

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Diseño a flexión de elementos de hormigón reforzado con
varillas corrugadas de fibra de vidrio**

AUTOR:

Lascano Rodríguez, Nicolás Ernesto

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Civil**

TUTOR:

Ing. Casal Rodríguez, Xavier Federico, MSc.

Guayaquil, Ecuador

05 de marzo del 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Lascano Rodríguez, Nicolás Ernesto**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____
Ing. Casal Rodríguez, Xavier Federico, MSc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, MSc.

Guayaquil, a los 5 días del mes de marzo del año 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Lascano Rodríguez Nicolás Ernesto**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Diseño a Flexión de Elementos de Hormigón Reforzado con Varillas Corrugadas de Fibra de Vidrio**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 5 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR

f. _____
Lascano Rodríguez, Nicolás Ernesto



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Lascano Rodríguez Nicolás Ernesto**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Diseño a Flexión de Elementos de Hormigón Reforzado con Varillas Corrugadas de Fibra de Vidrio**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 5 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR:

f. _____
Lascano Rodríguez, Nicolás Ernesto

REPORTE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Lascano_Nicolas_FINAL.doc (D96706133)
Submitted: 2/27/2021 6:36:00 AM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 1 %

Sources included in the report:

Prueba Plagio.pdf (D44210576)
https://www.researchgate.net/profile/Julio_Alberto_Hernandez_Caneiro/publication/279885819_LA_SEGURIDAD_EN_EL_DISENO_ESTRUCTURAL_CON_EL_EMPLEO_DE_BARRAS_DE_PRF_COMO_REFUERZO_DEL_HORMIGON/links/559d33fc08ae04e36508bc80/LA-SEGURIDAD-EN-EL-DISENO-ESTRUCTURAL-CON-EL-EMPLEO-DE-BARRAS-DE-PRF-COMO-REFUERZO-DEL-HORMIGON.pdf

Instances where selected sources appear:

Activ

AGRADECIMIENTO

Primero necesito agradecerle a mi abuelo, el grandísimo Ing. Cesar Rodríguez Baquerizo. Amigo, jefe, guía y a quién nunca tuve la oportunidad de llamar “colega”. Aunque ya no estés conmigo físicamente, todas tus virtudes, valores y enseñanzas se han quedado impregnadas en mí para siempre. Gracias por creer en mí, por apoyarme y por mostrarme el valor de la disciplina, la perseverancia, el trabajo duro y la familia. Eres y serás mi inspiración para ser un gran Ingeniero. Gracias por tanto Don César.

A mi madre, María Auxiliadora Rodríguez Quintero, quien pese a cualquier adversidad o confrontación me ha brindado su amor y apoyo de manera incondicional. Gracias por siempre creer en mí y por recordarme todos los días que debo “sacarme el aire” para alcanzar mis metas y que cuando esta vida golpea duro, es cuando más debemos mostrar fortaleza, levantarnos cuantas veces sea necesario y salir adelante. Por los que ya no están.

A mi padre, Ing. Alejandro José Lascano Parra, por ser un claro ejemplo de que con trabajo, constancia y sacrificio se puede salir adelante en esta vida. Gracias por siempre demostrarme que buscas lo mejor para mí, por inculcarme tus conocimientos cada vez que tienes la oportunidad y permitirme disfrutar de esta profesión aprendiendo a tu lado. Eres y serás mi inspiración y un pilar fundamental en mi vida. Te agradezco, por tanto.

A José Francisco Rivera “Pepe”, por siempre apoyarme y encaminarme en mi formación como profesional y ser humano.

A mis hermanos Alejandro y Lucas, por haber sido parte de todo este proceso y haberme apoyado y animado en todo momento.

A mis amigos del colegio y de la universidad, por todos los buenos ratos y por estar presentes en los momentos más difíciles. Lo logramos.

A mi enamorada Claudia, por la paciencia, el amor y el apoyo brindado todos estos años.

Finalmente, a mis profesores de la universidad, en especial al Ing. Xavier Casal por permitirme trabajar junto a él y haber confiado en mí.

DEDICATORIA

A mis padres Mariuxi y Alejandro, mis hermanos Alejandro, Lucas, Camila y Martín, mis abuelas Lucía y Virginia, mis tíos y primos Lascano y Rodríguez, y de manera muy especial a mis difuntos abuelos Mario Lascano y mi guía el Ing. César Rodríguez Baquerizo, son y serán por siempre el motor de mi vida y la razón por la que trabajo día a día para salir adelante, los amo y los extraño mucho, todo esto es por ustedes.

Nicolás Ernesto Lascano Rodríguez



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. STEFANY ALCÍVAR BASTIDAS, MSc.
DIRECTORA DE CARRERA

f. _____

ING. JOSÉ BARROS CABEZAS, MSc.
COORDINADOR DE ÁREA

f. _____

ING. CARLOS CHON DÍAZ, MSc.
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	2
I.1 Generalidades.....	2
I.2 Antecedentes	3
I.3 Alcance	4
I.4 Objetivos	5
I.4.1 Objetivo General.....	5
I.4.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO 1.....	6
CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	6
1.1 Materiales compuestos y Barras FRP.....	6
1.2 Fibras de Vidrio.....	7
1.3 Resinas	9
1.4 Fabricación de Varillas GFRP	11
1.5 Acabado Superficial de las varillas GFRP.....	13
1.5.1 Varillas de Superficie Rugosa	14
1.5.2 Varillas con Corrugaciones	15
1.6 Aplicaciones Típicas	17
CAPÍTULO 2.....	20
PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL	20
2.1 Caracterización del Material.....	20
2.2 Propiedades Físicas	20
2.2.1 Densidad.....	21
2.2.2 Coeficientes de Dilatación Térmica.....	21
2.3 Propiedades Mecánicas.....	21
2.3.1 Comportamiento a Tensión.....	21
2.3.2 Comportamiento a Compresión	24
2.3.3 Comportamiento a Cortante.....	25

2.3.4 Adherencia.....	27
2.4 Comportamiento a largo plazo	28
2.4.1 Creep	28
2.4.2 Fatiga.....	30
2.5 Comportamiento frente a altas temperaturas.....	31
CAPÍTULO 3.....	34
TEORÍA A FLEXIÓN	34
3.1 Consideraciones Generales.....	34
3.2 Filosofía de Diseño y Asunciones	34
3.3 Leyes Constitutivas de los Materiales	36
3.3.1 Hormigón	36
3.3.2 Varilla de Refuerzo GFRP	37
3.4 Propiedades de Diseño para las varillas GFRP	40
3.4.1 Factor de Exposición Ambiental	41
3.4.2 Resistencia a Tracción de Diseño	41
3.4.3 Resistencia a Tracción en ganchos de Diseño	42
3.5 Resistencia a Flexión	42
3.5.1 Estados Límite de Resistencia.....	43
3.5.2 Resistencia Nominal	44
3.5.3 Factores de Reducción de Resistencia.....	45
3.5.4 Refuerzo mínimo GFRP.....	47
3.6 Servicio	48
3.6.1 Agrietamiento.....	48
3.6.2 Deflexiones	49
3.6.3 Peraltes Mínimos Recomendados	50
3.6.4 Momento de Inercia Efectivo	51
3.6.5 Método Directo	52
3.6.6 Recubrimientos	53
3.7 Ruptura por Creep y Fatiga.....	54
3.7.1 Estado Límite por Creep	54
3.7.2 Estado Límite por Fatiga.....	55

CAPÍTULO 4.....	55
TEORÍA A CORTANTE	55
4.1 Consideraciones Generales.....	55
4.2 Filosofía de Diseño	55
4.3 Resistencia a Cortante.....	56
4.4 Límites del Refuerzo a Cortante	57
4.5 Refuerzo Mínimo a Cortante.....	58
4.6 Detallamiento de Estribos	59
CAPÍTULO 5.....	60
TEORÍA PARA EMPALMES Y LONGITUD DE DESARROLLO	60
5.1 Longitud de Desarrollo para varillas rectas.....	60
5.1.1 Factor por la ubicación de la varilla	62
5.1.2 Resistencia a Flexión en zonas críticas de adherencia	62
5.2 Longitud de Desarrollo para Ganchos	62
5.3 Longitud de Desarrollo para refuerzo de Momento Positivo	63
5.4 Traslapes para las zonas de tensión	64
CAPÍTULO 6.....	65
EJEMPLOS DE APLICACIÓN	65
6.1 Resistencia a Flexión de Sección Controlada por Compresión	65
6.2 Diseño a Flexión de Viga Controlada por Compresión	69
6.3 Diseño a Flexión de Viga Controlada por Tensión.....	73
6.4 Diseño a Corte de Viga Simplemente Apoyada.....	76
6.5 Deflexiones Inmediatas y a Largo Plazo (3 meses y 5 años).....	80
6.6 Diseño a Flexión de Losa Maciza Controlada por Compresión	86
6.7 Diseño a Flexión de Muro de Contención	91
6.8 Longitud de Desarrollo para Sección Controlada por Tensión.....	101
6.9 Elaboración de Diagrama Momento-Curvatura mediante Python	102
6.10 Análisis de Costos	105
6.11 Ventajas y Desventajas de la varilla GFRP.....	109

CAPÍTULO 7.....	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
7.1 Conclusiones	111
7.2 Recomendaciones	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los tipos de varillas. (ACI-440.1R, 2010).	6
Tabla 2: Propiedades mecánicas de las fibras de vidrio. (Almerich, 2010)...	9
Tabla 3: Propiedades mecánicas de las resinas. (Almerich, 2010).....	10
Tabla 4: Resistencia a tracción mínima por diámetro de GFRP. (ACI-440.1R- 2015).	23
Tabla 5: Propiedades de varillas GFRP y acero.	25
Tabla 6: Longitudes para muestras de ensayo a tracción de varillas GFRP. (Almerich, 2010).	38
Tabla 7: Diámetros y áreas nominales de las varillas GFRP. (ACI-440.6M- 2008).	40
Tabla 8: Factores de Exposición ambiental. (ACI-440.1R-2015).	41
Tabla 9: Cuantías de balance para varillas de acero y GFRP. (ACI-440.1R- 2015).	44
Tabla 10: Peraltes mínimos recomendados. (ACI-440.1R-2015).....	50
Tabla 11: Recubrimientos mínimos recomendados. (ACI-440.5-2008).	54
Tabla 12: Comparación de resultados de deflexiones con refuerzo de acero corrugado y GFRP.....	85
Tabla 13: Revisión de deflexiones admisibles entre sección reforzada con acero y GFRP.....	85
Tabla 14: Puntos notables del diagrama momento-curvatura de sección controlada por tensión.	104
Tabla 15: Puntos notables de diagrama momento-curvatura de sección controlada por compresión.	105
Tabla 16: Cotización de la empresa "Kompozit 21", Estados Unidos.	106
Tabla 17: Cotización de la empresa "Tuff Bar", Estados Unidos.	106
Tabla 18: Cotización de la empresa "Liteform", Estados Unidos.	107

Tabla 19: Cotización de la empresa "Unicomposite Technology", China..	107
Tabla 20: Planilla de varillas GFRP por metro lineal de muro.....	108
Tabla 21: Planilla de varillas de acero por metro lineal de muro.....	108
Tabla 22: Costo de importación de las varillas GFRP para las cuantías del muro de contención.	108
Tabla 23: Planillas de varillas GFRP y acero del diseño de las vigas simplemente apoyadas a flexión y corte.....	109
Tabla 24: Costo de importación de las varillas GFRP para la cuantía de la viga simplemente apoyada.	109
Tabla 25: Ventajas y Desventajas de la implementación de las varillas GFRP.	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de fabricación de fibras de vidrio. (Gardiner, 2009).	7
Figura 2: Esquema del proceso de pultrusión para la fabricación de varillas GFRP. (Husain, Shariq & Masood, 2020).	12
Figura 3: Tipos de recubrimiento superficial de varillas GFRP. (Quayyum, 2010).	14
Figura 4: Tratamiento superficial de resinas y granos finos. (Portnov, 2013).	14
Figura 5: Varilla GFRP "Sand Coated". (Solyom & Balázs, 2019).	15
Figura 6: Tratamiento superficial con envoltura en espiral. (Portnov, 2013).	15
Figura 7: Corrugaciones con resinas en varillas GFRP. (Portnov, 2013).	16
Figura 8: Varillas con corrugaciones. (Solyom & Balázs, 2019).	16
Figura 9: Corrugaciones en varillas GFRP con pultrusión. (Portnov, 2013).	17
Figura 10: Tablero del puente Emma Park en Utah, E.E.U.U. (ACI-440.1R-2015).	18
Figura 11: Rieles de Earlington Heights, Miami, E.E.U.U. (ACI-440.1R-2015)	18
Figura 12: Muro de protección en Honoapiilani, Hawaii. (ACI-440.1R-2015)	18
Figura 13: Muros de contención con varillas GFRP. (Tufbar, 2020)	19
Figura 14: Varillas GFRP para construcción de tablero. (Tufbar, 2020).	19
Figura 15: Barras GFRP para cajas de recolección y muros. (Tufbar, 2020).	19
Figura 16: Curva esfuerzo-deformación de varillas de acero y GFRP. (Jabbar, Fadir, 2018).	22
Figura 17: Relación Resistencia-Diámetro de GFRP. (Young-Ju et al., 2015).	23
Figura 18: Ensayo a compresión de varilla GFRP. (Almerich, 2010).	24

Figura 19: Ensayo a compresión de varilla GFRP con rollos e hilos transversales. (Rovira, Almerich, Molines & Martin, 2012).	25
Figura 20: Deformaciones y Fuerzas de corte sobre vigas con Estribos GFRP y de Acero. (Ahmed, Salakawy & Benmokrane, 2010).	26
Figura 21: Ancho de grietas y Fuerzas de corte sobre vigas con Estribos GFRP y de Acero. (Ahmed, Salakawy & Benmokrane, 2010).	26
Figura 22: Dimensiones para ensayo "pull out" de adherencia. (Aydin, 2014).	27
Figura 23: Resultados de ensayo "pull out" con varilla normal y con recubrimiento de arena. (Aydin, 2014).....	27
Figura 24: Ensayo de viga a carga sostenida empleando barras de tensión Dywidag. (Vijay, 1999).....	29
Figura 25: Resultado de ensayo de viga controlada por compresión para el 20% de la resistencia. (Vijay, 1999).....	29
Figura 26: Curva tiempo-temperatura para ensayo en horno. (Almerich, 2010).	32
Figura 27: Armadura de loseta para ensayo contra fuego $\varnothing 20\text{mm}$. (Almerich, 2010).	33
Figura 28: Loseta colocada encima del horno. (Almerich, 2020).	33
Figura 29: Temperatura registrada para los recubrimientos de 3, 5, 7 y 9 mm de los 4 niveles. (Almerich, 2010).....	33
Figura 30: Diagrama Momento-Curvatura para elementos reforzados con GFRP. (ACI-440.1R-2015).....	35
Figura 31: Modelo de Hognestad para el Hormigón. (Wight & MacGregor, 2012).	37
Figura 32: Longitudes para muestras de ensayo a tracción de varillas GFRP. (Almerich, 2010).	37
Figura 33: Resultado de ensayo a tracción de las varillas GFRP de $\varnothing 16\text{mm}$. (Almerich, 2010).	38
Figura 34: Relación Esfuerzo-Deformación de la varilla GFRP y acero de refuerzo.....	39

Figura 35: Relación esfuerzo-deformación de la varilla GFRP de 20 mm de diámetro. (Young-Ju et al., 2015).	40
Figura 36: Sección típica elíptica de las varillas GFRP. (Portnov, 2013). ...	41
Figura 37: Deformación, esfuerzos y fuerzas internas de secciones GFRP. (ACI-440.1R-2015).	43
Figura 38: Estados límite de resistencia para barras GFRP. (ACI-440.1R-2015).	46
Figura 39: Distribución lineal de esfuerzos y deformaciones. (ACI-440.1R-2015).	54
Figura 40: Longitud requerida para el gancho de un estribo GFRP. (ACI-440.1R-2015).....	59
Figura 41: Mecanismo de adherencia de varilla GFRP con hormigón. (ACI-440.1R-2015).....	60
Figura 42: Resistencia de sección controlada por compresión.....	65
Figura 43: Resistencia de sección controlada por compresión (acero).....	68
Figura 44: Esquema de viga simplemente apoyada para estudio.....	69
Figura 45: Diseño a flexión de sección controlada por compresión.	71
Figura 46: Diseño a flexión de sección controlada por compresión (acero).72	
Figura 47: Esquema de viga simplemente apoyada para estudio.....	73
Figura 48: Diseño a flexión de sección controlada por tensión.....	75
Figura 49: Diseño a flexión de sección controlada por tensión (acero).....	76
Figura 50: Diseño a corte de sección controlada por tensión.	79
Figura 51: Diseño a corte de sección controlada por tensión (acero).	80
Figura 52: Sección para el cálculo de deflexiones (GFRP).....	80
Figura 53: Deflexiones Permisibles. (ACI-318-2019).	82
Figura 54: Sección para el cálculo de deflexiones. (acero).....	83
Figura 55: Esquema de Losa maciza para diseño a flexión.....	86
Figura 56: Hoja electrónica en Excel para el cálculo de deflexiones.	88
Figura 57: Hoja electrónica en Excel para el cálculo de deflexiones.	89

Figura 58: Diseño a flexión de losa maciza (GFRP).	90
Figura 59: Diseño a flexión de losa maciza (acero).	91
Figura 60: Esquema de Muro de contención.	91
Figura 61: Fuerzas actuantes del muro y la zapata.	93
Figura 62: Diagrama de Momentos del muro.....	93
Figura 63: Reacción vertical del muro en la zapata en función de la excentricidad. (Torres, 2006).	95
Figura 64: Diagrama de momentos de la zapata.	96
Figura 65: Diseño a flexión del muro de contención (GFRP).	98
Figura 66: Diseño a flexión del muro de contención (acero).	101
Figura 67: Esquema de sección controlada por tensión.	101
Figura 68: Diagrama Momento-Curvatura de sección controlada por tensión, reforzada con acero corrugado y GFRP.	104
Figura 69: Diagrama Momento-Curvatura de sección controlada por compresión reforzada con acero corrugado y GFRP.....	105

RESUMEN

Hasta la actualidad, el mayor problema de las estructuras construidas de hormigón reforzado con varillas corrugadas de acero es la corrosión que se produce a causa de los impactos ambientales a los que son sometidas. Sin embargo, el material se lo aprovecha en gran medida debido a la gran ductilidad que este le proporciona al comportamiento, además de sus excelentes propiedades de adherencia y resistencia a la tracción.

En el presente trabajo, se presentarán a las varillas corrugadas de fibra de vidrio o “GFRP bars” (Glass Fiber Reinforced Polymer) como una alternativa de refuerzo para estructuras de hormigón armado, analizando su composición y proceso de fabricación para determinar sus propiedades físicas y mecánicas que permitan establecer un criterio acerca de su comportamiento. Posteriormente, se mostrarán las ecuaciones de diseño en base a la norma norteamericana ACI-440.1R-2015 que toman en cuenta gran variedad de ensayos realizados sobre el material para compararlas con las empleadas en el diseño con acero corrugado, mostradas en la normativa norteamericana ACI-318-2019.

Luego de haber establecido la metodología para el cálculo del refuerzo con las varillas GFRP, se han realizado diseños en elementos tales como vigas, losas, muros de contención y zapatas, siempre y cuando estos no exijan mayor ductilidad ni deflexiones importantes. Los resultados obtenidos serán empleados para efectuar una comparación (frente a las varillas de acero corrugado) del aspecto mecánico, económico y constructivo para determinar aquellas circunstancias donde la implementación de las varillas GFRP es beneficiosa y no contraproducente.

Palabras claves: corrosión, ductilidad, adherencia, fibras, vidrio, varillas, corrugado, deflexión, muros, zapatas, losas, diseño, comparación.

ABSTRACT

Until now, the biggest problem with concrete structures reinforced with corrugated steel bars is the corrosion that occurs due to the environmental attack to which they are subjected. However, the material is widely used because of the high ductility provided for the designs, in addition to its excellent bond and tensile strength properties.

In this dissertation, fiberglass rebar or “GFRP” (Glass Fiber Reinforced Polymer) will be displayed as an alternative solution for the reinforcement of concrete structures, breaking down its composition and manufacturing process to establish the physical and mechanical properties so that behavior and design criteria can be formulated. Subsequently, design equations will be shown based on the North American standard ACI-440.1R-2015 that takes into account a great variety of tests carried out on the material to compare it with those rules applied in the design of steel reinforcement, shown in the North American standard ACI -318-2019.

After defining the methodology for the calculation of GFRP reinforcement, designs have been made in elements such as beams, slabs, retaining walls and footings, as long as these do not require greater ductility or significant deflections. The results obtained will be used to make a comparison (to corrugated steel rods) of the mechanical, economic and constructive aspect to determine those circumstances where the implementation of GFRP rods is beneficial and not counterproductive.

Keywords: corrosion, ductility, bond, fibers, glass, rods, corrugated, deflection, walls, footings, slabs, design, comparison.

INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades

Como es de conocimiento del público, uno de los problemas más severos que sufren las varillas de acero de refuerzo en el hormigón armado es cuando estas se exponen a condiciones ambientales severas y se genera una reacción electro-química que perjudican al material y a sus propiedades mecánicas. Este efecto se lo conoce como “corrosión” y conlleva a la formación de una capa de óxido en el exterior de la varilla que puede incrementar su tamaño en hasta 4 veces, provocando que el recubrimiento se vea afectado y por ende la integridad de todo el elemento (Vidaud, 2014).

En la actualidad existen tecnologías y métodos para reparar y/o controlar el potencial de corrosión de modo que se tiene alguna idea del daño que pueden sufrir las varillas, sin embargo, esto representa un costo importante para las entidades públicas de un país. Según Vidaud (2014): “Los costos por acciones correctoras de estas patologías generadas por la corrosión se estiman muy cercanos a los 300 mil millones de dólares anuales en Norteamérica, mientras que en México pueden superarse los 10 mil millones, considerando que la tendencia de estas cifras está muy lejos de la disminución y estabilidad”.

Estas debilidades de los materiales clásicos de construcción pueden ser superadas con la implementación de nuevas alternativas que en lo posible traigan consigo más beneficios que contratiempos y/o desventajas. Para ello, se toma en consideración a las varillas de refuerzo compuesto FRP (Fiber Reinforced Polymer) dado que se ha observado que estas atribuyen con una gran durabilidad al momento de aplicarse en la construcción de estructuras de hormigón armado (Aydin, 2014).

I.2 Antecedentes

Los compuestos FRP a base de fibras de vidrio o fibras de carbono se han implementado exitosamente en el campo militar y naval desde la década de los 40, e incluso en el sector constructivo para el reforzamiento de puentes en Alemania y Estados Unidos entre los años 80 y 90. Por otro lado, han facilitado la fabricación de materiales para la construcción como tanques de almacenamiento, tuberías y elementos arquitectónicos, sin embargo, su aplicación como varillas de refuerzo para una alternativa frente a las varillas de acero corrugadas es muy baja y por ende se considera “novedosa” hasta el día de hoy (Vidaud, 2014).

Las varillas fabricadas con estos compuestos y su aplicación en el sector constructivo (concretamente en elementos de hormigón armado) han despertado el interés de muchos ingenieros civiles especialmente debido al beneficio sustancial en el costo de su fabricación y a la durabilidad. Adicionalmente, las propiedades mecánicas intrínsecas reflejan un comportamiento extraordinario frente a agentes químicos y ambientales, además de su alta resistencia a la tracción y rigidez en relación al peso, su expansión térmica controlable y condiciones de amortiguación y neutralidad electromagnética mayores a las de otros materiales (Almerich, 2010).

Considerando las cualidades ya mencionadas del material, sería adecuado introducir a las varillas como solución a estructuras de hormigón armado diseñadas para resistir ambientes agresivos, tales como plantas de tratamiento, estructuras marinas, plantas industriales, subestaciones eléctricas, barreras en carreteras y tableros de puentes, etc. Sin embargo, reemplazar en su totalidad las varillas corrugadas de acero por varillas compuestas de fibra de vidrio ha demostrado ser una alternativa poco aplicada por expertos, básicamente debido a la falta de estandarización en códigos de diseño y construcción, su comportamiento lineal hasta la falla que genera un mecanismo no dúctil, sus condiciones de adherencia y su bajo módulo elástico que hacen posible que el agrietamiento y las deformaciones controlen el diseño, de modo que se requiera mayor cantidad de refuerzo (Portnov, Bakis, Lackey & Kulakov, 2013).

I.3 Alcance

Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente respecto a las varillas de fibra de vidrio tanto por su aspecto de fabricación, comercialización y propiedades mecánicas, además de su implementación hasta la actualidad. Adicionalmente, se podrá poner en cuestión dicha información aplicándola para diseñar elementos estructurales propuestos en este trabajo.

Al conocer a profundidad el material, se podrá hacer una evaluación de la viabilidad al implementar las varillas de fibra de vidrio en elementos de hormigón armado, quiere decir que se determinará si es viable aplicarlo en construcciones y, de ser el caso, identificar en qué tipo de elementos sería más adecuado emplearlo. Por otro lado, se obtendrán beneficios por encima de la utilización de varillas corrugadas de acero, ejecutando una comparación entre los diseños considerando un comportamiento mecánico previamente estudiado y un análisis del costo que le compete a cada caso.

I.4 Objetivos

A continuación, se presentarán los objetivos que permitirán encaminar toda la investigación hacia un mismo frente, de modo que toda la información recopilada de la literatura será utilizada de manera adecuada y precisa para el propósito del presente trabajo.

I.4.1 Objetivo General

- Realizar una evaluación del comportamiento de las varillas corrugadas de fibra de vidrio en función de la literatura revisada para poder implementarlas en elementos de hormigón armado y hacer un estudio comparativo frente al refuerzo con varillas de acero para determinar los beneficios obtenidos.

I.4.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información necesaria respecto al material a estudiar para presentar el proceso de fabricación y la composición del mismo.
- Determinar las propiedades mecánicas más importantes del material.
- Realizar una comparación entre un diseño realizado con las varillas de acero y las varillas corrugadas de fibra de vidrio para poder identificar ventajas y desventajas.
- Analizar la viabilidad de implementar las varillas de fibra de vidrio en elementos de hormigón armado de acuerdo al aspecto constructivo y a un análisis de costos.

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

En este capítulo se hará énfasis en los compuestos FRP a base de fibras de vidrio (GFRP) para analizar las características más importantes y el papel que desempeñan cada uno de sus componentes. Adicionalmente, se explicará el proceso de fabricación del mismo, los diferentes tipos de presentación que el material tiene al finalizar la manufacturación y sus posibles y convenientes aplicaciones.

1.1 Materiales compuestos y Barras FRP

Los compuestos FRP están conformados por fibras continuas enlazadas a una resina, lo que determina las propiedades mecánicas y químicas finales del material. Los tipos de fibras más utilizadas comúnmente para compuestos y barras son las de carbón, vidrio y aramida, estas son sometidas a un proceso para pasar a una forma de Polímero Reforzado con Fibra, de allí provienen las siglas en inglés de CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polymer), GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer) y AFRP (Aramid-Fiber Reinforced Polymer) (Husain, Shariq & Masood, 2018).

En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas de cada una de estas barras FRP según lo expuesto en el ACI 440.1R-15, donde se puede observar que las barras compuestas no tienen un esfuerzo ni deformación de fluencia definida.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los tipos de varillas. (ACI-440.1R, 2015).

	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	276-317	N.A.	N.A.	N.A.
Resistencia a Tracción (Mpa)	483-600	483-690	600-690	1720-2540
Módulo Elástico (Gpa)	200	35-51	120-80	41-25
Deformación de Fluencia (%)	0.14-0.25	N.A.	N.A.	N.A.
Deformación de Ruptura (%)	0.6-1.2	1.2-1.3	0.5-1.7	1.9-4.4

Para el propósito de esta tesis de grado, se hará énfasis solamente en el comportamiento de las varillas compuestas con fibra de vidrio (GFRP), siendo estas las más utilizadas para compuestos FRP, elaboradas con una matriz bastante similar a la que se mezcla directamente para hormigones reforzados con fibra, con la diferencia de que estas tienen un recubrimiento superficial que las protege de la alcalinidad. Al igual que el resto de los materiales FRP, las varillas GFRP están compuestas por fibras que se mezclan con resina poliéster para adquirir estabilidad dimensional.

1.2 Fibras de Vidrio

La fibra de vidrio es un material compuesto por pequeños hilos de vidrio que se entrelazan entre sí para formar una malla, un patrón o algún otro formato textil. La obtención de dichos hilos se realiza con un proceso industrial (Figura 1), donde se pasa el vidrio derretido a través de un elemento rígido con pequeños orificios llamado “espinerette” que le brinda su peculiar tamaño a cada fibra para después obtener su flexibilidad con un enfriado.

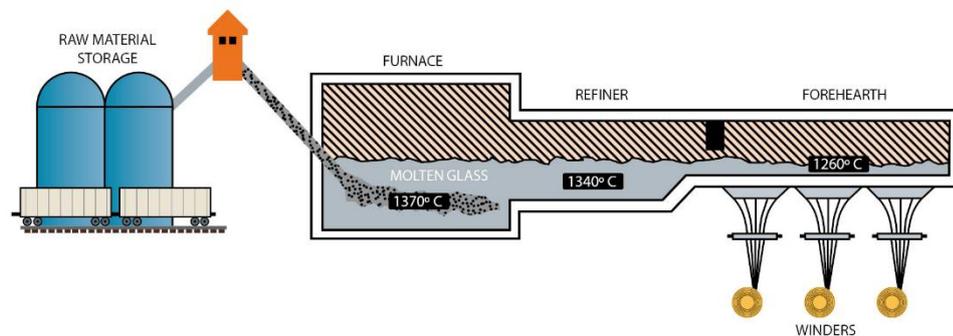


Figura 1: Esquema de fabricación de fibras de vidrio. (Gardiner, 2009).

Al unificar estas fibras, es posible fabricar elementos a base de un material ligero, resistente y flexible, que además no es excesivamente costoso y capaz de emplearse en diversas aplicaciones. Cabe recalcar que para ello las fibras de vidrio deben tener un enlace con alguna resina líquida que posteriormente se solidifique en un tiempo específico para adquirir cierta estructura o forma.

Típicamente, el vidrio es empleado en botellas, ventanas o envases y su característica más representativa es su fragilidad; sin embargo, esta propiedad es corregida considerablemente dado que el estiramiento del hilo

permite volverse un material flexible. Por otro lado, los componentes iniciales del vidrio como la arena, el cuarzo y la sílice se mantienen y condicionan a que no se vea afectado por sustancias ácidas y a que exista un excelente aislamiento térmico (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

Los fabricantes de vidrio a nivel mundial han experimentado con fibras de vidrio desde hace muchos años, pero empezó a popularizarse en el siglo XVIII con la revolución industrial. Para el año 1893 se realizó la exposición de un vestido hecho con este material y presentado en una feria en la ciudad de Chicago en Estados Unidos, hasta que para el año 1983 una empresa americana lo comenzó a utilizar como aislante acústico y térmico para edificios, mejor conocido por el nombre de “lana de vidrio”, siendo una de las aplicaciones más importantes del sector de la construcción (Almerich, 2010).

Los tipos de vidrio conocidos por el medio para fabricar las fibras son de tipo E, C, S, A y AR, siendo el vidrio tipo A (sodio-calcio) el primero en ser utilizado, con su desventaja de no ser muy resistente a la alcalinidad. Por otro lado, el vidrio tipo E (eléctrico) es el más popular y empleado para las fibras dado a su bajo costo y su moderada resistencia mecánica, química y eléctrica. El tipo S (en inglés strong) es aplicado cuando se requieran propiedades de alta resistencia a la tracción, rigidez y bajas deformaciones últimas, sin embargo, este tipo de fibras son de mayor costo. Finalmente, las fibras de tipo C son aplicadas en casos donde la resistencia y estabilidad química sea lo más importante, similar a las AR que se han aplicado con frecuencia en hormigones reforzados con fibra, ya que son resistentes a ambientes alcalinos sin afectar su durabilidad (Husain, Shariq & Masood, 2018).

A continuación, se mostrarán las propiedades mecánicas de cada uno de los tipos de fibra en la Tabla 2. Revisando los valores mostrados se puede determinar que para las varillas de fibra de vidrio se debería emplear la fibra tipo E, siendo la más económica y de mejores características de resistencia mecánica, química y eléctrica, además de que no requiere ninguna protección a la alcalinidad dado que esta es protegida por la resina poliéster (de ser el caso).

Tabla 2: Propiedades mecánicas de las fibras de vidrio. (Almerich, 2010).

	<i>Fibra Tipo E</i>	<i>Fibra Tipo S</i>	<i>Fibra Tipo C</i>	<i>Fibra Tipo AR</i>
Resistencia a Tracción (Mpa)	3.45	4.30	3.03	2.50
Módulo Elástico (Gpa)	72.4	86.9	69.0	70.0
Deformación de Ruptura (%)	4.80	5.00	4.80	3.60
Coefficiente de Poisson	0.20	0.22	-	-
Densidad (g/cm³)	2.54	2.49	2.49	2.78
Diámetro (µm)	10.0	10.0	4.50	-
CTE longitudinal (10e-6/°C)	5.00	2.90	7.20	-
Constante dieléctrica	6.30	5.10	-	-

1.3 Resinas

Las resinas son empleadas como el aglutinante principal de las varillas de fibra de vidrio (barras GFRP), siendo de vital importancia no por su resistencia mecánica (que es muy baja) si no por permitir distribuir la carga entre las fibras y protegerlas de los ambientes agresivos y la posible abrasión. La resina natural es aquella que se consigue de una secreción orgánica de ciertas plantas (como los pinos) que exudan una sustancia debido a su exposición al medio ambiente, mientras que la resina artificial o sintética es aquella resina natural que se mezcla con otros componentes producto de laboratorio para mejorar sus propiedades (Vijay, 1999).

En el mercado se pueden encontrar resinas sin una interconexión entre sus moléculas, quiere decir que se puede remoldar la forma del aglutinante si se lo somete a calor y presión constante, sin embargo, esto puede tender a volver el material cada vez más frágil en cada acción. A este tipo de resinas se las conoce como “termoplásticas” y se pueden encontrar en el medio como policarbonato, polietileno, polipropileno, entre otros.

Las resinas “termoestables”, por otro lado, son las que se utilizan frecuentemente para la fabricación de las varillas de GFRP, ya que no pueden ser remoldadas con calor debido a los enlaces existentes entre las moléculas y están compuestas de químicos líquidos de baja densidad y viscosidad. Las ventajas de utilizar las resinas termoestables en varillas GFRP son las excelentes condiciones y respuestas al flujo plástico o “creep”, la adherencia

con la fibra y el bajo costo inicial (Vijay, 1999). De acuerdo con su composición química, las resinas termoestables se pueden subdividir en 3 tipos:

- a) **Resina Poliéster:** la más utilizada por el medio debido a su bajo costo, baja viscosidad y tiempo de curado acelerado. Su resistencia y módulo elástico está por debajo de la resina epoxi, aunque sus propiedades pueden alterarse para ser más o menos flexible. Su defecto son los posibles hundimientos que alteran el acabado del producto debido a la elevada contracción volumétrica (5%-12%) (Vijay, 1999).
- b) **Resina Viniléster:** de baja viscosidad y curado acelerado, al igual que la resina poliéster. Además, ofrece una excelente resistencia a la corrosión y una mayor tenacidad frente a la ruptura que la resina epoxi sin las complicaciones al momento de la fabricación y re-moldeo. Su desventaja es la baja adherencia y, similar a la resina poliéster, una contracción volumétrica elevada (del 5% al 10%) (Vijay, 1999).
- c) **Resina Epóxica:** empleados para compuestos de alto rendimiento para mejorar las propiedades mecánicas y resistencia química. Es versátil, su amplio rango de propiedades le permite ser utilizado de diversas formas y además tiene una contracción volumétrica baja. Por otra parte, son materiales costosos, con un tiempo de curado lento.

Tabla 3: Propiedades mecánicas de las resinas. (Almerich, 2010).

	Poliéster	Epoxi	Viniléster
Resistencia a Tracción (Mpa)	202100	552130	70280
Módulo Elástico (Gpa)	2.124.1	2.524.12	3.023.5
Deformación de Ruptura (%)	1.026.0	1.029.0	3.523.5
Coefficiente de Poisson	-	0.220.33	-
Densidad (g/cm3)	1.021.45	1.121.3	1.121.3
Tg (°C)	10021.40	5022.60	9021.40
CTE longitudinal (10e-6/°C)	5521.00	4529.0	2127.3
Constante dieléctrica	5.022.02	1.023.0	5.421.0.3

En la Tabla 3 se muestran las propiedades mecánicas de los 3 tipos de resina. La selección de la resina más adecuada para las varillas GFRP se hizo en consideración al estudio de Vijay (1999), donde se ensayaron a tracción varillas #4 y #6 de fibra de vidrio tipo E fabricadas con diferentes resinas y recubrimientos superficiales para medir la resistencia y rigidez cuando se

someten a adversas condiciones ambientales aceleradas, tales como la salinidad, alcalinidad y hielo y deshielo. La resina que demostró ser menos vulnerable a la exposición de dichas condiciones fue la viniléster, en especial en el ambiente más crítico que resultó ser el alcalino.

En conclusión, la resina viniléster es la más adecuada a utilizar para el proceso de fabricación de las varillas GFRP dado a su baja viscosidad, tiempo de curado y durabilidad frente a ambientes agresivos. Por otro lado, se debe tener en cuenta que esta solución es más costosa que utilizar resina poliéster, aunque resulta más económica que la resina epoxi.

1.4 Fabricación de Varillas GFRP

Las varillas de fibra de vidrio, elaboradas desde los años 70 en la ex-Unión Soviética, son un material compuesto, es decir, su composición está estructurada por la combinación de 2 materiales principalmente: filamentos de fibra y la resina, sin embargo, también suelen tener rellenos y aditivos. Los filamentos de fibra proveen la resistencia y durabilidad al elemento, mientras que las resinas permiten que el material tenga un excelente comportamiento frente al fenómeno de la corrosión al someterse a agentes ambientales agresivos (Bakis et al., 2002).

Para iniciar el proceso de fabricación de las varillas de fibra de vidrio, se deben tirar de los filamentos de fibra (suministrados como rollos “mat” o hilos “roving”) y sumergir estos en una resina para luego ser sujetados en un horno hasta el punto que se puedan remover para dejarlos enfriar y proceder al cortado. Este proceso continuo se lo conoce como “pultrusión” y es realizado con máquinas industriales para altos volúmenes de producción y se basa en el refuerzo de fibra, el sistema de resina y el molde para la sección del perfil (Figura 2).

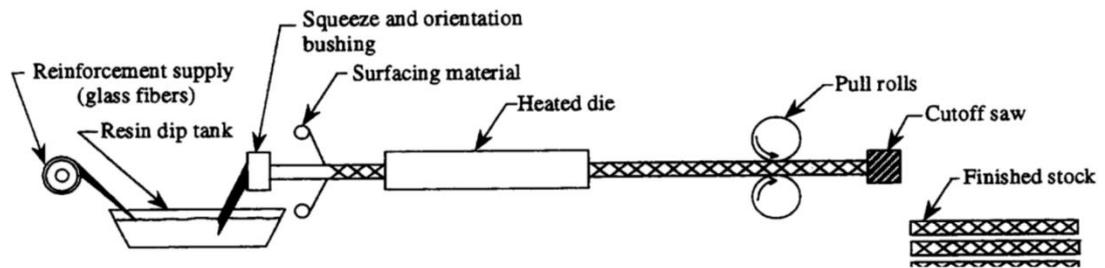


Figura 2: Esquema del proceso de pultrusión para la fabricación de varillas GFRP. (Husain, Shariq & Masood, 2020).

Unas de las ventajas más importantes de este proceso es la versatilidad al momento de la producción, dado que se pueden elaborar elementos personalizados desde el punto de vista mecánico (propiedades) y las secciones transversales de los perfiles. Concretamente el proceso se puede sintetizar en los siguientes pasos:

- a) **Dispensador de Refuerzo:** hilos (rovings) o rollos (mats) son colocados en estanterías para desde ahí ser jalados.
- b) **Dispositivo de Impregnación o Baño:** se impregnan los filamentos de fibras con resinas ubicadas en una bandeja dentro de un tanque que permite un baño distribuido uniformemente, permitiendo de esta manera alcanzar temperaturas regularizadas y estables.
- c) **Preformado:** luego de haber pasado por el baño, se remueve la resina excedente en el refuerzo y se coloca el mismo en la posición correcta para ofrecer una pre-compactación que ayuda a eliminar el aire y la humedad.
- d) **Cámara de Tratamiento Térmico y Polimerización:** el tratamiento térmico se realiza para compactar el material, darle su forma final y permitir el endurecimiento de la resina para producir la reacción exotérmica que le da la resistencia química. La temperatura es clave para poder garantizar la homogeneidad de estas propiedades además de su acabado superficial, por ello la cámara de polimerización se divide en 5 secciones con que trabajan independientemente, cada una de ellas con 2 compartimientos para poder regular la temperatura durante el tiempo adecuado para cada diámetro correspondiente de varilla.
- e) **Cámara de Enfriamiento:** luego de que la varilla abandona la cámara de polimerización, entra en la cámara de enfriamiento donde se diseña

un decremento constante de la temperatura de la varilla, de acuerdo a su respectivo diámetro. La temperatura del agua se mantiene dentro de ciertos límites para garantizar la continuidad de los productos que se están manufacturando.

- f) **Engranaje de Accionamiento / Máquina de Estiramiento:** en esta etapa la varilla es estirada a una velocidad y presión específica y debe colocarse a 3 metros de la cámara de polimerización para garantizar que la resina se encuentre endurecida y que la varilla sea atrapada dentro de los rodillos. Las velocidades de tiro dependerán del tipo de resina, tiempo y temperatura de curado y del tamaño y forma del producto (típicamente entre 0.5 m/min y 1.5 m/min). Por lo general, cuando se requiere que el material tenga buenas propiedades mecánicas y eléctricas, se utiliza la resina epoxi.
- g) **Máquina Cortadora:** se corta el producto con una sierra que está programada para una longitud de producción determinada. Por lo general, la sierra está fabricada de carburo de diamante.

El resultado final del proceso es un material plástico termoestable con excelentes propiedades mecánicas (gracias al pre-estirado) y químicas de acuerdo al tipo de fibra, resina y aditivo que se ha seleccionado. La gran mayoría de estos productos son a base de resina poliéster o viniléster y fibras de vidrio o de carbono en cualquiera de sus presentaciones (hilos “roving”, telas “Mats”, tejidos “Woven Roving” y velos “Vell”).

1.5 Acabado Superficial de las varillas GFRP

Dentro de las propiedades físico-mecánicas del material más importantes esta la adherencia, la misma que puede ser muy variable de acuerdo con el tipo de acabado superficial que se le aplique. Al finalizar el proceso de pultrusión el material queda con una superficie exterior lisa, por lo que se le debe dar tratamiento para mejorar las condiciones de adhesión y fricción entre las varillas de GFRP y el hormigón (Solyom & Balázs, 2019).

Los tipos de acabados superficiales se pueden dividir en 2 grandes grupos: varillas de sección circular con superficie rugosa para mejorar fricción y adherencia, y las varillas de sección circular con corrugaciones para incrementar la trabazón mecánica (Figura 3).

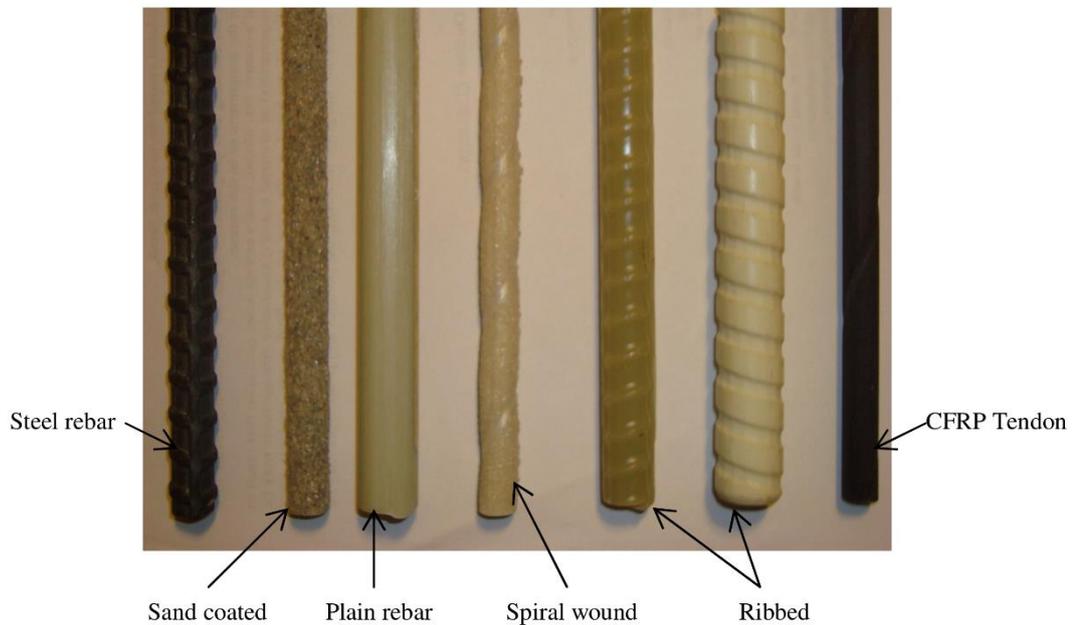


Figura 3: Tipos de recubrimiento superficial de varillas GFRP. (Quayyum, 2010).

1.5.1 Varillas de Superficie Rugosa

Este tipo de varillas no cuentan con corrugaciones para mejorar la adherencia, por el contrario, se pueden aplicar los métodos explicados a continuación:

- a) **Resinas y Granos finos (Sand Coated):** las fibras son bañadas en resinas no endurecidas a las que se les coloca cemento para asegurar que parte de la resina entre en la zona del material cementicio y viceversa, como se muestra en la Figura 4 y 5. La adherencia ideal se obtendría al garantizar que la resina y el hormigón se endurezcan de manera simultánea.

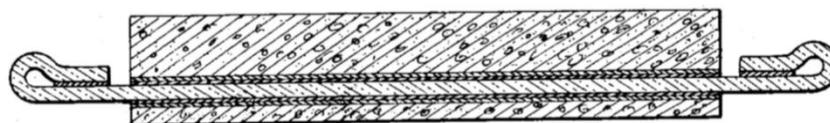


Figura 4: Tratamiento superficial de resinas y granos finos. (Portnov, 2013).

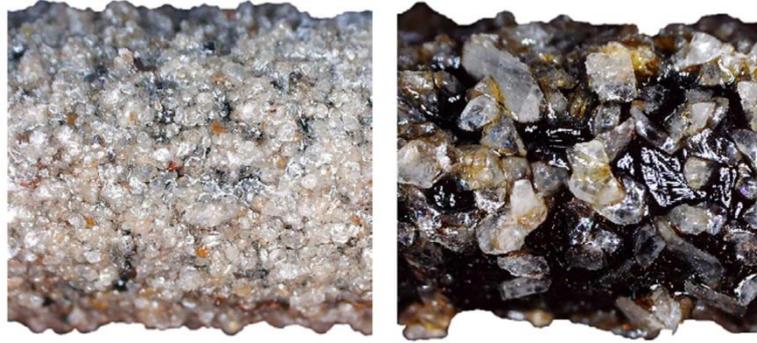


Figura 5: Varilla GFRP "Sand Coated". (Solyom & Balázs, 2019).

b) Envoltura en Espiral: la varilla es enrollada con hilos continuos de fibra de vidrio y una resina termoestable para permitir cierto grado de trabazón mecánica con el hormigón. Sin embargo, esta propiedad puede mejorarse al torcer los hilos de fibra de vidrio para brindar una ligera variación en la sección transversal. Se puede girar un grupo de hilos o también 2 (o más) grupos de hilos entre ellos, como se muestra en la Figura 6.

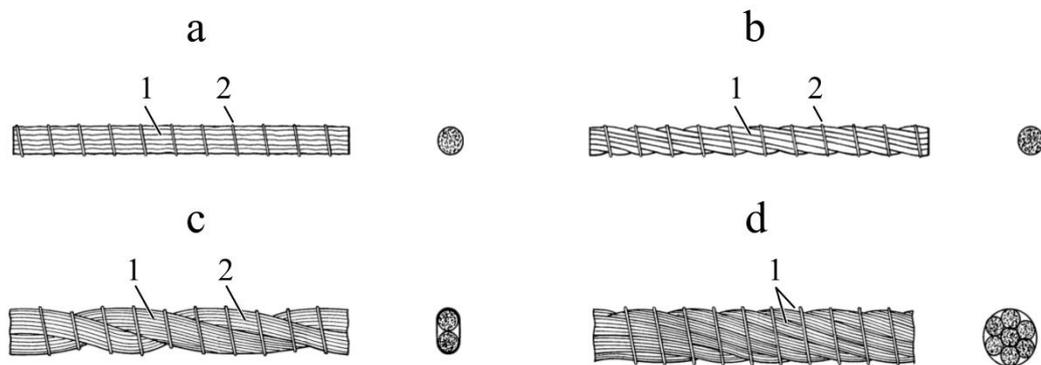


Figura 6: Tratamiento superficial con envoltura en espiral. (Portnov, 2013).

1.5.2 Varillas con Corrugaciones

Las ondulaciones generadas en la superficie de la varilla se pueden obtener con dos métodos: la aplicación de nuevos filamentos de fibra de vidrio o con el moldeado de una varilla inicialmente circular, considerando que este último no es recomendado debido a que el cortado del núcleo de la varilla

afecta a su resistencia a tracción. Por otro lado, a pesar de que el primer método evita esa pérdida en la resistencia, la corrugación y el núcleo de la varilla están unidos por una resina que no asegura una buena resistencia a corte, tal como se muestra en la Figura 7 y 8.

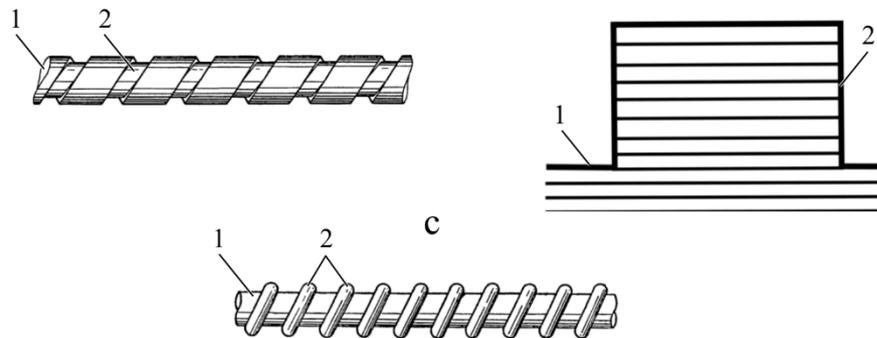


Figura 7: Corrugaciones con resinas en varillas GFRP. (Portnov, 2013).

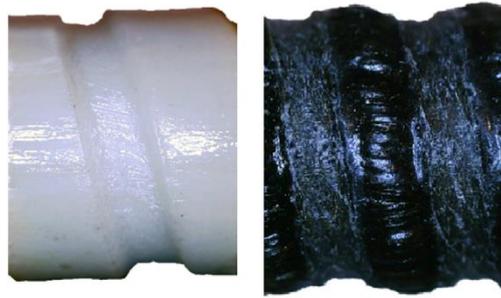


Figura 8: Varillas con corrugaciones. (Solyom & Balázs, 2019).

Para corregir lo mencionado anteriormente, se procura hacer el corrugado en espiral en concordancia con el proceso de pultrusión, esto se puede realizar de manera continua o por etapas. Para ello, se requieren de dos bobinas rotatorias de hilos de fibra de vidrio (rovings) que se envuelven en el núcleo circular listo longitudinal con la ayuda de una nueva impregnación de resina que se endurecerá luego de concluir el proceso de enrolado, así como se muestra en la Figura 9. Finalmente, se somete a todo el material a un nuevo baño de resina termoestable para brindar una última capa de garantía de unión entre los materiales, teniendo en cuenta que hay una última alternativa en la que se colocan agregados en la capa final de resinas que mejoran la condición de adhesión química.

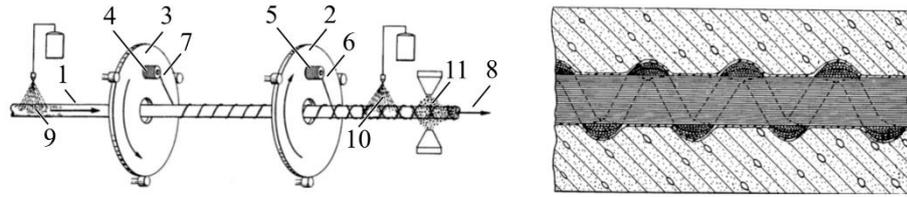


Figura 9: Corrugaciones en varillas GFRP con pultrusión. (Portnov, 2013).

1.6 Aplicaciones Típicas

Para mediados de los años 90, los japoneses eran los que tenían la mayor cantidad de aplicación de reforzamiento con compuestos FRP en el mundo. Sin embargo, el código canadiense para el diseño de carreteras y puentes (CAN/CSA-S6-06) había implementado reglamentos para las varillas GFRP en estructuras de hormigón armado, empleadas en el tablero del puente en Mantiob que fue finalizado para el año 2006 y que 10 años más tarde no ha presentado problemas en su servicio (ACI-440.1R-2015).

Por otro lado, su implementación en carreteras y tableros de puentes también ha sido exitosa en E.E.U.U., tal como se aplicó en el puente Emma Park en Utah (Figura 10) que fue construido para el año 2009. Además, se ha implementado en plintos de rieles en la ciudad de Miami (Figura 11) que conectan la estación Earlington Heights con el Centro Intermodal de Miami, con la finalidad de brindar aislamiento eléctrico.

Finalmente, se pueden aplicar en obras de muros sujetos a ambientes agresivos salinos, tal como se dio en el muro que protege la carretera Honoapiilani en Hawaii (Figura 12), siendo construido inicialmente con varillas de acero en el 2001 y reemplazado por varillas GFRP para el 2012. Además, se ha utilizado para la construcción de muros de contención que permiten la excavación de las tuneladoras, cisternas (Figura 13), cajas de recolección (Figura 15) y para el aislamiento magnético de cuartos MRI (resonancia magnética) en hospitales (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).



Figura 10: Tablero del puente Emma Park en Utah, E.E.U.U. (ACI-440.1R-2015).

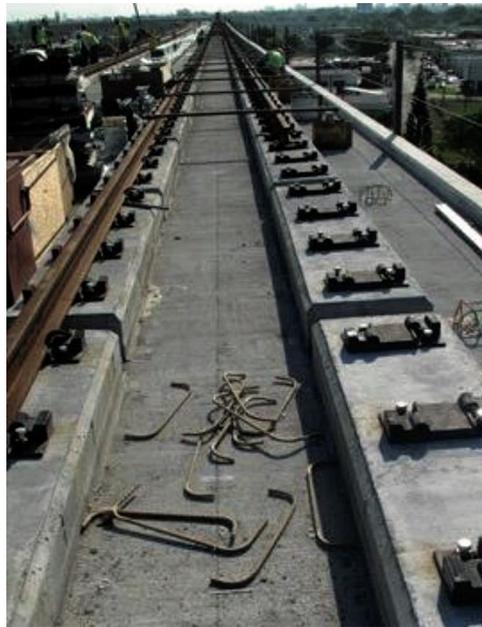


Figura 11: Rieles de Earlington Heights, Miami, E.E.U.U. (ACI-440.1R-2015)

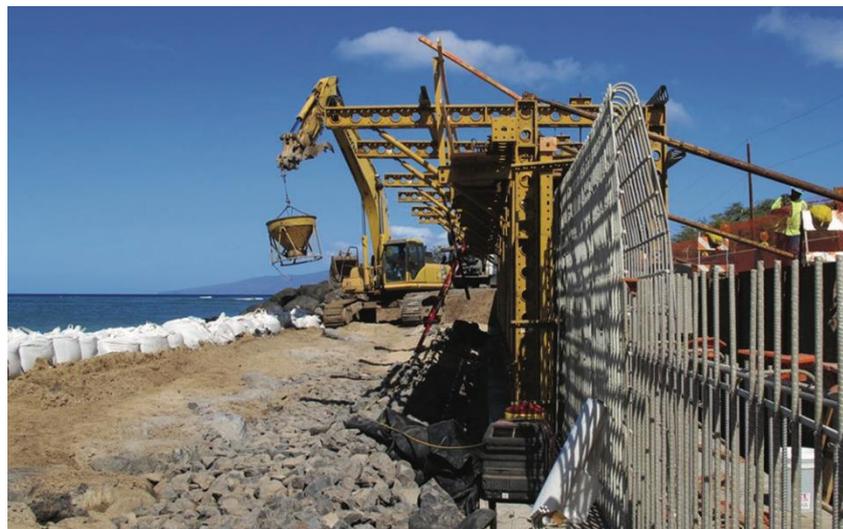


Figura 12: Muro de protección en Honoapiilani, Hawaii. (ACI-440.1R-2015)



Figura 13: Muros de contención con varillas GFRP. (Tufbar, 2020)



Figura 14: Varillas GFRP para construcción de tablero. (Tufbar, 2020).

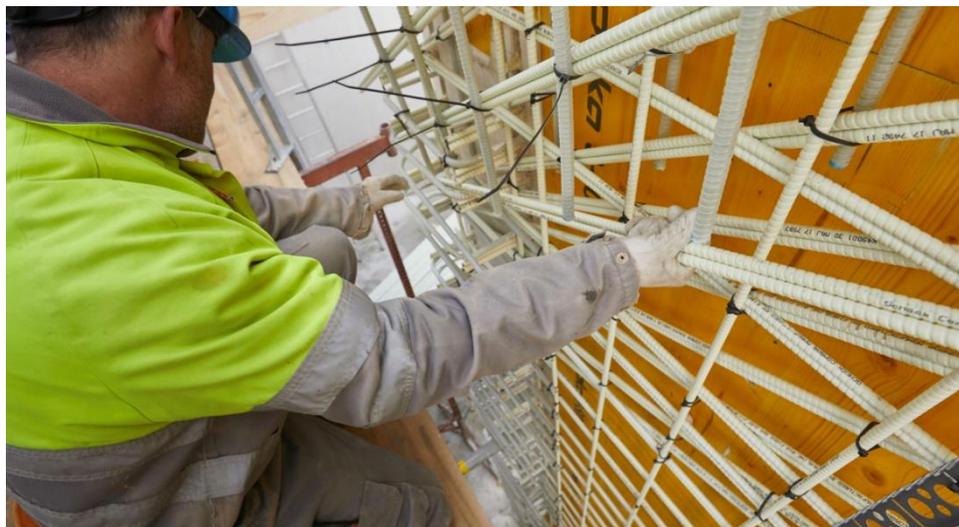


Figura 15: Barras GFRP para cajas de recolección y muros. (Tufbar, 2020).

CAPÍTULO 2

PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL

En este capítulo se hará una descripción de las propiedades intrínsecas del material que se deben tomar en consideración para los diseños. Para ello, se hará referencia a estudios previamente realizados por otros autores, pero también a la normativa ACI-440.1R-2015 que es una guía para el diseño y construcción de elementos de hormigón armado reforzados con varillas FRP.

2.1 Caracterización del Material

La implementación de las varillas GFRP debería estar limitada para aquellos casos donde la corrosión, la conductividad eléctrica y la resonancia magnética sean factores determinantes para el proyecto, considerando que, debido a la falta de experiencia de su uso, su baja ductilidad y el comportamiento pobre de las fibras al pandeo, no se recomienda el uso de las varillas en pórticos resistentes a momento o estructuras donde controlen los criterios de servicio (Kabashi, Avdyli, Krasniqi & Këpuska, 2019).

Tal como se ha mencionado previamente, las características de las varillas GFRP van a variar en función del control de calidad del proceso de fabricación, el tipo y volumen de la fibra, el tipo de resina y los efectos dimensionales. En consecuencia, las propiedades de este material anisotrópico que se mostrarán a continuación no aplican para todos los productos disponibles en el mercado (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

Para el propósito del presente trabajo, se hará énfasis en las siguientes normativas norteamericanas del hormigón:

- ACI-440.1R-2015: *Guía para el diseño y construcción de elementos reforzados con FRP.*
- ACI-440.05-2008: *Especificaciones de construcción con refuerzo FRP.*
- ACI-440.06M-2008: *Especificaciones de los materiales FRP.*
- ACI-440.3R-2012: *Guía para métodos y ensayos de compuestos FRP.*

2.2 Propiedades Físicas

2.2.1 Densidad

La densidad de las varillas GFRP está en un rango de 77.8 a 131.0 lb/ft³ (1250 a 2100 kg/m³), es decir que representa de 1/6 a 1/4 el peso del acero de refuerzo, permitiendo reducir los costos de transportación y facilitando la manipulación del material en campo.

2.2.2 Coeficientes de Dilatación Térmica

Los compuestos FRP tienen un coeficiente de dilatación térmica tanto para el sentido longitudinal como el transversal, siendo el primero gobernado por las fibras y el segundo por las resinas. Por lo general, la expansión en la dirección transversal es mayor que la longitudinal e incluso más elevada que la del hormigón endurecido, incidiendo en la posible generación de grietas en el recubrimiento del elemento sea por gradientes elevados de temperatura o un confinamiento inadecuado (ACI-440.1R, 2015). Para el caso de varillas GFRP:

$$\begin{aligned}\alpha_{long} &= 6 \text{ a } 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \\ \alpha_{trans} &= 21 \text{ a } 23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

De acuerdo con ensayos experimentales, se ha obtenido que en promedio el coeficiente de expansión transversal de las varillas GFRP es de $22 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, y que el ratio entre este y el coeficiente longitudinal es de 4. Además, se observó que siempre que la relación entre el espesor del recubrimiento y el diámetro de la varilla, c/d_b , sea mayor o igual a 1.6 se evitarían los problemas de agrietamiento mencionados anteriormente, incluso al someter al hormigón a altas temperaturas (80°C), considerando que a 60°C los resultados no mostraron pérdidas en la adherencia de los materiales (ACI-440.1R, 2015).

2.3 Propiedades Mecánicas

2.3.1 Comportamiento a Tensión

En la Tabla 1 del presente trabajo se puede observar la resistencia a tracción de los diferentes tipos de varillas FRP. Para ello, es de vital importancia entender que las varillas GFRP no contemplan un comportamiento plástico antes de la ruptura, si no que su relación esfuerzo-deformación es lineal hasta la falla (Figura 16) y la resistencia a tracción de las varillas está de 483 a 690 MPa y su módulo elástico de 35 a 51 GPa (ACI-440.1R, 2015).

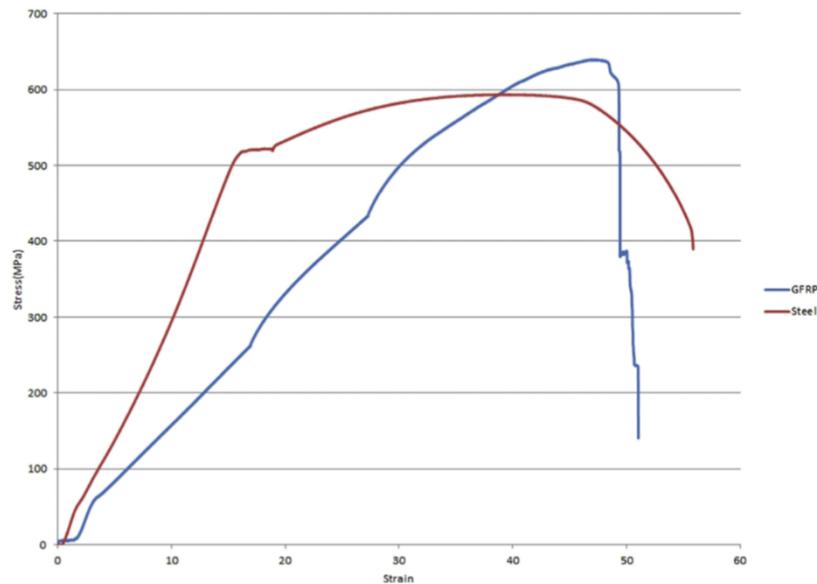


Fig. 4. Tensile curves of rebars.

Figura 16: Curva esfuerzo-deformación de varillas de acero y GFRP. (Jabbar, Fadir, 2018).

A diferencia del acero de refuerzo, se ha observado que las varillas GFRP de diferentes proveedores pueden tener reducciones en su resistencia a tracción de hasta el 40% a medida que el diámetro se incrementa proporcionalmente de 9.5 a 22.2 mm (Figura 17 y Tabla 4). Por tal motivo, los fabricantes deberían ser contactados particularmente para cumplir los requerimientos de los diferentes diámetros de cada varilla, lo que se consigue tomando como referencia el ensayo estandarizado para determinar la capacidad a tracción y la rigidez de las varillas, según ASTM D7205-06 (ACI-440.1R, 2015).

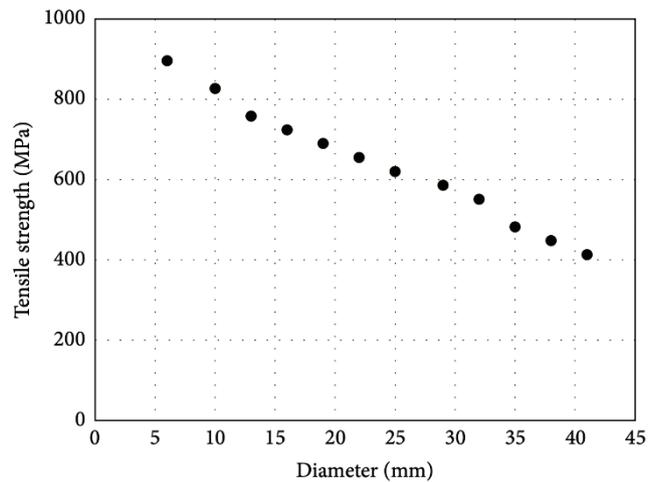


Figura 17: Relación Resistencia-Diámetro de GFRP. (Young-Ju et al., 2015).

Tabla 4: Resistencia a tracción mínima por diámetro de GFRP. (ACI-440.1R-2015).

Bar size designation	Minimum guaranteed tensile strength	
	GFRP, MPa	CFRP, MPa
6	760	1450
10	760	1310
13	690	1170
16	655	1100
19	620	1100
22	586	N/A
25	550	N/A
29	517	N/A
32	480	N/A

Para propósitos de diseño, las propiedades de una varilla GFRP deberían ser las dictadas por el fabricante, aunque por lo general se asume una distribución normal gaussiana que representa la resistencia de varios especímenes. Los proveedores son los encargados de reportar una tensión, deformación de ruptura y modulo elástico certificado y garantizado, con una probabilidad del 99.87% de que estos valores se puedan exceder por varillas similares con al menos 25 muestras ensayadas.

Luego de fabricada la varilla GFRP, esta no puede ser doblada, al menos que se haya elaborado con una resina termoplástica. Los dobleces en la producción de una varilla reducen del 40 al 50% de la resistencia debido a la concentración de esfuerzos y al encorvamiento de la fibra.

2.3.2 Comportamiento a Compresión

De acuerdo a la teoría experimental, no es recomendado utilizar varillas GFRP para resistir esfuerzos de compresión, dado que se ha observado un modo de falla de tensión transversal, micro-pandeo de las fibras y cortante para especímenes con relación longitud/diámetro de 1:1 y 2:1. No obstante, estudios realizados en columnas reforzadas con estas varillas indican que los estribos y espirales son adecuadas para el confinamiento del hormigón (ACI-440.1R, 2015).

Por el contrario, la contribución de las varillas GFRP longitudinales de un elemento a compresión es bastante baja, estas adquieren tan solo del 5% al 12% de la carga total máxima debido al bajo modulo elástico a compresión, que para muestras con un 50% a 60% de volumen de fibras de vidrio tipo E con resinas poliéster o viniléster se han obtenido módulos elásticos de 35 a 48 GPa, lo que representa el 80% del módulo a tensión para el mismo espécimen. Ensayos experimentales muestran una resistencia última a compresión de 170 MPa, aun así, se recomienda despreciar la contribución de las barras GFRP como refuerzo longitudinal en columnas y miembros a compresión y flexión (ACI-440.1R, 2015).

Hasta la actualidad no se han generado metodologías estandarizadas para ensayar las varillas GFRP a compresión, además, se cree que los valores bajos obtenidos se presentan debido al mal acabado en los extremos y al pandeo local de las fibras, observado en la Figura 18. Por ende, para poder considerar la resistencia a compresión, se podrían usar rollos e hilos de fibra en el sentido transversal (Figura 19) para brindar estabilidad y evitar la formación de vacíos (Rovira, Molines, Almerich & Martin, 2012).



Figura 18: Ensayo a compresión de varilla GFRP. (Almerich, 2010).



Figura 19: Ensayo a compresión de varilla GFRP con rollos e hilos transversales. (Rovira, Almerich, Molines & Martin, 2012).

Tabla 5: Propiedades de varillas GFRP y acero.

PROPIEDADES	VARILLAS	
	Acero	GFRP
Densidad (kg/m ³)	7850	1250
CTE longitudinal (10e-6/°C)	11.7	6
CTE transversal (10e-6/°C)	11.7	21
Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	276	N.A.
Resistencia a Tracción (Mpa)	483	483
Módulo Elástico a tracción (Gpa)	200	35
Deformación de Fluencia (%)	0.14	N.A.
Deformación de Ruptura (%)	0.6	1.2
Resistencia a Compresión (Mpa)	483	170
Módulo Elástico a Compresión (Gpa)	200.00	35

2.3.3 Comportamiento a Cortante

Las varillas GFRP son de baja resistencia cuando se habla del cortante interlaminar producido entre las fibras, concretamente donde yace la resina sin ningún tipo de refuerzo. Esto puede ser mejorado con la colocación de fibras fuera del eje longitudinal y entre capas, introduciendo una tela dentro del rollo de hilos en el proceso de pultrusión para aumentar la resistencia a corte.

En caso de requerir cierta resistencia a cortante para un elemento de hormigón armado, esta se debe solicitar al fabricante y ser corroborada mediante ensayos experimentales. Por otro lado, tomar en cuenta que la profundidad del eje neutro es reducida por el bajo módulo elástico de la varilla, generando que las fuerzas de la trabazón de agregados y la zona a

compresión se reduzcan, volviendo más importante la contribución de las varillas GFRP longitudinales (efecto dovela) que se espera que sea mucho menor a las de las varillas de acero (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

La similitud entre el refuerzo de acero y GFRP transversal es que ambos incrementan la contribución del hormigón a corte luego de la primera fisura -que es a 45 grados-. Sin embargo, aunque las vigas con estribos de acero muestren menor deformación (Figura 20), las vigas con GFRP pueden reducir el ancho de las grietas (Figura 21) debido a sus condiciones de adherencia (Ahmed, Salakawy & Benmokrane, 2010).

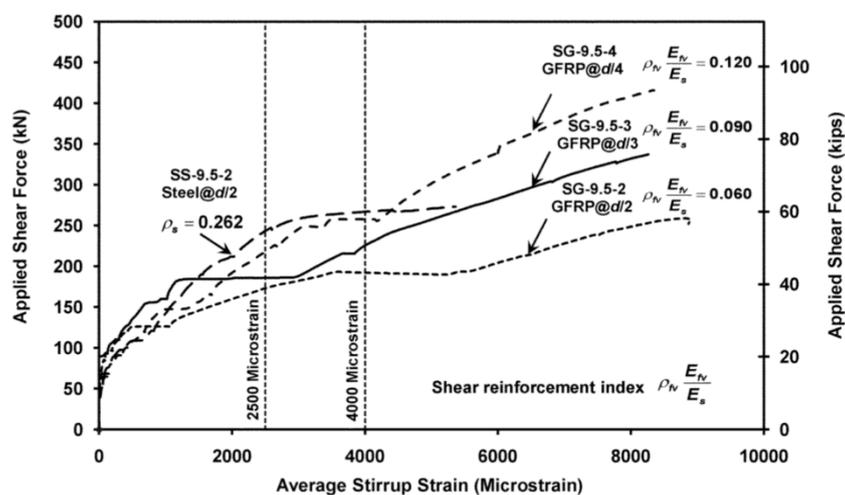


Figura 20: Deformaciones y Fuerzas de corte sobre vigas con Estribos GFRP y de Acero. (Ahmed, Salakawy & Benmokrane, 2010).

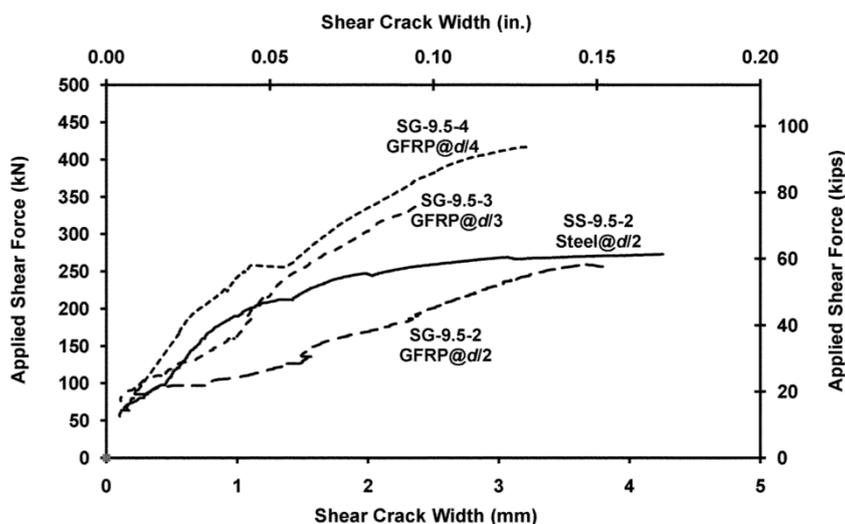


Figura 21: Ancho de grietas y Fuerzas de corte sobre vigas con Estribos GFRP y de Acero. (Ahmed, Salakawy & Benmokrane, 2010).

2.3.4 Adherencia

Para el acero corrugado, el mecanismo de adherencia con el hormigón es aquel que está conformado por la adhesión química entre materiales, la rugosidad natural del acero y la trabazón física por las corrugaciones. En caso de las varillas GFRP, la adherencia es dependiente del proceso de fabricación y acabado superficial y es transmitida hacia las fibras a través de las resinas, las mismas que pueden llegar a sufrir una falla de cortante por adherencia (ACI-440.1R, 2015).

Ensayos experimentales con la metodología “pull out” realizados por Almerich (2010) muestran que la longitud de anclaje de las varillas es de 15 a 40 veces el diámetro en función del acabado superficial, teniendo en cuenta que las varillas con corrugaciones y recubrimiento de arena pueden presentar hasta 2 veces mayor adherencia.

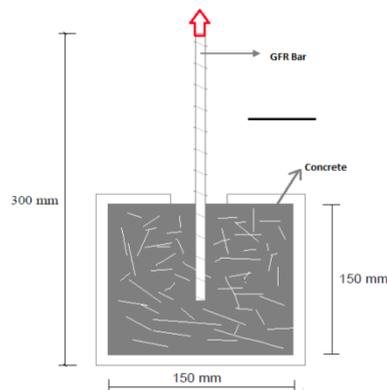


Figura 22: Dimensiones para ensayo "pull out" de adherencia. (Aydin, 2014).

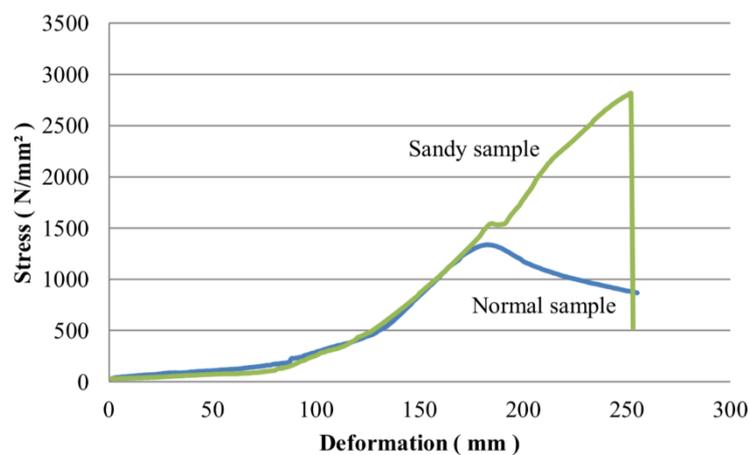


Figura 23: Resultados de ensayo "pull out" con varilla normal y con recubrimiento de arena. (Aydin, 2014).

2.4 Comportamiento a largo plazo

2.4.1 Creep

Las varillas GFRP, en comparación a los compuestos con fibra de carbono o aramida, son las más susceptibles a este fenómeno, ya que pueden alcanzar una falla frágil al estar sometidas a una fuerza de tensión durante un periodo de tiempo denominado como “endurance time”. Por el contrario, las varillas de acero no tienen este problema, al menos que se las someta a temperaturas muy elevadas (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

A medida que la relación entre el esfuerzo de tensión sostenido y la resistencia a corto plazo incrementa, el “endurance time” ira disminuyendo. Además, dicho tiempo puede acortarse debido a condiciones adversas en el ambiente tales como las elevadas temperaturas, exposición a rayos ultravioletas, alcalinidad, ciclos de hielo-deshielo y ciclos de humedad-resequedad (ACI-440.1R, 2015).

El criterio de diseño en las varillas GFRP para considerar este efecto no se ha definido completamente debido a la falta de estandarización de los ensayos experimentales y por la gran diversidad de resultados al finalizar la fabricación. No obstante, se ha observado que la varilla como tal no exhibe mayor “creep”, considerando que al ser sometida a una carga sostenida mayor al 50% de su esfuerzo último, resulta en un incremento relativamente bajo de su deformación inicial (Vijay, 1999).

Se han realizado ensayos experimentales en la Universidad de West Virginia con vigas de hormigón reforzadas con varillas GFRP “sand coated” de $\varnothing 12\text{mm}$ y $\varnothing 8\text{mm}$ a tensión y compresión respectivamente (Figura 24). Las deformaciones por creep en el hormigón fueron medidas por galgas extensiométricas colocadas en el borde superior, arrojando factores por creep de 1.29 y 1.54 para cargas sostenidas (560 días) del 20% y 50% de la resistencia última respectivamente provocado gracias al agrietamiento que, a su vez, ocurre por el bajo modulo elástico de las varillas GFRP, a pesar de que estas solo tuvieron un incremento del 25% al 40% de su deformación inicial (Vijay, 1999).



Figura 24: Ensayo de viga a carga sostenida empleando barras de tensión Dywidag. (Vijay, 1999).

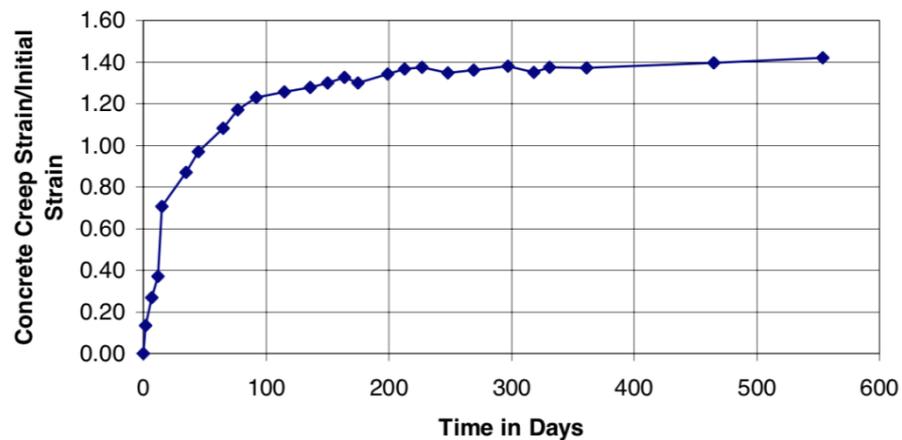


Figura 25: Resultado de ensayo de viga controlada por compresión para el 20% de la resistencia. (Vijay, 1999).

Dado que las deflexiones instantáneas de los elementos reforzados con GFRP son mayores, se deduce que las deflexiones por creep serán relativamente más pequeñas a las del refuerzo con acero corrugado (Figura 25). Esto quiere decir que las varillas GFRP no exhiben un comportamiento a creep importante, si no que esto es provocado por el agrietamiento del hormigón, su curvatura y su incremento en el brazo de palanca para mantener el equilibrio de las fuerzas. (Vijay, 1999).

2.4.2 Fatiga

Individualmente, las fibras de vidrio (tipo E y S) no son susceptibles a una falla por fatiga, sin embargo, las condiciones ambientales del laboratorio pueden provocar una ruptura retardada causada por los esfuerzos que se generan debido a la corrosión, deteriorando la superficie del material a mínimas cantidades de humedad. Por el contrario, cuando las fibras son embebidas en un compuesto FRP, se ha observado que los factores ambientales y las interacciones entre las fibras ocasionan un efecto de fatiga por tensión cíclica con el 10% de pérdida de la capacidad estática inicial por cada 10 años de logaritmo de tiempo. (Mendell & Meier, 1983)

Considerando que las varillas GFRP tienen menor resistencia a cortante que las varillas de acero, se ha observado en pasadores para pavimentos que su comportamiento a fatiga son bastante similares para cargas cíclicas transversales de corte hasta los 10 millones de ciclos. Cabe mencionar que la adición de corrugaciones u otro tipo de deformaciones en la superficie de la varilla GFRP puede traer consigo concentraciones de esfuerzos locales que originan estados de esfuerzos multi-axiales que degradan el comportamiento a la fatiga e incrementan los mecanismos producidos por el daño en la matriz que por lo general son suprimidos en materiales compuestos por fibras (ACI-440.1R, 2015).

Los rangos de los esfuerzos por fatiga de las varillas GFRP son relativamente más bajos que en el acero y no se pueden apreciar al menos que la varilla tenga un esfuerzo mayor al 50% de la resistencia última, además, esto puede alterar las condiciones de adherencia y va a estar regido por el proceso de fabricación y las circunstancias ambientales al momento de aplicar las cargas. Dado que el mecanismo de adherencia por fatiga ha sido muy poco estudiado hasta la actualidad, se espera que para dichas revisiones se utilicen criterios conservadores de diseño para aplicarse en varillas comercialmente disponibles (ACI-440.1R-2015).

2.5 Comportamiento frente a altas temperaturas

Los efectos de someter a un elemento de hormigón reforzado con varillas GFRP a altas temperaturas sobre el comportamiento axial y de corte es desconocido, sin embargo, está claro que el tipo de refuerzo, la selección de los agregados y el espesor del recubrimiento jugarán un papel importante. De acuerdo con el tipo de GFRP, la varilla sufrirá deterioro en las propiedades mecánicas y de adherencia, por lo que el tipo de agregado y el espesor del recubrimiento dictarán los parámetros que influenciarán la transferencia de calor al refuerzo, concluyendo en que su debilidad frente al fuego es mucho mayor al acero de refuerzo (ACI-440.1R, 2015).

Para cumplir adecuadamente con los estados límite de servicio, es importante garantizar que se mantendrá la adherencia entre el GFRP y el hormigón; por consiguiente, la temperatura en el ambiente no debería superar a la de transición del vidrio T_g , caso contrario el polímero que bordea la varilla se iría deteriorando. Los rangos de valores de T_g varían de 93°C a 120°C en función del tipo de resina y se espera que las fibras de vidrio presenten mejores propiedades térmicas que dicha resina con un punto de fusión de 880°C ya que aún tendrá cierta capacidad a carga axial con una reducción en la resistencia debido a las bajas fuerzas de transferencia de la resina entre fibras (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

La longitud de desarrollo de la varilla GFRP que esté ubicada fuera de la zona expuesta al fuego reducirá el riesgo de la pérdida de adherencia para las fibras. Quiere decir que las varillas GFRP bien adheridas tienen la capacidad de conservar su resistencia y rigidez a temperaturas muy por encima de T_g , tal como lo observado por Robert & Benmokrane (2010) donde se usaron varillas de T_g de 120°C y estas retuvieron el 50% de su resistencia a tracción incluso a 300°C (ACI-440.1R, 2015).

Finalmente, otros estudios sobre vigas reforzadas con GFRP han demostrado alcanzar temperaturas de hasta 462°C antes del colapso. Posteriormente, se ha definido que a 250°C se alcanza la temperatura crítica para una losa reforzada con GFRP, siendo posible incrementar esta resistencia con un mayor recubrimiento o con el uso de agregados de

carbonato, sin embargo, se debe considerar la posibilidad de una falla prematura debido al deterioro de la adherencia (Almerich, 2010).

A fin de determinar la resistencia al fuego de materiales constructivos, se debe analizar el tiempo en el que estos cumplen sus requisitos de resistencia, integridad estructural y aislamiento térmico. Para ello, existen normativas que establecen los ensayos en horno mediante una curva tiempo-temperatura (Figura 26) hasta producir la falla, siempre y cuando se haya sido sometido al elemento a sus cargas de servicio previamente, de ser el caso (Almerich, 2010).

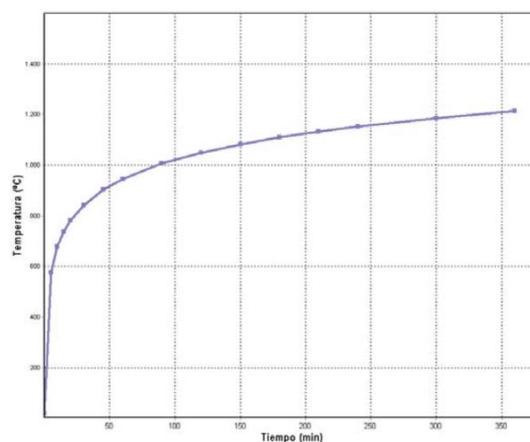


Figura 26: Curva tiempo-temperatura para ensayo en horno. (Almerich, 2010).

El procedimiento del ensayo realizado por Almerich (2010) muestra la colocación de termopares (Figura 27) en las mallas GFRP de $\varnothing 20$ mm de una loseta para captar las temperaturas a intervalos de menos de 1 minuto, registrando valores a partir de los 50°C hasta un tiempo de 95 minutos. La losa es colocada encima del horno (Figura 28) con 4 niveles de refuerzos para variar los recubrimientos, de modo que las varillas más expuestas sufren de una degradación importante (la resina alcanza su temperatura vítrea), quedando solo las fibras; mientras que los otros niveles mantienen su integridad estructural, pero sufren reducciones de resistencia (Figura 29).

De acuerdo con Almerich (2010), dentro de lo que compete el ensayo experimental, se tiene que es válida la implementación de las varillas GFRP siempre y cuando se cumpla con los recubrimientos adecuados, que terminan siendo bastante similares a los empleados para el acero de refuerzo. Para ello, se debería considerar esto en el ACI-440.05-2008.

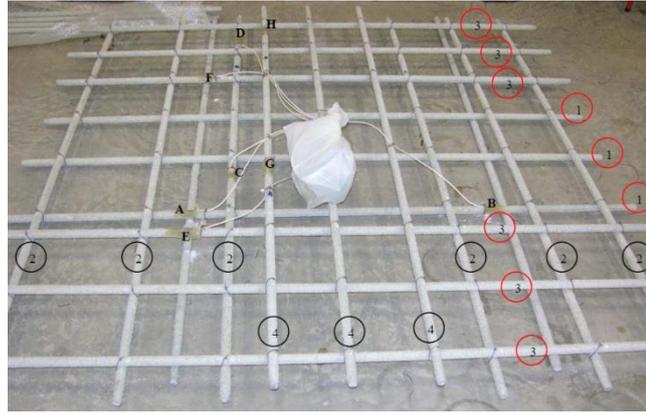


Figura 27: Armadura de loseta para ensayo contra fuego ø20mm. (Almerich, 2010).



Figura 28: Loseta colocada encima del horno. (Almerich, 2020).

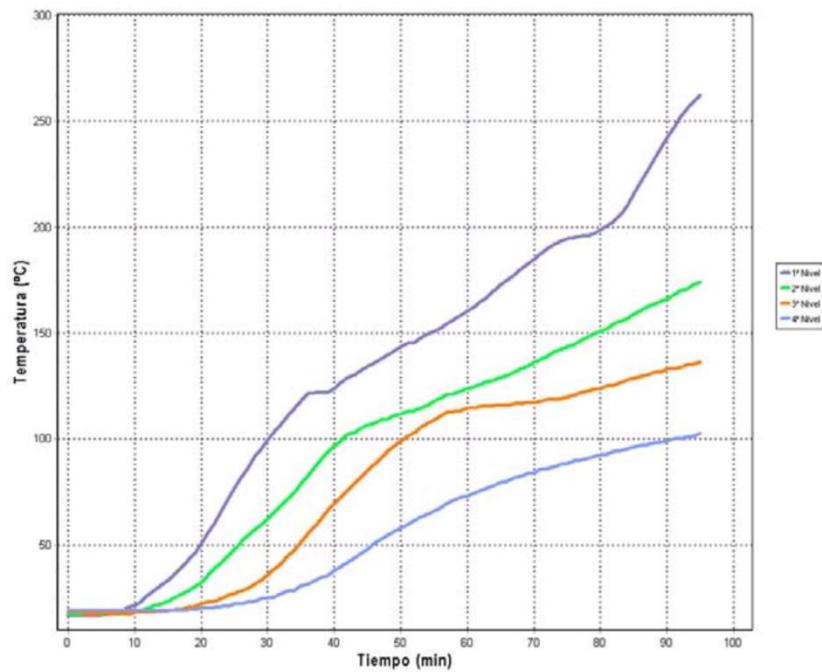


Figura 29: Temperatura registrada para los recubrimientos de 3, 5, 7 y 9 mm de los 4 niveles. (Almerich, 2010).

CAPÍTULO 3

TEORÍA A FLEXIÓN

3.1 Consideraciones Generales

Las consideraciones para el diseño, al igual que el diseño a flexión de elementos de hormigón armado con acero de refuerzo, se basan en los principios de equilibrio, compatibilidad de deformaciones y las leyes constitutivas de los materiales. Principalmente se revisarán los estados límite de resistencia, sin embargo, la baja rigidez de las varillas GFRP podría causar que los estados de servicio, fatiga y creep podrían controlar el diseño. Los factores de mayoración de las cargas descritos en ACI-318-2019 se pueden utilizar para determinar la resistencia requerida de un elemento de hormigón reforzado con varillas GFRP (ACI-440.1R, 2015).

3.2 Filosofía de Diseño y Asunciones

Los elementos de hormigón reforzado con acero corrugado por lo general son diseñados para asegurar una falla controlada por tensión, de modo que el acero alcanza la fluencia antes del aplastamiento y se garantiza un comportamiento dúctil. Por el contrario, la escasa ductilidad de las varillas GFRP impide este mecanismo y conlleva a una falla súbita y catastrófica en el material en caso de alcanzar la ruptura; sin embargo, se podría considerar al agrietamiento y las deflexiones excesivas -debido a la elongación elástica del refuerzo GFRP antes de su ruptura- como una falla inminente o advertencia previa al colapso (El-Nemr, Ahmed & Benmokrane, 2013).

Tanto las secciones controladas por tensión como por compresión son aceptadas para el diseño a flexión de miembros de hormigón reforzado con varillas GFRP. Las secciones controladas por compresión serían más adecuadas ya que se genera cierto comportamiento inelástico antes de la falla, aunque para cumplir criterios de servicio y resistencia, se debería compensar la falta de ductilidad con una mayor reserva de resistencia, motivo

por el cual se emplea un margen de seguridad más elevado que el aplicado en elementos reforzados con acero (ACI-440.1R, 2015).

Una forma de implementar varillas GFRP de alta resistencia en estos elementos es utilizar hormigones de alta resistencia, ya que estos podrían diseñarse como secciones controladas por compresión. Por consiguiente, se obtendrá una mayor rigidez en la sección agrietada y por ende una reducción en las deformaciones por flexión del miembro (ACI-440.1R, 2015).

La pequeña adquisición de ductilidad de las secciones controladas por compresión se evidencia en la Figura 30, donde se muestran las relaciones momento-curvatura para una sección de hormigón reforzado con acero (1) y con varillas GFRP controladas por compresión (2) y tensión (3), todas diseñadas para una misma resistencia, motivo por el cual la sección (3) es más grande. Los factores de reducción utilizados fueron de 0.9, 0.65 y 0.55 para las secciones (1), (2) y (3) respectivamente.

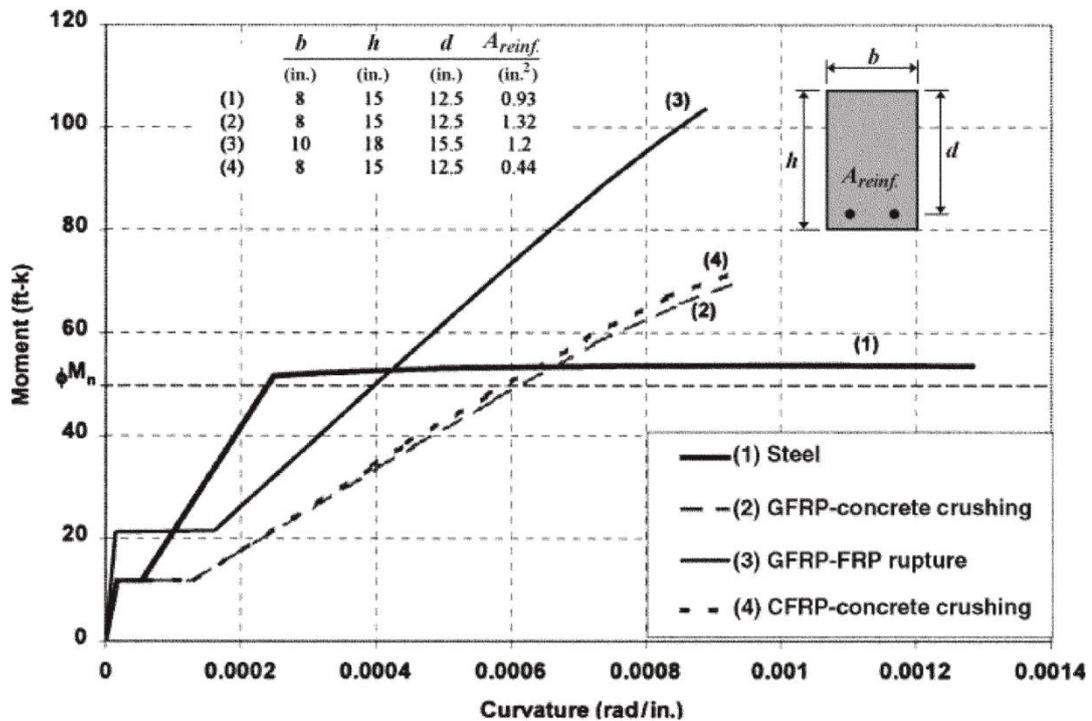


Figura 30: Diagrama Momento-Curvatura para elementos reforzados con GFRP. (ACI-440.1R-2015).

Las bases para los cálculos realizados al determinar la resistencia de una sección son las siguientes asunciones:

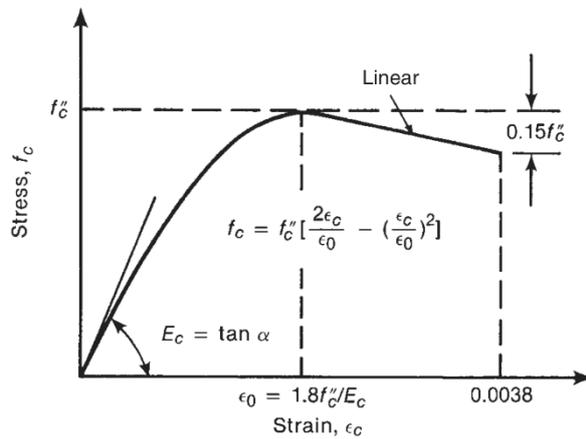
- La deformación unitaria del hormigón y el refuerzo GFRP es proporcional a una distancia desde el eje neutro. Las secciones planas permanecen planas.
- La deformación unitaria máxima a compresión del hormigón es de 0.003
- La resistencia a tensión del hormigón no es considerada
- El comportamiento a tensión de las varillas GFRP es lineal elástico hasta alcanzar la falla
- Se consideran las mejores condiciones de adherencia entre las varillas GFRP y el hormigón

3.3 Leyes Constitutivas de los Materiales

3.3.1 Hormigón

Para establecer la relación esfuerzo-deformación del hormigón, existe abundante teoría experimental e investigación como para seleccionar algún modelo que permita obtener los esfuerzos para cualquier deformación. Muchos de estos se pueden encontrar en textos como el de Wight & MacGregor (2012), donde se puede apreciar el modelo de Hognestad, tal como se muestra en la Figura 31.

De manera análoga, para los análisis de estado límite controladas por compresión, es posible optar por el bloque rectangular de esfuerzos propuesto por el ACI-318-2019, tal como se mostrará posteriormente. Finalmente, observando los modelos y consideraciones para el hormigón como material, se puede decir que estas son exactamente iguales tanto en elementos reforzados con acero corrugado como en elementos reforzados con varillas GFRP, teniendo en cuenta que, las condiciones de ductilidad entre ambas alternativas varían significativamente.



(a) Modified Hognestad. (From [3-39].)

Figura 31: Modelo de Hognestad para el Hormigón. (Wight & MacGregor, 2012).

3.3.2 Varilla de Refuerzo GFRP

Para definir el comportamiento de las varillas GFRP se hará énfasis a los ensayos a tracción que en la actualidad están normados por el ACI 440.3R-2012, muchos de los cuales han sido reemplazados por la metodología expuesta en ASTM D7205/D7205M. Primero se forman las probetas de barras GFRP con dos encamisados de acero de espesor, diámetro y longitud **L1** determinados (Figura 32) en los extremos para proteger al material de la presión de las mordazas y a su vez evitar que produzca un deslizamiento que reduzca la precisión del ensayo (Almerich, 2010). En la Tabla 6 se pueden observar valores recomendados para las dimensiones de las camisas de acero y sus longitudes respectivas, considerando que, para el tramo central, **L0**, se utiliza un valor de 12 veces el diámetro de la varilla (ACI-440.3R, 2012).

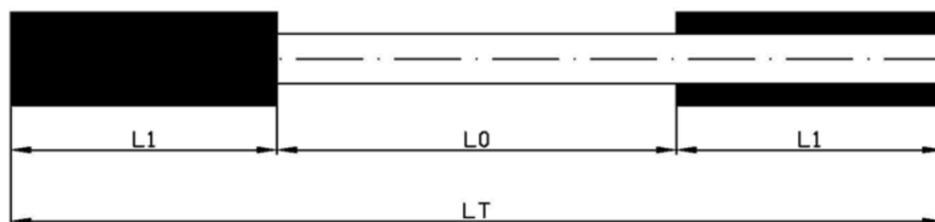


Figura 32: Longitudes para muestras de ensayo a tracción de varillas GFRP.

(Almerich, 2010).

Tabla 6: Longitudes para muestras de ensayo a tracción de varillas GFRP.
(Almerich, 2010).

\varnothing GFRP	\varnothing x e Camisa	L0	L1	LT
8	30x3	100	350	800
10	30x3	100	350	800
12	30x3	150	350	850
16	30x3	200	400	1000
20	40x3	200	450	1100
25	40x3	250	450	1150
32	45x4	250	450	1150

En la Figura 33 se puede observar el resultado del ensayo de una varilla de 16 mm de diámetro fabricada con resina viniléster sujeta a unas mordazas de tipo hidráulico en una prensa de velocidad constante de 5 mm/ minuto. La respuesta del material es una rotura frágil, alcanzando altos valores de fuerza (147,19 kN) y no mucha deformación, de manera que la ligera no linealidad presentada se genera a causa del reforzamiento exterior de la varilla al momento de su fabricación.



Figura 33: Resultado de ensayo a tracción de las varillas GFRP de \varnothing 16mm.
(Almerich, 2010).

El área transversal de la varilla de 16 mm es de $A_f = 201 \text{ mm}^2$, y su fuerza de tracción última de 147.19 kN. De tal forma que se puede obtener el esfuerzo (3.3.2a) y se lo emplearía en las ecuaciones de diseño como el máximo esfuerzo en la varilla GFRP, teniendo en cuenta que, a diferencia del acero, ya no habría mayor capacidad de deformación.

$$f_f = \frac{147.19 \text{ kN}}{2.01 \text{ cm}^2} * \frac{1 \text{ MN}}{10^3 \text{ kN}} * \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 732.28 \text{ MPa} \quad (3.3.2a)$$

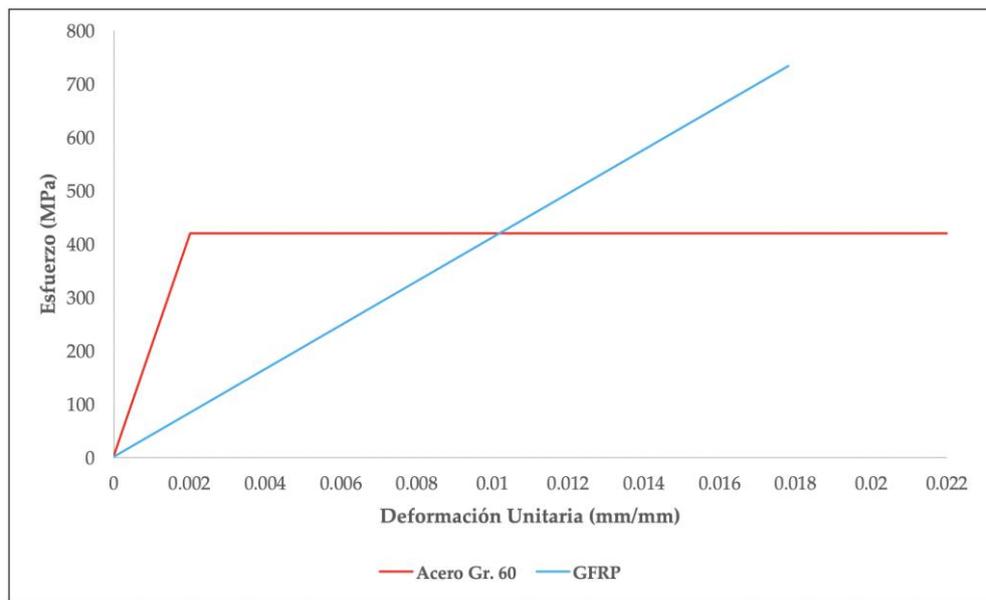


Figura 34: Relación Esfuerzo-Deformación de la varilla GFRP y acero de refuerzo.

Observando la Figura 34 se puede concluir que las varillas GFRP contemplarán un comportamiento lineal hasta la falla, tanto a compresión como a tensión, sin ningún tipo de reservas de deformación posterior al esfuerzo de ruptura. Hasta la actualidad no se ha normalizado un modelo como tal para el comportamiento de las varillas GFRP, ya que este dependerá mucho de la procedencia de sus componentes y el proceso de fabricación; no obstante, se puede divisar la similitud entre las curvas de la Figura 34 y 35 que muestra un ensayo realizado por Young-Ju et al. (2015) a tracción y se exhibe un mecanismo de falla frágil para el espécimen D19HD0 que es una varilla circular de sección llena de 20 mm de diámetro.

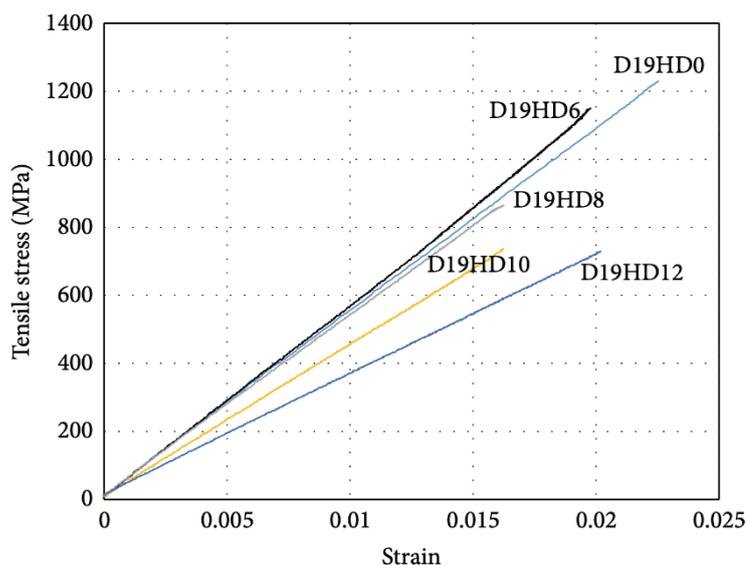


Figura 35: Relación esfuerzo-deformación de la varilla GFRP de 20 mm de diámetro. (Young-Ju et al., 2015).

3.4 Propiedades de Diseño para las varillas GFRP

La Tabla 7 muestra los diámetros y áreas nominales respectivas de las varillas GFRP de sección circular sólida o elíptica (Figura 36). El diámetro de las varillas de sección elíptica debe ser equivalente al de una varilla sólida redonda, y sus dimensiones externas máximas y mínimas deben ser otorgadas por el cliente en adición a su diámetro nominal (ACI-440.6M, 2008).

Tabla 7: Diámetros y áreas nominales de las varillas GFRP. (ACI-440.6M-2008).

Bar size designation	Nominal diameter, mm	Nominal area, mm ²
6	6.4	32
10	9.5	71
13	12.7	129
16	15.9	199
19	19.1	284
22	22.2	387
25	25.4	510
29	28.7	645
32	32.3	819

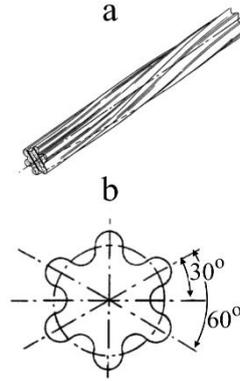


Figura 36: Sección típica elíptica de las varillas GFRP. (Portnov, 2013).

3.4.1 Factor de Exposición Ambiental

La exposición ambiental a largo plazo puede reducir significativamente la resistencia a tracción, creep y fatiga de las varillas GFRP en función del tipo y agresividad del entorno. Por tal motivo, las propiedades del material que son proporcionadas por el fabricante se deben considerar como propiedades iniciales que no incluyen estos efectos (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

El factor, C_E , de exposición ambiental se ha definido en función de la durabilidad de los diferentes tipos de fibra. Además, toma en consideración los efectos de temperatura, teniendo en cuenta que los elementos FRP no deberían de utilizarse en entornos donde la temperatura de servicio sea mayor a la implementada en la resina, T_g , para el proceso de fabricación (ACI-440.1R, 2015). Sus valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Factores de Exposición ambiental. (ACI-440.1R-2015).

Exposure condition	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Concrete not exposed to earth and weather	Carbon	1.0
	Glass	0.8
	Aramid	0.9
Concrete exposed to earth and weather	Carbon	0.9
	Glass	0.7
	Aramid	0.8

3.4.2 Resistencia a Tracción de Diseño

La resistencia a tensión de diseño se debería calcular con la siguiente ecuación de acuerdo con el ACI-440.1R (2015):

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (3.4.2a)$$

, donde:

- f_{fu} : resistencia a tracción de diseño (MPa).
- C_E : factor de exposición ambiental
- f_{fu}^* : resistencia a tracción media garantizada por fabricante por medio de ensayos en especímenes menos 3 veces la desviación estándar (MPa).

3.4.3 Resistencia a Tracción en ganchos de Diseño

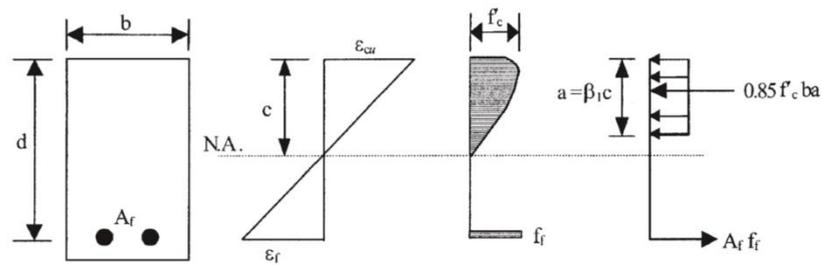
El ACI-440.1R-2015 hace referencia a las recomendaciones de diseño de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE, 1997) para determinar la resistencia en los ganchos de la varilla, la misma que es influenciada por la relación entre el radio de la curvatura y el diámetro de la varilla, r_b/d_b .

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (3.4.3a)$$

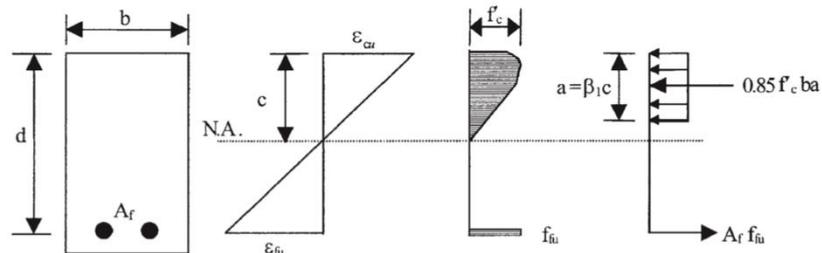
3.5 Resistencia a Flexión

La filosofía de diseño establece que la resistencia nominal a flexión de un miembro, M_n , multiplicada por un factor de reducción de resistencia, ϕ , debe ser mayor o igual al momento generado debido a las cargas factoradas, M_u , especificadas en el ACI-318-2019. Para determinar la resistencia nominal se aplican criterios de compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas internas y se define el mecanismo de falla, tal como se observa en la Figura 39.

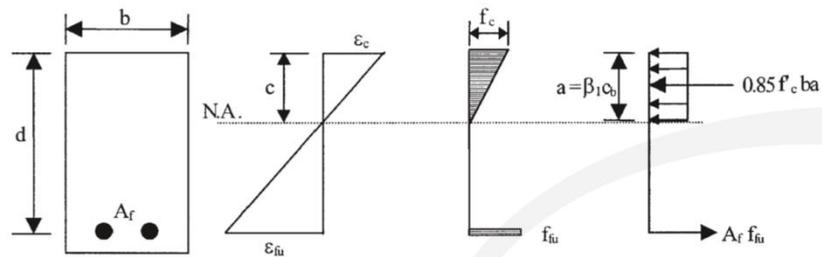
$$\phi M_n \geq M_u$$



(a) Failure governed by concrete crushing



(b) Balanced failure condition



(c) Failure governed by FRP rupture (concrete stress may be nonlinear)

Figura 37: Deformación, esfuerzos y fuerzas internas de secciones GFRP. (ACI-440.1R-2015).

3.5.1 Estados Límite de Resistencia

Para determinar si la sección es controlada por tensión o compresión, se puede comparar la cuantía del refuerzo GFRP con la cuantía balanceada, es decir, donde el agrietamiento del hormigón y la ruptura del GFRP ocurren de manera simultánea. A continuación, se presentan las ecuaciones (3.5.1a) y (3.5.1b) del ACI-440.1R-2015 para la cuantía de refuerzo y de balance respectivamente.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (3.5.1a)$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (3.5.1b)$$

; donde:

- E_f : módulo de elasticidad garantizado de diseño (MPa).
- ε_{cu} : deformación unitaria última del hormigón (0.003)
- β_1 : factor igual a 0.85 para hormigones menores o igual a $f'_c=28$ MPa e incrementa 0.05 cada 7 MPa. No puede ser menor a 0.65
- A_f : área de la varilla de refuerzo GFRP (mm^2)

De acuerdo con la normativa, los valores típicos de cuantía balanceada para elementos reforzados con GFRP son de 0.0078, como se muestra en la Tabla 9. Sin embargo, para la fibra de carbono o aramida, los valores son mucho menores que en los miembros reforzados con acero, incluso pueden alcanzar valores por debajo de la cuantía mínima, que es de 0.0035 para acero grado 60 y $f'_c=35$ MPa (ACI-440.1R, 2015).

Tabla 9: Cuantías de balance para varillas de acero y GFRP. (ACI-440.1R-2015).

Bar type	Yield strength f_y or tensile strength f_{tu} , ksi (MPa)	Modulus of elasticity, ksi (GPa)	ρ_b or ρ_{fb}
Steel	60 (414)	29,000 (200)	0.0335
GFRP	80 (552)	6000 (41.4)	0.0078

3.5.2 Resistencia Nominal

Si se cumple que $\rho_f > \rho_{fb}$, entonces la sección es controlada por el aplastamiento del hormigón, lo que implica que la distribución de esfuerzos se puede aproximar al bloque rectangular de esfuerzos expuesto en el ACI-318-2019. Basándose en la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio de fuerzas, se pueden obtener las siguientes ecuaciones (3.5.2a), (3.5.2b) y (3.5.2c) para el momento nominal, la profundidad “a” del bloque de compresión y el esfuerzo en la varilla GFRP respectivamente (ACI-440.1R-2015).

$$Mn = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3.5.2a)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f'_c b} \quad (3.5.2b)$$

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad (3.5.2c)$$

Reemplazando la ecuación (3.5.2b) en (3.5.2c) se puede despejar una ecuación para el esfuerzo en la varilla GFRP (3.5.2d) en función del módulo elástico, la deformación unitaria del hormigón, la cuantía y el factor B_1 :

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (3.5.2d)$$

Finalmente, la resistencia nominal también se puede expresar en función de la cuantía (3.5.2e):

$$Mn = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (3.5.2e)$$

Para aquellos casos $\rho_f < \rho_{fb}$, donde controle la ruptura de la varilla GFRP, la resistencia nominal se puede hallar con la ecuación (3.5.2f):

$$Mn = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3.5.2f)$$

Aunque se conozca el esfuerzo en la varilla GFRP al momento de la ruptura, no se tiene claro cuál sería la deformación del hormigón en ese instante ni tampoco la ubicación del eje neutro, c . Para este caso, las simplificaciones del bloque rectangular de esfuerzos no son aplicables ya que el hormigón no alcanza la deformación unitaria última (0.003).

El factor $B_1 x c$ va a variar en función del tipo de material y de la cuantía de refuerzo GFRP, quiere decir que, en caso de tener una sección balanceada, el máximo valor de este producto es $B_1 x c_b$ y su ecuación se puede escribir como (3.5.2g) y (3.5.2h):

$$Mn = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (3.5.2g)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (3.5.2h)$$

3.5.3 Factores de Reducción de Resistencia

Los factores de reducción de resistencia, a diferencia de los utilizados en elementos con acero de refuerzo, son más conservadores debido a la baja ductilidad de los elementos reforzados con GFRP. En la ecuación (3.5.3a) y en la Figura 38 se muestran los límites y la representación gráfica de la obtención de los factores de reducción, siendo 0.65 para secciones controladas por compresión y 0.55 para secciones controladas por tensión (ACI-440.1R, 2015).

$$\phi = \begin{cases} 0.55 & \text{para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{para } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb} \\ 0.65 & \text{para } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{cases} \quad (3.5.3a)$$

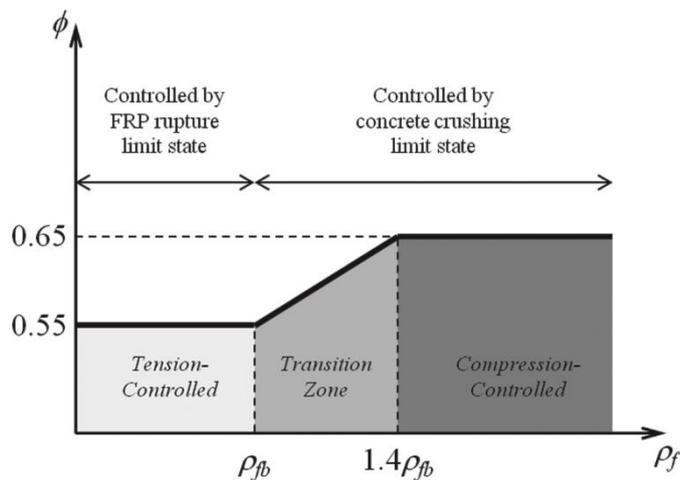


Figura 38: Estados límite de resistencia para barras GFRP. (ACI-440.1R-2015).

La incertidumbre entre comportamiento mecánico real del hormigón y el asumido para los cálculos hace que se dificulte predecir el mecanismo de falla del elemento. El caso más frecuente es de una resistencia del hormigón que sobrepase la especificada en los diseños, lo que provoca que se genere un mecanismo de falla de tensión antes que uno de compresión, motivo por el cual se considera que la cuantía del refuerzo debe ser mayor o igual a 1.4 veces la cuantía de balance para poder asegurar una falla de compresión. Así mismo, la zona de transición de la Figura 38 es teóricamente controlada por compresión y sus valores ϕ son reducidos linealmente.

El factor de reducción de resistencia para una sección reforzada con acero corrugado controlada por compresión es de 0.65 con un índice de confianza (β) de 3.5 a 4.0, de acuerdo con el ACI-318-2019. Así mismo, ensayos experimentales sobre vigas reforzadas con varillas GFRP realizados por Shield et al. (2011) muestran que para una proporción de 1 a 3 veces la carga viva “L” sobre la carga muerta “D” los factores de 0.65 y 0.55 para las secciones controladas por compresión y por tensión respectivamente arrojaban la misma confiabilidad β .

Un análisis no lineal de la curvatura al momento de la falla (Shield et al. 2011) mostró que las vigas con secciones reforzadas con varillas GFRP alcanzaban una curvatura de 0.016/d a 0.018/d para fallas controladas por tensión y de 0.011/d a 0.02/d para fallas controladas por compresión. De acuerdo con el ACI-318-19, toda curvatura que sea mayor a 0.008/d (correspondiente a una deformación unitaria del acero de 0.005) implica que la sección es controlada por tensión, sin embargo, el factor de 0.55 se aplica para mantener un índice de confianza de 3.5 a pesar de que el bajo modulo elástico de las varillas GFRP haga que las deflexiones al alcanzar la falla sean bastante elevadas, incluso mayores a las del acero de refuerzo.

3.5.4 Refuerzo mínimo GFRP

Para las secciones controladas por tensión, es necesario garantizar una cantidad mínima de refuerzo para prevenir una falla debido al agrietamiento del hormigón, M_{cr} . Las ecuaciones para el refuerzo mínimo del ACI-318-2019 son aplicables con la diferencia en los factores de reducción de resistencia, siendo 0.55 en vez de 0.9 para una sección con refuerzo GFRP. La ecuación (3.5.4a) en el sistema internacional es obtenida multiplicando la ecuación del ACI-318-2019 por un factor de 0.9/0.55=1.64:

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d \quad (3.5.4a)$$

Esta revisión no es necesaria para las secciones controladas por compresión, dado que el refuerzo mínimo para prevenir una falla por agrietamiento ya estaría colocado.

3.6 Servicio

A diferencia de los elementos de hormigón reforzados con varillas de acero corrugado, la rigidez de los elementos con varillas GFRP se reduce significativamente después de agrietarse, de modo que las deflexiones permisibles bajo las cargas de servicio pueden controlar sobre los estados límite de resistencia. Quiere decir que, para una misma sección de cuantías de refuerzo equivalentes, típicamente la reforzada con GFRP tendrá mayores deflexiones y anchos de grietas (ACI-440.1R-2015)

3.6.1 Agrietamiento

Inicialmente, la resistencia de las varillas GFRP a la corrosión facilita extender los límites de los anchos de grietas permisibles que se proponen para el hormigón reforzado con acero corrugado, ya que para el ACI-318-2019 los valores varían de 0.46 a 0.56 mm, mientras que el ACI-440.1R-2015 en base a los estudios realizados por la sociedad japonesa (JSCE, 1997) se puede considerar un ancho máximo de 0.5 mm en base a un criterio de estética. Por otro lado, la normativa canadiense (CAN/CSA S6-06) accede a valores de 0.5 mm para ambientes extremadamente agresivos y 0.7 mm para otros.

A pesar de haber modelos y tecnologías para medir el ancho de las grietas, se puede controlar el agrietamiento por flexión implementando el método indirecto que condiciona el espaciamiento de las varillas para garantizar la seguridad del elemento en función de las propiedades del compuesto GFRP y del esfuerzo correspondiente en la varilla a cargas de servicio. En el ACI-318-2019 se muestra el modelo de Frosch (1999) para el espaciamiento máximo, basado en un modelo físico y se puede adaptar a la ecuación (3.6.1a) para vigas y losas con refuerzos GFRP.

$$S_{max} = 1.15 \frac{E_f W}{f_{fs} k_b} - 2.5 c_c \leq \frac{E_f W}{f_{fs} k_b} \quad (3.6.1a)$$

El método se considera indirecto dado que el espaciamiento máximo de la varilla GFRP cumpliría con la grieta máxima permisible. Simultáneamente, se debe cumplir con la inecuación para el recubrimiento lateral, d_c (3.6.1b), dado en un nivel de esfuerzo y ancho de grieta

determinado. En caso de necesitar un d_c mayor, se recomienda reducir el nivel de esfuerzo en la varilla GFRP colocando mayor cuantía (ACI-440.1R, 2015).

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2 f_{fs} \beta k_b} \quad (3.6.1b)$$

El ancho de la grieta w puede ser seleccionado en función de la finalidad de la estructura. Como se mencionó previamente, el valor será demandante para elementos en condiciones ambientales agresivas, pero puede reducirse y optar valores tales como 0.4 a 0.7 mm para cuando se posee una resistencia adecuada a la corrosión y a su vez se quiere controlar el aspecto estético (ACI-440.1R, 2015).

El término k_b es un coeficiente que toma en consideración el grado de adherencia existente entre el hormigón y la varilla GFRP. Para aquellos casos donde la adherencia es similar al del acero corrugado, este factor toma el valor de 1.0, mientras que, si tiene una adherencia mayor el factor es menor a 1.0. Los estudios y ensayos de la sociedad canadiense CAN/CSA S806-12 que se ejecutaron para diferentes tipos de varillas GFRP de diferentes proveedores arrojaron valores de k_b de 0.60 a 1.72, siendo las varillas recubiertas con arena las que tienden a los valores más bajos (ACI-440.1R, 2015).

Un consenso del comité canadiense estableció que un valor de 1.4 se considera conservador para el factor k_b , dejando a un lado las varillas lisas y las mallas prefabricadas. Además, se ha observado que los valores iniciales de los anchos de grieta pueden verse incrementados en un 40% para ambientes controlados y 60% para ambientes más agresivos dentro de un periodo de 3 años bajo carga sostenida (Bakis et al., 2002).

3.6.2 Deflexiones

El control de deflexiones puede revisarse mediante el método indirecto (peraltes mínimos) o el método directo. Considerando que se está empleando un material de bajo modulo elástico, las magnitudes de sus deformaciones serán más grandes que las presentadas con el hormigón reforzado con acero. Por tal motivo, el ACI-440.1R-2015 explícitamente sugiere hacer un pre-dimensionamiento de los elementos con los peraltes mínimos para después hacer la revisión respectiva con el método directo.

3.6.3 Peraltes Mínimos Recomendados

Cabe recalcar que la aplicación de estos peraltes mínimos no garantiza el cumplimiento de los requerimientos por deflexiones. Los valores de la Tabla 10 fueron obtenidos a través de una limitación de la relación claro/peralte y su correlación con la curvatura asociada a través de la ecuación (3.6.3a), formulada por Ospina et al. (2001) aplicable para cualquier miembro sometido a flexión frente a cargas de servicio y con un comportamiento lineal-elástico del refuerzo.

La ecuación (3.6.3a) considera que el hormigón contribuye a la rigidez en la zona de tensión cuando se generan las grietas en esta zona, por tal motivo, se tuvieron que alterar los valores de la Tabla 10 mediante la proporción de los momentos de inercia efectivos y agrietados (3.6.4). Para ello, los valores tabulados fueron obtenidos asumiendo una deflexión máxima de L/240 bajo cargas de servicio, con un refuerzo de 2 y 3 veces la cuantía de balance para losas y vigas respectivamente.

Tabla 10: Peraltes mínimos recomendados. (ACI-440.1R-2015).

Member	Minimum thickness h			
	Simply supported	One end continuous	Both ends continuous	Cantilever
Solid one-way slabs	$\ell/13$	$\ell/17$	$\ell/22$	$\ell/5.5$
Beams	$\ell/10$	$\ell/12$	$\ell/16$	$\ell/4$

$$\frac{l}{h} \leq \frac{48\eta}{5K_1} \left(\frac{1-k}{\varepsilon_{fs}} \right) \left(\frac{\Delta}{l} \right)_{max} \quad (3.6.3a)$$

; donde:

- $\eta = d/h$
- El valor “k” obedece a la ecuación (3.6.4b)
- $\left(\frac{\Delta}{l} \right)_{max}$ es la deflexión máxima permitida sobre el claro para cargas de servicio
- El factor “K1” considera las condiciones de borde, tomando valores de 1, 0.8, 0.6 y 2.4 para tramos simplemente apoyados, un solo tramo continuo, ambos tramos continuos y voladizos respectivamente.

- ε_{fs} es la deformación unitaria del refuerzo GFRP bajo cargas de servicio, evaluado a $L/2$ para vigas continuas y $L=0$ para voladizos.

3.6.4 Momento de Inercia Efectivo

Para aquellos casos donde la máxima carga de servicio exceda el momento de agrietamiento, M_{cr} , la sección sufre de una pérdida de rigidez que perjudica el momento de inercia, tal como se la determina en la ecuación (3.6.4a) y (3.6.4b). La rigidez a flexión de un elemento irá variando de $(E_g I_g)$ a $(E_{cr} I_{cr})$ dependiendo de la magnitud de la carga al momento de determinar la deflexión, por tal motivo, el ACI-440.1R-2015 ha optado por una ecuación de la inercia efectiva (3.6.4c) que permite una transición gradual de la inercia gruesa, I_g , a una inercia agrietada, I_{cr} , que considera los efectos de la rigidez del hormigón a tensión y la variación de EI a lo largo del miembro (ACI-440.1R, 2015).

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (3.6.4a)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f \eta_f + (\rho_f \eta_f)^2} - \rho_f \eta_f \quad (3.6.4b)$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)} \leq I_g \quad (3.6.4c)$$

El estudio realizado por Bischoff (2005) muestra que la ecuación adoptada del ACI-318-2019 sobreestima la rigidez de las secciones cuando I_g/I_{cr} es mayor de 3 o 4, considerando que las vigas reforzadas con GFRP tienen un factor de 5 a 25 I_g/I_{cr} . Por tal motivo, se obtiene la expresión (3.6.4c) basada en la sección y en el promedio ponderado de sus flexibilidades ($1/EI$) que se adapta mejor a las deflexiones con grietas discretas a lo largo de los miembros; aplicable para secciones reforzadas con acero y GFRP sin la necesidad de factores empíricos de corrección.

El valor de “ γ ” está en función de las cargas aplicadas y las condiciones de borde, además de considerar las secciones no agrietadas a lo largo del miembro y el cambio de rigidez que estas representan. De acuerdo con el estudio de Bischoff (2005) este valor se puede obtener con la ecuación (3.6.4d). El ACI-440.1R-2015 recomienda que se calculen las deflexiones

inmediatas con los momentos de inercia efectivos (3.6.4c) para la máxima carga de servicio M_a en el miembro (ACI-440.1R, 2015).

$$\gamma = 1.72 - 0.72 \left(\frac{M_c}{M_a} \right) \quad (3.6.4d)$$

Las deflexiones para miembros continuos pueden ser estimadas mediante un promedio ponderado de las inercias efectivas I_e en las secciones críticas de momentos positivos y negativos, tal como lo recomienda el ACI-318-2019. Para el caso de claros continuos en ambos extremos se puede determinar la inercia efectiva con la ecuación (3.6.4e), mientras que para los claros continuos en 1 solo extremo se debe obtener I_e en base a la ubicación del máximo momento, siendo estos 2 últimos métodos similares a los empleados para elementos reforzados con acero (ACI-440.1R, 2015).

$$I_e = 0.70I_{e+} + 0.15(I_{e1-} + I_{e2-}) \quad (3.6.4e)$$

3.6.5 Método Directo

Las deflexiones calculadas para los elementos reforzados con GFRP deben cumplir con los límites que generalmente se encuentran en los códigos de construcción locales. Para determinar el valor de las deflexiones a corto plazo se puede aplicar la ecuación de la inercia efectiva u otra técnica usual para el análisis estructural; además, las deflexiones a largo plazo suelen ser mucho mayores en función de las características geométricas del miembro, las cargas y los materiales y también deben ser consideradas frente a las cargas de servicio (ACI-440.1R, 2015).

Las deflexiones producidas por “creep” y contracción conservan una relación tiempo/deflexión que se asemeja bastante bien a la obtenida con miembros reforzados con acero, indicando que los criterios para determinar deflexiones a largo plazo pueden ser empleados de igual manera. La ecuación (3.6.5a) del ACI-318-2019 permite determinar la deflexión a largo plazo, con la peculiaridad de que el parámetro λ_Δ se iguala al valor de ξ dado que la cuantía a compresión en miembros reforzados con GFRP es despreciada (ACI-440.1R, 2015).

$$\Delta_{(cp+sh)} = \lambda_\Delta (\Delta_i)_{sus} \quad (3.6.5a)$$

$$\lambda_\Delta = \frac{\xi}{1 + 50\rho'_f} \quad (3.6.5b)$$

Las ecuaciones (3.6.5a) y (3.6.5b) con ciertas modificaciones pueden ser empleadas para determinar la rigidez de miembros de hormigón reforzado. Debido al flujo plástico del elemento, se genera un decremento en el módulo elástico efectivo y simultáneamente un incremento en la profundidad del eje neutro, lo que eleva la magnitud de los momentos de inercia de la sección agrietada I_{cr} , siendo esto último primordial para los miembros GFRP debido a su baja rigidez. Por consiguiente, las deflexiones a largo plazo para el hormigón reforzado con GFRP pueden tender a ser menores a las obtenidas por un elemento con acero de refuerzo (ACI-440.1R, 2015).

Un estudio realizado por Brown (1997) muestra que las deflexiones a largo plazo para vigas reforzadas con GFRP sin refuerzo a compresión para una carga sostenida durante 6 meses fueron del 60% al 90% de la deflexión inicial. En comparación a los resultados de las ecuaciones (3.6.5a) y (3.6.5b), las deflexiones medidas representaron solo del 50% al 75% el valor sugerido de dichas ecuaciones. Por esta razón, se sugiere un factor de 0.6 para la ecuación (3.6.5a) para determinar la deflexión a largo plazo de elementos reforzados con GFRP, siempre y cuando toda o la mayoría de la carga de servicio considerada no sea una carga sostenida, caso contrario los valores de deflexiones podrían subestimarse para esta ecuación (3.6.5c).

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0.6\xi(\Delta_i)_{sus} \quad (3.6.5c)$$

3.6.6 Recubrimientos

La Tabla 11 del ACI-440.5-2008 muestra los recubrimientos mínimos requeridos, donde se consideran todas las condiciones de exposición menos aquellos casos que se necesite protección adicional por el fuego. Para varillas empaquetadas, el recubrimiento debe ser igual al diámetro compuesto de todas las varillas del paquete, pero no debe ser inferior a 2 pulgadas (50 mm) ni a alguno de los valores de la tabla.

Tabla 11: Recubrimientos mínimos recomendados. (ACI-440.5-2008).

	Specified cover, in.
Slabs and joists	
Top and bottom bars	
No. 10 bars and smaller	3/4
Formed concrete surfaces exposed to earth and for bottoms bearing on work mat, or slabs supporting earth cover	
No. 5 bars and smaller	1-1/2
No. 6 through 10 bars	2
Beams, formed	
Stirrups, spirals, and ties	1-1/2
Primary reinforcement	2
Exposed to earth	
Stirrups and ties	2
Primary reinforcement	2-1/2
Walls	
No. 10 bars and smaller	3/4
Formed concrete surfaces exposed to earth or in contact with ground	2
Footings and base slabs	
At formed surfaces and bottoms bearing on concrete work mat	2
At unformed surfaces and bottoms in contact with earth	3
Top of footings	Same as slabs
Over top of piles	2

3.7 Ruptura por Creep y Fatiga

Para evitar la falla por “creep” y fatiga en las varillas GFRP bajo cargas sostenidas o cíclicas (respectivamente) se necesitan limitar los esfuerzos de estos elementos bajo estas condiciones de fuerza. Debido a que los esfuerzos generados en la varilla estarán dentro del rango elástico del miembro, se pueden determinar los esfuerzos mediante una distribución lineal, tal como se muestra en la Figura 39 (ACI-440.1R, 2015).

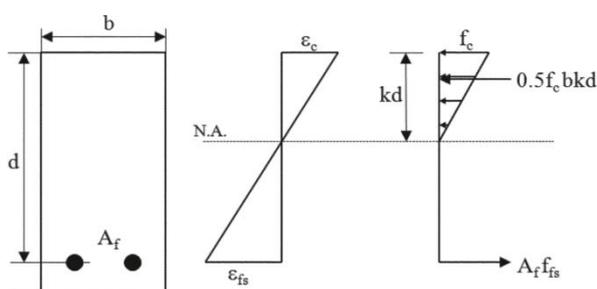


Figura 39: Distribución lineal de esfuerzos y deformaciones. (ACI-440.1R-2015).

3.7.1 Estado Límite por Creep

El esfuerzo límite para evitar la falla por “creep” en las varillas GFRP se calcula con la ecuación (3.7.1a) donde se debe considerar el momento M_s como el valor de todas las cargas sostenidas muertas y vivas sin factorar. Los

valores del momento de inercia agrietado I_{cr} y la relación entre el peralte efectivo y la profundidad del eje neutro elástico (factor k) se calcula con las ecuaciones anteriores (ACI-440.1R, 2015).

$$f_{fs,sus} = M_{s,sus} \frac{n_f d (1 - k)}{I_{cr}} \quad (3.7.1a)$$

3.7.2 Estado Límite por Fatiga

Para controlar los efectos por cargas cíclicas, la ecuación (3.7.2a) se puede utilizar para determinar el esfuerzo de la varilla GFRP siempre y cuando se considere el momento debido a todas las cargas sostenidas y el máximo momento en el ciclo de carga. Las varillas GFRP se limitan al 20% de su esfuerzo último, de ahí sale la ecuación (3.7.2a) (ACI-440.1R, 2015).

$$f_{fs,sus} = 0.20 f_{fu} \quad (3.7.2a)$$

CAPÍTULO 4

TEORÍA A CORTANTE

4.1 Consideraciones Generales

Poder medir de manera adecuada la resistencia de las varillas GFRP a cortante implica la consideración de ciertas desventajas que puede tener el material frente a este mecanismo, entre ellos, el bajo modulo elástico, la baja resistencia al cortante transversal, la ausencia de un punto de fluencia dentro de su comportamiento y la reducción en la resistencia a tracción en la porción doblada de una varilla GFRP en comparación a un tramo recto sin doblez (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

4.2 Filosofía de Diseño

El diseño a cortante de las varillas GFRP se basa en los criterios de diseño por resistencia y se emplea un factor de reducción de 0.75 de la misma forma como lo estipula el ACI-318-2019, del mismo modo, siguiendo las recomendaciones de esta normativa se pueden obtener de las fuerzas de corte actuantes máximas, V_u , cerca de los extremos de las vigas y revisar que estas sean menores que la resistencia a corte de diseño, ϕV_n .

4.3 Resistencia a Cortante

Una sección reforzada con varillas GFRP sufre de una reducción en su eje neutro al alcanzar el agrietamiento, principalmente debido a la baja rigidez axial del material producida por el bajo modulo elástico. Quiere decir que la zona de compresión tiende a reducirse y las grietas alcanzan un ancho cada vez mayor, de modo que la resistencia a cortante otorgada por la trabazón entre los agregados y el hormigón a compresión es mucho menor en comparación a una sección de cuantía equivalente reforzada con varillas de acero corrugado (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

Por otro lado, se ha podido apreciar en un sin número de investigaciones, tal como la realizada por la JSCE (1997) que la resistencia a corte de un miembro de hormigón sin refuerzo transversal es influenciada por la rigidez del refuerzo a flexión GFRP en la zona de tensión, sin embargo, su acción de dovela no se ha estudiado a profundidad y se espera que su contribución sea menor a la obtenida con una varilla de acero (ACI-440.1R, 2015).

La capacidad a cortante de un hormigón reforzado con varillas GFRP se puede calcular con la ecuación (4.3a) estipulada en el ACI-440.1R-2015, donde el parámetro k (en función de la cuantía y la relación modular) se obtiene con lo visto en (3.6.4b) y es expresado como un solo factor kd para tomar en cuenta la rigidez axial de las varillas GFRP. La ecuación (4.3a) ha sido adoptada para contemplar un margen de seguridad para especímenes dentro de un rango de cuantías de refuerzo y de resistencias a compresión que han sido ensayados por Tureyen & Frosch (2003), no obstante, dicha ecuación puede reescribirse para adoptar una forma similar a la ecuación del ACI-318-2019 de punzonamiento de losas con un factor $(5k/2)$ que considere la baja rigidez axial de las varillas GFRP, como se muestra en (4.3b) (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) \quad (4.3a)$$

$$V_c = \left(\frac{5k}{2}\right) 2 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4.3b)$$

Las ecuaciones del ACI-318-2019 para estimar la contribución de los estribos también puede ser aplicada para el refuerzo a cortante de las varillas GFRP, tal como se muestra en la ecuación (4.3c). Además, para mantener un control sobre el ancho de las grietas y asegurar la integridad del hormigón, se debe limitar el nivel de esfuerzos en la varilla (4.3d) y así evitar una falla en la zona doblada de los estribos, que es la zona más débil (ACI-440.1R, 2015).

$$V_f = \frac{A_{fv}f_{fv}d}{S} \quad (4.3c)$$

$$f_{fv} = 0.004E_f \leq f_{fb} \quad (4.3d)$$

De la ecuación (4.3c) se puede despejar el área requerida y el espaciamiento para el refuerzo transversal requerido (4.3e), del mismo modo, para estribos inclinados y estribos rectangulares en espiral se pueden aplicar las ecuaciones (4.3f) y (4.3g) respectivamente.

$$\frac{A_{fv}}{S} = \frac{Vu - \phi Vc}{\phi f_{fv}d} \quad (4.3e)$$

$$V_f = \frac{A_{fv}f_{fv}d}{S} (\sin\theta + \cos\theta) \quad (4.3f)$$

$$V_f = \frac{A_{fv}f_{fv}d}{S} (\sin\theta) \quad (4.3g)$$

En función del índice de refuerzo transversal (4.3h) y por ende la cuantía transversal (4.3i) se pueden generar 2 modos de falla en los miembros con GFRP al igual que en el diseño a flexión: un mecanismo de falla por tensión y otro de falla por compresión. Como se mencionaba previamente, el mecanismo de falla por tensión es frágil e implica la ruptura de la varilla; a medida que el índice de refuerzo (4.3h) aumenta, también lo hace la resistencia a corte por tensión y el mecanismo se iría alterando hasta obtener una falla de corte por compresión (ACI-440.1R, 2015).

$$\text{Índice de Refuerzo Transversal: } (\rho_{fv}E_f) \quad (4.3h)$$

$$\rho_{fv} = \frac{A_{fv}}{b_w S} \quad (4.3i)$$

4.4 Límites del Refuerzo a Cortante

Suponer -para el diseño a cortante- que la resistencia del hormigón y del acero pueden sumarse, es válido siempre y cuando las grietas que se generen en el miembro sean controladas. Para ello, se hace referencia a la normativa canadiense CAN/CSA-S6-06 donde se limita a la deformación unitaria por tensión de la varilla GFRP a 0.004 (mm/mm) y a la fuerza de diseño para que no exceda la resistencia de la porción doblada del estribo (ACI-440.1R, 2015).

Una deformación unitaria de 0.004 da lugar a una predicción de la resistencia a corte muy conservadora pero precisa, ya que impide la degradación de la trabazón de agregados y por ende de la resistencia a cortante del hormigón. No obstante, los ensayos detallados en el ACI-440.3R-2012 para la resistencia a tracción de la porción doblada de la varilla han mostrado valores de hasta el 60% la capacidad de la porción recta, indicando que el tramo recto puede gobernar en el diseño ignorando el límite de 0.004 (Ahmed, Salakawy & Benmokrane, 2010).

4.5 Refuerzo Mínimo a Cortante

Para aquellos casos donde la demanda sea mayor a la mitad de la resistencia a corte del hormigón, $V_u > \phi V_c/2$, el ACI-318-2019 indica unas ecuaciones para el refuerzo mínimo con el fin de evitar la falla por corte en miembros susceptibles a la formación súbita de grietas. Bajo el mismo concepto, se utiliza la ecuación (4.5a) para el refuerzo transversal mínimo GFRP, la misma que arroja valores más conservadores en comparación a los obtenidos en los estribos de acero y que además tendrá menor contribución a medida que se incremente la rigidez de las varillas longitudinales o la resistencia del hormigón (ACI-440.1R, 2015).

$$A_{fv, \min} = 0.35 \frac{b_w S}{f_{fv}} \quad (4.5a)$$

De acuerdo con los valores obtenidos de la resistencia del hormigón, V_c , se puede obtener una falla de corte por tensión o compresión. Si V_c es menor a $0.18 \phi f'_c b x d$ se puede esperar una falla por tensión, mientras que si excede $0.3 \phi f'_c b x d$ se genera una falla por compresión (aplastamiento del

hormigón), sin embargo, al ACI-318-2019 propone el límite de $8x\sqrt{f'c}bx d$ siendo más conservador y recomendado para las fallas a compresión y así controlar el agrietamiento excesivo y el aplastamiento del alma (ACI-440.1R, 2015).

4.6 Detallamiento de Estribos

El espaciamiento máximo estipulado en el ACI-318-2019 para los estribos de acero en miembros de hormigón armado es de $d/2$ a 600 mm para garantizar que al menos un estribo intersekte cada grieta. De acuerdo con el ACI-440.1R-2015 se pueden optar por los mismos límites, además de tener en cuenta que cuando la relación entre el radio de curvatura, r_b , y el diámetro, d_b , de la varilla GFRP tienden a valores pequeños se ocasiona una falla a bajos niveles de carga en la zona del doblado del estribo, por tal motivo se recomienda un mínimo de $r_b/d_b = 3$ y un gancho cerrado a 90 grados (ACI-440.1R, 2015).

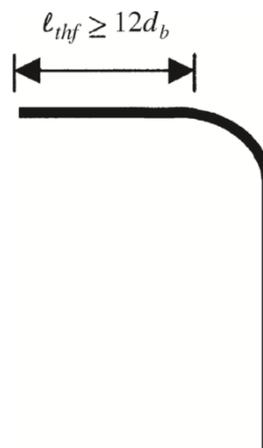


Figura 40: Longitud requerida para el gancho de un estribo GFRP. (ACI-440.1R-2015).

Para un correcto anclaje del estribo, la investigación de Ehsani et al. (1995) recomienda una longitud del gancho de por lo menos 12 veces el diámetro de la varilla para garantizar que no haya ningún deslizamiento significativo ni influencia importante en la resistencia a tracción de la rama del estribo. Cabe recalcar que por ello las consideraciones del ACI-318-2019 para

los estribos de acero no son aplicables para las varillas GFRP (ACI-440.1R-2015).

CAPÍTULO 5

TEORÍA PARA EMPALMES Y LONGITUD DE DESARROLLO

Los esfuerzos de adherencia que se producen entre las varillas GFRP y el hormigón se generan siempre que haya un cambio en la fuerza de tensión de la varilla, la misma que tiene que balancear la fuerza de la zona de compresión. Las cualidades de la adherencia entre estos materiales dependen principalmente del tipo de compuesto de fibra (FRP), el modulo elástico, el acabado superficial y la forma de la varilla (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

5.1 Longitud de Desarrollo para varillas rectas

Las varillas corrugadas de acero embebidas en el hormigón resisten las fuerzas de tensión con la ayuda de un esfuerzo de adherencia promedio, μ , que actúa en la superficie de la varilla. Para el caso de las barras GFRP se implementa el mismo modelo, tal como se puede observar en la Figura 41 y la ecuación (5.1a), con la diferencia de que la varilla no alcanzará su resistencia última cuando se diseñen las secciones controladas por el aplastamiento del hormigón (ACI-440.1R, 2015).

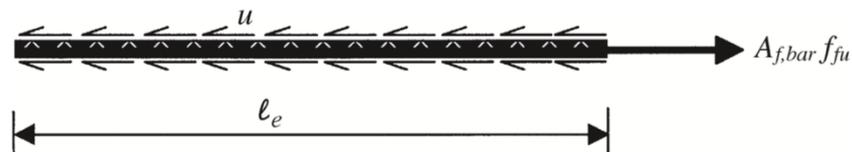


Figura 41: Mecanismo de adherencia de varilla GFRP con hormigón. (ACI-440.1R-2015).

$$\ell_e \pi d_b \mu = A_f f_f \quad (5.1a)$$

Las ecuaciones para la longitud de desarrollo del ACI-318-2019 fueron obtenidas en base a ensayos experimentales sobre 62 empalmes no confinados y 54 confinados para relacionar el esfuerzo de adherencia promedio y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del hormigón con el recubrimiento al centro de la varilla y la longitud del empalme, utilizando una regresión lineal. Wambeke & Shield (2006) hicieron un estudio similar para vigas reforzadas con varillas GFRP, resultando en la ecuación (5.1b) (ACI-440.1R, 2015).

$$\frac{\mu}{0.083\sqrt{f'_c}} = 4.0 + 0.3\left(\frac{C}{d_b}\right) + 100\left(\frac{d_b}{l_e}\right) \quad (5.1b)$$

El factor **C** hace referencia al menor recubrimiento de la varilla GFRP o la mitad del espaciado de centro a centro de las varillas que se están desarrollando. Sorprendentemente, los estudios de Wambeke & Shield (2006) mostraron que la forma y la condición de confinamiento de las barras GFRP (que tienen un área entre corrugaciones pequeña) no afectaron de manera representativa los resultados, sin embargo, una varilla de acero (con área entre corrugaciones grande) podría incrementar la fuerza máxima de adherencia (ACI-440.1R, 2015).

Resolviendo las ecuaciones (5.1a) y (5.1b) se puede obtener el esfuerzo máximo permisible que puede alcanzar una varilla para una longitud de desarrollo y recubrimiento dado (5.1c). El modelo toma en consideración la falla tipo “pull-out” y “splitting” para longitudes embebidas **L_e** de por lo menos **19x d_b** y un recubrimiento normalizado **C/d_b** máximo de 3.5 para poder aplicar la ecuación (5.1c) para ambos tipos de falla (ACI-440.1R, 2015).

$$f_{fe} = \frac{0.083\sqrt{f'_c}}{\alpha} \left(\frac{13.6l_e}{d_b} + \frac{C l_e}{d_b d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (5.1c)$$

Para aquellos casos donde **L_e > 19x d_b** y **C/d_b > 3.5**, se esperará una falla tipo “pull-out”; además, al momento de aplicar la ecuación (5.1c) para propósitos de diseño, se puede asumir que el esfuerzo permisible **f_{fe}** varía linealmente de 0 a lo obtenido por la ecuación, hasta un punto donde la longitud **L_e** sea **20x d_b**. Posterior a este punto, la ecuación se emplea para determinar el esfuerzo permisible a lo largo de la varilla (ACI-440.1R, 2015).

Es necesaria una revisión para determinar si con la longitud de desarrollo existente se puede generar la capacidad a momento requerida. Caso contrario, se tendrá que incrementar dicha longitud de desarrollo o aumentar el número de varillas de modo que el esfuerzo requerido en cada barra es reducido (Nanni, De Luca & Zadeh, 2014).

5.1.1 Factor por la ubicación de la varilla

Por defecto, el factor para considerar la ubicación de la varilla “ α ” se puede asumir de 1.0. Por otro lado, para el refuerzo principal superior (aquel que tiene más de 300 mm de hormigón por debajo) se debería considerar un valor de 1.5, principalmente debido a la migración hacia arriba de agua, aire y partículas finas al momento de la fundición (ACI-440.1R, 2015).

5.1.2 Resistencia a Flexión en zonas críticas de adherencia

Las zonas críticas de adherencia son aquellas donde el esfuerzo máximo admisible en la varilla f_{fe} está limitado por la ecuación (5.1c). Para estos casos, el diseño a flexión debe ser revisado en función del estado límite por aplastamiento, siendo aplicable cuando el esfuerzo admisible en la varilla es mayor o igual al obtenido por compatibilidad de deformaciones f_r , de no ser así, se obtendría una falla por adherencia (sea una sección controlada por compresión o tensión) y se utilizaría el esfuerzo admisible f_{fe} como un estado último de resistencia de la varilla, con un factor de reducción recomendado de 0.55 (ACI-440.1R, 2015).

5.2 Longitud de Desarrollo para Ganchos

En base a los estudios realizados por Ehsani et. Al (1996) se puede aplicar la expresión (5.2a) para varillas GFRP dobladas a 90 grados, siendo K_4 un factor en función de la resistencia última de la varilla GFRP. Además, cuando el recubrimiento lateral y el adicional después del gancho es mayor de 64mm y 50mm respectivamente, se puede aplicar otro factor de 0.7, similar a los factores empleados en el ACI-318-2019 para los ganchos de acero corrugado. En la ecuación (5.2b) se muestra lo mencionado anteriormente.

$$l_{bhf} = \frac{K_4 d_b}{\sqrt{f'c}} \quad (5.2a)$$

$$l_{bhf} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{165d_b}{\sqrt{f'c}} \text{ para } f_{fu} \leq 520 \text{ MPa} \\ \frac{f_{fu}d_b}{3.1\sqrt{f'c}} \text{ para } 520 < f_{fu} < 1040 \text{ MPa} \\ \frac{330d_b}{\sqrt{f'c}} \text{ para } f_{fu} \geq 1040 \text{ MPa} \end{array} \right\} \quad (5.2b)$$

El valor obtenido con la ecuación (5.2b) no puede ser menor a 230 mm o **12d_b**, este último límite también es la longitud máxima de un gancho a 90 grados. Longitudes del gancho por encima de este límite no tuvieron una influencia significativa en la tracción última y el deslizamiento. Para poder garantizar que la varilla no falle por corte, se recomienda un radio de dobléz de mínimo **3d_b**. (ACI-440.1R, 2015).

5.3 Longitud de Desarrollo para refuerzo de Momento Positivo

El refuerzo GFRP para elementos a flexión debería seguir los requerimientos del ACI-318-2019, con la diferencia de que el esfuerzo requerido **f_{fr}** de cada barra debe ser considerado el menor entre: el esfuerzo último **f_{tu}**, el calculado por compatibilidad **f_r** y el obtenido por la ecuación (5.1c) **f_{fe}**. La ecuación (5.3a) muestra la relación entre la longitud **L_d** y el esfuerzo requerido en la varilla **f_{fr}**.

$$l_d = \frac{\frac{\alpha f_{fr}}{0.0083\sqrt{f'c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (5.3a)$$

Debido a los factores de reducción de resistencia empleados para el diseño con barras GFRP, la sección 9.7.3.8.3 del ACI-318-2019 para la terminación del refuerzo en los apoyos simples y en puntos de inflexión debe ser alterada a la ecuación (5.3b), donde se aplica **M_n** que es la resistencia

nominal a flexión (asumiendo que el refuerzo en la sección alcanza el esfuerzo requerido f_{fr}); la fuerza cortante factorada V_u y la longitud embebida L_a a partir del centro del apoyo o; el mayor entre el peralte efectivo d o $12d_b$ para el punto de inflexión. La ecuación (5.3b) puede incrementarse en un 30% (1.3 veces) cuando los extremos del refuerzo están confinados por una reacción a compresión, de la misma forma como lo estipula el ACI-318-19. (ACI-440.1R, 2015).

$$l_d \leq \frac{\phi M_n}{V_u} + l_a \quad (5.3b)$$

5.4 Traslapes para las zonas de tensión

Los traslapes para el acero corrugado se caracterizan en 2 grandes grupos (Clase A y B) en función de la fracción de varillas empalmadas y del esfuerzo en dichas varillas, sin embargo, el refuerzo GFRP no se clasifica de esta manera debido a que su comportamiento no exige que las varillas alcancen toda su capacidad a tracción, motivo por el cual emplear empalmes clase B ($1.3L_d$) en estas barras sería conservador (ACI-440.1R, 2015).

CAPÍTULO 6

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En este capítulo se utilizarán las ecuaciones para el diseño de elementos de hormigón reforzado con varillas GFRP, contemplado en estructuras típicas como vigas, losas y muros de contención, siendo estos por lo general aplicaciones viables para este material. Además, una vez explicado el proceso, se realizarán análogamente los cálculos con el refuerzo de acero corrugado y, con la implementación de herramientas como Excel y Python para elaborar hojas de cálculo para establecer ventajas y desventajas entre las alternativas.

6.1 Resistencia a Flexión de Sección Controlada por Compresión

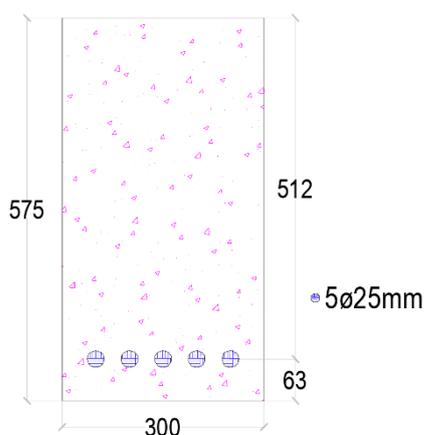


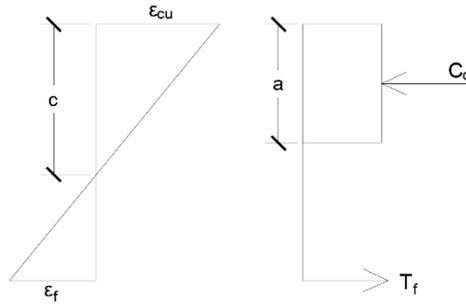
Figura 42: Resistencia de sección controlada por compresión.

Geometría: $h = 575 \text{ mm}$; $rec = 38\text{mm}$; $est\phi 13\text{mm}$; $d = 512 \text{ mm}$

Hormigón: $f'_c = 28 \text{ MPa}$

Detalles del refuerzo GFRP: $5\phi 25\text{mm}$; $f_{fu}^* = 550 \text{ MPa}$; $E_f = 41 \text{ GPa}$; $A_f = 510 \text{ mm}^2$

Exposición ambiental: $C_E = 0.8$



$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_f}{d - c}$$

$$\frac{0.003}{c} = \frac{\varepsilon_f}{512 - c}$$

$$\frac{(1.536 - 0.003c)}{c} = \varepsilon_f$$

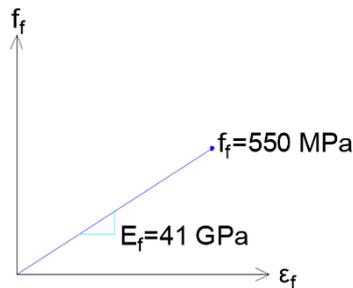
$$\frac{1.536}{c} - 0.003 = \varepsilon_f \quad [1]$$

Ecuaciones de Equilibrio:

$$C = T$$

$$0.85 * f'_c * a * b = A_f * f_f$$

(Se considera el comportamiento lineal de la varilla GFRP):



$$0.85 * 28 * c * 0.85 * 300 = 5 * 510 * E_f * \varepsilon_f$$

$$6069 * c = 5 * 510 * 41000 * \varepsilon_f$$

$$6069 * c = 104550000 * \varepsilon_f$$

$$c = 17226.89 * \varepsilon_f \quad [2]$$

Reemplazando ecuación [2] en [1]:

$$\frac{1.536}{17226.89 * \varepsilon_f} - 0.003 = \varepsilon_f$$

$$1.536 = (\varepsilon_f + 0.003) * 17226.89 * \varepsilon_f$$

$$0 = 17226.89 \varepsilon_f^2 + 51.68 \varepsilon_f - 1.536$$

Resolviendo la ecuación cuadrática:

$$\varepsilon_f = \mathbf{0.00806 \text{ mm/mm}}$$

$$f_f = \varepsilon_f * E_f = 0.00806 * 41000 = 330.46 \text{ MPa}$$

$$c = 138.85 \text{ mm}$$

Factor de Reducción de Resistencia:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{5 * 510}{300 * 512} = 0.0166$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$$

$$= 0.85 * 0.85 \frac{28}{550 * 0.8} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (550 * 0.8)}$$

$$\rho_{fb} = 0.010044 = 1.004\%$$

$$\rho_f \geq 1.4 \rho_{fb}$$

$$0.0166 \geq 1.4 * 0.01004$$

$$0.0166 \geq 0.014056 \therefore \text{Controlada por compresión; } \phi = 0.65$$

Resistencia Provista a flexión:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn = 0.65 * f_f * A_f * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\phi Mn = 0.65 * 330.46 * (5 * 510) * \left(512 - \frac{138.85 * 0.85}{2}\right)$$

$$= 248.12 \text{ kN} - \text{m}$$

Las varillas GFRP para la sección propuesta (controlada por compresión) alcanzan un esfuerzo relativamente bajo (330 MPa) pero una deformación importante (0.008), producida por el bajo módulo elástico del material. A continuación, se mostrarán los cálculos a realizar para la sección reforzada con acero corrugado.

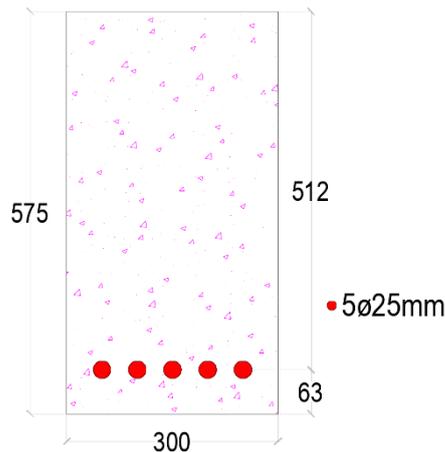


Figura 43: Resistencia de sección controlada por compresión (acero).

$$5\phi 25\text{mm}; f_y = 420 \text{ MPa}; E_s = 200 \text{ GPa}; A_s = 490.9 \text{ mm}^2$$

$$\frac{1.536}{c} - 0.003 = \varepsilon_f \quad [1]$$

Ecuaciones de Equilibrio:

$$C = T$$

$$0.85 * f'_c * a * b = A_s * f_s$$

$$0.85 * 28 * c * 0.85 * 300 = 5 * 490.9 * E_s * \varepsilon_s$$

$$6069 * c = 5 * 490.9 * 200000 * \varepsilon_s$$

$$c = 80886.47 * \varepsilon_s \quad [2]$$

Reemplazando ecuación [2] en [1]:

$$\frac{1.536}{80886.47 * \varepsilon_f} - 0.003 = \varepsilon_s$$

$$1.536 = (\varepsilon_s + 0.003) * 80886.47 * \varepsilon_s$$

$$0 = 80886.47 \varepsilon_s^2 + 242.66 \varepsilon_s - 1.536$$

Resolviendo la ecuación cuadrática:

$$\varepsilon_s = \mathbf{0.003108 \text{ mm/mm}}$$

$$f_s = \varepsilon_s * E_s = 0.003108 * 200000 = 621 \text{ MPa} > f_y$$

$$f_s = f_y = 420 \text{ MPa}$$

$$c = \mathbf{251.39 \text{ mm}}$$

Factor de Reducción de Resistencia:

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} = \frac{5 * 490.9}{300 * 512} = 0.0159$$

$$\rho_{sb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{420} * \frac{0.003}{0.003 + 0.0021}$$

$$\rho_{sb} = 0.02833$$

$$\rho_s < \rho_{sb}$$

$$\varepsilon_s = 0.003108 > 0.002 ; \text{zona de transición}$$

$$\phi = 0.65 + (0.003108 - 0.002) \left(\frac{250}{3} \right) = 0.742$$

Resistencia Provista a flexión:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn = 0.742 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\phi Mn = 0.742 * 420 * (2454.5) * \left(512 - \frac{251.39 * 0.85}{2} \right) = 309.91 \text{ kN} - \text{m}$$

En ambos casos se ha colocado la misma cuantía, P_{sf} , y se asume que se produce una falla por compresión (aplastamiento) del hormigón (0.003), a pesar de ello, la sección reforzada con acero alcanza la fluencia (f_y) y está dentro de la zona de transición por lo que se le permite un factor de seguridad menos conservador. Por otro lado, la sección reforzada con varillas GFRP arroja un momento resistente " ϕMn " y un eje neutro " c " menor debido al bajo nivel de esfuerzos que alcanza la varilla a una deformación elevada.

6.2 Diseño a Flexión de Viga Controlada por Compresión

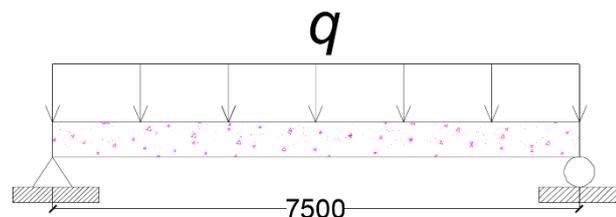


Figura 44: Esquema de viga simplemente apoyada para estudio.

$$q_D = 5.8 \text{ KN} - \text{m}$$

$$q_L = 4.4 \text{ KN} - m$$

Geometría: $b = 300 \text{ mm}$; $h = ?$

Hormigón: $f'_c = 28 \text{ MPa}$

Detalles del refuerzo GFRP: $f^*_{fu} = 550 \text{ MPa}$; $E_f = 41 \text{ GPa}$

Exposición ambiental: $C_E = 0.8$

$$f_{fu} = f^*_{fu} * C_E = 550 * 0.8 = 440 \text{ MPa}$$

Demanda:

$$M_D = 5.8 * \frac{7.5^2}{8} = 40.78 \text{ KN} - m$$

$$M_L = 4.4 * \frac{7.5^2}{8} = 30.94 \text{ KN} - m$$

$$M_u = 1.2(40.78) + 1.6(30.94) = 98.44 \text{ KN} - m$$

Sección Controlada por compresión:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{440} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (440)}$$

$$\rho_{fb} = 0.010044$$

$$\rho_f \geq 1.4 \rho_{fb}$$

$$\rho_f = 1.5 (0.010044) = \mathbf{0.01506} ; \phi = 0.65$$

Esfuerzo en las varillas GFRP (3.5.2d)

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu}$$

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(41000 * 0.003)^2}{4} + \frac{0.85 * 0.85 * 28}{0.01506} 41000 * 0.003 - 0.5 * 41000 * 0.003} \right) \leq 440$$

$$f_f = 349.61 \text{ MPa} \leq 440 \text{ MPa}$$

Peralte Requerido para la cuantía asumida (3.5.2e):

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 = 98.44 x 10^6$$

$$\phi Mn = 0.65 * 0.01506 * 349.61 \left(1 - 0.59 \frac{0.01506 * 349.61}{28} \right) 300 * d^2$$

$$\phi Mn = 912.79 * d^2 = 98.44 x 10^6$$

$$d_{req} = 328.39 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\rho_f = 0.01506 = \frac{A_f}{bd}$$

$$A_{f req} = 0.01506 * 300 * 328.39 = 1483.66 \text{ mm}^2$$

Se colocan 3φ25 mm

Comprobación:

Se asumen estribos de φ13mm y recubrimiento de 38 mm

$$h = 328 + 13 + \frac{25.4}{2} + 38 = 391.7$$

Se utiliza sección de 300x400 mm y d = 362mm

$$A_{f real} = 3 * 510 = 1530 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{f real} = \frac{A_f}{bd} = \frac{1530}{300 * 362} = 0.01408 \geq 1.4 \rho_{fb}; \phi = 0.65$$

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(123)^2}{4} + \frac{0.85 * 0.85 * 28}{0.01408} * 123} - 0.5 * 123 \right) = 363.36 \text{ MPa}$$

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) bd^2$$

$$\phi Mn = 0.65 * 0.01408 * 363.36 \left(1 - 0.59 \frac{0.01408 * 363.36}{28} \right) 300 * 362^2$$

$$\phi Mn = 116.64 \text{ kN} - m > Mu = 98.44 \text{ kN} - m; \text{OK!}$$

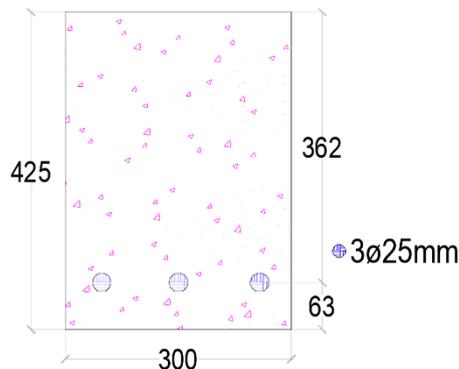


Figura 45: Diseño a flexión de sección controlada por compresión.

Los peraltes mínimos recomendados por el ACI-440.1R-2015 no son suficientes para cumplir de manera adecuada los criterios de servicio, por lo que este estado límite se revisará más adelante. Cabe recalcar que, para ser una sección controlada por compresión, la vas varillas GFRP alcanzan un esfuerzo elevado, que representa el 85% del esfuerzo último (**0.85x f_{tu}**). El diseño controlado por compresión con varillas de acero corrugado quedaría de la siguiente manera:

Demanda:

$$M_u = 1.2(40.78) + 1.6(30.94) = 98.44 \text{ KN} - m$$

Sección Controlada por compresión:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y = \mathbf{0.0021 \text{ mm/mm}}$$

$$c = \frac{3}{5}d = \frac{3}{5} * 362 = 217.2 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn = 0.65 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 98.44 \times 10^6$$

$$0.65 * 420 * A_{s,req} * \left(362 - \frac{217.2 * 0.85}{2}\right) = 98.44 \times 10^6$$

$$A_{s,req} = 1337.04 \text{ mm}^2$$

Se colocan **3 ϕ 25 mm**

Comprobación:

$$A_{s \text{ real}} = \frac{3\pi}{4} (25^2) = 1472.62 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{s \text{ real}} = \frac{Af}{bd} = \frac{1472.62}{300 * 362} = 0.01363$$

$$\phi Mn = 0.65 * 420 * 1472.62 * \left(362 - \frac{217.2 * 0.85}{2}\right) = 108.42 \text{ kN} - m$$

$$\phi Mn = \mathbf{108.42 \text{ kN} - m} > M_u = \mathbf{98.44 \text{ kN} - m}; \mathbf{OK!}$$

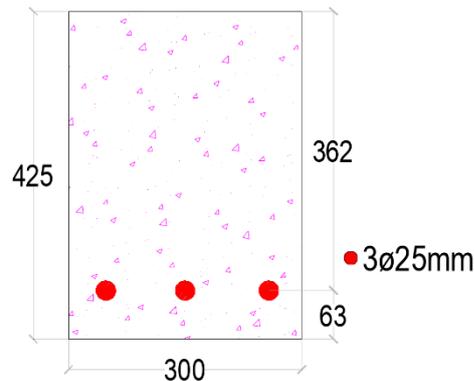


Figura 46: Diseño a flexión de sección controlada por compresión (acero).

Tanto para el diseño del refuerzo de acero corrugado y GFRP se obtuvieron las mismas cuantías (3 ϕ 25mm), sin embargo, hay que notar que para la falla por compresión se consideró que la varilla de acero está justo en su punto de fluencia, f_y , y solo alcanza su respectiva deformación unitaria de 0.002, mientras que la varilla GFRP brinda casi la misma resistencia, pero

requiere de una deformación de 0.0089, lo que podría llamar la atención durante la revisión por los criterios de servicio.

6.3 Diseño a Flexión de Viga Controlada por Tensión

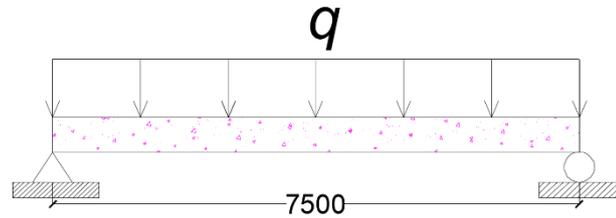


Figura 47: Esquema de viga simplemente apoyada para estudio.

$$q_D = 5.8 \text{ KN} - m$$

$$q_L = 4.4 \text{ KN} - m$$

Geometría: $h = 575 \text{ mm}$; $rec = 38 \text{ mm}$; estribo $\phi 13 \text{ mm}$; $d = 512 \text{ mm}$

Hormigón: $f'_c = 28 \text{ MPa}$

Detalles del refuerzo GFRP: $f^*_{fu} = 550 \text{ MPa}$; $E_f = 41 \text{ GPa}$

Exposición ambiental: $C_E = 0.8$

$$f_{fu} = f^*_{fu} * C_E = 550 * 0.8 = 440 \text{ MPa}$$

Demanda:

$$M_D = 5.8 * \frac{7.5^2}{8} = 40.78 \text{ KN} - m$$

$$M_L = 4.4 * \frac{7.5^2}{8} = 30.94 \text{ KN} - m$$

$$M_u = 1.2(40.78) + 1.6(30.94) = 98.44 \text{ KN} - m$$

Cuantía de Balance:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{440} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (440)}$$

$$\rho_{fb} = 0.010044$$

Esfuerzo en las varillas GFRP

$$f_f = f_{fu} = 440 \text{ MPa}$$

$$\frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_f}{d - c}$$

$$\frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{440/41000}{512 - c}$$

$$\frac{0.01073}{512 - c} * (c) = \varepsilon_c \quad [1]$$

Equilibrio:

$$C = T$$

$$f_c * \frac{c}{2} * b = A_f * f_f$$

$$E_c \varepsilon_c * \frac{c}{2} * 300 = A_f * 440$$

$$24870.06 * \varepsilon_c * \frac{c}{2} * 300 = A_f * 440$$

$$8478.43 * \varepsilon_c * c = A_f \quad [2]$$

Resistencia:

$$\phi Mn = 0.55 * f_f * A_f * \left(d - \frac{c}{3}\right)$$

$$98.44x10^6 = 0.55 * 440 * A_f * \left(512 - \frac{c}{3}\right)$$

$$\frac{98.44x10^6}{(123904 - 80.66 * c)} = A_f \quad [3]$$

Reemplazando [1] y [3] en [2]

$$8478.43 * \frac{0.01073}{512 - c} * c * c = \frac{98.44x10^6}{(123904 - 80.66 * c)}$$

$$\frac{90.97}{512 - c} * c^2 = \frac{98.44x10^6}{(123904 - 80.66 * c)}$$

$$11.27x10^6 c^2 - 7337.64c^3 = 5.04x10^{10} - 98.44x10^6 c$$

$$c = 1541.73 ; \mathbf{63.90} ; -69.72$$

$$c = \mathbf{63.90 \text{ mm}}$$

Se reemplaza "c" para hallar "Af"

$$\frac{98.44x10^6}{(123904 - 80.66 * c)} = A_f \quad [3]$$

$$A_f = \frac{98.44x10^6}{(123904 - 80.66 * 63.90)} = 828.97 \text{ mm}^2$$

Se colocan 2ø25 mm

Comprobación:

$$A_f = 2 * 510 = 1020 \text{ mm}^2$$

$$A_{f, \min} = \frac{2.3bd}{f_{fu}} = \frac{2.3 * 300 * 512}{440} = 802.1 \text{ mm}^2$$

$$A_f > A_{f, \min}; \text{OK!}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{2 * 510}{300 * 512} = 0.00664$$

$$\rho_f \leq 1.4 \rho_{fb}$$

$$0.00664 \leq 0.014 ; \text{controla tensión}$$

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2$$

$$\phi Mn = 0.55 * 0.00664 * 440 \left(1 - 0.59 \frac{0.00664 * 440}{28} \right) 300 * 512^2$$

$$\phi Mn = 118.59 \text{ kN} - m > Mu = 98.44 \text{ kN} - m ; \text{OK!}$$

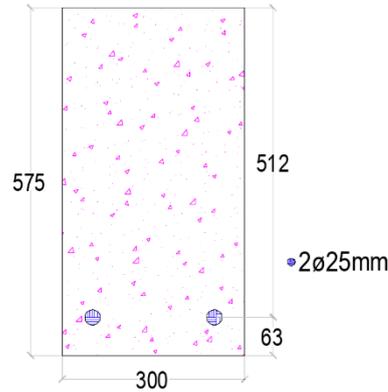


Figura 48: Diseño a flexión de sección controlada por tensión.

Para la misma sección, el diseño con acero corrugado sería el siguiente:

Demanda:

$$M_u = 1.2(40.78) + 1.6(30.94) = 98.44 \text{ KN} - m$$

Sección Controlada por compresión:

$$\varepsilon_s = 0.005 \text{ mm/mm}$$

$$c = \frac{3}{8} d = \frac{3}{8} * 512 = 192 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn = 0.9 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2} \right) = 98.44 \times 10^6$$

$$0.9 * 420 * A_{s,req} * \left(512 - \frac{192 * 0.85}{2} \right) = 98.44 \times 10^6$$

$$A_{s,req} = 605.07 \text{ mm}^2$$

Se colocan **2Ø20 mm**

Comprobación:

$$A_{s,real} = \frac{2\pi}{4} (20^2) = 628.32 \text{ mm}^2$$

$$A_{s\ min} = \frac{1.4bd}{f_y} = \frac{1.4 * 300 * 512}{420} = 512\text{mm}^2$$

$$\rho_{s\ real} = \frac{A_s}{bd} = \frac{628.32}{300 * 512} = 0.004091$$

$$\phi Mn = 0.9 * 420 * 628.32 * \left(512 - \frac{192 * 0.85}{2}\right) = 102.22\ \text{kN} - \text{m}$$

$$\phi Mn = \mathbf{102.22\ \text{kN} - \text{m}} > Mu = \mathbf{98.44\ \text{kN} - \text{m}} ; \mathbf{OK!}$$

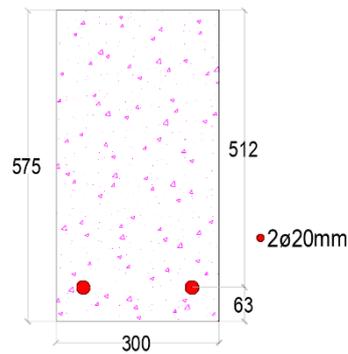


Figura 49: Diseño a flexión de sección controlada por tensión (acero).

Al igual que en el diseño controlado por compresión, la cuantía de acero y de refuerzo GFRP es similar, sin embargo, con los resultados obtenidos se puede concluir que la sección con acero de refuerzo es más eficiente desde el punto de vista de resistencia. Además, se esperan deformaciones elevadas en las varillas GFRP, dado que estas alcanzan una deformación de 0.01 (mm/mm), siendo el doble de la deformación de las varillas de acero corrugado (0.005 mm/mm).

6.4 Diseño a Corte de Viga Simplemente Apoyada

$$q_D = 5.8\ \text{KN} - \text{m}$$

$$q_L = 4.4\ \text{KN} - \text{m}$$

Geometría: $h = 575\ \text{mm}$; $rec = 38\text{mm}$; $est\phi 13\text{mm}$; $d = 512\ \text{mm}$

Hormigón: $f'_c = 28\ \text{MPa}$

Detalles del refuerzo GFRP: $f^*_{fu} = 760\ \text{MPa}$; $E_f = 41\ \text{GPa}$

Exposición ambiental: $C_E = 0.8$

$$f_{fu} = f^*_{fu} * C_E = 760 * 0.8 = 608\ \text{MPa}$$

Demanda:

$$q_u = 1.2(5.8) + 1.6(4.4) = 14 \text{ KN/m}$$

$$V_u = 14 * 7.5/2 = 52.5 \text{ kN}$$

A una distancia "d" del apoyo:

$$V_{u,d} = 52.5 * \frac{\left(\frac{7.5}{2} - 0.512\right)}{\frac{7.5}{2}} = 45.33 \text{ kN}$$

Diseño a Flexión:

$$\rho_f = \frac{Af}{bd} = \frac{2 * 510}{300 * 512} = 0.00664$$

$$E_c = 4700\sqrt{28} = 24870.06 \text{ MPa}$$

$$n_f = \frac{41000}{24870.06} = 1.65$$

$$\rho_f * n_f = 0.011$$

$$k = \sqrt{2\rho_f\eta_f + (\rho_f\eta_f)^2} - \rho_f\eta_f \quad (3.6.4b)$$

$$k = \sqrt{2(0.011) + (0.011)^2} - 0.011 = 0.137$$

Resistencia del hormigón (Vc):

$$V_c = \frac{2}{5}k\sqrt{f'c} bd$$

$$V_c = \frac{2}{5} * 0.138 * \sqrt{28} * 300 * \frac{512}{1000} = 44.68 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 33.51 \text{ kN}$$

$$V_u > \frac{\phi V_c}{2}; \text{ Requiere Refuerzo}$$

Resistencia Requerida por Refuerzo Transversal (Vf):

$$\phi V_f = V_{u,d} - \phi V_c$$

$$\phi V_f = 45.33 - 33.51 = 11.82 \text{ kN}$$

Cortante en el alma (Vcw):

$$V_c = 0.66\sqrt{f'c} bd$$

$$V_{cw} = 0.66\sqrt{28} * 300 * \frac{512}{1000} = 536.43 \text{ kN}$$

$$\phi V_{cw} = 402.32 \text{ kN}$$

$$\phi V_f < \phi V_{cw}; \text{ Cortante por tensión, OK!}$$

Resistencia de la varilla GFRP (ffv):

$$\frac{r_b}{d_b} = \frac{30}{10} = 3$$

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3\right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (3.4.3a)$$

$$f_{fb} = (0.05(3) + 0.3) * 608 = 273.6 \text{ MPa}$$

$$f_{fv} = 0.004 * E_f = 0.004 * 41000 = \mathbf{164 \text{ MPa}}$$

$$f_{fv} < f_{fb}; \text{ OK!}$$

Refuerzo Transversal requerido GFRP:

$$\frac{A_{fvreq}}{S_{req}} = \frac{\phi V_f}{\phi f_{fv} d}$$

$$\frac{A_{fvreq}}{S_{req}} = \frac{11.82 * 1000}{0.75 * 164 * 512} = 0.19 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Se colocan Estribos $\phi 10\text{mm}$ (2 ramas)

$$A_{fvreal} = 71\text{mm}^2 * (2) = 142 \text{ mm}^2$$

$$S_{req} = \frac{142}{0.19} = \mathbf{756.4 \text{ mm}}$$

Refuerzo Transversal Mínimo GFRP:

$$A_{fv, \text{ min}} = 0.35 \frac{b_w S}{f_{fv}} \quad (4.5a)$$

Se colocan Estribos $\phi 10\text{mm}$ (2 ramas)

$$S_{\text{ min}} = \frac{A_{fv} * f_{fv}}{0.35 * b} = \frac{142 * 164}{0.35 * 300} = 222 \text{ mm}$$

$$\mathbf{S_{\text{ min}} = 200 \text{ mm}}$$

Separación Máxima de Estribos GFRP:

$$\phi V_f = 11.82 \text{ kN}$$

$$V_f = 15.76 \text{ kN} < 0.33\sqrt{f'c} bd$$

$$V_f = 15.76 \text{ kN} < 0.33\sqrt{28} * 300 * \frac{512}{1000}$$

$$\mathbf{V_f = 15.76 \text{ kN} < 268.22; S_{\text{ max}} = d/2}$$

$$S_{\text{ max}} = \frac{512}{2} = 256 \text{ mm}$$

$$\mathbf{S_{\text{ max}} = 250 \text{ mm}}$$

Posición "x" donde no se requiere refuerzo transversal:

$$\frac{Vu}{\frac{L}{2}} = \frac{\phi Vc * 0.5}{\frac{L}{2} - x}$$

$$x = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{\phi Vc * 0.5}{Vu} \right)$$

$$x = \frac{7.5}{2} \left(1 - \frac{33.51 * 0.5}{52.5} \right) = 2553 \text{ mm}$$

Refuerzo a Compresión:

$$\rho_{f(t,s)} = 0.0018 \frac{414}{f_{fu}} * \frac{E_s}{E_f} = 0.0018 \frac{414}{520} * \frac{200000}{41000} = 6.99 \times 10^{-3}$$

$$0.0014 \leq [\rho_{f(t,s)} = 0.00699] \leq \mathbf{0.0036}$$

$$\rho_{f(t,s)} = \mathbf{0.0036}$$

$$A'_f(\text{min}) = 0.0036 * b * h = 0.0036 * 300 * 575 = 621 \text{ mm}^2$$

Se colocan 2φ22mm

$$[A'_{f \text{ real}} = 774 \text{ mm}^2] \geq A_{f \text{ req}} ; \text{OK!}$$

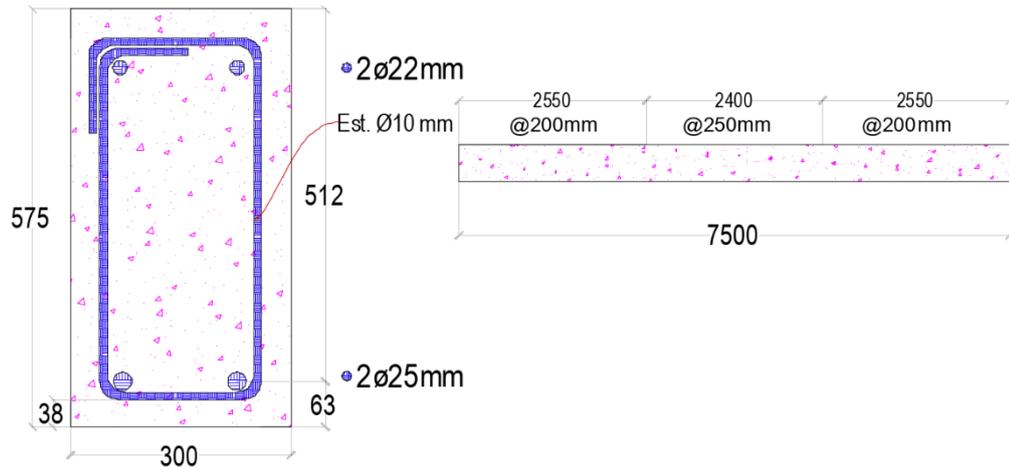


Figura 50: Diseño a corte de sección controlada por tensión.

Diseño a Flexión:

$$\rho_{s \text{ real}} = \frac{A_s}{bd} = \frac{628.32}{300 * 512} = 0.004091$$

Resistencia del hormigón (Vc):

$$V_c = 0.66 \rho_s^{1/3} \sqrt{f'_c} b d$$

$$V_c = 0.66 * 0.004091^{1/3} * \sqrt{28} * 300 * \frac{512}{1000} = 85.80 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 64.34 \text{ kN}$$

$$\frac{\phi V_c}{2} < V_u < \phi V_c; \text{ Refuerzo mínimo}$$

Refuerzo Transversal Mínimo GFRP:

$$A_{sv, \text{min}} = \left(0.35 \frac{b_w S}{f_y}; 0.062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_y} \right)$$

Se colocan Estribos φ8mm (2 ramas)

$$S_{\text{min}} = \frac{A_{sv} * f_y}{0.35 * b} = \frac{101 * 420}{0.35 * 300} = 402 \text{ mm}$$

Separación Máxima de Estribos:

$$V_s < 0.33\sqrt{f'c} bd$$
$$S_{max} = \frac{512}{2} = 256 \text{ mm}$$

Refuerzo a Compresión

$$\rho_{s \text{ real}} = \frac{A_s}{bd} = \frac{628.32}{300 * 512} = 0.004091$$
$$A's = 0.5 * 628 = 314 \text{ mm}^2$$

Se colocan 2 ϕ 16mm

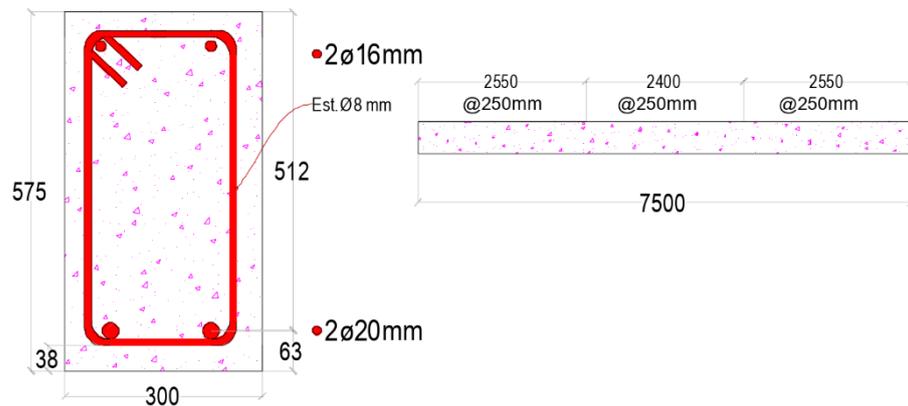


Figura 51: Diseño a corte de sección controlada por tensión (acero).

6.5 Deflexiones Inmediatas y a Largo Plazo (3 meses y 5 años)

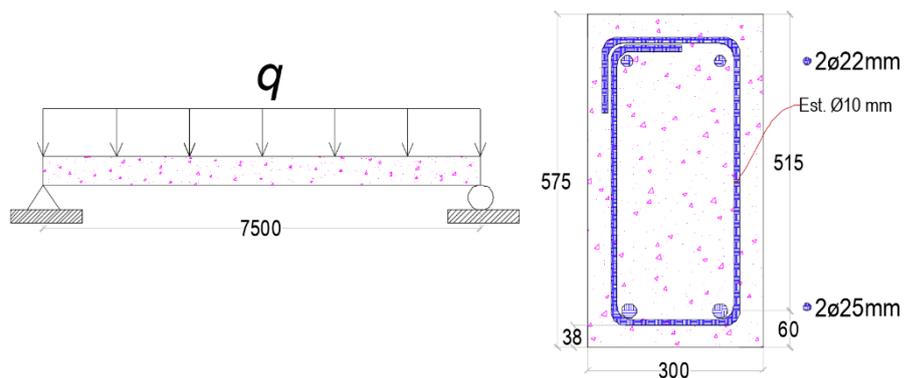


Figura 52: Sección para el cálculo de deflexiones (GFRP).

Geometría: $h = 575 \text{ mm}$; $rec = 38 \text{ mm}$; $est \phi 10 \text{ mm}$; $d = 515 \text{ mm}$

Hormigón: $f'c = 28 \text{ MPa}$

Detalles del refuerzo GFRP: $2\phi 25 \text{ mm}$; $f_{fu}^* = 550 \text{ MPa}$; $E_f = 41 \text{ GPa}$; $A_f = 510 \text{ mm}^2$

Exposición ambiental: $C_E = 0.8$

$$q_{SD} = 1.8 \text{ KN/m}$$

$$q_L = 4.4 \frac{\text{KN}}{\text{m}}; \text{ solo el 20\% es carga sostenida a largo plazo}$$

$$L = 7.5 \text{ m}$$

Demanda:

$$q_{pp} = 2400 * 10 * 0.3 * 0.575 = 4.14 \text{ kN/m}$$

$$q_D = q_{pp} + q_{SD} = 4.14 + 1.8 = 5.94 \text{ kN/m}$$

$$M_D = 5.94 * \frac{7.5^2}{8} = 41.77 \text{ kN} - \text{m}$$

$$M_L = 4.4 * \frac{7.5^2}{8} = 30.94 \text{ kN} - \text{m}$$

$$M_{SUS} = 41.77 + 0.2(30.94) = 47.95 \text{ kN} - \text{m}$$

Cálculo de Inercias:

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{300 * 575^3}{12} = 4.753x10^9 \text{ mm}^4$$

$$\eta_f = \frac{Ef}{Ec} = \frac{41000}{24870.06} = 1.65$$

$$\rho_f = \frac{Af}{bd} = \frac{510 * 2}{300 * 515} = 0.0066$$

$$\rho_f * \eta_f = 1.65 * 0.0066 = 0.0109$$

$$k = \sqrt{2\rho_f\eta_f + (\rho_f\eta_f)^2} - \rho_f\eta_f \quad (3.6.4b)$$

$$k = \sqrt{2 * 0.0109 + (0.0109)^2} - 0.0109 = 0.137$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + \eta_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (3.6.4a)$$

$$I_{cr} = \frac{300 * 515^3}{3} (0.137)^3 + (1.65)(1020)(515^2)(1 - 0.137)^2 \\ = 0.367x10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \leq I_g \quad (3.6.4c)$$

$$M_{cr} = 0.62 * \sqrt{f'_c} * \frac{I_g}{(y_t)} = 0.62 * \sqrt{28} * \frac{(4.753x10^9)}{287.5} = 54.23 \text{ kN} - \text{m}$$

$$M_a = M_{D+L} = 41.77 + 30.94 = 72.70 \text{ kN} - \text{m}$$

$$\gamma = 1.72 - 0.72 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right) = 1.72 - 0.72 \left(\frac{54.23}{72.70}\right) = 1.18$$

$$I_e = \frac{0.367x10^9}{1 - 1.22 \left(\frac{54.24}{72.70}\right)^2 \left(1 - \frac{0.367x10^9}{4.753x10^9}\right)} = 0.935x10^9 \text{ mm}^4$$

Deflexiones Inmediatas:

$$\Delta_{max} = \frac{5ML^2}{48EI}$$

$$\Delta_{i(D)} = \frac{5 * 41.77 * 10^6 * 7500^2}{48 * 24870.06 * 4.753 \times 10^9} = 2.070 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(D+L)} = \frac{5 * 72.70 * 10^6 * 7500^2}{48 * 24870.06 * 0.935 \times 10^9} = 18.31 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} = 18.31 - 2.070 = \mathbf{16.24 \text{ mm}}$$

Deflexiones a Largo Plazo:

$$\Delta_{i(SUS)} = \frac{5 * 47.95 * 10^6 * 7500^2}{48 * 24870.06 * 0.935 \times 10^9} = 12.08 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)(no \text{ sus})} = 18.31 - 12.08 = 6.23 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(3 \text{ meses})} = 0.6\xi(\Delta_{i(SUS)}) + \Delta_{i(L)(no \text{ sus})} = 0.6 * 1.0 * 12.08 + 6.23 = 13.48 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(5 \text{ años})} = 0.6\xi(\Delta_{i(SUS)}) + \Delta_{i(L)(no \text{ sus})} = 0.6 * 2.0 * 12.08 + 6.23 = \mathbf{20.73 \text{ mm}}$$

Chequesos: (de acuerdo a deflexiones permisibles del ACI-318-19)

Member	Condition	Deflection to be considered	Deflection limitation
Flat roofs	Not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to maximum of L , S , and R	$l/180^{[1]}$
Floors		Immediate deflection due to L	$l/360$
Roof or floors	Supporting or attached to nonstructural elements	Likely to be damaged by large deflections	$l/480^{[3]}$
		Not likely to be damaged by large deflections	$l/240^{[4]}$

Figura 53: Deflexiones Permisibles. (ACI-318-2019).

Cubiertas planas sin contacto con elementos no estructurales:

$$\Delta_{perm} = \frac{L}{180} = \frac{7500}{180} = 41.7 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} = 16.24 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} < \Delta_{perm} ; \mathbf{OK!}$$

Entrepisos sin contacto con elementos no estructurales:

$$\Delta_{perm} = \frac{L}{360} = \frac{7500}{360} = 20.83 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} = 16.24 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} < \Delta_{perm} ; \mathbf{OK!}$$

Cubierta con elementos no estructurales a carga sostenida:

$$[\Delta_i (5 \text{ años}) = 20.73 \text{ mm}] > [\Delta_{perm} = \frac{L}{480} = \frac{7500}{480} = 15.63 \text{ mm}] ; \text{NOT OK}$$

$$[\Delta_i (5 \text{ años}) = 20.73 \text{ mm}] < [\Delta_{perm} = \frac{L}{240} = \frac{7500}{240} = 31.25 \text{ mm}] ; \text{OK!}$$

Para la misma sección, utilizando las varillas de acero corrugado como refuerzo, el cálculo de las deflexiones es el siguiente:

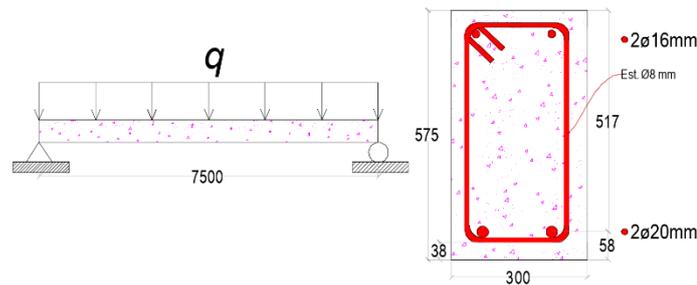


Figura 54: Sección para el cálculo de deflexiones. (acero).

Detalles del refuerzo: $2\phi 20\text{mm}$; $f_y = 420 \text{ MPa}$; $E_s = 200 \text{ GPa}$; $A_s = 628 \text{ mm}^2$

Cálculo de Inercias:

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{300 * 575^3}{12} = 4.753 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\eta = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{24870.06} = 8.042$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} = \frac{628}{300 * 517} = 0.00405$$

$$\rho_s * \eta = 8.042 * 0.00405 = 0.0326$$

$$k = \sqrt{2\rho_f\eta_f + (\rho_f\eta_f)^2} - \rho_f\eta_f \quad (3.6.4b)$$

$$k = \sqrt{2 * 0.0326 + (0.0326)^2} - 0.0326 = 0.225$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + nA_s d^2 (1 - k)^2 \quad (3.6.4a)$$

$$I_{cr} = \frac{300 * 517^3}{3} (0.225)^3 + (8.042)(628)(517^2)(1 - 0.225)^2$$

$$= 0.811 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$M_{cr} = 0.62 \sqrt{f'c} \frac{I_g}{(y_t)} = 0.62 * \sqrt{28} * \frac{(4.753 \times 10^9)}{287.5} = 54.23 \text{ KN} - m$$

$$M_a = M_{D+L} = 41.70 + 30.94 = 72.70 \text{ KN} - m$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (ACI.318.19; Ec. 24.2.3.5a)$$

$$I_e = \left(\frac{54.23}{72.70}\right)^3 (4.753 \times 10^9) + \left[1 - \left(\frac{54.23}{72.70}\right)^3\right] (0.811 \times 10^9) = 2.447 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

Deflexiones Inmediatas:

$$\Delta_{max} = \frac{5ML^2}{48EI}$$

$$\Delta_{i(D)} = \frac{5 * 41.70 * 10^6 * 7500^2}{48 * 24870.06 * 4.753 \times 10^9} = 2.070 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(D+L)} = \frac{5 * 72.70 * 10^6 * 7500^2}{48 * 24870.06 * 2.447 \times 10^9} = 7.00 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} = 7.00 - 2.070 = \mathbf{4.93 \text{ mm}}$$

Deflexiones a Largo Plazo:

$$\Delta_{i(SUS)} = \frac{5 * 47.95 * 10^6 * 7500^2}{48 * 24870.06 * 2.447 \times 10^9} = 4.62 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)(no \text{ sus})} = 7.00 - 4.62 = 2.38 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(3 \text{ meses})} = \frac{\xi}{1 + 50\rho'_s} (\Delta_{i(SUS)} + \Delta_{i(L)(no \text{ sus})}) = \frac{1.0 * 4.62}{1 + 50(0.00262)} + 2.38 = 6.46 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(5 \text{ años})} = \frac{\xi}{1 + 50\rho'_s} (\Delta_{i(SUS)} + \Delta_{i(L)(no \text{ sus})}) = \frac{2.0 * 4.62}{1 + 50(0.00262)} + 2.38 = \mathbf{10.54 \text{ mm}}$$

Cheques: (de acuerdo a deflexiones permisibles del ACI-318-19)

Cubiertas planas sin contacto con elementos no estructurales:

$$\Delta_{perm} = \frac{L}{180} = \frac{7500}{180} = 41.7 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} = 4.93 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} < \Delta_{perm} ; \mathbf{OK!}$$

Entrepisos sin contacto con elementos no estructurales:

$$\Delta_{perm} = \frac{L}{360} = \frac{7500}{360} = 20.83 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} = 4.93 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i(L)} < \Delta_{perm} ; \mathbf{OK!}$$

Cubierta en contacto con elementos no estructurales a carga sostenida susceptible a daño y no susceptible a daño respectivamente:

$$[\Delta_{i(3 \text{ meses})} = 10.54 \text{ mm}] < \left[\Delta_{perm} = \frac{L}{480} = \frac{7500}{480} = 15.63 \text{ mm} \right] ; \mathbf{OK!}$$

$$[\Delta_i (5 \text{ años}) = 10.54 \text{ mm}] < [\Delta_{perm} = \frac{L}{240} = \frac{7500}{240} = 31.25 \text{ mm}] ; \text{OK!}$$

Tabla 12: Comparación de resultados de deflexiones con refuerzo de acero corrugado y GFRP.

	GFRP	Acero
Inercia Gruesa (I_g), 10e9 mm⁴	4.753	4.753
Inercia Agrietada (I_{cr}), 10e9 mm⁴	0.367	0.811
Inercia Efectiva (I_e), 10e9 mm⁴	0.935	2.789
Deflexión Inmediata (Δ_i, L), mm	16.24	4.93
Deformación a Largo Plazo (Δ_i, sus), mm	20.73	10.54

Tabla 13: Revisión de deflexiones admisibles entre sección reforzada con acero y GFRP.

		Deflexiones Admisibles (mm)			
		L/180	L/360	L/480	L/240
GFRP					
Deflexión Inmediata (Δ _i , L), mm	16.24	41.7	20.83		
Deformación a Largo Plazo (Δ _i , sus), mm	20.73			15.63	31.25
Acero Corrugado					
Deflexión Inmediata (Δ _i , L), mm	4.93	41.7	20.83		
Deformación a Largo Plazo (Δ _i , sus), mm	10.54			15.63	31.25

Observando los casos mostrados anteriormente, se podría decir que la sección mostrada sería adecuada para soportar la demanda tanto con el refuerzo de GFRP y el de acero corrugado; en otras palabras, el criterio por resistencia se satisface. Sin embargo, este ejemplo muestra que las varillas GFRP disminuyen el valor de la inercia efectiva y esto conlleva a la obtención de deflexiones mucho más elevadas (de 2 a 3 veces más) tal como se muestra en la Tabla 12 y por consiguiente el criterio de servicio no se cumple, de modo que se tendrá que aumentar el tamaño de la sección, **d**, o colocar mayor cantidad de refuerzo, **A_f**, para corregir lo antes mencionado.

6.6 Diseño a Flexión de Losa Maciza Controlada por Compresión

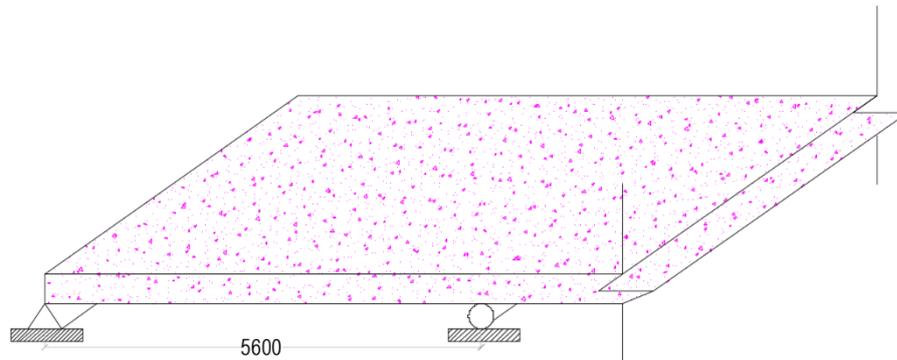


Figura 55: Esquema de Losa maciza para diseño a flexión.

$$W_D = ?$$

$$W_L = 2.4 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Hormigón: } f'_c = 28 \text{ MPa}$$

$$\text{Detalles del refuerzo GFRP: } f^*_{fu} = 650 \text{ MPa}; E_f = 41 \text{ GPa}$$

$$\text{Exposición ambiental: } C_E = 0.8$$

$$f_{fu} = f^*_{fu} * C_E = 650 * 0.8 = 520 \text{ MPa}$$

Demanda:

$$W_D = 2400 * 10 * 0.35 = 8.4 \text{ kN/m}^2$$

$$W_u = 1.2(8.4) + 1.6(2.4) = 13.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_u = 13.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$+M_u = 13.92 * \frac{5.5^2}{14} = 30.07 \text{ KN} - \text{m}$$

$$-M_u = 13.92 * \frac{5.5^2}{10} = 42.11 \text{ KN} - \text{m}$$

Sección Controlada por compresión:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{520} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (520)}$$

$$\rho_{fb} = 0.00744$$

$$\rho_f \geq 1.4 \rho_{fb}$$

$$\rho_f = 1.5 (0.00744) = \mathbf{0.0111} ; \phi = 0.65$$

Esfuerzo en las varillas GFRP (3.5.2d)

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu}$$

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(41000 * 0.003)^2}{4} + \frac{0.85 * 0.85 * 28}{0.0111} 41000 * 0.003 - 0.5 * 41000 * 0.003} \right) \leq 440$$

$$f_f = 415.94 \text{ MPa} \leq 520 \text{ MPa}$$

Peralte Requerido para la cuantía asumida (3.5.2e):

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 = 42.11 \times 10^6$$

$$\phi Mn = 0.65 * 0.0111 * 415.94 \left(1 - 0.59 \frac{0.0111 * 415.94}{28} \right) 1000 * d^2$$

$$\phi Mn = 2709.05 * d^2 = 42.11 \times 10^6$$

$$d_{req} = 124.68 \text{ mm}$$

Peralte mínimo por Servicio (Tabla # 8):

$$h_{min} = l/17 \text{ (viga simplemente apoyada, un extremo continuo)}$$

$$h_{min} = \frac{5.8}{17} = 341 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\rho_f = 0.0111 = \frac{Af}{bd}$$

$$A_{f req} = 0.0111 * 1000 * 125 = 1395 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 13 \text{ mm c}/90 \text{ mm}$

Revisión por contracción y temperatura:

$$\rho_{f(t,s)} = 0.0018 \frac{414}{f_{fu}} * \frac{E_s}{E_f} = 0.0018 \frac{414}{520} * \frac{200000}{41000} = 6.99 \times 10^{-3}$$

$$0.0014 \leq [\rho_{f(t,s)} = 0.00699] \leq \mathbf{0.0036}$$

$$\rho_{f(t,s)} = \mathbf{0.0036}$$

$$Af(\text{min}) = 0.0036 * b * h = 0.0036 * 1000 * 145 = 522 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 10 \text{ mm c}/100 \text{ mm}$

Comprobación:

$$A_{f \text{ real}} = 11 * 129 = 1419 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{f \text{ real}} = \frac{Af}{bd} = \frac{1419}{1000 * 125} = 0.0113 \geq [1.4 \rho_{fb} = 0.0098]$$

$$\phi = 0.65$$

Controla el Aplastamiento del Hormigón

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(123)^2}{4} + \frac{0.85 * 0.85 * 28}{0.0113} 123 - 0.5 * 123} \right) = 411.77 \text{ MPa}$$

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2$$

$$\phi Mn = 0.65 * 0.0113 * 411.77 \left(1 - 0.59 \frac{0.0113 * 411.77}{28} \right) 1000 * 125^2$$

$$\phi Mn = 42.62 \text{ kN} - \text{m} > Mu = 42.11 \text{ kN} - \text{m}; \text{ OK!}$$

La sección cumple satisfactoriamente el criterio de resistencia, ahora se hará la revisión de las deflexiones (estado límite de servicio), para ello se emplea una hoja electrónica formulada en Excel, siguiendo los procedimientos del inciso 6.5.

ESTIMACIÓN DE DEFLEXIONES		
b = 1000 mm	qpp = 3.48 kN/m	M (D) = 13.64 kN-m
h = 145 mm	qSD = 0 kN/m	M (L) = 9.41 kN-m
rec. = 20 mm	q (D) = 3.48 kN/m	M (sus) = 15.52 kN-m
d = 125 mm	q (L) = 2.40 kN/m	
f'c = 28 Mpa	q (L)sus = 0.48 kN/m	
ffu = 520 Mpa	L = 5.6 m	
Ef = 41000 Mpa	Af = 1419 mm ²	
Ec = 24870.06 Mpa		
Ig = 0.254 x10 ⁹ mm ⁴	Deflexiones Inmediatas	
nf = 1.649	▣ i(D) = 7.053 mm	
pf = 0.01135	▣ i(D+L) = 74.63 mm	
pf*nf = 0.0187	▣ i(L) = 67.58 mm	
k = 0.176	Deflexiones a Largo Plazo	
Icr = 0.028 x10 ⁹ mm ⁴	▣ i(sus) = 50.26 mm	
Mcr = 11.50 kN-m	▣ i(L)no sus = 24.37 mm	
Ma = 23.05 kN-m	▣ i(3 m) = 54.53 mm	
factor I = 1.36	▣ i(5 a) = 84.68 mm	
Ie = 0.041 x10 ⁹ mm ⁴		
		▣ perm 1 = 31.11 mm NO CUMPLE
		▣ perm 2 = 15.56 mm NO CUMPLE
		▣ perm 3 = 11.67 mm NO CUMPLE
		▣ perm 3 = 23.33 mm NO CUMPLE

Figura 56: Hoja electrónica en Excel para el cálculo de deflexiones.

Los resultados muestran que la losa no cumple con las deflexiones permisibles, lo que es entendible ya que el peralte mínimo de la Tabla 10 indica un valor mucho mayor al obtenido con las ecuaciones de equilibrio d_{req} , por ende, se debe aumentar el peralte con la consideración de que la losa tendrá una cuantía de refuerzo GFRP más pequeña y su mecanismo de falla se altera a una sección controlada por tensión. En este ejemplo se puede

observar como un diseño con varillas GFRP controlado por deflexiones puede volver el diseño costoso.

ESTIMACIÓN DE DEFLEXIONES		
b = 1000 mm	qpp = 5.76 kN/m	M (D) = 22.58 kN-m
h = 240 mm	qSD = 0 kN/m	M (L) = 9.41 kN-m
rec. = 40 mm	q (D) = 5.76 kN/m	M (sus) = 24.46 kN-m
d = 200 mm	q (L) = 2.40 kN/m	
f'c = 28 Mpa	q (L)sus = 0.48 kN/m	
ffu = 550 Mpa	L = 5.6 m	
Ef = 41000 Mpa	Af = 1419 mm ²	
Ec = 24870.06 Mpa		
Ig = 1.152 x10 ⁹ mm ⁴	Deflexiones Inmediatas	
nf = 1.649	▣ i(D) = 2.574 mm	
pf = 0.00710	▣ i(D+L) = 4.66 mm	
pf*nf = 0.0117	▣ i(L) = 2.09 mm	▣ perm 1 = 31.11 mm OK
k = 0.142	Deflexiones a Largo Plazo	▣ perm 2 = 15.56 mm OK
Icr = 0.077 x10 ⁹ mm ⁴	▣ i(sus) = 3.56 mm	
Mcr = 31.50 kN-m	▣ i(L)no sus = 1.10 mm	
Ma = 31.99 kN-m	▣ i(3 m) = 3.24 mm	
factor I = 1.01	▣ i(5 a) = 5.37 mm	▣ perm 3 = 11.67 mm OK
Ie = 0.901 x10 ⁹ mm ⁴		▣ perm 3 = 23.33 mm OK

Figura 57: Hoja electrónica en Excel para el cálculo de deflexiones.

Revisión por contracción y temperatura:

$$\rho_{f(t,s)} = 0.0018 \frac{414}{f_{fu}} * \frac{E_s}{E_f} = 0.0018 \frac{414}{520} * \frac{200000}{41000} = 6.99 \times 10^{-3}$$

$$0.0014 \leq [\rho_{f(t,s)} = 0.00699] \leq 0.0036$$

$$\rho_{f(t,s)} = 0.0036$$

$$A_f(\min) = 0.0036 * b * h = 0.0036 * 1000 * 240 = 864 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 13 \text{ mm c/90mm}$

Refuerzo Requerido:

Uso $h = 240 \text{ mm}$; $rec = 40 \text{ mm}$; $d = 200 \text{ mm}$

Se colocan $\phi 13 \text{ mm c/90mm}$

$$A_{f \text{ real}} = 11 * 129 = 1419 \text{ mm}^2$$

$$A_{f \text{ min}} = 2.3 * 1000 * \frac{200}{550} = 848.91 \text{ mm}^2$$

$$A_{f \text{ real}} > A_{f \text{ min}}; \text{OK!}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{1419}{1000 * 205} = 0.00692 < [\rho_{fb} = 0.00744]$$

$$\phi = 0.55$$

Controla ruptura de GFRP

Comprobación:

$$f_f = 550 \text{ MPa}$$

$$\phi Mn = 0.55 * 0.00692 * 550 \left(1 - 0.59 \frac{0.00692 * 550}{28} \right) 1000 * 200^2$$

$$\phi Mn = 79.34 \text{ kN} - m > Mu = 42.11 \text{ kN} - m ; \text{ OK!}$$

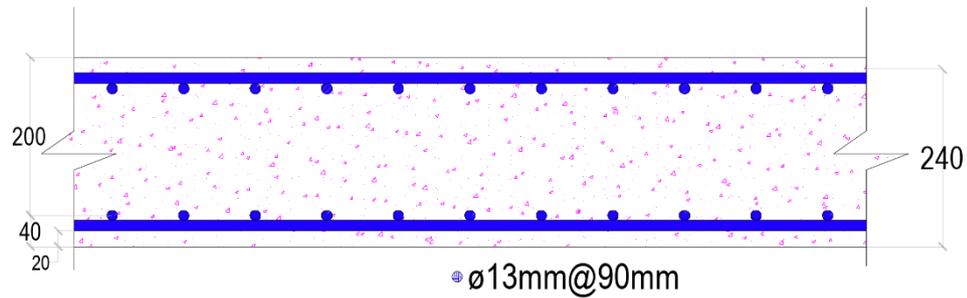


Figura 58: Diseño a flexión de losa maciza (GFRP).

Demanda:

$$-M_u = 13.92 * \frac{5.6^2}{10} = 42.11 \text{ KN} - m$$

Sección Controlada por tensión:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y = \mathbf{0.005 \text{ mm/mm}}$$

$$c = \frac{3}{8}d = \frac{3}{8} * 200 = 75 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn = 0.9 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 42.11 \times 10^6$$

$$0.9 * 420 * A_{s,req} * \left(200 - \frac{75 * 0.85}{2}\right) = 42.11 \times 10^6$$

$$A_{s,req} = 663 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 10 \text{ mm } c/100 \text{ mm}$

Comprobación:

$$A_{s \text{ real}} = \frac{10\pi}{4} (10^2) = 785 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \frac{1.4}{420} (1000 * 200) = 666 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ real}} > A_{s \text{ min}}; \text{ OK!}$$

$$\phi Mn = 0.9 * 420 * 785 * \left(200 - \frac{75 * 0.85}{2}\right) = 49.88 \text{ kN} - m$$

$$\phi Mn = 49.88 \text{ kN} - \text{m} > Mu = 42.11 \text{ kN} - \text{m}; \text{ OK!}$$

Revisión por contracción y temperatura:

$$A's = 0.0018 * b * h = 0.0018 * 1000 * 240 = 432 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 8 \text{ mm c}/100\text{mm}$

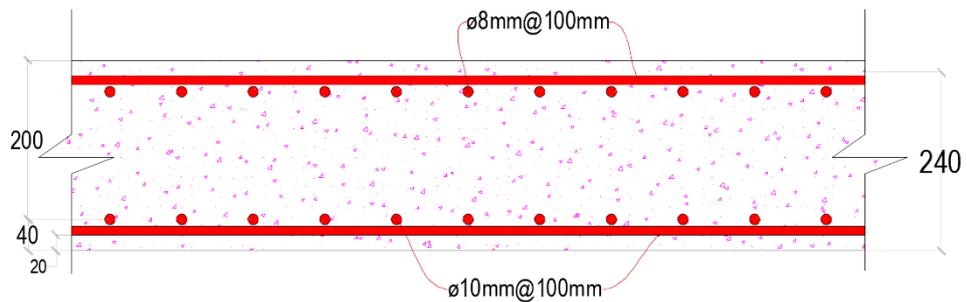


Figura 59: Diseño a flexión de losa maciza (acero).

6.7 Diseño a Flexión de Muro de Contención

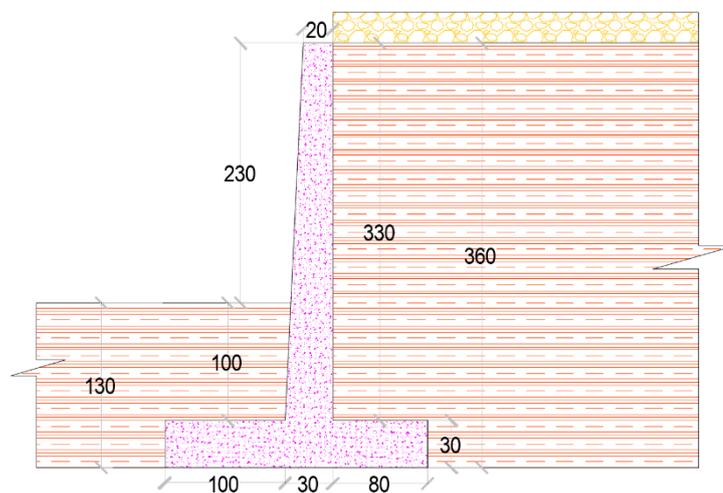


Figura 60: Esquema de Muro de contención.

$$\gamma_{\text{suelo}} = 16 \text{ kN/m}^3$$

$$S_c = 15 \text{ kN/m}^2$$

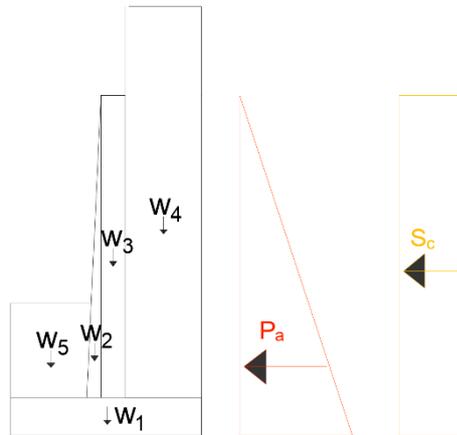
$$\text{Constante de Rankine: } K_a = 0.32$$

Geometría: unidades en cm

$$\text{Hormigón: } f'_c = 28 \text{ MPa}$$

$$\text{Detalles del refuerzo GFRP: } f^*_{fu} = 655 \text{ MPa}; E_f = 41 \text{ GPa}$$

Cálculo de Fuerzas Resistentes y Actuantes:



Fuerzas y Momentos Resistentes:

$$h_{relleno} = \frac{15}{16} = 0.94m$$

$$W_1 = b * h * \gamma_c = 2.1 * 0.3 * \frac{24kN}{m^3} = 15.12 kN/m$$

$$W_2 = 0.1 * 3.3 * 0.5 * \frac{24kN}{m^3} = 3.96 kN/m$$

$$W_3 = 0.2 * 3.3 * \frac{24kN}{m^3} = 15.84 kN/m$$

$$W_4 = 0.8 * (3.30 + 0.94) * \frac{16kN}{m^3} = 54.24 kN/m$$

$$W_5 = 1.00 * 1.00 * \frac{16kN}{m^3} = 16 kN/m$$

$$W_{total} = 105.16 kN/m$$

$$M_1 = 15.12 * 2.1 * 0.5 = 15.876 kN - m$$

$$M_2 = 3.98 * (1.0 + \frac{2}{3} * 0.1) = 4.224 kN - m$$

$$M_3 = 15.84 * (1.2) = 19.008 kN - m$$

$$M_4 = 54.24 * 1.7 = 92.208 kN - m$$

$$M_5 = 16 * 0.5 = 8 kN - m$$

$$\Sigma M_R = 139.32$$

Fuerzas y Momentos Actuantes:

$$F_1 = P_a = (\gamma_{suelo} * h * K_a) * \left(\frac{h_{muro}}{2}\right) = 16 * 3.60 * 0.32 * \frac{3.60}{2} = 33.17 kN/m$$

$$F_2 = S_c = (\gamma_{suelo} * h * K_a) * (h_{muro}) = 15 * 0.94 * 0.32 * 3.60 = 16.24 kN/m$$

$$\Sigma M_a = 33.17 \left(\frac{3.60}{3} \right) + 16.24 \left(\frac{3.60}{2} \right)$$

$$\Sigma M_a = 69.04 \text{ kN} - \text{m}$$

Factor de Seguridad por Volteo:

$$FS_{volteo} = \frac{\Sigma M_R}{\Sigma M_a} = \frac{139.32}{69.04} = 2.02$$

$$FS_{volteo} = 2.02 \geq 2 ; \text{OK!}$$

Fuerzas en el Muro y la Zapata:

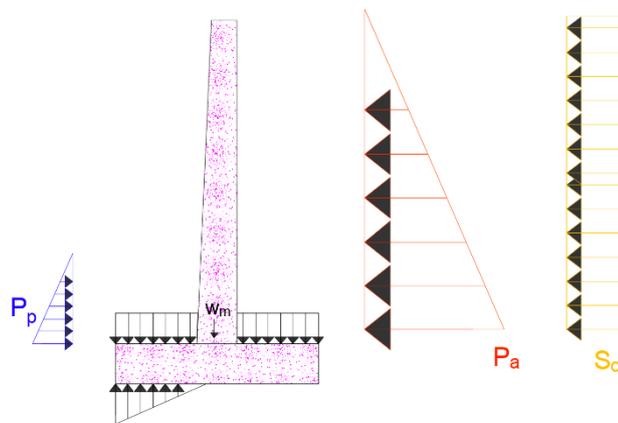


Figura 61: Fuerzas actuantes del muro y la zapata.

Diseño a Flexión del Muro:

Demanda del Muro

$$P_a = (\gamma_{suelo} * h * K_a) = 16 * 3.30 * 0.32 = 16.89 \text{ kN/m}^2$$

$$S_c = (\gamma_{suelo} * h * K_a) = 15 * 0.94 * 0.32 = 4.512 \text{ kN/m}^2$$

$$P_p = (\gamma_{suelo} * h * K_a) = 16 * 1.00 * 0.32 = 5.12 \text{ kN/m}^2$$

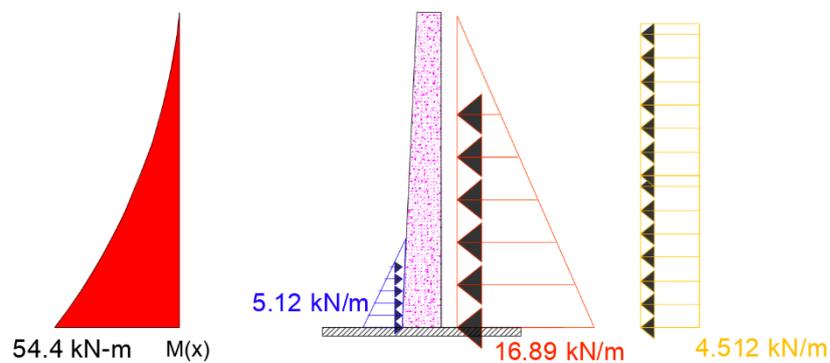


Figura 62: Diagrama de Momentos del muro.

$$M_u = (1.6) * 54.4 = 87.04 \text{ kN} - m$$

Quantía de Balance:

$$C_E = 0.7; f_{fu} = f_{fu}^* * C_E = 655 * 0.7 = 458 \text{ MPa}$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{458} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (458)}$$

$$\rho_{fb} = 0.00935$$

Esfuerzo en las varillas GFRP (3.5.2d)

$$f_f = f_{fu} = 458 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} = \frac{458}{41000} = 0.0112$$

$$c_b = \left(\frac{0.003}{0.003 + 0.0112} \right) 250 = 52.93 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\phi Mn = 87.04 \times 10^6 = 0.55 * A_{f_{req}} * 458 * \left(250 - \frac{0.85 * 52.93}{2} \right)$$

$$A_{f_{req}} = 1518.79 \text{ mm}^2; \phi 16 \text{ mm c/120mm}$$

Revisión por contracción y temperatura:

$$\rho_{f(t,s)} = 0.0018 \frac{414}{f_{fu}} * \frac{E_s}{E_f} = 0.0018 \frac{414}{458} * \frac{200000}{41000} = 7.936 \times 10^{-3}$$

$$0.0014 \leq [\rho_{f(t,s)} = 0.00794] \leq \mathbf{0.0036}$$

$$\rho_{f(t,s)} = \mathbf{0.0036}$$

$$A_{f_{st}} = 0.0036 * b * h = 0.0036 * 1000 * 300 = 1080 \text{ mm}^2$$

$$\phi 13 \text{ mm c/120mm}$$

$$A'_f = 8.33 * 130 = 1082.9 \text{ mm}^2; \mathbf{OK!}$$

Revisión por Refuerzo Mínimo:

$$A_{f_{min}} = \frac{2.3bd}{f_{fu}} = \frac{2.3 * 1000 * 250}{458} = 1255.46 \text{ mm}^2 < A_{f_{req}}; \mathbf{OK!}$$

Comprobación:

$$\rho_{f_{real}} = \frac{A_f}{bd} = \frac{8.33 * 199}{1000 * 250} = 0.00637 < [\rho_{fb} = 0.00935]$$

$$\phi = 0.55$$

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2$$

$$\phi Mn = 0.55 * 0.00637 * 458 \left(1 - 0.59 \frac{0.00637 * 458}{28} \right) 1000 * 250^2$$

$$\phi Mn = \mathbf{94.12 \text{ kN} - m} > Mu = \mathbf{87.04 \text{ kN} - m}; \mathbf{OK!}$$

Diseño a Flexión de la Zapata:

Demanda de la Zapata:

$$M_{volteo} = \Sigma M_R - \Sigma M_a = 139.32 - 69.04 = 70.28 \text{ kN} - m$$

$$M_{volteo} = 70.28 \text{ kN} - m = W * e$$

$$e = \frac{70.28}{105.16} = 0.668 \text{ m} = 66.83 \text{ cm}$$

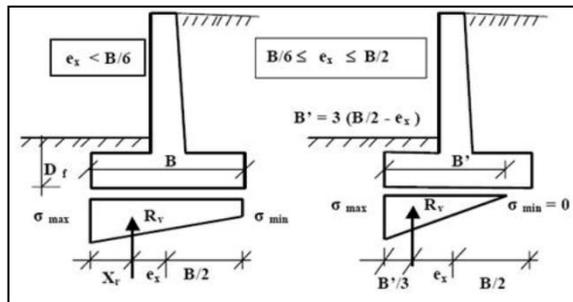


Figura 63: Reacción vertical del muro en la zapata en función de la excentricidad. (Torres, 2006).

$$B/6 \leq (e = 66.83 \text{ cm}) \leq B/2$$

$$B' = 3 \left(\frac{B}{2} - e \right) = 3 \left(\frac{2.1}{2} - 0.668 \right) = 1.146 \text{ m}$$

$$\sigma_{max} = \frac{2 * R_v}{3 \left(\frac{2.1}{2} - e \right)} = \frac{2 * 105.16}{3(1.05 - 0.668)} = 183.53 \text{ kN/m}$$

$$q_a = 16 * (3.30 + 0.94) = 67.84 \text{ kN} - m$$

$$q_p = 16 * (1.00) = 16 \text{ kN} - m$$

$$W_m = 15.84 + 3.96 = 19.8 \text{ kN} - m$$

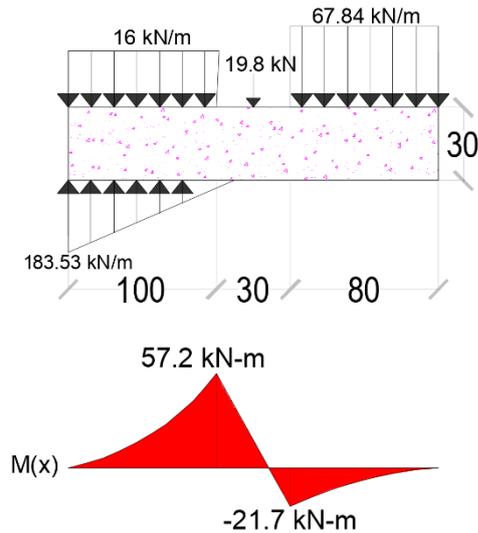


Figura 64: Diagrama de momentos de la zapata.

$$M_{u+} = 1.6 * 57.20 = 91.52 \text{ kN} - \text{m}$$

$$M_{u-} = 1.6 * 21.7 = 34.72 \text{ kN} - \text{m}$$

Cuantía de Balance:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{458} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (458)}$$

$$\rho_{fb} = 0.00935$$

Esfuerzo en las varillas GFRP (3.5.2d)

$$f_f = f_{fu} = 458 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} = \frac{458}{41000} = 0.0112$$

$$c_b = \left(\frac{0.003}{0.003 + 0.0112} \right) 250 = 52.93 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\phi Mn(+) = 91.52 \times 10^6 = 0.55 * A_{f_{req}} * 458 * \left(250 - \frac{0.85 * 52.93}{2} \right)$$

$$A_{f_{req}}(+) = 1597 \text{ mm}^2; \phi 16 \text{ mm } c/120 \text{ mm}$$

$$\phi Mn(-) = 34.72 \times 10^6 = 0.55 * A_{f_{req}} * 458 * \left(250 - \frac{0.85 * 52.93}{2} \right)$$

$$A_{f_{req}}(-) = 605.84 \text{ mm}^2; \phi 16 \text{ mm } c/300 \text{ mm}$$

Revisión por contracción y temperatura:

$$\rho_{f(t,s)} = 0.0018 \frac{414}{f_{fu}} * \frac{E_s}{E_f} = 0.0018 \frac{414}{458} * \frac{200000}{41000} = 7.936 \times 10^{-3}$$

$$0.0014 \leq [\rho_{f(t,s)} = 0.00794] \leq \mathbf{0.0036}$$

$$\rho_{f(t,s)} = \mathbf{0.0036}$$

$$A_{f\ st} = 0.0036 * b * h = 0.0036 * 1000 * 300 = 1080 \text{ mm}^2$$

$$\mathbf{\phi 13 \text{ mm } c/120\text{mm}}$$

$$A'_f = 8.33 * 130 = 1082.9 \text{ mm}^2; \mathbf{OK!}$$

Revisión por Refuerzo Mínimo:

$$A_{f\ min} = \frac{2.3bd}{f_{fu}} = \frac{2.3 * 1000 * 250}{458} = 1255 \text{ mm}^2 > A_{f\ req(-)}$$

Para $Mu(-)$, se colocan $\mathbf{\phi 16 \text{ mm } c/120\text{mm}}$

Comprobación:

$$\rho_{f\ real} = \frac{A_f}{bd} = \frac{1658.33}{1000 * 250} = 0.00663 < [\rho_{fb} = 0.00935]$$

$$\phi = 0.55$$

$$\phi Mn = \phi \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) bd^2$$

$$\phi Mn = 0.55 * 0.00663 * 458 \left(1 - 0.59 \frac{0.00663 * 458}{28} \right) 1000 * 250^2$$

$$\phi Mn+ = \mathbf{97.70 \text{ kN} - m} > Mu = \mathbf{87.04 \text{ kN} - m}; \mathbf{OK!}$$

$$\phi Mn- = \mathbf{97.70 \text{ kN} - m} > Mu- = \mathbf{33.92 \text{ kN} - m}; \mathbf{OK!}$$

Longitud de Desarrollo de los Ganchos:

$$l_{bhf} = \max \left(\frac{165d_b}{\sqrt{f'_c}}; 12db; 230\text{mm} \right)$$

$$\mathbf{\phi 16 \text{ mm}: } l_{bhf} = \max \left(\frac{165(16)}{\sqrt{28}}; 12 * 16; 230\text{mm} \right) = 498$$

$$\mathbf{\phi 16 \text{ mm}: } l_{bhf} = 500 \text{ mm}$$

$$\mathbf{\phi 13 \text{ mm}: } l_{bhf} = \max \left(\frac{165(13)}{\sqrt{28}}; 12 * 13; 230\text{mm} \right) = 405.36$$

$$\mathbf{\phi 13 \text{ mm}: } l_{bhf} = 410 \text{ mm}$$

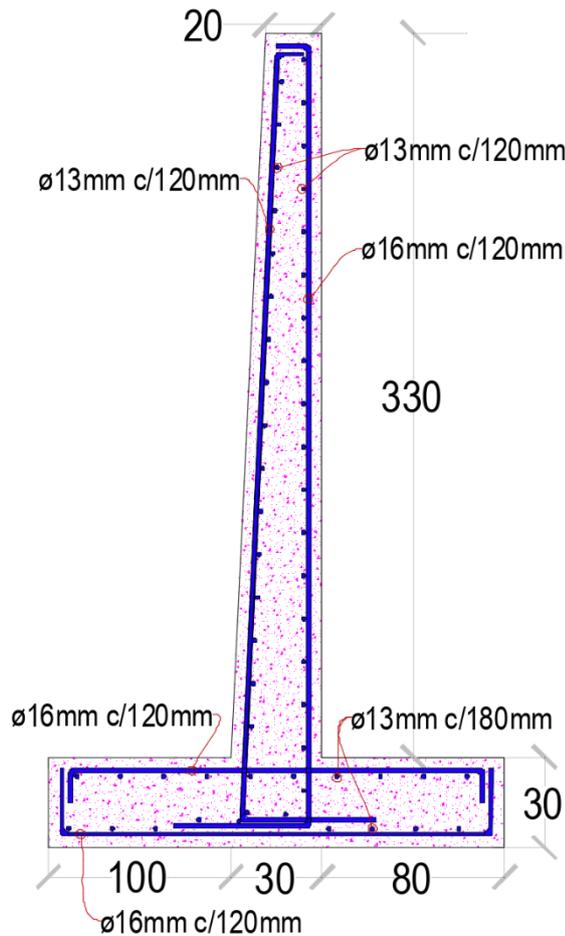


Figura 65: Diseño a flexión del muro de contención (GFRP).

El diseño con las varillas corrugadas de acero Gr. 60 ($f_y=420 \text{ MPa}$) es el siguiente:

Diseño a Flexión del Muro:

Demanda del Muro

$$M_u = (1.6) * 54.4 = 87.04 \text{ kN} - \text{m}$$

Sección Controlada por tensión:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y = \mathbf{0.005 \text{ mm/mm}}$$

$$c = \frac{3}{8}d = \frac{3}{8} * 250 = 93.75 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn = 0.9 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 87.04x10^6$$

$$0.9 * 420 * A_{s,req} * \left(250 - \frac{93.75 * 0.85}{2}\right) = 87.04x10^6$$

$$A_{s,req} = 1095.68 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 16 \text{ mm c}/180\text{mm}$

Revisión por contracción y temperatura:

$$A's = 0.0018 * b * h = 0.0018 * 1000 * 300 = 540 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 12 \text{ mm c}/180\text{mm}$

Revisión por Refuerzo Mínimo:

$$A_{s,min} = \frac{1.4bd}{f_y} = \frac{1.4 * 1000 * 250}{420} = 833.33 \text{ mm}^2 < A_{s,req}; \text{OK!}$$

Comprobación:

$$A_{s,real} = 1111.11 \text{ mm}^2$$

$$\phi Mn = 0.9 * 420 * 1111.11 * \left(250 - \frac{93.75 * 0.85}{2} \right) = 88.27 \text{ kN} - \text{m}$$

$$\phi Mn = 88.27 \text{ kN} - \text{m} > Mu = 87.04 \text{ kN} - \text{m}; \text{OK!}$$

Diseño a Flexión de la Zapata:

Demanda de la Zapata:

$$M_{u+} = 1.6 * 57.20 = 91.52 \text{ kN} - \text{m}$$

$$M_{u-} = 1.6 * 21.7 = 34.72 \text{ kN} - \text{m}$$

Sección Controlada por tensión:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y = 0.005 \text{ mm/mm}$$

$$c = \frac{3}{8}d = \frac{3}{8} * 250 = 93.75 \text{ mm}$$

Refuerzo Requerido:

$$\phi Mn = \phi * T * z$$

$$\phi Mn(+) = 0.9 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2} \right) = 91.52x10^6$$

$$0.9 * 420 * A_{s,req} * \left(250 - \frac{93.75 * 0.85}{2} \right) = 91.52x10^6$$

$$A_{s,req}(+) = 1152.08 \text{ mm}^2; \phi 18 \text{ mm c}/180\text{mm}$$

$$\phi Mn(-) = 0.9 * f_s * A_s * \left(d - \frac{a}{2} \right) = 34.72x10^6$$

$$0.9 * 420 * A_{s,req} * \left(250 - \frac{93.75 * 0.85}{2} \right) = 34.72x10^6$$

$$A_{s,req}(-) = 437.06 \text{ mm}^2$$

Revisión por contracción y temperatura:

$$A's = 0.0018 * b * h = 0.0018 * 1000 * 300 = 540 \text{ mm}^2$$

Se colocan $\phi 14 \text{ mm c}/250\text{mm}$

Revisión por Refuerzo Mínimo:

$$A_{s,min} = \frac{1.4bd}{f_y} = \frac{1.4 * 1000 * 250}{420} = 833.33 \text{ mm}^2 > A_{s,req}(-)$$

Para $Mu(-)$, se colocan **$\phi 14 \text{ mm c}/180 \text{ mm}$**

Comprobación:

$$A_{s,real}(+) = 1413.72 \text{ mm}^2$$
$$\phi Mn(+) = 0.9 * 420 * 1413.72 * \left(250 - \frac{93.75 * 0.85}{2}\right) = 112.3 \text{ kN} - m$$

$$\phi Mn(+) = \mathbf{112.30 \text{ kN} - m} > Mu = \mathbf{91.52 \text{ kN} - m}; \mathbf{OK!}$$

$$A_{s,real}(-) = 855.21 \text{ mm}^2$$
$$\phi Mn(-) = 0.9 * 420 * 855.21 * \left(250 - \frac{93.75 * 0.85}{2}\right) = 67.94 \text{ kN} - m$$

$$\phi Mn(-) = \mathbf{67.94 \text{ kN} - m} > Mu = \mathbf{34.72 \text{ kN} - m}; \mathbf{OK!}$$

Longitud de Desarrollo de los Ganchos:

$$Ldh = \max\left(\frac{f_y * db}{17\sqrt{f'_c}}; 8db; 150 \text{ mm}\right)$$

$$Ldh\phi 12 \text{ mm} = \max\left(\frac{4200 * 1.2}{17\sqrt{280}}; 8(12); 150 \text{ mm}\right) = 177.17 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 16 \text{ mm} = 180 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 16 \text{ mm} = \max\left(\frac{4200 * 1.6}{17\sqrt{280}}; 8(16); 150 \text{ mm}\right) = 228.22 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 16 \text{ mm} = 230 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 14 \text{ mm} = \max\left(\frac{f_y * 1.4}{17\sqrt{280}}; 8(14); 150 \text{ mm}\right) = 206.7 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 14 \text{ mm} = 210 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 18 \text{ mm} = \max\left(\frac{4200 * 1.8}{17\sqrt{280}}; 8(18); 150 \text{ mm}\right) = 265.76 \text{ mm}$$

$$Ldh\phi 16 \text{ mm} = 270 \text{ mm}$$

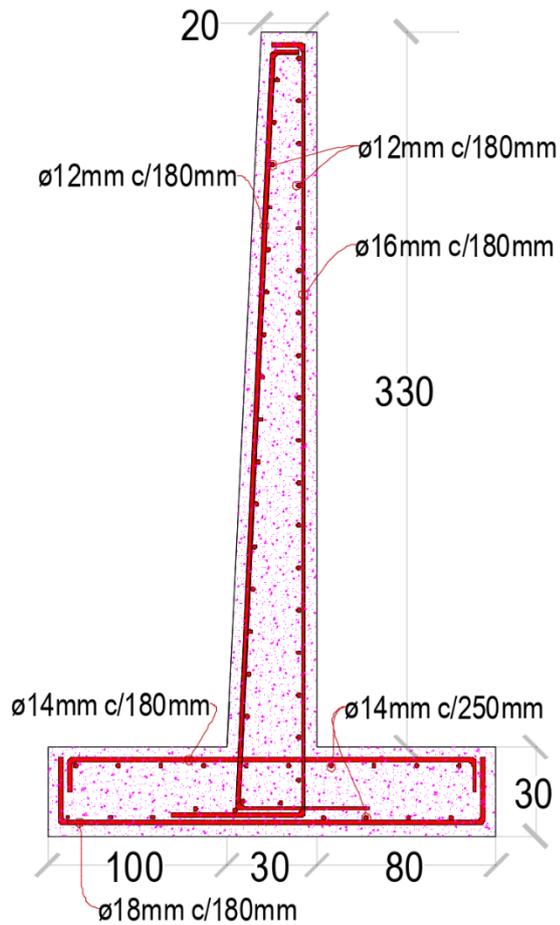


Figura 66: Diseño a flexión del muro de contención (acero).

6.8 Longitud de Desarrollo para Sección Controlada por Tensión

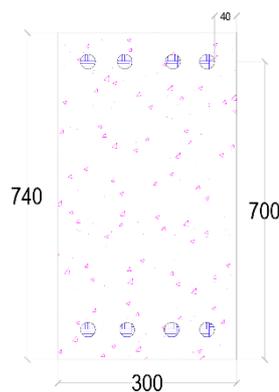


Figura 67: Esquema de sección controlada por tensión.

Geometría: $b = 300\text{mm}$; $d = 700\text{ mm}$

Hormigón: $f'c = 28\text{ MPa}$

Detalles del refuerzo GFRP: $3\phi 25\text{mm}$; $f_{fu}^* = 550 \text{ MPa}$; $E_f = 41 \text{ GPa}$; $A_f = 510 \text{ mm}^2$

Exposición ambiental: $C_E = 0.8$

$$f_{fu} = f_{fu}^* * C_E = 550 * 0.8 = 440 \text{ MPa}$$

$$A_f = 510 * 4 = 2040 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{2040}{300 * 700} = 9.71 \times 10^{-3} = 0.00971$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0.85 * 0.85 \frac{28}{440} * \frac{41000 * 0.003}{41000 * 0.003 + (440)}$$

$$= 0.01004$$

$\rho_f \leq \rho_{fb}$; **Controla Tensión**

$$l_d = \frac{\frac{\alpha f_{fr}}{0.0083\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (5.3a)$$

$\alpha = 1.5$; mas de 300 mm por debajo de la varilla

$f_{fr} = f_{fu} = 440 \text{ MPa}$; sección controlada por tensión

$$dc = 40 + 12.7 + \frac{25.4}{2} = 65.4 \text{ mm}$$

$$S = \frac{300 - 40(2) - 12.7(2) - 25.4(4)}{3} = 31 \text{ mm}$$

$$C = \min\left(65.4; \frac{31 + 25.4}{2}\right) = 28.2 \text{ mm} \leq [3.5db \ (3.5 * 25.4 = 88.9)]$$

C = 28.2 mm

$$l_d = \frac{\frac{1.5 * 440}{0.0083\sqrt{28}} - 340}{13.6 + \frac{28.2}{25.4}} 25.4 = \mathbf{2007.7 \text{ mm}}$$

6.9 Elaboración de Diagrama Momento-Curvatura mediante Python

Para poder representar de manera gráfica el comportamiento a flexión de los elementos de hormigón reforzados con varillas GFRP se mostrará el procedimiento para elaborar un diagrama momento-curvatura y comparar el mismo con una sección reforzada con acero corrugado. Los cálculos se han

realizado con la herramienta Python para ambas secciones, y toman en consideración lo siguiente:

- El hormigón resiste tensión hasta el esfuerzo de rotura, f_r , considerado como el punto de fisura y tiene un valor de $2\sqrt{f'_c}$
- Las varillas corrugadas de fibra de vidrio GFRP tienen un comportamiento lineal hasta el esfuerzo último $f_{tu} = 440-760 \text{ MPa}$
- Las varillas corrugadas de acero tienen un comportamiento lineal hasta la fluencia $f_y = 420 \text{ MPa}$
- El hormigón admite esfuerzos de compresión hasta una deformación unitaria de $e_{cu} = 0.003$, donde se produce el aplastamiento

La Figura 68 muestra el diagrama de una sección controlada por tensión. Se puede observar que la curva de la sección reforzada con varillas GFRP alcanza ligeramente una resistencia mayor a la reforzada con acero, sin embargo, su capacidad de deformación es menor y en su desarrollo no presenta un punto de fluencia, a diferencia de la curva de la sección reforzada con acero corrugado donde se puede ver claramente que esto ocurre a $M_y=26.54 \text{ Ton-m}$ y $\phi_y=0.00006$ y la ductilidad es bastante elevada.

$$\mu_{Gr.60} = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{0.00029}{0.00006} = 4.83 \quad \mu_{GFRP} = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{0.00025}{0.00025} = 1.00$$

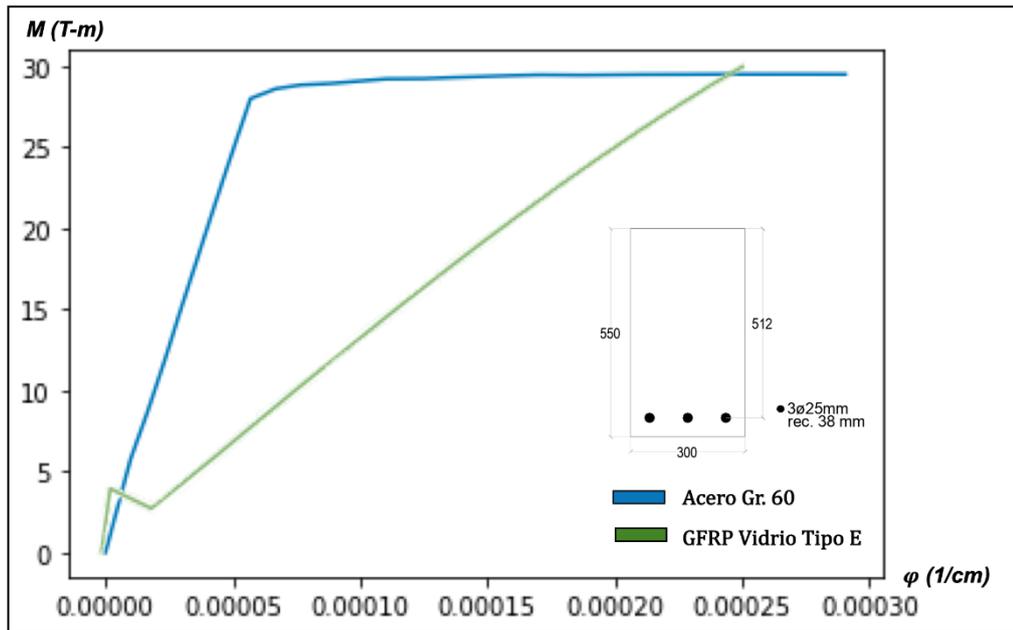


Figura 68: Diagrama Momento-Curvatura de sección controlada por tensión, reforzada con acero corrugado y GFRP.

Tabla 14: Puntos notables del diagrama momento-curvatura de sección controlada por tensión.

	GFRP		Acero	
	M T-m	φ_f 1/cm	M T-m	φ_s 1/cm
Punto de Fisura	4.96	0.000005	4.96	0.000005
Punto de Cedencia	-	-	26.54	0.000060
Resistencia Nominal	29.80	0.000280	27.00	0.000300

Debido a que el hormigón reforzado con GFRP está compuesto por 2 materiales frágiles, el diagrama toma una forma similar a una línea recta, con un punto de fisura cuando el hormigón a tensión alcanza $f_r = 2\sqrt{f'_c}$ y un punto de ruptura cuando $\epsilon_{cu} = 0.003$ o $f_f = 440 \text{ MPa}$. En caso de requerir mayor resistencia o capacidad de deformación, se podría incrementar el ancho b de la sección o la resistencia del hormigón f'_c , así como considerar la posibilidad de incluir refuerzo en la zona de compresión, A'_f , que a su vez facilita el proceso constructivo y controla las deformaciones por flujo plástico.

Incrementar la cuantía de refuerzo, A_f y A_s , disminuye los esfuerzos de las varillas y por ende su deformación, permitiendo alcanzar una mayor

resistencia a la sección M_{max} , pero su capacidad de deformación se ve perjudicada, ya que la profundidad de eje neutro c es mayor. Esto se puede observar claramente en el diagrama de la Figura 69 cuando la sección es controlada por compresión, sin embargo, como el refuerzo GFRP puede deformarse hasta $e_{fu} = f_{fu} / E_f$, la capacidad de deformación es levemente mayor a la del refuerzo con acero.

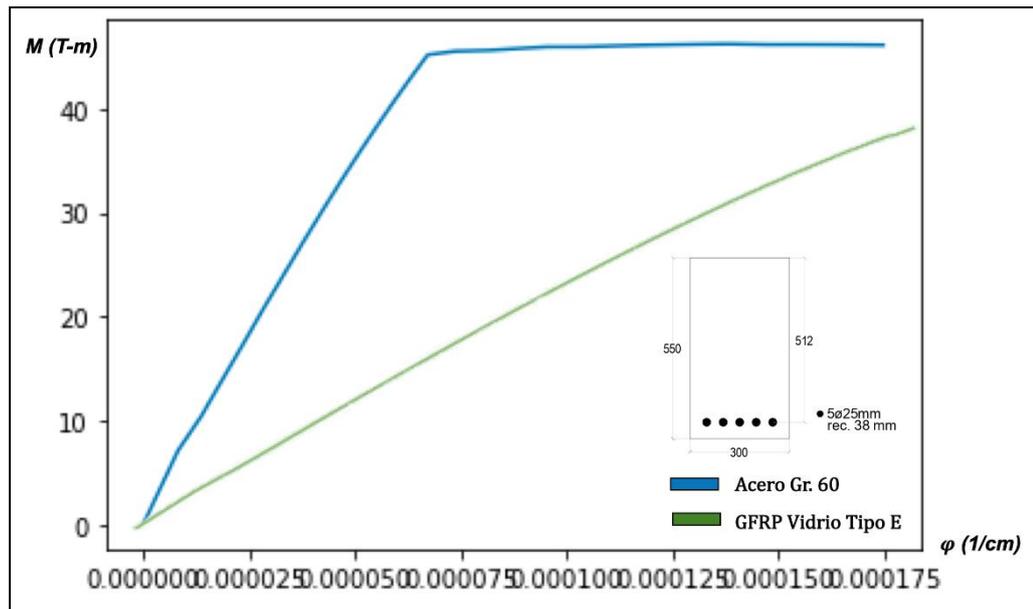


Figura 69: Diagrama Momento-Curvatura de sección controlada por compresión reforzada con acero corrugado y GFRP.

Tabla 15: Puntos notables de diagrama momento-curvatura de sección controlada por compresión.

	GFRP		Acero	
	M T-m	φ_f 1/cm	M T-m	φ_s 1/cm
Punto de Fisura	8.57	0.000005	8.57	0.000005
Punto de Cedencia	-	-	42.27	0.000118
Resistencia Nominal	36.70	0.000200	42.80	0.000175

6.10 Análisis de Costos

En la actualidad, el precio del acero proporcionado por los proveedores de la ciudad de Guayaquil ronda cerca de 1.00\$/kg, sea este para varillas corrugadas o perfiles. Dado que las varillas GFRP no se comercializan en muchos países de Latinoamérica, se tomará como referencia el precio de mercado brindado (por metro lineal) por varias empresas de Estados Unidos y una de China

Tabla 16: Cotización de la empresa "Kompozit 21", Estados Unidos.

Ø GFRP	Peso	Costo	Costo
(mm)	Kg/ml	\$/ml	\$/Kg
6	0.054	\$ 0.14	\$ 2.59
10	0.144	\$ 0.35	\$ 2.43
13	0.25	\$ 0.71	\$ 2.84
16	0.46	\$ 1.30	\$ 2.83
19	0.59	\$ 1.79	\$ 3.03
22	0.732	\$ 2.14	\$ 2.92
25	0.885	\$ 2.50	\$ 2.82
29	0.879	\$ 2.90	\$ 3.30
32	0.97	\$ 3.22	\$ 3.32

Tabla 17: Cotización de la empresa "Tuff Bar", Estados Unidos.

Ø GFRP	Peso	Costo	Costo
(mm)	Kg/ml	\$/ml	\$/Kg
10	0.148	\$ 0.47	\$ 3.18
13	0.253	\$ 0.62	\$ 2.45
16	0.432	\$ 0.90	\$ 2.08
19	0.61	\$ 1.14	\$ 1.87
22	0.818	\$ 1.48	\$ 1.81
25	1.100	\$ 1.87	\$ 1.70
29	1.279	\$ 2.11	\$ 1.65
32	1.637	\$ 2.88	\$ 1.76
36	2.767	\$ 4.43	\$ 1.60

Tabla 18: Cotización de la empresa "Liteform", Estados Unidos.

Ø GFRP	Costo	Costo
(mm)	\$/ft	\$/m
10	\$ 777777 0.13	\$ 777777 .41
13	\$ 777777 0.18	\$ 777777 .60
16	\$ 777777 0.29	\$ 777777 .94

Tabla 19: Cotización de la empresa "Unicomposite Technology", China.

Description		Specification	Unit Price	Quantity	Amount
			US\$/m	m	US\$
1	GFRP Rebar	12mm	0.57	10,000	5700.00
2		16mm	1.00	10,000	10000.00
3		20mm	1.58	10,000	15800.00
5	Packing	Include pallet or wood box package with plastic film			
6	Freight				
Total EXW Price					31500.00

Con esta información, se puede observar que el costo de las varillas GFRP es mucho mayor al del acero (de 2.50 a 3.32 \$/kg), sin embargo, debido a que las varillas GFRP tienen una densidad de $\frac{1}{4}$ la del acero corrugado, puede haber un beneficio en caso que las cuantías de diseño sean similares. Las Tablas 20 y 21 muestran las planillas de las varillas para el diseño del muro de contención del ejemplo 6.7 y se ha considerado un peso específico y costo/kg de los proveedores presentados anteriormente y en esta se muestra que el diseño con las varillas GFRP es 1.5 veces más costoso al diseñado con acero de refuerzo (sin considerar el costo de importación), debido a la diferencia en las cuantías.

Tabla 20: Planilla de varillas GFRP por metro lineal de muro.

PLANILLA DE VARILLAS GFRP (POR ML DE MURO)								
Descripción	Unidad	ml	Cantidad (ml)	Ø (mm)	Masa (kg/m)	Peso (Kg)	Costo/Kg	Costo Total
Refuerzo principal muro	8.00	4.07	32.56	16	0.46	14.98	\$ 2.83	\$ 42.39
Refuerzo secundario muro	8.00	3.99	31.92	13	0.46	14.68	\$ 2.45	\$ 35.97
Refuerzo transversal muro	55.00	1.00	55.00	13	0.46	25.30	\$ 2.45	\$ 61.99
Refuerzo principal zapata	8.00	2.45	19.60	16	0.46	9.02	\$ 2.83	\$ 25.52
Refuerzo secundario zapata	8.00	2.04	16.32	16	0.46	7.51	\$ 2.83	\$ 21.25
Refuerzo transversal zapata	24.00	1.00	24.00	13	0.46	11.04	\$ 2.45	\$ 27.05
Total								\$ 214.15

Tabla 21: Planilla de varillas de acero por metro lineal de muro.

PLANILLA DE VARILLAS ACERO (POR ML DE MURO)								
Descripción	Unidad	ml	Cantidad (ml)	Ø (mm)	Masa (kg/m)	Peso (Kg)	Costo/Kg	Costo Total
Refuerzo principal muro	5	3.74	18.70	16	1.58	29.51	\$ 1.00	\$ 29.51
Refuerzo secundario muro	5	3.66	18.30	12	0.88	16.10	\$ 1.00	\$ 16.10
Refuerzo transversal muro	37	1.00	37.00	12	0.88	32.56	\$ 1.00	\$ 32.56
Refuerzo principal zapata	6	2.45	14.70	18	2.00	29.37	\$ 1.00	\$ 29.37
Refuerzo secundario zapata	6	2.04	12.24	14	1.21	14.79	\$ 1.00	\$ 14.79
Refuerzo transversal zapata	17	1.00	17.00	14	1.21	20.54	\$ 1.00	\$ 20.54
Total								\$ 142.87

Tabla 22: Costo de importación de las varillas GFRP para las cuantías del muro de contención.

COSTO DE IMPORTACIÓN DE LAS VARILLAS GFRP - ECUADOR		
	Precio/Kg	Total
Peso Total Estimado (Kg)		82.52
Valor total de las varillas GFRP	\$ 2.64	\$ 217.85
Valor FOB / Ton	\$ 2.76	\$ 228.88
Transporte por Tierra / Ton	\$ 0.98	\$ 81.33
Transporte Marítimo / Ton	\$ 7.07	\$ 584.41
Subtotal		\$ 221.47
Seguro (2%)		\$ 4.43
Tarifa Arancelaria (20%)		\$ 44.29
Total		\$ 270.19

En la Tabla 22 se muestran además los costos de importación aproximados de la varilla GFRP en caso que esta vaya a implementarse en la ciudad de Guayaquil. Por otro lado, las Tablas 23 y 24 muestran las planillas calculadas para el diseño de una viga simplemente apoyada, donde el resultado indica que la viga con refuerzo GFRP es 1.10 veces más costosa a la reforzada con acero corrugado (sin considerar el costo de importación).

Tabla 23: Planillas de varillas GFRP y acero del diseño de las vigas simplemente apoyadas a flexión y corte.

PLANILLA DE VARILLAS GFRP								
Descripción	Unidad	ml	Cantidad (ml)	Ø (mm)	Masa (kg/m)	Peso (Kg)	Costo/Kg	Costo Total
Refuerzo Principal	2.00	8.02	16.04	25	0.89	14.20	\$ 14.20	\$ 40.03
Refuerzo Secundario	2.00	7.95	15.90	22	0.73	11.64	\$ 11.64	\$ 33.99
Refuerzo transversal	30.00	1.59	47.58	10	0.14	6.85	\$ 6.85	\$ 16.65
Total								\$ 90.67

PLANILLA DE VARILLAS ACERO								
Descripción	Unidad	ml	Cantidad (ml)	Ø (mm)	Masa (kg/m)	Peso (Kg)	Costo/Kg	Costo Total
Refuerzo Principal	2.00	7.90	15.80	20	2.47	38.96	\$ 38.96	\$ 38.96
Refuerzo Secundario	2.00	7.80	15.60	16	1.58	24.62	\$ 24.62	\$ 24.62
Refuerzo transversal	30.00	1.58	47.40	8	0.40	18.72	\$ 18.72	\$ 18.72
Total								\$ 82.30

Tabla 24: Costo de importación de las varillas GFRP para la cuantía de la viga simplemente apoyada.

COSTO DE IMPORTACIÓN DE LAS VARILLAS GFRP - ECUADOR		
		Total
Peso Total Estimado (Kg)		32.69
	Precio/Kg	Total
Valor total de las varillas GFRP	\$ 272.72	\$ 9.01
Valor FOB / Ton	\$ 2.76	\$ 0.74
Transporte por Tierra / Ton	\$ 3.98	\$ 0.13
Transporte Marítimo / Ton	\$ 7.07	\$ 0.56
Subtotal		\$ 90.45
Seguro (2%)		\$ 1.81
Tarifa Arancelaria (20%)		\$ 18.09
Total		\$ 110.34

6.11 Ventajas y Desventajas de la varilla GFRP

En función de la literatura revisada y la información numérica obtenida de los ejemplos de aplicación del presente trabajo, se pueden destacar ciertas ventajas y desventajas que implican el uso de elementos de hormigón reforzado con varillas de fibra de vidrio. Para ello, se hace una comparación

desde el punto de vista mecánico, constructivo y del coste, tal como se observa en la Tabla 25.

Tabla 25: Ventajas y Desventajas de la implementación de las varillas GFRP.

GFRP	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Gran capacidad a tracción, lo que le permite diseñar elementos a flexión de alta resistencia.	Bajo módulo elástico, esto implica grandes deformaciones para relativamente pequeños niveles de esfuerzos.
Su comportamiento lineal le permite diseñar elementos dentro del rango elástico.	Su relación esfuerzo-deformación es lineal hasta la falla, convirtiéndolo en un material frágil de poca ductilidad.
El material no es conductor térmico ni eléctrico, de modo que es ideal para la construcción de subestaciones, plantas, etc., en especial en sitios de hielo y deshielo.	Poca resistencia al fuego, considerando que esto no ha sido estudiado a profundidad.
Las varillas no son susceptibles a la corrosión, cloruros u otros ataques químicos, por lo tanto, no requiere de costos por mantenimiento. Además, alarga la vida útil de las estructuras y su implementación implica un ahorro en transporte y mano de obra.	Su costo en comparación al acero corrugado es mayor.
Los posibles acabados superficiales le brindan una capacidad de adherencia a la varilla mejor que la del acero	Los elementos se vuelven más susceptibles a las deformaciones a largo plazo producidas por el flujo plástico.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos de los cálculos realizados para el diseño a flexión de vigas, muros y zapatas, presentados en este trabajo, se puede comprobar que la cuantía de refuerzo del acero y GFRP de las secciones controladas por compresión no difieren en grandes cantidades, dado que los factores de seguridad son los mismos y la resistencia a tracción de ambas varillas son similares (dependiendo del diámetro de la varilla de fibra de vidrio). Sin embargo, se puede verificar que estos valores pueden verse alterados considerando que, la baja rigidez de la varilla GFRP, hace que esta tenga mayor deformación que el acero (4 veces más) para un mismo nivel de esfuerzos, reduciendo significativamente los valores de la inercia agrietada y causando problemas de agrietamiento que deben ser corregidos elevando la cuantía de refuerzo GFRP para cumplir los criterios de servicio.

Colocar cuantías muy elevadas conlleva a un diseño extremadamente costoso, por tal motivo, aumentar el peralte del elemento puede ser otra solución para el problema de deflexiones, considerando que en tal caso la sección pasa a ser controlada por tensión y su factor de seguridad es mucho menor al del acero por la incertidumbre que prevalece en el material. Por consiguiente, se puede concluir que no es adecuado utilizar las varillas de fibra de vidrio donde gobierne el criterio por deflexiones, ya que las cuantías en cierta medida siempre serán mayores a las del acero de refuerzo, dependiendo del diámetro y la resistencia a tracción mínima de la varilla GFRP garantizada por el fabricante.

Observando la ausencia de un punto de fluencia en los gráficos de momento-curvatura para las secciones de hormigón reforzado con GFRP, se puede confirmar que la escasa ductilidad del material es evidente, por tal motivo, se concluye que no es recomendable su aplicación para estructuras o elementos sometidos a fuerzas sísmicas importantes, pórticos especiales resistentes a momento o cualquier otro tipo de diseño donde se requiera una gran capacidad de deformación. Por otro lado, su implementación en tableros de puentes, pavimentos, muros de contención u otro tipo de obras especiales en plantas eléctricas o industriales lo vuelve al material bastante atractivo

debido a su inmunidad a la corrosión, la conductividad eléctrica y a los ataques químicos.

Considerando el análisis de costos realizado con el muro de contención diseñado en el presente trabajo y una viga simplemente apoyada; para una sección controlada por tensión tanto para las varillas GFRP y las de acero corrugado, se afirma que las primeras representan la opción más costosa ya que la cuantía es más elevada a causa de la incertidumbre del material durante los procesos de diseño. Esto indica que, a pesar de su baja densidad, la varilla GFRP resulta la alternativa más cara a corto plazo, sin embargo, observando los aspectos estéticos, constructivos y de logística, el material representa un ahorro importante, ya que acelera y vuelve más eficiente los procesos de traslado y armado en obra y evita posibles reparaciones a largo plazo en vista de la corrosión del acero corrugado, alargando hasta 100 años la vida útil de las estructuras.

7.2 Recomendaciones

Es necesario realizar investigaciones exhaustivas respecto al comportamiento del material a largo plazo, puesto que su bajo módulo elástico hace que las deflexiones por flujo plástico “creep” se magnifiquen de manera importante, agravando aún más el problema de agrietamiento del hormigón. Para ello, se podría hacer un análisis empleando acero corrugado o refuerzo GFRP en las zonas de compresión, aunque este se desprecie.

Se requiere además de un análisis más profundo acerca de la adherencia de la varilla GFRP, ya que durante su proceso de fabricación las resinas no siempre son colocadas de manera uniforme, lo que arroja valores alternados de la adhesión a lo largo del elemento. Adicionalmente, sería adecuado tener estándares de fabricación para evitar que el material se degrade de manera acelerada por el deterioro severo de la resina al exponerse a temperaturas elevadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abed, F., El-Chabib, H., & Alhammaydeh, M. (2012). Shear characteristics of GFRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 31(16), 1-12.
- Almerich, A. I. (2010). *Diseño, según Estados Límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP* (Tesis doctoral). Valencia, España: Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
- Almerich, A. I., Martín, P., Molines, J. M., & Rovira, J. (2012). RTHp rebar: New International Reinforcement for Reinforced Concrete Elements. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1-9.
- American Concrete Institute. (2008). *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement - ACI-440.6M-08*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2008). *Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars - ACI-440.05-08*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2012). *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures - ACI-440.3R-12*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2015). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars - ACI-440.1R-15*. American Concrete Institute.
- Aydin, F. (Junio de 2014). The Use of FRP Bars in Concrete. *Sakarya University, Technology Faculty, Civil Engineering Department*, 1-9.
- Bakis, C. E., Bank, L., Brown, V., Cosenza, E., Davalos, J., & Lesko, J. (2002). Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 2(73), 1-16.
- El-Nemr, A., Ahmed, E., & Benmokrane, B. (2013). Flexural Behavior and Serviceability of Normal- and High-Strength Concrete Beams

- Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*, 1-12.
- Husain, S., Shariq, M., & Masood, A. (2018). GFRP bars for RC structures - A Review. *Advances in Construction Materials and Structures* (pág. 1-12). Roorkee: Muslim University.
- Jabbar, S., & Farid, S. (2018). Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. *Department of Materials Engineering, University of Technology, Baghdad, Iraq*, 1-12.
- Kabashi, N., Avdyli, B., Krasniqi, E., & Këpuska, A. (2020). Comparative Approach to Flexural Behavior of Reinforced Beams with GFRP, CFRP, and Steel Bars. *Civil Engineering Journal* , 1-11.
- Nanni, A., De Luca, A., & Zadeh, H. (2014). *Reinforced Concrete with FRP Bars, Mechanics and Design*. Boca Ratón: CRC Press.
- Portnov, G., Bakis, C., Lackey, E., & Kulakov, V. (2013). FRP Reinforcing bars - Designs and methods of manufacture (Review of Patents). *Mechanics of Composite Materials*, 1-20.
- Quayyum, S. (2010). *Bond behaviour of fibre reinforced polymer (FRP) rebars in concrete* (Tesis de maestría). University of British Columbia, Bangladesh.
- Rovira, J., Almerich, A. I., Martin, P., & Molines, J. M. (2011). Development and applications of glass fiber bars as a reinforced in concrete structures. *18th International Conference of Composite Materials*. Valencia: Dpto Mecánica de los Medios Continuos y T. Estructuras, Universidad Politécnica de Valencia.
- Solyom, S., & Balázs, G. (2020). Bond of FRP bars with different surface characteristics. *Construction and Building Materials*, 1-27.
- Vidaud, E. (2014). Polímeros Fibroreforzados, una alternativa sustentable frente al ataque de la corrosión en el concreto armado. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 1-4.
- Vijay, P. (1999). *Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars* (Tesis doctoral). West Virginia University, West Virginia.

You, Y.-J., Park, K.-T., Seo, D.-W., & Hwang, J.-H. (2015). Tensile Strength of GFRP Reinforcing Bars with Hollow Section. *Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, 1-9.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Lascano Rodríguez Nicolás Ernesto** con C.C: # **0922574884** autor/a del trabajo de titulación: **Diseño a Flexión de Elementos de Hormigón Reforzado con Varillas Corrugadas de Fibra de Vidrio** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **05 de marzo de 2021**

f. _____

Nombre: **Lascano Rodríguez, Nicolás Ernesto**

C.C: **0922574884**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Diseño a flexión de elementos de hormigón reforzado con varillas corrugadas de fibra de vidrio		
AUTOR(ES)	Nicolás Ernesto Lascano Rodríguez		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Xavier Federico Casal Rodríguez, MSc.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	05 de marzo de 2021	No. DE PÁGINAS:	122
ÁREAS TEMÁTICAS:	Construcción, Ingeniería Estructural, Materiales de Ingeniería		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Corrosión, Ductilidad, Adherencia, Fibras, Vidrio, Varillas, Corrugado, Deflexión		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Hasta la actualidad, el mayor problema de las estructuras construidas de hormigón reforzado con varillas corrugadas de acero es la corrosión que se produce debido a los impactos ambientales a los que son sometidas. Sin embargo, el material se lo aprovecha en gran medida debido a la gran ductilidad que este le proporciona al comportamiento, además de sus excelentes propiedades de adherencia y resistencia a la tracción.</p> <p>En el presente trabajo, se presentarán a las varillas corrugadas de fibra de vidrio o “GFRP bars” (Glass Fiber Reinforced Polymer) como una alternativa de refuerzo para estructuras de hormigón armado, analizando su composición y proceso de fabricación para determinar sus propiedades físicas y mecánicas que permitan establecer un criterio acerca de su desempeño. Posteriormente, se mostrarán las ecuaciones de diseño en base a la norma norteamericana ACI-440.1R-2015 que toman en cuenta gran variedad de ensayos realizados sobre el material para compararlas con las empleadas en el diseño con acero corrugado, mostradas en la normativa norteamericana ACI-318-2019.</p> <p>Luego de haber establecido la metodología para el cálculo del refuerzo de las varillas GFRP, se han realizado diseños en elementos tales como vigas, losas, muros de contención y zapatas, siempre y cuando estos no exijan mayor ductilidad ni deflexiones importantes. Los resultados obtenidos serán empleados para efectuar una comparación (frente a las varillas de acero corrugado) del aspecto mecánico, económico y constructivo para determinar aquellas circunstancias donde la implementación de las varillas GFRP es beneficiosa y no contraproducente.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-99-098-3779	E-mail: nlascanor@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Glas Cevallos, Clara Catalina		
	Teléfono: +593-98-461-6792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			