 + 1,1997)434,78}{0,85 \times 166,66 \times 12 \times 16} = 0,383535$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_s + A'_s} = \frac{1,1997}{1,1997 + 1,1997} = 0,500$$

$$\varphi = 1$$

$$\varphi'_s = 1$$

$$Md = 0,85 \times 16.666.666,67 \times 0,12 \times 0,16^2 \times \left[(0,8 \times 0,185 \times (1 - 0,4 \times 0,185)) + \left(0,383535 \times (1 - 0,500 \times 1) \times \left(1 - \frac{0,04}{0,16} \right) \right) \right]$$

$$Md = 1,246810 \text{ Tm}$$

$$M_{resist} = \frac{Md}{Coef_{may}}$$

$$M_{resist} = \frac{1,246810}{1,35} = 0,923563 \text{ Tn.m}$$

Donde;

ω = tasa mecánica de la armadura

ρ_s = tasa geométrica de armadura A_s

φ = coeficiente de tensión del acero en la armadura A_s función de la relación entre la profundidad de la línea neutra y el canto de la pieza; $\xi = \frac{x}{d}$

φ'_s = coeficiente de tensión del acero en la armadura A'_s función de la relación entre la profundidad de la línea neutra y el canto de la pieza; $\xi = \frac{x}{d}$

Md = momento flector que deberá resistir la viga

M_{resist} = momento que la viga puede resistir

5.3.5 Comparación de momentos

Momento Flector máximo:

$$M = 0,75 \text{ Tn.m}$$

$$Md_{ref} = 1,0125 \text{ Tn.m}$$

Momento Flector máximo resistente:

$$M_{resist} = 0,923563 \text{ Tn.m}$$

$$\therefore Md_{ref} > M_{resist}$$

La nueva situación de carga produce un momento Md_{ref} , mayor que el M_{resist} que la viga podrá

resistir como máximo en la situación actual, por tanto **la viga deberá reforzarse**.

Determinación del modo de rotura

Se deberá tener en cuenta la siguiente tabla:

$\frac{x}{d} = 0,185$	Determina el modo de rotura
$\frac{x}{d} < 0,259$	La ruptura se inicia por exceso de deformación plástica del acero, la pieza tendrá un comportamiento dúctil que es el deseable
$\frac{x}{d} = 0,259$	El hormigón y el acero se rompen al mismo tiempo, la pieza esta normalmente armada

5.3.6 Cálculo de la deformación inicial debida a cargas permanentes

$$\mu = \frac{Mg}{b \times d^2 \times F_{cd}} = \frac{0,0552 \times 10^5}{12 \times 16^5 \times 166,66}$$
$$\mu = 0,01078$$

Profundidad de la LN

$$0,8 \times x = d \times [1 - (1 - 2\mu)^{0,5}]$$
$$0,8 \times x = 16 \times [1 - (2 \times 0,01078)^{0,5}]$$
$$x = 0,21680006 \text{ cm}$$

Brazo de Palanca de la Fuerza a A_s

$$z = d - \lambda x = 16 - 0,4 \times 0,21680006$$
$$z = 15,913279 \text{ cm}$$

Fuerza en A_s

$$Mg = F_s \times z$$
$$F_s = \frac{Mg}{z} = \frac{0,0552 \times 10^5}{15,913279} = 346,880 \text{ kg}$$

Tensión en A_s

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{346,880}{1,1997} = 289,139 \text{ kg/cm}^2$$

Deformación

$$\varepsilon_{bi} = \frac{\sigma_s}{E} = \frac{289,139}{2.100.000} = 0,0001376$$
$$\varepsilon_{bi} = 0,137\text{‰}$$

5.3.7 Dimensionamiento del refuerzo

En este punto, se debe de tener en cuenta especialmente la compatibilidad de deformaciones, llevando en consideración las deformaciones máximas permitidas.

$\varepsilon_s máx$	10 ‰	para el acero
$\varepsilon_c máx$	3,5 ‰	para el hormigón
$\varepsilon_{f_{cu}}$	17 ‰	rotura de la fibra
$\varepsilon_{f_c máx}$	15 ‰	para la Fibra

Respetando la linealidad de las deformaciones según dimensiones de la sección:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{x}{d-x} = \frac{\varepsilon_b}{h-x}$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{x}{d-x}$$

$$\frac{3,5}{10} = \frac{x}{16-x}$$

$$0,35(16-x) = x$$

$$5,6 - 0,35x = x$$

$$x = 4,1481cm$$

$$\varepsilon_b = 5,551‰$$

La deformación de la Fibra será:

$$\varepsilon_{f_c} = \varepsilon_b - \varepsilon_{bi} = 5,551 - 0,137 = 5,414‰$$

5.3.8 Ecuaciones de Equilibrio de momento

Respecto a A_s

$$Md_{ref} = F_c \times (d - \lambda x) + F'_s \times (d - d') + \phi \times F_{f_c} \times d'$$

Respecto a F_c

$$Md_{ref} = F_s \times (d - \lambda x) + F'_s \times (\lambda x - d') + \phi \times F_{f_c} \times (h - \lambda)$$

Tenemos lo siguiente:

$$F_{fc} = \frac{Md_{ref} - F_c \times (d - \lambda x) - F'_s \times (d - d')}{\phi \times d'}$$

$$F_{fc} = \frac{Md_{ref} - F_s \times (d - \lambda x) - F'_s \times (\lambda x - d')}{\phi \times (h - \lambda)}$$

Dónde:

$$Md_{ref} = 101.250 \text{ kg.m}$$

$$F_c = b \times 0,8 \times x \times 0,85 \times F_{cd} = 12 \times 0,8 \times 4,14 \times 0,85 \times 166,66 = 5.630,4 \text{ kg}$$

$$F_s = A_s \times F_{yd} = 1,1997 \times 4347,83 = 5.216,08 \text{ kg}$$

$$F'_s = A'_s \times F_{yd} = 1,1997 \times 4347,83 = 5.216,08 \text{ kg}$$

$$\phi = 0,85$$

$$d - \lambda x = 16 - 0,4 \times 4,14 = 14,344 \text{ cm}$$

$$d - d' = 16 - 4 = 12 \text{ cm}$$

$$\lambda x - d' = 0,4 \times 4,14 - 16 = -2,344 \text{ cm}$$

$$h - \lambda = 20 - 0,4 = 18,334 \text{ cm}$$

Como resultado:

$$F_{fc} = \frac{101.250 - 5.630,4 \times 14,344 - 5.216,08 \times 12}{0,85 \times 4}$$

$$\phi F_{fc} = -12383,9709 \text{ kg}$$

$$F_{fc} = \frac{101.250 - 5.216,08 \times 14,344 - 5.216,08 \times -2,344}{0,85 \times 18,334}$$

$$\phi F_{fc} = 2.479,21786 \text{ kg}$$

Se toma la mayor de las fuerzas calculadas, el valor de $\phi F_{fc} = 2.479,21786 \text{ kg}$ indica que es necesaria esa fuerza de tracción adicional para equilibrar el momento que es objetivo de refuerzo.

Siendo:

$$\phi F_{fc} = 2.479,21786 \text{ kg}$$

$$E_{fc} = 2.228.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{fc} = 5,414029202\%$$

$$\varepsilon_{fc} = 0,005414029202$$

Tenemos que:

$$\frac{A_{fc}}{\phi} = \frac{\phi F_{fc}}{E_{fc} \times \varepsilon_{fc}} = \frac{2.479,21786}{2.228.000 \times 0,005414029202}$$
$$A_{fc} = 0,1747019 \text{ cm}^2$$

Espesor de la lámina de Fibra de Carbono

$$t_{fc} = 0,0165 \text{ cm}$$

Se expresa lo siguiente:

$$b_{fc} = \frac{A_{fc}}{\phi \times t_{fc}} = \frac{0,1747019}{0,85 \times 0,0165} = 12,45 \text{ cm}$$

El valor de b_{fc} es igual al ancho de la viga, por tanto bastara una lámina de Fibra de Carbono.

5.4 Dimensionamiento de Refuerzo para Viga de Hormigón Armado con Fibras de Carbono – Refuerzo a Cortante

5.4.1 Datos de punto de partida

<i>Datos</i>	<i>Conversión de Unidad de medida</i>
$b = 12 \text{ cm}$	$b = 0,12 \text{ m}$
$h = 20 \text{ cm}$	$h = 0,20 \text{ m}$
$L = 200 \text{ cm}$	$L = 2,00 \text{ m}$
$P = 1,5 \text{ Tn}$	$P = 1.500 \text{ N}$
$d = 16 \text{ cm}$	$d = 0,16 \text{ m}$
$F_{ck} = 25 \text{ MPa}$	$F_{ck} = 250 \text{ kg/cm}^2$
$F_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$F_{yk} = 5.000 \text{ kg/cm}^2$
$E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$	$F_{cd} = 166,7 \text{ kg/cm}^2$
$E_{fc} = 2.228.000 \text{ kg/cm}^2$	$F_{cd} = 16.666.666,67 \text{ N/m}^2$
$V = 764 \text{ kg}$	$F_{yd} = 4.347,83 \text{ kg/cm}^2$
$V_c = 103,66 \text{ kg}$	$A_s = 0,00011997 \text{ m}^2$
$V_s = 661,12 \text{ kg}$	$A'_s = 0,00011997 \text{ m}^2$
$T_{fc} = 3.790 \text{ MPa}$	$T_{fc} = 3.8646,63 \text{ kg/cm}^2$
$\phi = 0,85$	
$\psi = 0,85$	
$t_{fc} = 0,0165 \text{ cm}$	
$\omega_{fc} = 10 \text{ cm}$	
$n = 1$	
$S_{fc} = 1$	
$d_{fc} = 16 \text{ cm}$	

Dónde:

b = base de análisis de viga de hormigón armado.

h = altura de análisis de viga de hormigón armado.

P = carga puntual P

F_{ck} = resistencia característica del hormigón

F_{yk} = resistencia característica del acero

F_{cd} = resistencia de cálculo del hormigón

F_{yd} = resistencia de cálculo del acero.

E = módulo de elasticidad

E_{fc} = módulo de elasticidad de la Fibra de Carbono

V = fuerza cortante

V_c = fuerza cortante, contribución al corte del hormigón

V_s = fuerza cortante, contribución al corte del hormigón

T_{fc} = tensión límite de ruptura de la Fibra de Carbono

ϕ = coeficiente de minoración de resistencia de la Fibra de Carbono

ψ = coeficiente de minoración de resistencia recomendado por ACI

t_{fc} = espesor de una camada de Fibra de Carbono

ω_{fc} = ancho de la lámina de Fibra de Carbono

n = número de camadas de Fibra de Carbono

S_{fc} = separación entre láminas de Fibra de Carbono

d_{fc} = profundidad de la lámina de Fibra de Carbono para el refuerzo al cizallamiento

5.4.2 Verificación de la capacidad resistente a esfuerzo cortante – Tensión de corte de calculo

$$\tau = \frac{V}{b \times d} = \frac{764}{12 \times 16} =$$
$$\tau = 3,983281 \text{ kg/cm}$$

5.4.3 Verificación de la capacidad resistente de la sección al esfuerzo cortante

$$V_n = V_c + V_s = 103,66 + 661,12 =$$
$$V_n = 764,78 \text{ kg}$$

5.4.4 Determinación del diseño del refuerzo

$$V_{fc} = \frac{A_{fc} \times T_{fc} (\sin\beta + \cos\beta) \times d_{fc}}{S_{fc}} < 0,332 \times b \times d \times \sqrt{F_{cd}}$$

Para:

$\beta = 90^\circ$, la expresión de V_{fc} puede escribirse de la siguiente manera:

$$V_{fc} = \frac{A_{fc} \times T_{fc} \times d_{fc}}{S_{fc}} \leq 0,332 \times b \times d \times \sqrt{F_{cd}}$$

o bien:

$$V_{fc} = \frac{2 \times n \times t_{fc} \times \omega_{fc} \times T_{fc} \times d_{fc}}{S_{fc}}$$

$$V_{fc} = \frac{2 \times 1 \times 0,0165 \times 10 \times 3.8646,63 \times 16}{1}$$

$$V_{fc} = 12.753,3879 \text{ kg}$$

5.4.5 Determinación de la resistencia al cizallamiento pretendida

$$V_{nR} = \phi \times (V_c + V_s + \psi V_{fc})$$

$$V_{nR} = 0,85 \times (103,66 + 661,12 + (0,85 \times 12.753,3879))$$

$$V_{nR} = 9.864,38758 \text{ kg}$$

V_{nR} = Resistencia nominal al cortante de la viga después del Refuerzo.

5.4.6 Relación entre el ancho y separación de las láminas de Fibra de Carbono

$$\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}} = \frac{V_{fc}}{2 \times n \times t_{fc} \times d_{fc}}$$

$$\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}} = \frac{12.753,3879}{2 \times 1 \times 0,0165 \times 16}$$

$$\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}} = 0,625$$

Teniendo en cuenta:

$\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}} < 1$	Las láminas de Fibra de Carbono deberá de mantener una separación mayor o igual a $\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}}$
$\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}} = 1$	Se deben de usar láminas de Fibra de Carbono continuas o de ancho $\omega_{fc} = S_{fc}$
$\frac{\omega_{fc}}{S_{fc}} > 1$	Una única camada de Fibra de Carbono no será suficiente, mas camadas serán necesarias

5.5 Plan de Práctica

5.5.1 Pasos a seguir

Llevar a cabo 3 probetas de viga según cálculo. Todas las probetas deberán cumplir con las siguientes características:

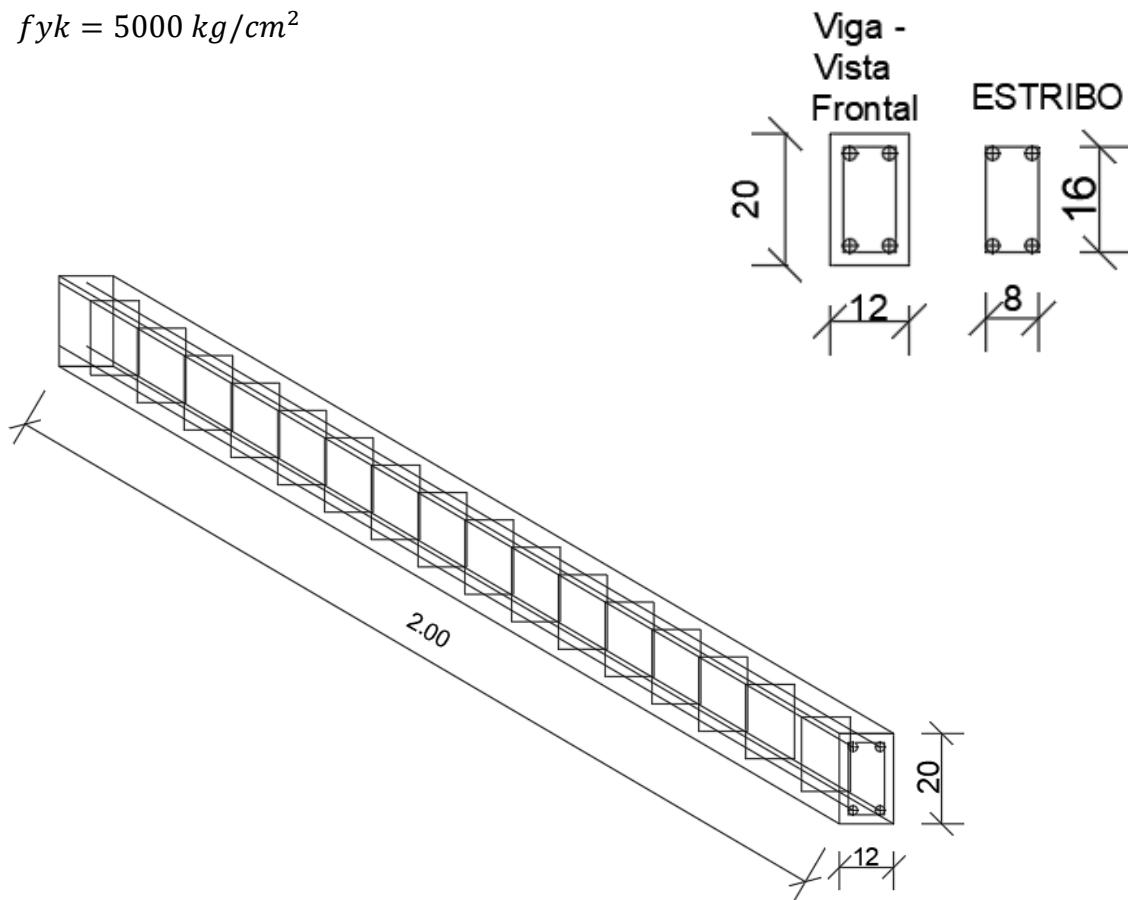
$$b = 12\text{cm}$$

$$h = 20\text{cm}$$

$$L_{\text{Log.Viga}} = 2\text{mts}$$

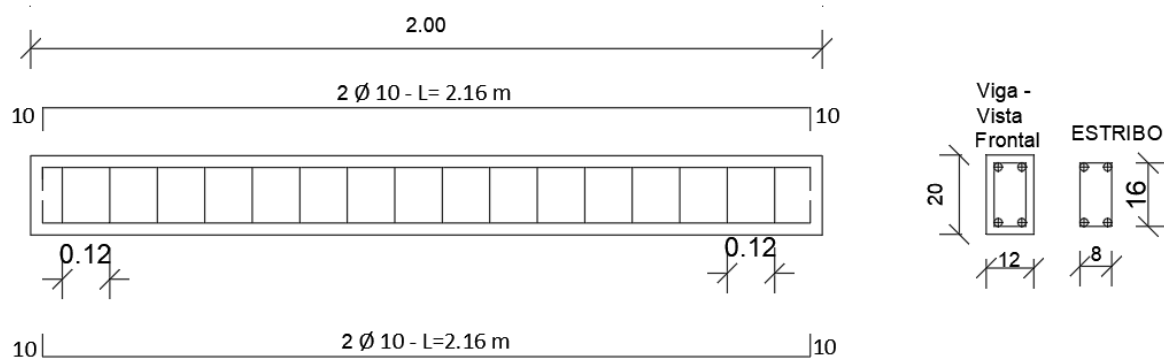
$$f_{ck} = 250\text{ kg/cm}^2$$

$$f_{yk} = 5000\text{ kg/cm}^2$$



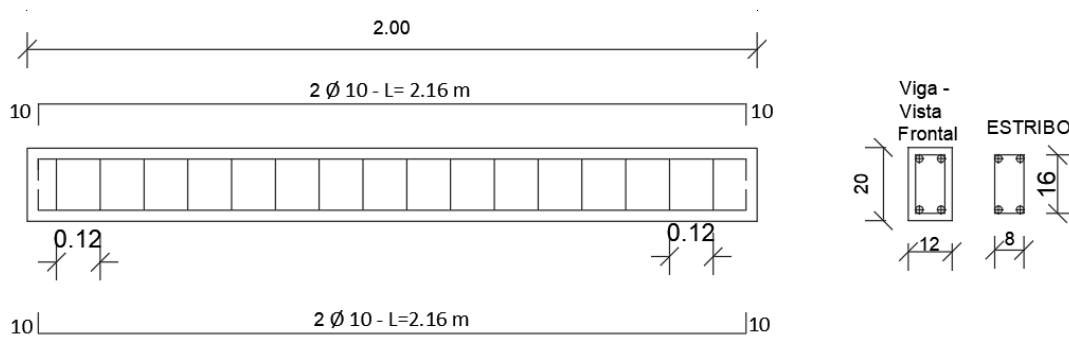
a) Viga de ensayo 1

Esta se armará según cálculo, teniendo 2 unidades de varilla conformada $\varnothing 10$, de 2 metros de longitud cada varilla, se colocará una varilla en cada extremo superior y esta actuará como armadura positiva y 2 unidades de varilla conformada $\varnothing 10$, de 2 metros de longitud cada varilla, para la armadura negativa, se colocará una varilla en cada extremo inferior. Los estribos serán con varilla $\varnothing 6$, cada 12 centímetros e irán a lo largo de la longitud de la viga



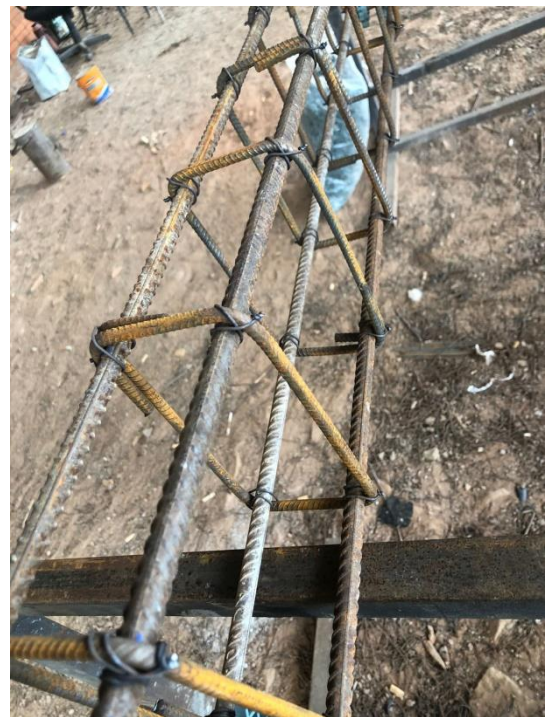
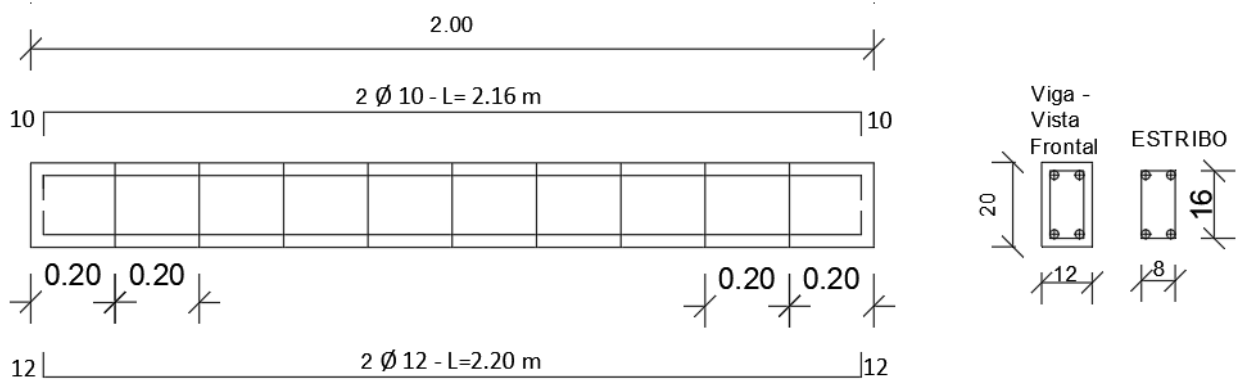
b) Viga de ensayo 2

Esta se armará según cálculo, teniendo 2 unidades de varilla conformada $\varnothing 10$, de 2 metros de longitud cada varilla, se colocará una varilla en cada extremo superior y esta actuará como armadura positiva y 2 unidades de varilla conformada $\varnothing 10$, de 2 metros de longitud cada varilla, para la armadura negativa, se colocará una varilla en cada extremo inferior. Los estribos serán con varilla $\varnothing 6$, cada 12 centímetros e irán a lo largo de la longitud de la viga.



c) Viga de ensayo 3

Esta se armará de la siguiente manera, teniendo 2 unidades de varilla conformada $\varnothing 10$, de 2 metros de longitud cada varilla, se colocará una varilla en cada extremo superior y esta actuará como armadura positiva y 2 unidades de varilla conformada $\varnothing 12$, de 2 metros de longitud cada varilla, para la armadura negativa, se colocará una varilla en cada extremo inferior. Los estribos serán con varilla $\varnothing 6$, cada 20 centímetros e irán a lo largo de la longitud de la viga



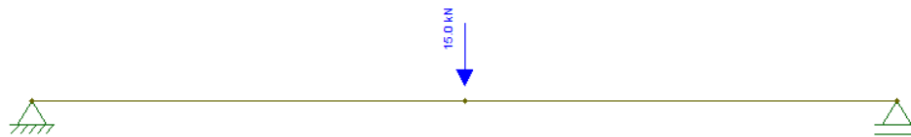
5.5.2 Pasos a seguir para la impregnación de la Fibra de Carbono

Se tiene 3 Probetas Elaboradas cada una con características iguales, pero una de ellas está debilitada, a continuación se explicará paso a paso como se colocará la Fibra de Carbono y su correspondiente componente epoxi.

a) Viga de ensayo 1

Esta se ensayará sin Fibra de Carbono, el propósito de esta rotura será sacar el valor del Estado Limite Último de la viga de hormigón armado.

La viga ira colocada de forma simplemente apoyada con el propósito de aguantar una carga igual a $P=15\text{kN}$.



b) Viga de ensayo 2

Se ensayará hasta la rotura, por tanto, la Fibra de Carbono se colocará en toda la parte inferior a lo largo de la longitud de la viga, teniendo así un corte de 0.12x2.00 metros, se utiliza epoxi para su correcta adherencia a la viga. El Objetivo de esta rotura será anotar el valor que aguanta la Viga de Hormigón Armado con Fibra de Carbono en esa posición.



c) Viga de ensayo 3

Se ensayará hasta la rotura, la Fibra de Carbono se colocará en toda la parte inferior a lo largo de la longitud de la viga, teniendo así un corte de 0.12x2.00 metros igual a la Segunda Probeta, pero esta Probeta está debilitada en sus estribos con una separación de 0.20m entre estribos y su armadura negativa ha sido reemplazada por varilla $\varnothing 12$, se utiliza epoxy para su correcta adherencia a la viga. El Objetivo de esta rotura será anotar el valor que aguanta la Viga de Hormigón Armado con Fibra de Carbono en esa posición ya que la viga está debilitada y sobre exigida.



6. CAPITULO VI: FACTORES A CONSIDERAR EN UN PROYECTO DE REFUERZO

6.1 Momento en que se interviene la estructura

Lo primero en tener en cuenta, todos los problemas patológicos detectados en las construcciones que presente la viga de hormigón armado o ya sea cualquier estructura, tienden a agravarse con el tiempo, cuanto antes las manifestaciones patológicas sean descubiertas y corregidas, menor será el costo de la intervención.

Por tanto, es crucial mantener un estricto control en las fases del proyecto, la ejecución, la utilización con mantenimiento preventivo, y, la utilización con mantenimiento correctivo.

6.2 Fase de Proyecto

Cualquier eventualidad tomada durante la fase de proyecto, en vista a prevenir o corregir futuras manifestaciones patológicas corresponden a un costo que es considerada de valor unitario.

6.3 Fase de Ejecución

Cualquier medida adicional a las especificaciones técnicas de proyecto, en vista a sanear o evitar ocurrencias patológicas no previstas durante la etapa de proyecto, corresponden a un costo cinco veces mayor del que hubiera tenido si la medida hubiera sido tomada durante la etapa de proyecto.

6.4 Fase de Utilización. Mantenimiento preventivo

Si existe la posibilidad de la ocurrencia patológica puede ser prevista o anticipada durante la utilización de la estructura, por ejemplo durante una evaluación de mantenimiento regular de la construcción y fueran tomadas inmediatas medidas cabales para su control o eliminación, el costo del tal intervención preventiva será cinco veces menor de lo que costaría si la medida fuera tomada luego de la ocurrencia de la

manifestación patológica, a pesar de ser veinticinco veces mayor que el costo de aplicación de la medida si su recomendación hubiera sido durante la fase de proyecto.

6.5 Fase de Utilización. Intervención correctiva

Lo que ocurre aquí es que cuando los problemas patológicos se han manifestado, lo cual ocurre en muchos casos cuando el problema se ha diseminado y ocasionado daños considerables, el costo de la intervención se estima en ciento veinticinco veces superior al de la fase de proyecto.

7. Capítulo VII: RESULTADOS

El estudio del análisis patológico de una viga de hormigón armado (evaluación y diagnóstico), se considera un factor fundamental para determinar a través de ella la necesidad de realizar el refuerzo o bien, verificar y tomar una decisión para la corrección de una estructura de hormigón armado; los datos obtenidos en los relevamientos determinaran el cálculo del mismo.

En adelante se mostrará los resultados obtenidos de los ensayos de probetas preparados, tanto de viga de hormigón armado sin refuerzo, viga de hormigón armado con el sistema de refuerzo compuesto por la Fibra de Carbono y la resina de epoxi, y también la probeta cilíndrica para la verificación de resistencia de cálculo.

7.1 Probeta Cilíndrica

Para la evaluación y aceptación del concreto se ha tomado como base la medida de la resistencia a la compresión simple ya que es el más utilizado debido a su economía y fácil realización, las probetas cilíndricas tienen una dimensión de 15cm de diámetro y 30cm de altura, la mezcla vertida a cada probeta cilíndrica se realizó in situ con una dosificación de 1:3:4 para obtener una resistencia característica igual a $F_{ck} = 25MPa$.

- Primera Probeta:

El moldeo se realizó a la fecha 01/06/2022 y la rotura se realizó a la fecha 15/07/2022 con un total de 44 días de curado, tuvo una carga de rotura de 62.000 kg, obteniendo así una rotura muy buena, teniendo como resultado $F_{ck} = 338,73 \text{ kg/cm}^2$ como también podemos escribir; $F_{ck} = 33,21 \text{ MPa}$.



- **Segunda Probeta:**

El moldeo se realizó a la fecha 01/06/2022 y la rotura se realizó a la fecha 15/07/2022 con un total de 44 días de curado, tuvo una carga de rotura de 69.000 kg, obteniendo así una rotura muy buena, teniendo como resultado $F_{ck} = 379,06 \text{ kg/cm}^2$ como también podemos escribir; $F_{ck} = 33,88 \text{ MPa}$.



- **Tercera Probeta:**

El moldeo se realizó a la fecha 01/06/2022 y la rotura se realizó a la fecha 15/07/2022 con un total de 44 días de curado, tuvo una carga de rotura de 62.000 kg, obteniendo así una rotura muy buena, teniendo como resultado $F_{ck} = 338,73 \text{ kg/cm}^2$ como también podemos escribir; $F_{ck} = 33,21 \text{ MPa}$.



A través de este ensayo se obtuvo los parámetros matemáticos el cual se pudo verificar la dosificación realizada in situ 1:3:4 para la viga de hormigón armado obteniendo un resultado excelente sobrepasando el valor esperado de $F_{ck} = 25 \text{ MPa}$, como evidencia en la siguiente imagen se detalla los datos del ensayo descrito.

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Asunción

DIRECCIÓN DE DEPARTAMENTOS
INFORME DE ENSAYO

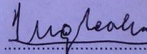
DD-CGA-177/2022

Datos del Solicitante:
Empresa: Diana Madeleine Caballero
Ensayo: A la Compresión de Hormigón, en Probetas Cilíndricas-.
Obra: Tesis
Ensayo realizado en: Laboratorio de Materiales de Construcción
Fecha del Informe: 18/07/2022

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y MATERIALE

Prob. Nº	Fecha		Edad (días)	Área (cm ²)	Carga de Rotura (kg)	Carga Corregida (kg)	Fc (kg/cm ²)
	Moldeo	Rotura					
1	01/06/2022	15/07/2022	44	176.7	62.000	59.853	338.73
2	01/06/2022	15/07/2022	44	176.7	69.000	66.450	376.06
3	01/06/2022	15/07/2022	44	176.7	62.000	59.853	338.73

Norma Utilizada : UNE 83 - 304
Los resultados obtenidos corresponden exclusivamente a las muestras suministradas por la firma interesada


Prof. Ing. Augusto Acosta
Jefe de Laboratorio de Materiales de Construcciones

Campus de la Una -San Lorenzo , Tel-Fax:021585581/4 E-mail: inf@ing.una.py Página 1 de 1

Detalle del Informe realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción situado en el Campus de la UNA – San Lorenzo; Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Asunción.

7.2 Probeta de Viga de Hormigón Armado

- Viga de ensayo 1 - Viga de Hormigón Armado sin Refuerzo:

Se practicó el ensayo a flexión de dicha Probeta de hormigón armado, cuyas dimensiones fueron detallándose anteriormente gracias al cálculo de dimensionamiento de la sección 5.2 del Proyecto Final de Grado, a través de este ensayo se realizó la verificación si dichos parámetros cumplen con las solicitaciones calculadas.



El armado de la viga de hormigón fue calculado como para que pueda resistir una carga puntual igual a $P = 1.500 \text{ kg}$ sin ningún refuerzo, el resultado arrojó una carga igual a $P_{rotura1} = 4.400 \text{ kg}$, superando totalmente la carga a la cual la viga fue dimensionada,

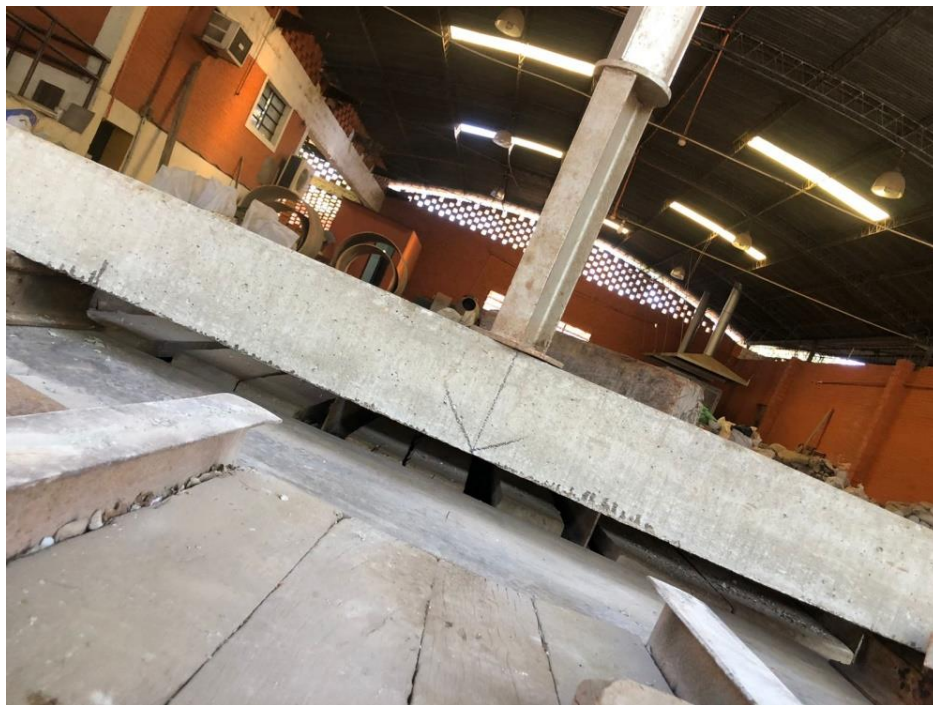
siendo así resultado satisfactorio para la conclusión de esta probeta ya que aguantó 193% más de carga que debería de aguantar. No obstante, debido a los resultados arrojados en la probeta cilíndrica se hace un cambio en el cálculo y hallando una carga de rotura esperada igual a $P_{esperada} = 4.582,44 \text{ kg}$, 3,98% más de la carga $P_{rotura1}$



De esta manera se muestra las fisuras ocasionadas por la falla a flexión, la viga de hormigón armado cumple con las solicitaciones iniciales adoptadas para la realización del Proyecto Final de Grado, anotando el valor para la comparación con el refuerzo

empleado por el componente de la Fibra de Carbono y la resina de epoxi.

- **Viga de ensayo 2 - Viga de Hormigón Armado con Refuerzo de Fibra de Carbono:**
La viga tiene las mismas características de la viga sin reforzar, es decir, mismas dimensiones calculadas en la sección 5.2 del Proyecto, el ensayo realizado en la Primera Probeta, indica que la viga sin reforzar aguanta una carga $P = 4.400 \text{ kg}$. Esta Segunda Probeta teniendo una lámina de Fibra de carbono como refuerzo arrojó una carga igual a $P_{rotura2} = 4.800 \text{ kg}$, 9,1% de carga más que la viga sin reforzar demostrando así, el aporte del método de refuerzo compuesto por la Fibra de Carbono y la resina de epoxi.



Preparación para realizar el ensayo



Las primeras fisuras por flexión



Se observa la rotura total de la viga de hormigón armado, teniendo así falla a flexión, notándose también la adherencia que tuvo la fibra de carbono en el hormigón.

- **Viga de ensayo 3 - Viga de Hormigón Armado con Refuerzo de Fibra de Carbono:**

Esta viga también cumple con las características de las Probetas 1 y 2 de vigas; su sección, longitud y la resistencia característica tanto de acero y del hormigón, pero en particular fueron puestas varilla de $\varnothing 12$ a la armadura negativa reemplazando la varilla de $\varnothing 10$ que tenían las 2 Probetas ensayadas anteriormente, también se agregó el sistema de refuerzo de la Fibra de Carbono, pero la separación de los estribos fueron modificados y puestos cada 20cm.

Pretendiendo que arroje una rotura a cortante, fue reforzada a flexión y debilitada los estribos.

Se procede al ensayo arrojando una carga de rotura igual a $P_{rotura3} = 6.700 \text{ kg}$, superando 52,27% más respecto a la viga sin reforzar.



8. CAPITULO VIII: ANÁLISIS ECONÓMICO

8.1 Resumen de Costos generales

A continuación, una breve descripción de los gastos que tuvo la realización del Proyecto Final de Grado. Cabe de mencionar y destacar que se consiguió exonerar algunos gastos como los materiales para la elaboración de viga de hormigón y también el ensayo de la probeta cilíndrica.

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Paquete de Fibra de Carbono + epoxi	1	gl	1.992.000	1.992.000
2	Costo de traslado + impuestos EEUU	1	gl	393.161	393.161
3	Costo de Envío de Miami a Paraguay (23.5 \$/kg)	1	gl	637.000	637.000
4	Costo de envío a puerta	1	un	25.000	25.000
5	Varilla Ø6	3	un	25.600	76.800
6	Varilla Ø10	2	un	61.875	123.750
7	Varilla Ø12	1	un	90.750	90.750
8	Arena lavada	0,109	m3	35.000	3.815
9	Triturada	0,135	tn	55.000	7.425
10	Cemento	68	kg	1.300	88.400
11	Madera para encofrado	9	un	10.000	90.000
12	Mano de Obra por preparación de encofrado y armado (2 personas)	1	gl	180.000	180.000
13	Laboratorio de ensayo de probetas	3	un	615.000	1.845.000
14	Combustible para movilidad	1	gl	250.000	250.000
TOTAL GUARANIES:					5.803.101
TOTAL DÓLARES:					851

8.2 Análisis de Precios Unitarios

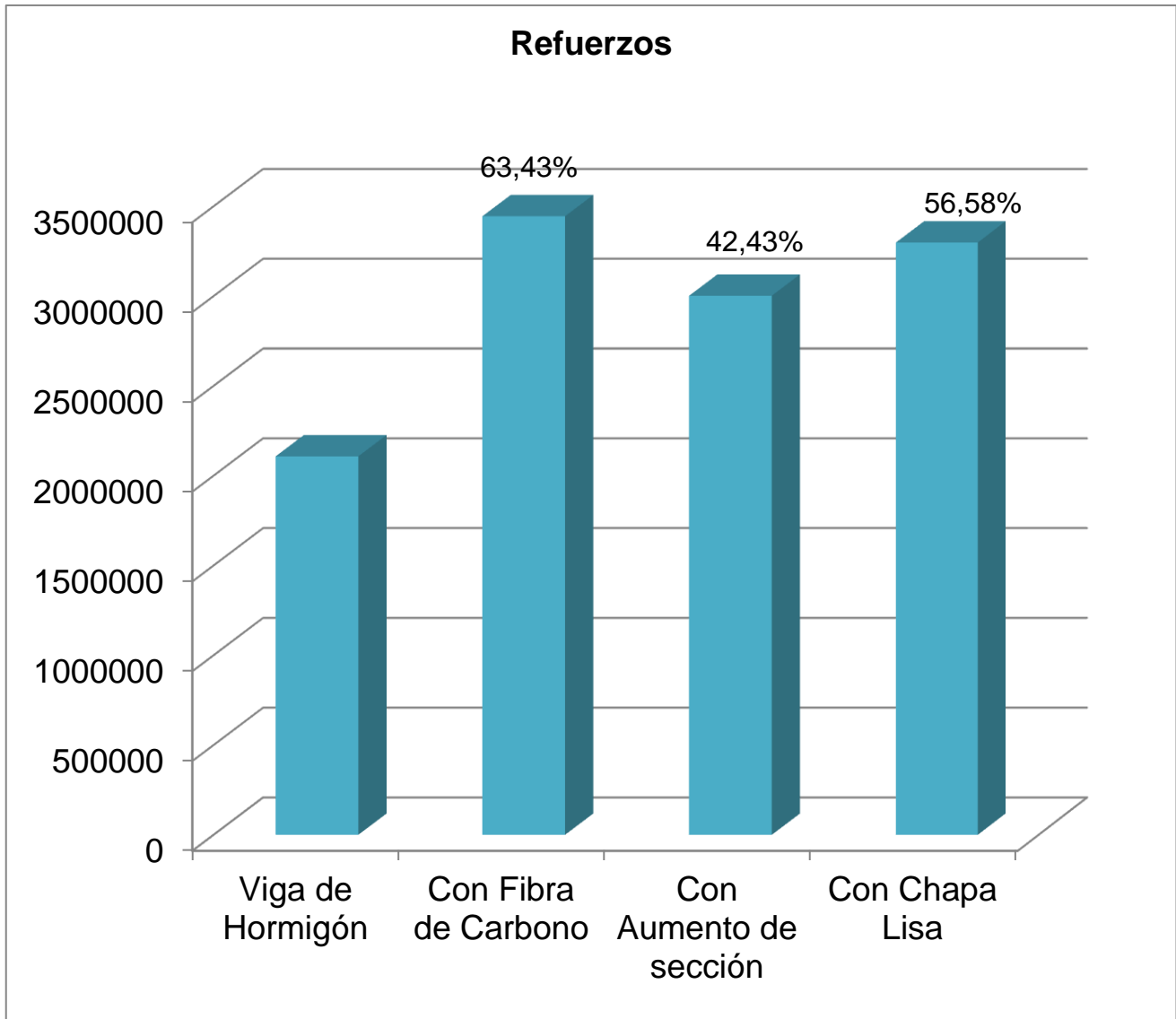
Fecha	Ítem N° 1	Viga de Hormigón Armado		
			Unidad: m3	
a. Equipos a utilizar	Modelo de equipo	Horas de c/equipo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Herramientas Menores	convencional	1,0	28.500	28.500
Maquinarias				-
				-
				-
A. Total Gs.				28.500
b. Mano de obra	Cantidad de trabajadores	Horas de c/trabajador	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Oficial	1,0	2,0	25.000	50.000
Albañil	2,0	2,0	18.000	72.000
				-
				-
B. Total Gs.				122.000
C. Producción de equipo p/h		3,01	Costo horario (A+B)	150.500
D. Costo Unitario de la Ejecución (A+B)/C =D				50.000
E. Materiales	Unidad	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Cemento	kg	300,0	1.260	378.000
Arena Lavada	m3	0,7	65.000	45.500
Piedra Triturada	tn	1,4	110.000	154.000
Varilla conformada	kg	95,0	11.000	1.045.000
Alambre de atar	kg	0,4	18.000	7.200
Clavo 1" a 7"	kg	0,4	18.000	7.200
				-
E. Total Gs.				1.636.900
F. Transporte	DMT KM	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Camión para traslado	30,0	1,0	2.000	60.000
				-
				-
				-
F. Total Gs.				60.000
Costo Directo Total [D+E+F]			Gs	1.775.400
Gastos Generales [12% s/ (CDT)] (GG)			Gs	213.048
Beneficio e Impuestos [15% s/ (CDT)] (Bel)			Gs	64.415
Costo Unitario [CDT + G.G. + BEL] (CU)			Gs	2.052.863
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO (I.V.A.)			Gs	54.545
COSTO UNITARIO ADOPTADO [CU + IVA]			Gs	2.107.408

Fecha	Ítem N° 2	Viga de Hormigón Armado con Refuerzo de Fibras de Carbono		
	Obra		Unidad:m3	
a. Equipos a utilizar	Modelo de equipo	Horas de c/equipo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Herramientas Menores	convencional	1,0	28.500	28.500
A. Total Gs.				28.500
b. Mano de obra	Cantidad de trabajadores	Horas de c/trabajador	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Oficial	1,0	2,0	25.000	50.000
Albañil	2,0	2,0	18.000	72.000
B. Total Gs.				122.000
C. Producción de equipo p/h		3,01	Costo horario (A+B)	150.500
D. Costo Unitario de la Ejecución (A+B)/C =D				150.500
E. Materiales	Unidad	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Cemento	kg	300,0	1.260	378.000
Arena Lavada	m3	0,7	65.000	45.500
Piedra Triturada	tn	1,4	110.000	154.000
Varilla conformada	kg	95,0	11.000	1.045.000
Alambre de atar	kg	0,4	18.000	7.200
Clavo 1" a 7"	kg	0,4	18.000	7.200
Lamina de Fibra de Carbono	m2	1,0	550.000	550.000
Epoxi	lts	0,8	85.000	68.000
E. Total Gs.				2.254.900
F. Transporte	DMT KM	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
camiones para traslado	30,0	1,0	2.000	60.000
F. Total Gs.				60.000
Costo Directo Total [D+E+F]			Gs	2.465.400
Gastos Generales [12% s/ (CDT)] (GG)			Gs	295.848
Beneficio e Impuestos [15% s/ (CDT)] (Bel)			Gs	369.810
Costo Unitario [CDT + G.G. + BEL] (CU)			Gs	3.131.058
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO (I.V.A.)			Gs	313.106
COSTO UNITARIO ADOPTADO [CU + IVA]			Gs	3.444.164

Fecha	Ítem N° 3	Viga de Hormigón Armado con aumento de sección de Hormigón Armado		
		Unidad: m3		
a. Equipos a utilizar	Modelo de equipo	Horas de c/equipo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Herramientas Menores	convencional	1,0	28.500	28.500
A. Total Gs.				28.500
b. Mano de obra	Cantidad de trabajadores	Horas de c/trabajador	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Oficial	1,0	2,0	25.000	50.000
Albañil	2,0	2,0	18.000	72.000
B. Total Gs.				122.000
C. Producción de equipo p/h		3,01	Costo horario (A+B)	150.500
D. Costo Unitario de la Ejecución (A+B)/C =D				150.500
E. Materiales	Unidad	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Cemento	kg	331,0	1.260	417.060
Arena Lavada	m3	0,9	65.000	58.500
Piedra Triturada	tn	1,6	110.000	176.000
Varilla conformada	kg	115,0	11.000	1.265.000
Alambre de atar	kg	0,6	18.000	10.800
Clavo 1" a 7"	kg	0,6	18.000	10.800
E. Total Gs.				1.938.160
F. Transporte	DMT KM	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
camiones para traslado	30,0	1,0	2.000	60.000
F. Total Gs.				60.000
Costo Directo Total [D+E+F]			Gs	2.148.660
Gastos Generales [12% s/ (CDT)] (GG)			Gs	257.839
Beneficio e Impuestos [15% s/ (CDT)] (Bel)			Gs	322.299
Costo Unitario [CDT + G.G. + BEL] (CU)			Gs	2.728.798
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO (I.V.A.)			Gs	272.880
COSTO UNITARIO ADOPTADO [CU + IVA]			Gs	3.001.678

Fecha	Ítem N° 4	Viga de Hormigón Armado con Refuerzo de Chapa negra		
			Unidad: m3	
a. Equipos a utilizar	Modelo de equipo	Horas de c/equipo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Herramientas Menores	convencional	1,0	28.500	28.500
A. Total Gs.				28.500
b. Mano de obra	Cantidad de trabajadores	Horas de c/trabajador	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Oficial	1,0	2,0	25.000	50.000
Albañil	2,0	2,0	18.000	72.000
B. Total Gs.				122.000
C. Producción de equipo p/h		3,01	Costo horario (A+B)	150.500
D. Costo Unitario de la Ejecución (A+B)/C =D				150.500
E. Materiales	Unidad	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
Cemento	kg	331,0	1.260	417.060
Arena Lavada	m3	0,9	65.000	58.500
Piedra Triturada	tn	1,6	110.000	176.000
Varilla conformada	kg	115,0	11.000	1.265.000
Alambre de atar	kg	0,6	18.000	10.800
Clavo 1" a 7"	kg	0,6	18.000	10.800
Chapa lisa negra	m2	1,0	220.000	220.000
Herramientas menores para la fijación de chapa	gl	1,0	50.000	50.000
E. Total Gs.				2.208.160
F. Transporte	DMT KM	Consumo	Costo horario Gs.	Costo Total hora Horario Gs.
camiones para traslado	30,0	1,0	2.000	2.000
F. Total Gs.				2.000
Costo Directo Total [D+E+F]			Gs	2.310.242
Gastos Generales [12% s/ (CDT)] (GG)			Gs	277.229
Beneficio e Impuestos [15% s/ (CDT)] (Bel)			Gs	346.536
Costo Unitario [CDT + G.G. + BEL] (CU)			Gs	2.934.007
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO (I.V.A.)			Gs	293.401
COSTO UNITARIO ADOPTADO [CU + IVA]			Gs	3.297. 842

8.2.1 Resumen de Análisis Precios Unitarios



- Reforzar con Fibra de carbono tiene un costo del 63,43% gs/m³ más a la viga de hormigón armado.
- Reforzar con Aumento de Sección tiene un costo del 42,43% gs/m³ más a la viga de hormigón armado.
- Reforzar con Chapa Lisa tiene un costo del 56,58% gs/m³ más a la viga de hormigón armado.

9. CAPITULO IX: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

- Se realizó el análisis patológico a grandes rasgos de una viga de hormigón armado determinando así la patología común de una viga.
- La propuesta de Refuerzo con Fibra de Carbono resulta competitiva respecto a los Aumento de sección del hormigón, chapas Lisas u otro sistema de refuerzo adoptado, ya que la ventaja de esta técnica radica en su rapidez de ejecución y puesta en carga.
- Como desventaja se puede mencionar que en general los materiales constituyentes del Sistema de Refuerzo ya se pueden adquirir en Paraguay pero por el momento no existe un stock permanente.
- El beneficio que posee el Refuerzo con Fibra de Carbono respecto a los aumentos de secciones en vigas de hormigón convencional es que al momento de su ejecución se deja 24hs de curado a temperatura ambiente y luego ya es posible poner en carga la viga de hormigón armado.

9.2 Recomendaciones

- Llevar a cabo el estudio de Refuerzo con Fibra de Carbono a Cortante.
- Estudiar la comparativa entre el refuerzo de la Fibra de Carbono vs otro tipo de refuerzo como por ejemplo: Fibra de Vidrio, Chapas de acero, recrecido de hormigón, etc.

10. CAPITULO IX: BIBLIOGRAFIA

- [1] García A, Moran F, Arroyo J, «Jiménez Montoya Hormigón Armado,» 15 Edición 2009, p. 98.
- [2] Paredes G, Loncharich O, Carrón A, «Refuerzos de estructura de Hormigón Armado con Fibras de Carbono. Factibilidad de su aplicación en Paraguay,» 2008, TFG, Paraguay.
- [3] Estrada M, Yoplac J, «Evaluación Técnica y económica de reforzamiento estructural de concreto armado con fibras de carbono en el edificio multifamiliar Huaraz Breña,» 2016, Lima Perú. [En línea]. Available: https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2645/TESIS%20DE%20REFORZAMIENTO_ESTRADA%20-%20YOPLAC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4] Morán J, «Implantación de la Fibra de Carbono en arquitectura, los estudios sobre cemento reforzados con fibra de carbono,» 2016, Madrid España. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/54454/1/TFG_Moran_Arias_Jaime.pdf
- [5] <https://www.zschimmer-schwarz.es/que-es-el-carbono-y-por-que-se-le-considera-el-rey-de-la-tabla-periodica/>
- [6] Moran J, «Implantación de la Fibra de Carbono en la Arquitectura, estudio de Cemento reforzado con Fibras de Carbono,» 2019, TFG, España.
- [7] García A, Moran F, Arroyo J, «Jiménez Montoya Hormigón Armado,» 15 Edición 2009, p. 98.
- [8] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/343558/Rosell%20S%C3%A1enz%20de%20Villaverde_Adri%C3%A0_TFG_La%20fibra%20de%20sequence=1&isAllowed=y
- [9] García A, Moran F, Arroyo J, «Jiménez Montoya Hormigón Armado,» 15 Edición 2009, p. 98.
- [10] Bolívar A, Cañón S, «Análisis de Patología fenómeno de Carbonatación en Puentes de concreto, en las localidades de Teusaquillo, Engátiva y Fortibón,» 2015, TFG, Colombia.
- [11] Patología y Terapéutica del Hormigón Armado, Manuel Fernández Canovas, 1994, Madrid España
- [12] http://contenidos.educarex.es/mci/2009/43/TEMA2/resina_epoxidicas.pdf
- [13] https://www.nazza.es/blog/9_aplicaciones-resina-epoxi.html

Otras Fuentes:

Diagnóstico, evaluación y reparación de estructuras:

<https://vbook.pub/documents/diagnostico-evaluacion-y-reparacion-de-estructuras-de-hormigon-armado-ing-gj-martz-soliz-1w9dmmgd6j2p>

Aplicaciones de Resina epoxi: https://www.nazza.es/blog/9_aplicaciones-resina-epoxi.html

Reparación de estructuras de Hormigón Armado - UDC:

<https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Publicaciones/pubval/Patologia/traspasancias%20refuerzo.pdf>

Refuerzo en Vigas – Cueva del Ingeniero Civil:

<https://www.cuevadelcivil.com/2011/05/refuerzo-en-vigas.html>

Une-en 1990- Bases de Cálculo de Estructuras - ID:5f53f63a879a0

<https://xdoc.mx/documents/une-en-1990-bases-de-calculo-de-estructuras-5f53f63a879a0>

Los Estados Límites de Servicio del Hormigón Armado:

<https://www.cuevadelcivil.com/2011/04/los-estados-limites-de-servicio-del.html>

Análisis Comparativo entre el Método de Recrecido:

<https://1library.co/document/4yrv70pq-analisis-comparativo-recrecido-hormigon-colocacion-recrecido-rehabilitar-hormigon.html>

Tesis de Maestría «Técnicas de aprendizaje automático para análisis a flexión en vigas rectangulares de hormigón armado» Elaborado por el Prof. Ing Fredy Ramírez, UNA 2019. San Lorenzo - Paraguay

11. CAPITULO X: ANEXOS



Mezcla de dosificación 1:3:4



Mezcla de dosificación 1:3:4



Encofrado de Viga de Hormigón



Encofrado de Viga de Hormigón



Proceso de carga de mezcla a encofrado



Probetas Cilíndricas



Presentación de Componente Fibra de Carbono + Epoxi



Refuerzo a Flexión Fibra de Carbono



Rotura de Probeta cilíndrica



Preparación para rotura de probeta de viga de hormigón armado sin refuerzo



Prensa para la realización del ensayo



Rotura a Flexión Viga Hormigon Armado sin refuerzo



Rotura a Flexión Viga Hormigon Armado con refuerzo

Coronel Ovedo, 26 de julio de 2022

Ing. Alfredo Moreno Sosa

Decano FCyT

PRESENTE

Tengo el agrado de dirigirme a Usted, y por su intermedio a quien corresponda, solicitando una Nota Institucional dirigida a la Lic. Patricia Echeverría, Directora General del Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN), solicitando la exoneración del presupuesto con número de entrada INTN/2022/64930, dicho presupuesto solicite para realizar el ensayo de resistencia a la flexión en vigas a fin de recabar datos que serán útiles para llegar a la demostración y conclusión del Proyecto de Fin de Grado con el siguiente título ***“Análisis de la Fibra de Carbono como alternativa para reforzamiento estructural en vigas de Hormigón Armado”***, el Proyecto cuenta con muchos gastos y ver esta alternativa de exoneración de los gastos será una gran ayuda económica y de esta manera concluir lo antes posible y así llegar a la tan anhelada meta final, también solicito la aprobación de la Directora de la INTN, poder estar presente en el momento de la realización del ensayo para recabar los datos que me servirá como evidencia para el desarrollo del libro.

Sin otro particular y aguardando una respuesta favorable, me despido atentamente.

DIANA MADELEINE CABALLERO

ALUMNA TESISISTA - ING. CIVIL

Nota de petición dirigida al Decano de la Facultad, buscando alternativas de amortiguar gastos de los ensayos.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CAAGUAZÚ
Sede Coronel Oviedo
Creada por Ley N° 3198 del 4 de Mayo de 2007.
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS – F.C. y T.
Coronel Oviedo – Paraguay



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentido crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

Nota FCyT N° 122/2022

Coronel Oviedo, 27 de julio de 2022.-

Señora

Lic. Patricia Echeverría, Directora General
Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología – INTN

PRESENTE

Tengo el agrado de dirigirme a Usted, haciéndole llegar cordiales saludos y desearle éxitos en sus altas funciones.

La presente es a los efectos de solicitar exoneración de presupuesto para nuestra alumna **Diana Madeleine Caballero con C.I N° 5.571.999** de la Carrera de Ing. Civil, con nro. de mesa de entrada INTN/2022/64930, dicho presupuesto fue solicitado para realizar el ensayo de resistencia a la flexión en vigas a fin de recabar datos que serán útiles para llegar a la demostración y conclusión del Proyecto Final de Grado con el siguiente título “ **Análisis de la Fibra de Carbono como alternativa para reforzamiento estructural en vigas de Hormigón Armado**”, el Proyecto cuenta con muchos gastos y ver esta alternativa de exoneración de los gastos será una gran ayuda económica y de esta manera concluir lo antes posible.

La alumna también solicita la aprobación para poder estar presente en el momento de la realización del ensayo para recabar los datos que servirá como evidencia para el desarrollo del libro.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle atentamente y desearle éxitos en sus funciones.




Ing. Alfredo Moreno Sosa
Decano

+595 521 201 548

Sgto. Florentino Benítez es/ Padre Molas. (Ex Guardería Betel).
Coronel Oviedo, Paraguay.

Respuesta de la Facultad a la nota de Petición, total predisposición de parte del Decano de la FCyT. Sin embargo, no hubo respuesta favorable de parte de la INTN.

 INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA, NORMALIZACIÓN Y METROLOGÍA
SOLICITUD DE SERVICIO AL INTN
RUC: 5571999

Nombre y Apellido / Razón Social: DIANA CABALLERO
Dirección:

Por la presente, solicito a la Dirección General del INTN, se sirva ordenar por donde corresponda la realización de los sgt doc. trabajos:
RESISTENCIA A LA FLEXION EN VIGAS DE HORMIGON
SEGUN PLANILLA DE RECEPCION

Cantidad y detalle del Material Entregado


PROGRAMA DE TRABAJO

DETERMINACIÓN	CANT.	PRECIO UNI.	SUBTOTAL
Materiales de Construcción - Hormigones - Resistencia a la flexión en tirantes de H° A°	3.0	615.000	1.845.000
		Costo	1.845.000



Responsable: - MATCONS-Material de Construcción
Llamar a: DIANA CABALLERO
Telef: Cel:

NOTA: Los materiales serán sometidos a ensayos destructivos, por lo que a partir de la entrega de los resultados, el recurrente renuncia a todo reclamo en propiedad y el INTN queda autorizado a disponer de los mismos, a excepción de los equipos de medición y los materiales que por expreso pedido en la solicitud serán reutilizados.

INTN PTYF	RETIRADO	
	TOTAL ()	PARCIAL ()
Nro. Entrada: INTN/2022/66538	Por:	
Fecha: 16/08/2022	C.I:	
	Fecha:	
	Hora:	
	Firma:	


Firma y Alcaración
Conformidad y Aceptación del
Solicitante
C.I.

Buscando otra alternativa, se redujo el número de probetas a ensayar. Nota de presupuesto.

 INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA, NORMALIZACIÓN Y METROLOGÍA Avda. Gral. Artigas N° 3973 Y Gral. Roa Asunción, Paraguay Teléfonos: +595 21 288 6000 Email: intn@intn.gov.py		TIMBRADO N° 15724639 Válido hasta 30/06/2023 RUC: 80000638-0				
		FACTURA N° 001-002-0002271				
CONDICIÓN DE VENTA: Contado (X) Crédito ()						
ASUNCIÓN: 16 de Agosto de 2022		VENCIMIENTO: 16/08/2022				
SEÑORES: DIANA CABALLERO		RUC: 5571999				
DIRECCIÓN: --						
EMAIL: --						
TEL: --						
COD.	CANT.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	VALOR DE VENTA		
				EXENTA	IVA 5%	IVA 10%
	3	Materiales de Construcción - Hormigones - Resistencia a la flexión en tirantes de H° A°	615.000			1.845.000
<div style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> * NO SE ACEPTAN RECLAMOS PASADAS LAS 24 HS. * PAGADO CAJA INTN * ES OBLIGATORIA LA PRESENTACION DE LA FACTURA PIRETIRAR LOS RESULTADOS. </div>						
N° Expediente: INTN/2022/66538N° Resolución:				N° Contrato:		
TOTAL A PAGAR		Guaraníes Un millón ochocientos cuarenta y cinco mil				
LIQUIDACIÓN DEL IVA: 5%:		10%: 167.727		TOTAL IVA: 167.727		
NO SE ACEPTAN RECLAMOS PASADA LAS 24 HORAS						
FIRMA		ACLARACIÓN		CÉDULA DE IDENTIDAD		SELLO Y FECHA
		TIMBRADO N° 15724639 RUC: 5571999 FACTURA 001-002-0002271				ORIGINAL
TOTAL MONTO SIN COMISIÓN GS. 1.845.000						
VENCIMIENTO 16/08/2022						

Comprobante del pago de los ensayos de Probetas de hormigón armado.



INSTITUTO NACIONAL DE
**TECNOLOGÍA,
NORMALIZACIÓN Y
METROLOGÍA**

**GOBIERNO
NACIONAL**

Paraguay
de la gente

INFORME DE ENSAYO				
CONS N°: 0936 /2022		N° Expediente: 66538/2022		
Dpto. Ejecutor: Materiales de Construcción - ONI				
Solicitante: DIANA CABALLERO				
Dirección del solicitante: SD				
Persona de contacto: Diana Caballero		Teléfono: 0971486333		
DESCRIPCIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO				
3 (tres) vigas de H°A° de 2,0 m x 0,12 m x0,20m (LxAxH). FM: 2022-06-01 Tipo de Cemento: Vallemi CP IV 32 – Puzolánico Dosaje: In situ 1:3:4				
Fecha de recepción: 16-08-2022		Fecha de ejecución: 26-08-2022		
DETERMINACIONES	UNIDADES DE MEDIDA	VALORES OBTENIDOS		
		M1 (Sin Refuerzo)	M2 (Con Refuerzo)	M3 (Con Refuerzo)
Área de aplicación	cm ²	113,09	113,09	113,09
Carga Aplicada	Kgf	5100	5500	7400
Resistencia a la Compresión	Kgf/cm ²	45,1	48,6	59,2
ABREVIATURAS				
Ítem: Muestra evaluada.		kgf: Kilogramofuerza		
cm ² : centímetro al cuadrado				
NOTAS				
• Este informe sólo puede ser reproducido en forma parcial con autorización expresa del Departamento del Organismo.				
• Los resultados obtenidos se refieren exclusivamente a las muestras ensayadas y suministradas por el solicitante.				
				Fecha de informe: 22-09-2022
 Técnico DERLIS MEDINA FERREIRA Jefe de Dpto. Materiales de Construcción ONI - INTN		 Jefe de Departamento DERLIS MEDINA FERREIRA Jefe de Dpto. Materiales de Construcción ONI - INTN		
Fin del informe.				
Código: FOR-ONI-34, Versión: 07				Página 1 de 1

TEMBIPOTA: Oipytyvó tekoaty, mba'eapopyha, hemureko ha opalte mba'e'aporáme, taha'e jehapereka, kuave'émby hepytyvómby, mbojojaha, mba'e ra'ña, tendyry ñangareko rupive, avei kualia mboaje ha jesareko iporáve haña mba'eapopy, kuave'émby, tapichakuéra jeikoporá ha tekomo'á, tembiapo omomba'eguasúva tekoaty ha tekoha reheve. **MISIÓN:** Contribuir con la sociedad, la industria, el comercio, el sector productivo, mediante la investigación, servicios de asistencia técnica, normalización, metrología, seguridad eléctrica, certificación e inspección, para el mejoramiento de la calidad de los productos, los servicios, el bienestar y seguridad de las personas, con un enfoque de responsabilidad social y ambiental. **TEMBIHECHA:** Temimolmby hembiapopyahukuáva ha ojeytaso añetéva, ojehechakuáva tetápyre ha tetá ambue rupi omoguahé porá rehe kuave'émbyeta puruharakuérape, imba'apoharakuéra ikatupyry ha imba'erechakuaguí, ha upéichante avei oipytyvohaguére tekoatýpe. **VISIÓN:** Ser una institución innovadora y competitiva, reconocida nacional e internacionalmente por la calidad de sus servicios, la excelencia profesional y humana de su gente, y su contribución a la sociedad.

Avda. Artigas 3973 y Gral. Roa / C.C. | Teléf.: 288 6000 | www.intn.gov.py | e-mail: intn@intn.gov.py | Asunción – Paraguay

Informe elaborado por representantes de la INTN de los resultados obtenidos en roturas de las Vigas de ensayo.

**DIRECCIÓN DE DEPARTAMENTOS
INFORME DE ENSAYO**

DD-CGA-177/2022

Datos del Solicitante:

Empresa: Diana Madeleine Caballero

Ensayo: A la Compresión de Hormigón, en Probetas Cilíndricas-.

Obra: Tesis

Ensayo realizado en: Laboratorio de Materiales de Construcción

Fecha del Informe: 18/07/2022

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y MATERIALE

Prob. N°	Fecha		Edad (días)	Área (cm ²)	Carga de Rotura (kg)	Carga Corregida (kg)	F _c (kg/cm ²)
	Moldeo	Rotura					
1	01/06/2022	15/07/2022	44	176.7	62.000	59.853	338,73
2	01/06/2022	15/07/2022	44	176.7	69.000	66.450	376,06
3	01/06/2022	15/07/2022	44	176.7	62.000	59.853	338,73

Norma Utilizada : UNE 83 - 304

Los resultados obtenidos corresponden exclusivamente a las muestras suministradas por la firma interesada

Prof. Ing. Augusto Acosta
Jefe de Laboratorio de Materiales de Construcciones