

*Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas*



**DISEÑO ESTRUCTURAL CON POLÍMERO REFORZADO
CON FIBRA DE VIDRIO DE LA SUPERESTRUCTURA DE
LA CASA DE BOMBAS DE LA CENTRAL
TERMOELÉCTRICA “ANTONIO GUITERAS”**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: [Luis Ignacio González Orta]

Tutor(es): [Lic. Ing. Pedro A. Hernández Delgado]

Matanzas, 2018

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente yo, Luis Ignacio González Orta declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

La casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” quedó destruida después del paso por la costa norte de Cuba del huracán Irma en septiembre del 2017, dicha estructura se encuentra en una zona de ambiente altamente corrosivo, creando la necesidad de reconstruirla de manera resistente ante este tipo de fenómenos; por lo que se propuso utilizar para la construcción de los elementos de la superestructura (losas prefabricadas, vigas prefabricadas y muros) hormigón armado reforzado con polímero reforzado con fibra de vidrio fabricado en Rusia por la planta de materiales compuestos de Yaroslavl. En el presente trabajo de diploma se analiza el estado del conocimiento referente a la utilización de dicho material, se describe una metodología de diseño para cada uno de los distintos elementos de la superestructura de la edificación en cuestión, basándose en los criterios expuestos por el ACI-440 y el ACI-318, se aplica dichas metodologías a cada elemento correspondiente, obteniendo un diseño estructural con refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio cumpliendo todos los parámetros de diseño para el estado límite de resistencia y el estado límite de servicio. Se obtuvo como resultado una posible solución a los desfavorables efectos de la corrosión que puedan afectar a los componentes estructurales y un diseño resistente para los posibles fenómenos que puedan afectar la estructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.

Palabras claves: casa de bombas; ambiente altamente corrosivo; superestructura; polímero reforzado con fibra de vidrio; diseño estructural.

ABSTRACT

The bomb house of the "Antonio Guiteras" Thermoelectric Plant was destroyed after the passage through the north coast of Cuba of Hurricane Irma in September 2017, this structure is located in a highly corrosive environment, creating the need to rebuild it in a resistant to this type of phenomena; for what it was proposed to use for the construction of the elements of the superstructure (prefabricated slabs, prefabricated beams and walls) reinforced concrete reinforced with glass fiber reinforced polymer manufactured in Russia by the Yaroslavl composite materials plant. In the present diploma work, the state of knowledge regarding the use of said material is analyzed, a design methodology is described for each one of the different elements of the superstructure of the building in question, based on the criteria exposed by the ACI -440 and ACI-318, these methodologies are applied to each corresponding element, obtaining a structural design with glass fiber reinforced polymer reinforcement meeting all the design parameters for the limit state of resistance and the limit state of service. The result was a possible solution to the unfavorable effects of corrosion that may affect the structural components and a resistant design for the possible phenomena that may affect the structure of the pump house of the "Antonio Guiteras" Thermoelectric Plant.

Keywords: bomb house; highly corrosive environment; superstructure; polymer reinforced with fiberglass; structural design.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
1.1 Términos y definiciones.	6
1.2 Materiales compuestos	7
1.2.1 Los polímeros reforzados con fibra como tecnología.....	8
1.2.2 Esferas de utilización de los PRF.....	10
1.3 Los PRFV como solución frente al ataque de la corrosión en el hormigón armado.....	12
1.3.1 Ventajas y desventajas del PRFV.	14
1.3.2 Comparación entre el acero clase A-III de producción rusa y el PRFV producido en Yaroslavl.	17
1.4 Estado de resistencia límite a flexión en secciones rectangulares	20
1.4.1 Hipótesis para modelar el estado límite de resistencia a flexión	21
1.4.2 Condición básica de diseño para el estado límite de resistencia a flexión.....	21
1.4.3 Definición del factor de reducción de la capacidad resistente	21
1.5 Estado límite de servicio	22
1.6 Normas, códigos y especificaciones de cálculo y diseño publicadas.....	23
Capítulo 2 Materiales y métodos	26
2.1 Caracterización mecánica de las barras de PRFV producidas en la fábrica de Yaroslavl.....	26
2.2 Sistema a base de placas (tipo cajón).....	28
2.3 Notación.....	29
2.4 Metodología de diseño de los diferentes elementos estructurales.....	33
2.4.1 Diseño estructural del muro.....	33
2.4.2 Diseño estructural de vigas rectangulares.....	34
2.4.3 Procedimiento secuencial del diseño estructural de vigas rectangulares....	42
2.4.4 Diseño estructural de losa en una dirección.....	44
Capítulo 3 Diseño estructural con refuerzo de PRFV de la superestructura.....	51
3.1 Aplicar la metodología de cálculo para el diseño estructural con PRFV a los elementos que componen la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.....	51
3.1.1 Diseño estructural con refuerzo de PRFV de la losa prefabricada.	51
3.1.2 Diseño estructural con refuerzo de PRFV de la viga prefabricada.	61
3.1.3 Diseño estructural del muro.....	70
Conclusiones	72
Recomendaciones	73
Referencias Bibliográficas	74
Anexos	76

INTRODUCCIÓN

Cuba por su posición geográfica es asediada frecuentemente por huracanes dejando a su paso considerables afectaciones en diferentes renglones de la economía del país. Un huracán es un sistema meteorológico tropical que ha alcanzado vientos de más 118 km/h. Los vientos huracanados giran en espiral alrededor de un centro relativamente calmado, conocido como el “ojo”. Los daños que provocan estos fenómenos de la naturaleza son producidos por los intensos vientos que los conforman, las intensas lluvias que provocan inundaciones y las olas que se originan en el mar dañando las zonas costeras. Los huracanes se clasifican por la intensidad máxima alcanzada por los vientos, según la escala Saffir – Simpson, utilizada en nuestro país por el Instituto de Meteorología en los partes periódicos que sobre estos fenómenos se emiten y que tan atentamente sigue toda la población cubana cuando amenazan y cruzan sobre nuestro archipiélago.

En el mes de septiembre del año 2017 la región del Caribe se vió afectada por los efectos meteorológicos del huracán Irma, en Cuba, al realizar su trayectoria por la costa norte y recurvar hacia el norte precisamente sobre la costa de la provincia de Matanzas, se originaron olas del orden de los 6 m ya que la intensidad de sus vientos fue en su centro de 255 km/h. Dada su ubicación, en el borde este de la costa norte matancera, la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” recibió el embate directo de este oleaje provocando importantes daños en objetos vitales al destruir la superestructura de la casa de bombas de circulación y del edificio de clarificación, dañando las bombas de circulación. Además, se produjo la obstaculización de los conductos de alimentación de la piscina de tranquilización y de succión de las bombas. El canal de drenaje sufrió afectaciones por la cantidad de sedimentos y fragmentos de roca y concreto que, lanzados por el oleaje, provocaron daños en algunas zonas. El muro anti-ola fue destruido en partes importantes y en otras dañándolo significativamente, quedando inhabilitado para realizar una labor de protección.

Cuando se evalúan los criterios de durabilidad y sostenibilidad en estructuras marítimas o muy cercanas a la línea costera el ingeniero debe enfrentar retos relacionados con la agresividad del medio ambiente y el cambio climático. De esta manera, junto a las cargas

que deben soportar las estructuras, las deformaciones y fisuras que se pueden admitir en los elementos, aparecen la resistencia de los miembros a la corrosión, la degradación y los deterioros de los materiales. En su artículo “Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas” [Aguirre & Mejía 2013] reconoce que más del 80% de los deterioros en este tipo de estructuras se debe a la corrosión del acero de refuerzo, siendo la causa de inversiones millonarias en reparaciones y reconstrucciones costosas con productos químicos para la rehabilitación y el factor limitante de la vida útil de estas estructuras en un alto número de casos.

Si se toma como base los planteamientos anteriores, el evitar los daños por corrosión en las nuevas estructuras costeras o cercanas a la línea de costa conllevaría a proveer de una mayor vida útil a la obra edificada y dejaríamos un patrimonio de mayor calidad a las futuras generaciones. Existen diversas tendencias en la ingeniería para evitar los daños por corrosión, pero de manera general se pueden agrupar en dos bloques:

1. Los diseños que buscan evitar que los agentes agresivos lleguen al acero de armado.
2. Los diseños que buscan evitar que el armado sea corrosible.

En el segundo bloque existen diversos métodos, que van desde el colocar armado de acero inoxidable hasta la sustitución del acero por barras de polímero reforzados con fibras. Este trabajo se centra en el uso de hormigones armados con barras de polímero reforzados con fibras de vidrio (PRFV), tecnología que, a pesar de existir desde finales de la segunda guerra mundial, ha comenzado a ser explotada para la construcción a partir de los últimos años del siglo XX.

Entre las tareas de recuperación de esta central termoeléctrica se encuentra la realización del proyecto de una nueva estructura para la casa de bombas de agua de mar del sistema de enfriamiento, que fue destruida totalmente, siendo necesario reconstruirla de una manera resistente y duradera, de modo que pueda ser más eficiente y eficaz ante las futuras adversidades que se puedan presentar y de esta manera minimizar todo tipo de daño. Para la reconstrucción de la casa de bombas se propone utilizar como material de

refuerzo estructural las barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) de ARMOTEX (entidad comercializadora de la empresa productora de materiales compuestos de Yaroslavl), este posee propiedades que lo hacen idóneo para este tipo de estructura según asegura (ARMOTEX, 2016a) dado que no se corroen, incluso en los ambientes más agresivos, no reacciona a la sal, ni a los productos químicos o a los álcalis del hormigón armado, ofrecen una resistencia a la tracción superior al acero, son fáciles de cortar, son más ligera que la barras de refuerzo de acero, es mucho más fácil de manejar, reduce el tiempo de instalación y requiere menos transporte para llevar los materiales al sitio de trabajo, los precios de las barras de PRFV de ARMOTEX son muy competitivos frente a las barras de acero tradicional en el mercado, el costo de instalación de las barras es igual o más barato que las de acero y evidentemente la mano de obra también, este material se instala más fácil que el tradicional.

Cuba como país costero, posee importantes edificaciones que se encuentran en un ambiente altamente corrosivo, por lo que en el presente trabajo se plantea:

Situación problemática: Dado los efectos desfavorables provocados por la corrosión en las obras cercanas a la costa es necesario dar solución al diseño de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” con un material no corrosivo.

Problema científico: Necesidad de adecuar la metodología de diseño de una estructura de hormigón reforzado con PRFV a la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” minimizando los efectos corrosivos.

Objeto de investigación: Casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”

Campo de aplicación: Desarrollo estructural de las construcciones en Cuba.

En correspondencia con el problema científico planteado se define la siguiente **hipótesis:** Si se describe una metodología de diseño para estructuras de hormigón reforzado con PRFV se podrá aplicar para el diseño estructural de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.

Objetivo general:

- Proponer un diseño estructural con polímeros reforzados con fibra de vidrio para la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.

Objetivos específicos:

- Analizar el estado del arte referente a: el refuerzo estructural con PRFV, efectos de la corrosión.
- Describir una metodología para el cálculo de estructuras de PRFV.
- Aplicar la metodología para el cálculo de los elementos estructurales de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.

Estructura de la tesis:

Introducción: Fundamentación teórica de la problemática existente.

Capítulo 1: Estado del arte de la utilización de los PRFV como refuerzo estructural. En este capítulo se exponen las principales propiedades del material en cuestión, así como la normativa a utilizar para la construcción con este tipo de refuerzo.

Capítulo 2: Metodología de diseño estructural con PRFV basado en las normas ACI-440 y ACI-318 para el diseño de los diferentes elementos de la superestructura de una edificación con muros de cargas.

Capítulo 3: Diseño estructural de los diferentes elementos de la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” basado en la metodología de diseño estructural con PRFV planteada en el capítulo 2

Conclusiones.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

El objetivo fundamental de este capítulo es analizar el estado del conocimiento referente a los polímeros reforzados con fibra (PRF) como refuerzo estructural, el campo de aplicación de dicho material, su utilización como solución ante los efectos de la corrosión, sus fortalezas y debilidades. Se realiza una descripción de las ventajas que ofrece el material en cuestión fabricado en la Planta de Materiales Compuestos de Yaroslavl con respecto al acero A-III de producción rusa y un bosquejo de las principales normas vigentes sobre el uso de este material en la construcción de obras de ingeniería civil.

1.1 Términos y definiciones.

Polímero: Compuesto natural o sintético de alto peso molecular, formado por una cantidad finita de moléculas.

Compuesto: Conocido también como Composite, es la combinación de uno o más materiales que difieren en su forma o composición, pero que mantienen sus propiedades, o sea, no se disuelven o combinan completamente uno dentro del otro, aunque actúen de conjunto.

Refuerzo de fibra continua: Cualquier elemento de fibra continua embebida en una resina, utilizado como refuerzo del hormigón.

PRF: Compuesto de polímeros reforzados con fibras de alta resistencia, embebidas en una matriz de resina. Los PRF más utilizados como refuerzo del hormigón en ingeniería civil, se producen en base a fibras de carbono (PRFC - CFRP), de aramida (PRFA - AFRP), de vidrio (PRFV - GFRP), y, más recientemente, de basalto (PRFB - BFRP). En la práctica se emplean como refuerzo interno en elementos de hormigón armado y pretensado, anclajes del terreno y en la reparación o refuerzo de las estructuras existentes de hormigón.

Barra PRF: Producto de forma alargada que puede ser utilizado como refuerzo estructural interno del hormigón, en reemplazo del acero. Está formado por fibras longitudinales

embebidas y conformadas por una resina polimérica rígida. La sección transversal de la barra es comúnmente circular o rectangular, y puede producirse con una superficie corrugada para incrementar su adherencia con el hormigón.

Durabilidad: Habilidad o aptitud para resistir el agrietamiento, la oxidación, degradación química, fatiga, y/o los efectos de un daño producido por un agente externo, para un período de tiempo específico, bajo condiciones apropiadas de carga, o bajo condiciones ambientales específicas.

Resina: Material polimérico que es rígido o semirrígido a temperatura ambiente.

Fibra: Cualquier material cuya longitud sea al menos 100 veces su diámetro, usualmente entre 0,10 mm y 0,13 mm.

Fibra de vidrio: Fibra obtenida de la fundición de un producto inorgánico que se ha enfriado sin cristalizar. Incluye fibras de vidrio álcali resistente (vidrio tipo AR), de propósito general (vidrio tipo E) y de alta resistencia (vidrios tipo S)

1.2 Materiales compuestos

Según (Nanny et al., 2014, Caneiro et al., 2015, ACMA, 2012) se puede decir que un material compuesto se define como un producto sólido, formado por varios materiales que se diferencian en forma, proceso de fabricación, composición química y, como regla, consolidados luego hasta lograr que los materiales primarios que lo forman (matrices), se enlacen físicamente con los complementarios, incluyendo aquellos que se utilizan para la unión, aunque posean límites diferenciados entre sí.

Los PRF representan un tipo particular de material compuesto formados usualmente por fibras muy fuertes embebidas en una matriz formada por resinas. La fibra proporciona la resistencia y rigidez al compuesto que, mientras la matriz sirve para vincular y proteger a la fibra, así como garantizar la trasmisión de esfuerzos entre ellas mediante transferencia del cortante. Las fibras más utilizadas en la actualidad son las de vidrio, basalto, carbón y aramida, mientras que la matriz generalmente está formada por resinas epoxídicas, poliésteres, vinílicas o fenólicas.

Diferentes simbologías han sido utilizadas para identificar a fibras específicas, tales como: PRF de vidrio (PRFV), PRF de carbón (PRFC), PRF de aramida (PRFA), PRF de acero (PRFS) y PRF híbridos (PRFH), estos últimos para compuestos que contienen diferentes tipos de fibras. Aunque estos compuestos son definidos como una matriz polimérica reforzada con fibras, en el caso del hormigón reforzado con PRF, al menos uno de los materiales constituyentes debe ser un refuerzo continuo más rígido y resistente que la matriz. Cada uno de los materiales constituyentes juega un importante rol en el proceso y desempeño final del producto terminado. La resina o el polímero mantienen la fibra en su lugar y definen las propiedades físicas del producto terminado, mientras que el refuerzo provee la resistencia mecánica.

1.2.1 Los polímeros reforzados con fibra como tecnología.

El empleo de los materiales compuestos en la construcción es empleado en numerosos países, tanto en el refuerzo de estructuras que se encuentran deterioradas o es necesario aumentar su capacidad resistente como el armado de elementos de hormigón en nuevas construcciones. A partir de la implementación una serie de países que han tomado la delantera en la utilización del material han desarrollado normativas para su uso destacando Estados Unidos, Canadá, Rusia, Japón e Italia. Como es lógico el desarrollo de las nuevas tecnologías, amigables con el medio ambiente y que brindan ventajas técnicas son patrimonio de los países más desarrollados, sin embargo, en los países del tercer mundo apenas se habla de su empleo y se utiliza en contadas obras, todas con capital extranjero. Ello conlleva a que en estos últimos no se cuente con regulaciones propias para desarrollar la ingeniería con el sustento legal que debe exigirse.

La aplicación de los materiales compuestos en la construcción data de la década de 1960 en los Estados Unidos, en los años 1970 se introduce en Europa, y después se comienza a aplicar en Japón a partir del año 1999. Sin embargo, el uso comercial comenzó a partir de 1980, utilizándolos como armado en forma de láminas o barras de polímeros reforzados con fibras, principalmente en aquellas estructuras de hormigón que exigían una alta resistencia a la corrosión, o absoluta transparencia electromagnética, sobre todo en construcciones para la salud con ensayos clínicos mediante el tratamiento de imagen y

sonido, o en torres de transmisión, fábricas de componentes de computadoras, etcétera. En Japón se reporta su empleo, como tendones elaborados en base a polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC) en estructuras flotantes marinas, y también como cables de PRF reforzados con aramida (PRFA) dispuestos en elementos de pre y postensado como parte de la estructura de puentes flotantes. Su empleo fue incluyéndose progresivamente y, de manera creciente, como refuerzo de elementos de hormigón en los sistemas estructurales de edificaciones, tableros de puentes, revestimiento de túneles, sistemas de anclaje, contención de tierras, y otras aplicaciones ingenieras. (Caneiro et al., 2015)

De acuerdo con lo planteado en (Caneiro et al., 2015, ARMOTEX, 2015a) la utilización de los materiales compuestos ha logrado desarrollar en beneficio de la ingeniería civil una rama de amplio uso, como son las barras de fibras de alta resistencia revestidas por una matriz polimérica con superficie con relieves comparables a las de las barras de acero para garantizar su adherencia con el hormigón que se han llamado barras de Polímero Reforzado con Fibra. Esto ha sido logrado fundamentalmente por el interés de contrarrestar el problema de la corrosión del acero al despasivarse por el ataque de los iones cloruros o sulfatos o por la carbonatación de la matriz cementicia que lo envuelve y protege, fenómeno generalmente presente e inevitable en ambientes agresivos, muy frecuentes en las zonas de desarrollo de nuestro país y el caribe.

Estas barras pueden realizarse con diferentes tipos de fibras, lo cual conlleva a productos de características físico-mecánicas diferentes y precios disímiles. El más resistente es el Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC) que tiene resistencias a la tracción del orden de las 9 veces la resistencia del acero ordinario, pero con un costo de aproximadamente 10 veces el valor del acero en el mercado internacional. Las barras de Polímero Reforzado con Fibra de Aramida (PRFA) tiene una resistencia de aproximadamente 4 veces la del acero, sin embargo, su costo es de 5 veces el valor del acero ordinario. Por último, las barras de Polímero Reforzadas con Fibra de Vidrio (PRFV) resisten 2 veces la tensión de rotura del acero, pero su valor está muy cercano a los costos del acero a nivel internacional. En este último se centrará la atención del presente trabajo.

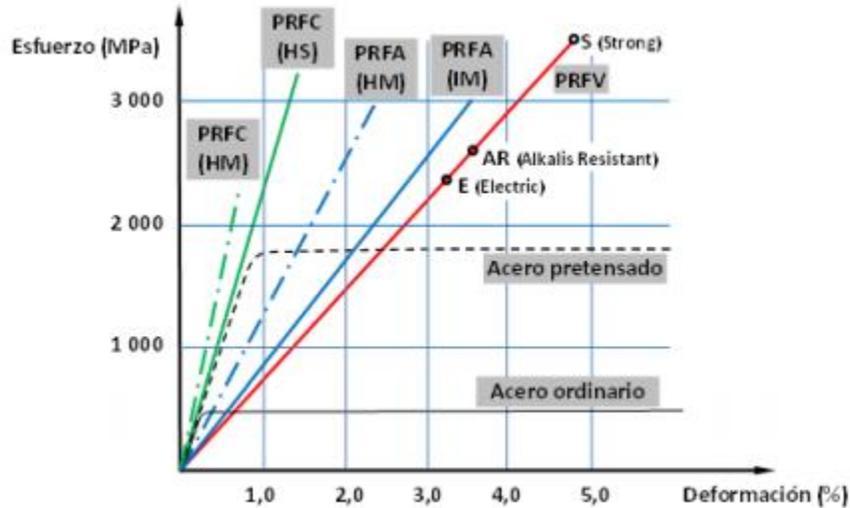


Figura 1.1 Leyes esfuerzo-deformación de algunos materiales compuestos de PRF (Caneiro et al., 2015)

1.2.2 Esferas de utilización de los PRF.

Diversas fuentes coinciden con los campos de aplicación de los PRF tales como (Caneiro et al., 2015, ARMOTEX, 2015b, ONNCCE, 2015) planteando que las armaduras de PRF se emplean con índices competitivos ventajosos en construcciones industriales, civiles, viales y agrícolas de hormigón, lo mismo ligeros que de peso normal. Han demostrado su aptitud en edificios de mampostería reforzados (incluyendo, cimentaciones, vigas zapatas, vigas de cerramiento), obras marítimas y portuarias, canalizaciones, mejoramiento del terreno y drenajes (como recubrimiento de canales y taludes), en pavimentos rígidos de hormigón armado y defensa de los viales, elementos de infraestructura en la industria química, sustituyendo al acero de alto límite elástico en elementos de hormigón pretensado, en soportes de torres de iluminación y de líneas de transmisión eléctrica y travesaños aislantes para las mismas, en losas para viales y aceras, así como para sus cercados y costaneras, traviesas de ferrocarril, perfiles para colectores, líneas de tuberías (centrales térmicas, canales de cables), sistemas comunales, como refuerzo del ferrocemento, etc.

El empleo de armaduras de PRF incrementa el tiempo de servicio de las edificaciones en dos o tres veces, en comparación con aquellas que emplean armaduras metálicas,

especialmente cuando actúan en un ambiente agresivo, en particular los que contienen sales, álcalis y ácidos. Su mayor resistencia, combinada con propiedades tales como una mayor ligereza, durabilidad, posibilidad de explotación en condiciones complejas, así como sus ventajas económicas, amplifican el espectro de uso de los materiales compuestos.

Sin embargo, varias guías de buenas prácticas de diseño y construcción como por ejemplo (ACI, 440.1R-06), limitan la contribución de esta tipología de refuerzo, o sugieren un análisis más cuidadoso, en casos como:

- Elementos que se vean solicitados por un marcado predominio de los esfuerzos de compresión, sobre todo cuando el hormigón alcance su máxima deformación, aunque no debe despreciarse su resistencia.
- Redistribución plástica de los esfuerzos interiores (en estructuras porticadas o continuas no se justifica aprovechar las ventajas de la redistribución debido a la ausencia de ductilidad del material en situaciones próximas a la de colapso).



Figura 1.2 Tablero de puente reforzado con PRFV. (ARMOTEX, 2015f)



a) Reforzamiento a flexión.



b) Reforzamiento a cortante.



c) Reforzamiento a compresión.



d) Reforzamiento para confinamiento.

Figura 1.3 Ejemplos del empleo de los compuestos de PRF como reforzamiento.

(Caneiro et al., 2015)

1.3 Los PRFV como solución frente al ataque de la corrosión en el hormigón armado.

Se define el fenómeno de la corrosión como la “reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medioambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”. La capa de óxido que se forma en el acero de refuerzo trae consigo un aumento de volumen en la barra, de 2 a 4 veces mayor que el volumen del acero original. Este óxido provoca la pérdida de adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto, llegando a provocar el estallamiento del recubrimiento; con la correspondiente pérdida de las propiedades mecánicas, reduciendo la capacidad de resistencia del acero y consecuentemente la del elemento de concreto reforzado.(ARMOTEX, 2015a)



Figura 1.4 Efectos de la corrosión de las barras de acero de refuerzo en edificaciones. (ARMOTEX, 2015a)

Los costos por acciones correctoras o de detención de estas patologías generadas por la corrosión del acero en estructuras de concreto reforzado, suelen ser en la actualidad considerablemente significativos. En Norteamérica, por ejemplo, los costos de reparación se estiman muy cercanos a los 300 mil millones de dólares anuales. Son cifras que lejos de manifestar tendencia a la estabilidad o a la disminución, tienden a crecer cada día; motivado por factores distintos y complejos, muchas veces relacionados entre sí.(ARMOTEX, 2015a)

Dado lo anteriormente expresado la comunidad profesional y científica se encuentra ante un reto mundial; que motiva a la sociedad científica a continuar y desarrollar la tecnología del concreto reforzado. Conocer el fenómeno de la corrosión de las barras de acero de refuerzo embebidas en el concreto, e investigar y buscar alternativas para reducir los efectos negativos de este fenómeno, es una de las brechas que puede culminar con éxito en la disminución de las pérdidas cuantiosas que provoca. En este ámbito, una posible solución puede ser el denominado Polímero Reforzado con Fibra de vidrio; los que han sido estudiados a partir de las últimas décadas, aún no se han

utilizado a gran escala en aplicaciones de construcción. Parece ser que las barras reforzadas PRFV pueden constituirse en una atractiva posibilidad; pues tienen significativas ventajas, mucho más si son comparados con las barras de acero de refuerzo tradicional.

La empresa productora de materiales compuestos de Yaroslavl en (materials, 2015) expresa que los PRFV son productos para el refuerzo del concreto con una alta relación resistencia/ peso; puede compararse en 50 veces más que la del concreto, y 20 veces más que la del acero. Suelen ser menos susceptibles a los daños medioambiental que provoca la exposición a ácidos alcalinos, ambientes marinos, u otros; resultando ser muy ligeros, excelentes aislantes térmicos y con suficiente neutralidad electromagnética.

Las varillas de PRFV contribuyen entonces a elevar en niveles significativos la durabilidad de las estructuras propensas al fenómeno de la corrosión. Son recomendadas para estructuras de concreto reforzado expuestas a las sales producto del deshielo, con necesidad de neutralidad eléctrica o magnética, cercanas al mar o marinas, o sometidas a ambientes agresivos en general. Estos compuestos han sido utilizados igualmente con éxito en el medio marino, automovilístico, y de recreación. Otras aplicaciones también han tenido lugar en el sector constructivo; cabe destacar su empleo en la construcción de tuberías, tanques de almacenamiento, fachadas de edificios y elementos arquitectónicos.

Son productos que cada día de muestran ser la solución por varios aspectos, entre los que sobresalen: ligereza, resistencia a la corrosión, excelente resistencia a la tensión, y elevado desempeño mecánico; sin dejar a un lado las similares condiciones de instalación si se comparan con las varillas de acero, y las ventajas presentes en su manipulación y almacenamiento.

1.3.1 Ventajas y desventajas del PRFV.

El autor de esta tesis ha investigado en diversas bibliografías (ARMOTEX, 2016a, ARMOTEX, 2015e, materials, 2015, Caneiro et al., 2015) sobre las fortalezas y

debilidades de los PRFV, con el objetivo de analizar las características positivas y negativas del material antes de tomar una decisión definitiva en el diseño de elementos de hormigón reforzado con PRFV. Los resultados de dicha investigación se encuentran reflejado a continuación.

Entre las principales ventajas del PRFV se encuentran:

1. Su alta resistencia mecánica.
2. Resistente a la corrosión y sustancias químicas.
3. Bajo peso unitario (de 7 a 10 veces inferior al peso del acero).
4. Transparencia magnética.
5. Elevada durabilidad.
6. Baja conductividad térmica y eléctrica.
7. Alta resistencia a la fatiga.
8. Competitividad en precio.
9. La facilidad de enrollarlos durante el proceso de fabricación cuando se trata de diámetros pequeños unido a un buen comportamiento frente a la humedad y la fatiga, al margen de su mayor durabilidad y, por tanto, reducir los costos de mantenimiento, y extender la vida útil de la estructura en que se emplee.

Las principales desventajas de los PRFV son:

1. No alcanza a fluir antes de la ruptura (colapso frágil). Esta desventaja se resalta en los diagramas esfuerzo – deformación.

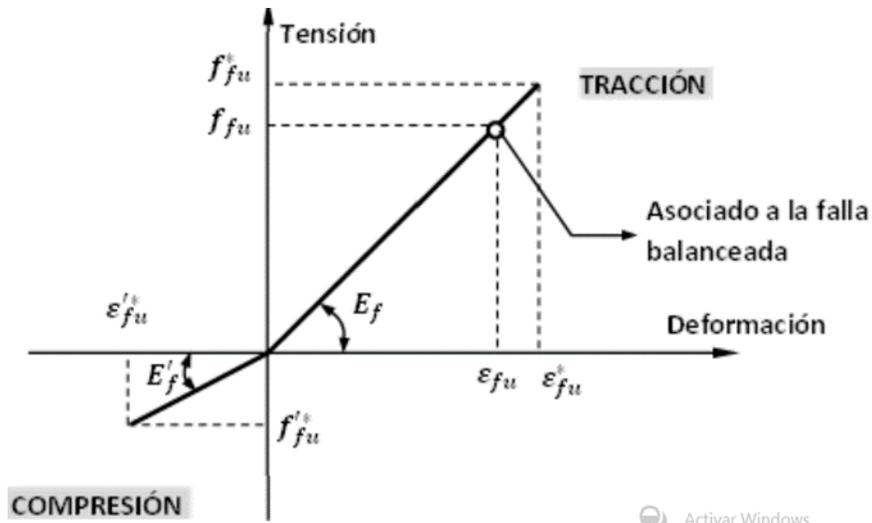


Figura 1.5 Ley esfuerzo – deformación típica de barras de PRF a tracción y compresión. (Caneiro et al., 2015)

2. Bajo módulo de Elasticidad (En el caso en que el refuerzo sea mediante fibras de vidrio, llega a ser aproximadamente cuatro veces menor que el del acero).

3. Anisotropía: En realidad las fibras se disponen de modo bidimensional, lo que provoca que la respuesta del material en cada ángulo de orientación de la fibra sea diferente, incluso, las propiedades mecánicas son proporcionales a la cantidad de fibras por volumen que se orienta en cada dirección. De ahí que el material presente:

- Mucha menor resistencia a compresión que a tracción.
- Módulo de Elasticidad a compresión menor que el de tracción (en el orden del 20% según reflejan algunas investigaciones).

- Baja resistencia a cortante.

4. No puede doblarse en obra.

5. Puede dañarse ante la exposición directa y continuada a la radiación ultravioleta (el prolongado almacenaje al aire libre debe evitarse).

6. Baja resistencia al fuego.

Su costo de elaboración obliga a situarlos en el mercado a un precio relativamente superior al del acero, aunque no se puede perder de vista que al contar con una resistencia superior, se puede llegar a reducir la superficie requerida y llega a equilibrar el costo de refuerzo de una obra entre las variantes de refuerzo tradicional y PRFV, su comportamiento elástico reduce sensiblemente la ductilidad que se desea en situaciones de fallo, presenta un módulo de deformación mucho menor que el del acero, su presencia en elementos en flexión demanda mayores peraltos; el carácter anisótropo que presentan conlleva a cualidades diferentes a tracción que a compresión; todos los dobleces deben ser elaborados en fábrica y se presentan dificultades tecnológicas para garantizar las uniones entre piezas.

1.3.2 Comparación entre el acero clase A-III de producción rusa y el PRFV producido en Yaroslavl.

En las siguientes tablas se expone la información que ofrece el productor de la armadura PRFV que se elabora en la Planta de Materiales Compuestos de Yaroslavl, coincidiendo con lo planteado por (NOSTROY, 2.6.90-2013, Caneiro et al., 2015), comparando varias propiedades de este producto con las de las barras de acero A- III producidas también en Rusia, y que resultan similares al acero G-60 de uso común en América.

Tabla 1.1 Comparación entre el acero clase A-III de producción rusa y el PRFV producido en Yaroslavl. (materials, 2015)

<i>Característica</i>	<i>Armadura metálica de clase A-III (A400C), estándar estatal 5781-82</i>	<i>Armadura plástica reforzada con vidrio APV, estándar estatal 319 322 012</i>
Material	Acero	Fibra de vidrio embebida en una base de resina epoxi
Límite de resistencia en tracción (<i>MPa</i>)	390	800
Alargamiento relativo (%)	14	2,2
Módulo de elasticidad	200 000	50 000

(MPa)		
Límite de resistencia en compresión (MPa)	390	300
Límite de resistencia transversal, (MPa)	273	150
Inoxidabilidad	Hay corrosión	Material no corrosivo
Conductibilidad térmica	Sí	No
Conductibilidad eléctrica	Sí	No (dieléctrico)
Perfiles que se producen, diámetro, (mm)	6 - 80	2 - 32
Longitud (m).	6 - 12	Según el pedido del cliente
Calidad ambiental	No hay peligro	No tóxica, por el grado de influencia al organismo humano y medio ambiente pertenece a la Clase 4 de peligro (poco peligrosas)
Durabilidad	Conforme a las normas de construcción	Proyectada no menos que 80 años
Diámetro (mm)	6 A-III	APV 4
Cambio entre las barras de acero y PRFV propuesto por el fabricante, teniendo en cuenta solamente la resistencia a la tracción directa de ambos refuerzos.	8 A-III	APV 5
	10 A-III	APV 6
	12 A-III	APV 8
	14 A-III	APV 10
	16 A-III	APV 12
	18 A-III	APV 14
	20 A-III	APV 16

Mientras tanto, la siguiente tabla refleja la longitud en metros por tonelada de peso de las barras de acero para los diámetros que se comercializan (Columna A), y las longitudes equivalentes en PRFV (Columna B), según información del fabricante. Observe como

con el empleo de las barras de PRFV el peso del refuerzo se reduce entre 7 y 12 veces aproximadamente (Columna B/A), en comparación con el peso del acero. Si se tiene en cuenta que en la actualidad el precio de un metro lineal de acero en barra es mayor que su equivalente en PRFV, a más de la inobjetable mejoría desde el punto de vista de la durabilidad que se alcanza con el empleo del refuerzo en base a barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio, se evidencia que el costo directo de esta tipología de refuerzo puede llegar a representar un ahorro que hace más competitivo a este último producto.

Tabla 1.2 Relación longitud/peso correspondiente a las barras de Acero A-III y de PRFV.(materials, 2015)

ACERO A-III			PRFV			B/A
		A			B	
(mm) d_b	Peso / Lineal (kg/m)	Long. / Peso (m/ton)	(mm) d_b	Peso Lineal (kg/m)	Long. / Peso (m/ton)	
6	0,25	4 000	4	0,028	35 714	8,92
8	0,395	2 532	5	0,035	28 571	11.28
10	0,67	1 492	6	0,054	18 518	12.41
12	0,92	1 086	8	0,088	11 363	10,46
14	1,20	833	10	0,128	7 812	9,38
16	1,58	633	12	0,185	5 405	8,54
18	2,00	500	14	0,263	3 802	7,60
20	2,47	405	16	0,370	2 702	6,67

Con estos datos expresados en estas tablas se pone en evidencia que, para una obra cercana a la costa, con una importancia económica y funcional para el país como es la casa de bombas de la Central termoeléctrica “Antonio Guiteras” es recomendable utilizar PRFV antes que refuerzo estructural con acero, siempre teniendo en cuenta las dificultades presentadas por este material desde el diseño de los elementos estructurales hasta su mantenimiento periódico.

1.4 Estado de resistencia límite a flexión en secciones rectangulares

En (Caneiro et al., 2015) se plantea que el diseño de elementos de hormigón armado reforzado con barras de acero se realiza, generalmente, con secciones hipo-reforzadas, con el fin de asegurar que la fluencia del acero antes de producirse el fallo del hormigón, asegurando una adecuada ductilidad y la posibilidad de alertar un probable fallo inminente. Sin embargo, el comportamiento elástico del refuerzo en base a PRF exige un cambio en la forma de abordar el problema.

Si el fallo se originara por el refuerzo (PRF) el colapso es frágil, por ende, repentino y generalmente fatal, por ello la advertencia de un fallo inminente mediante la observación de un agrietamiento progresivo, o de una deflexión apreciable debido a la elongación significativa que experimente el refuerzo PRF antes de su colapso, es lo más aconsejable. De cualquier forma, el elemento reforzado con PRF no exhibiría la ductilidad acostumbrada de aquellos reforzados con acero. Debido a esto cuando se refuerza con barras de PRFV se prefiere que el fallo se produzca por compresión del hormigón, a pesar de que esté presente también cierta fragilidad.

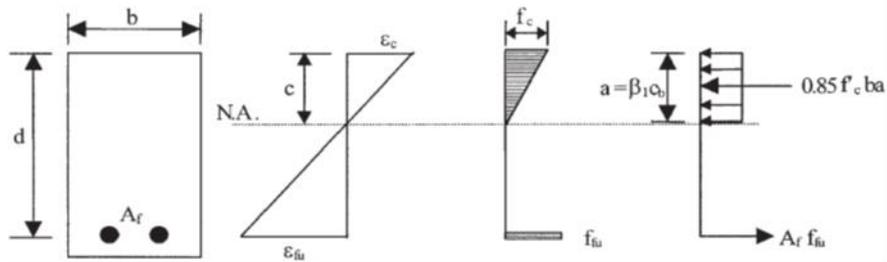


Figura 1.5 Sección con fallo por tracción del refuerzo(ACI, 440.1R-15)

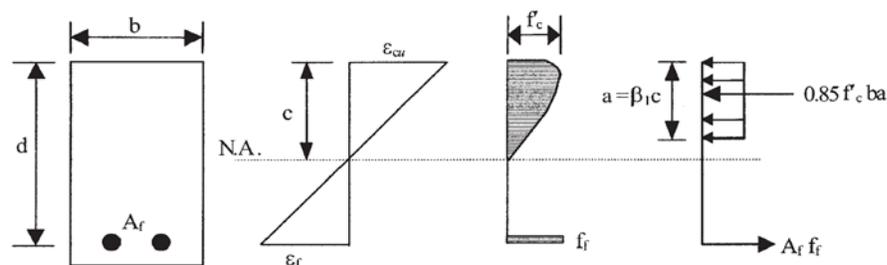


Figura 1.6 Sección con fallo por compresión del hormigón(ACI, 440.1R-15)

Cuando se refuerza con barras de PRF, las razones anteriores conducen a preferir que el fallo por compresión del hormigón se adelante al del refuerzo, a pesar de que el primero de ambos, presente también cierta fragilidad.

1.4.1 Hipótesis para modelar el estado límite de resistencia a flexión

- La tensión en el hormigón y el refuerzo de FRP es proporcional a la distancia del eje neutro (es decir, una sección plana antes asumir carga permanece plana después de recibir la carga)
- La deformación máxima en el hormigón es 0.003.
- La fuerza a tracción del hormigón se ignora.
- El comportamiento del refuerzo PRF a tracción es lineal hasta su rotura. Esto significa que la ecuación constitutiva de este material responde a la ley de Hooke en todo el rango de deformaciones.
- Se acepta adherencia perfecta entre las barras de PRF y el hormigón que las envuelve.

1.4.2 Condición básica de diseño para el estado límite de resistencia a flexión

Se trata de cumplir con la base de diseño de los estados límites de resistencia, es decir, asegurar que la sollicitación actuante, determinada a partir de la combinación más desfavorable de las acciones exteriores luego de mayorar sus valores característicos mediante los respectivos coeficientes de carga, no exceda a la sollicitación resistente de la sección calculada a partir de la resistencia reglamentaria de los materiales, afectando su magnitud por el factor de reducción de resistencia que luego se define. O sea, todo diseño debe satisfacer la condición que el momento mayorado en la sección debe ser menor o igual que la resistencia nominal a flexión en la sección multiplicada por el anteriormente mencionado factor de reducción de resistencia.

1.4.3 Definición del factor de reducción de la capacidad resistente

Debido a que los elementos de hormigón reforzados con barras de PRF no se caracterizan por un comportamiento dúctil, debe adoptarse un factor reductor (ϕ) que garantice una mayor reserva de resistencia que la que se acostumbra asegurar en hormigón armado,

cuando el refuerzo es mediante barras de acero. A diferencia de la definición que hace el (ACI, 318S-05) de este coeficiente, que lo precisa mediante una función de la deformación que alcanza el acero en tracción (pudiendo ser expresada también como una función de la profundidad de la línea neutra), en el caso del refuerzo en base a barras de PRF se hace depender este factor de la relación entre la cuantía del refuerzo en tracción que se proponga al diseño (ρ_f), y la cuantía balanceada (ρ_{fb}). (Caneiro et al., 2015)

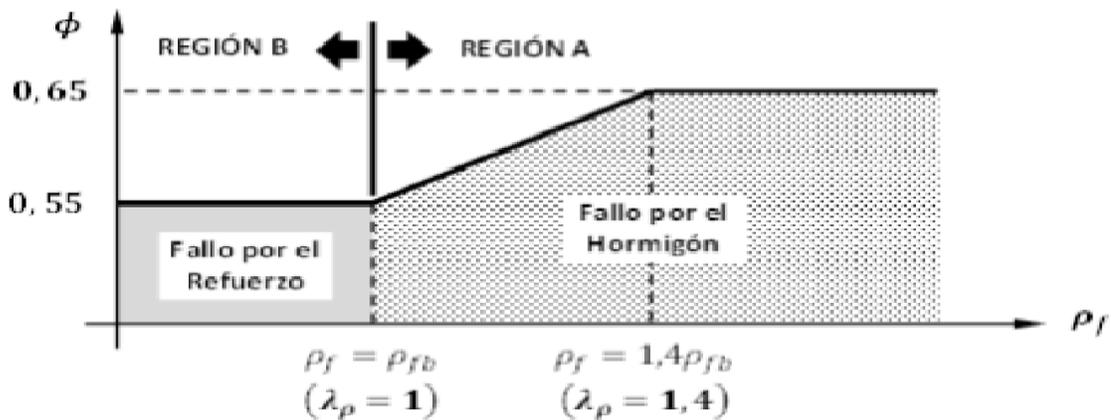


Figura 1.7 Representación gráfica del coeficiente reductor de la capacidad nominal para las FPR. (Caneiro et al., 2015)

1.5 Estado límite de servicio

Numerosas investigaciones realizadas en las dos últimas décadas confirman que los elementos de hormigón reforzados con barras de PRF si se les presentan, en general, una menor rigidez una vez que comienzan a fisurarse, comparado con aquellos reforzados con barras de acero. Por esta razón es frecuente que la deformación (flecha) bajo cargas de servicio sea el criterio que gobierne en tales diseños, especialmente cuando se decida utilizar la condición que, como ya se ha adelantado, se relaciona con fallos más frágiles por la ruptura del refuerzo, antes que por el aplastamiento del hormigón. Ya desde 1998 Gao, Tighiouart y otros, comprobaron que en especímenes de hormigón reforzados con barras de acero y barras de PRF, bajo condiciones análogas de diseño, incluyendo las áreas de refuerzo en ambos casos, se observaban mayores flechas y anchos de fisura cuando se utilizaban las barras de PRF. (Caneiro et al., 2015)

1.6 Normas, códigos y especificaciones de cálculo y diseño publicadas.

La entidad comercializadora de la empresa de producción de materiales compuestos de Yaroslavl expone en (ARMOTEX, 2015d) que ante la enorme variedad de tipos de barras de PRFV que se puede encontrar en el mercado, estas guías o normas marcan los estados límites a los que debe de atenerse el diseño de los diferentes tipos de armado, provocando una falta de uniformidad al establecer unas pautas a seguir en los métodos de ensayo de cada uno de los materiales.

A pesar de ello, una de las conclusiones a la que se parece haber llegado de manera unánime a lo largo de todos estos años de investigación, es la referente al comportamiento del armado de PRFV en secciones de hormigón cuando están sometidos a esfuerzos de compresión, ya que en ninguna de ellas se considera su aportación en el diseño y cálculo de dichos elementos.

Como resultado de esta evolución en los conocimientos acerca de los últimos años diversos códigos o normas de diseño, entre los que cabe destacar en sus últimas versiones:

ESTADOS UNIDOS (EEUU):

ACI 440R-07 (2007) "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI 440.1R-15 (2015) "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI 440.5-08 (2008) "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bar," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI 440.6-08 (2008) "Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI 440.3R-04 (2004) "Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. Structures

CANADÁ:

CAN/CSA-S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002), 187p.

CAN/CSA-S6-06 "Canadian Highway Bridge Design Code" Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (December 2006), 800p.

The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures

Design Manual No. 3, "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers"

Design Manual No. 4, "FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures"

Design Manual No. 5, "Prestressing Concrete Structures with FRPS"

Design Guide, "Specifications for FRP Product Certification"

Design Guide, "Durability Monograph"

JAPÓN

Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials,"

Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 325 p.

ITALIA

CNR-DT 203/2006 - "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars."

RUSIA

Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC) GOST 31938-2012 Interstate Standard Fiber-Reinforced Polymer Bar for Concrete Reinforcement General Specifications ISO 10406-1:2008, NEQ) Official Revision.

EUROPA

FIP Task Group 9.3 "FRP Reinforcement for Concrete Structures" (1999) Report# TF 22 A 98741 "Eurocrete Modifications to NS3473 When Using FRP Reinforcement", Norway (1998)

Conclusiones parciales del capítulo.

- Los PRFV son utilizados en gran medida en las construcciones desde finales del siglo pasado principalmente por los países desarrollados, en obras con ambientes agresivos.
- Entre las características más notables de dicho material se encuentran su carácter anisotrópico y que nunca alcanza a fluir antes de la ruptura (colapso frágil).
- En los diseños de elementos hormigón estructural reforzado con PRFV se recomienda que el fallo por compresión del hormigón se adelante al del refuerzo.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describirán los métodos de diseño para el cálculo de muro, viga rectangular y losa en una dirección, siguiendo en cada caso las especificaciones de diseño expresadas en (ACI, 440.1R-06, ACI, 440.1R-15, ACI, 318S-05, ACI, 318S-08); utilizando como material de refuerzo estructural PRFV. Esta metodología pretende responder al diseño de los correspondientes elementos de la casa de bombas de la central termoeléctrica “Antonio Guiteras”.

2.1 Caracterización mecánica de las barras de PRFV producidas en la fábrica de Yaroslavl

Para desarrollar el cálculo estructural utilizando PRFV, considerando el comportamiento anisotrópico del material en cuestión, se debe tener en cuenta una mayor atención a determinadas propiedades mecánicas, tales como, la resistencia última a esfuerzos a tracción, compresión y cortante, su módulo de elasticidad tanto a tracción como a compresión ya que estos difieren considerablemente, deformación admisible que puede alcanzar ante los esfuerzos normales, alargamiento relativo máximo, etc. En dependencia del tipo de fibra que se utilice para la confección de las barras, ya sea carbono, aramida, o el material de interés de esta tesis, el vidrio, estas propiedades pueden variar apreciablemente. A continuación, en las tablas 2.1 y 2.2 se ofrece las principales características mecánicas y geométricas que ofrece el fabricante de las barras de PRFV producidas en la planta de Yaroslavl, coincidiendo con las ofrecidas en (CIDC, 2015).

*Tabla 2.1 Principales propiedades mecánicas de las barras PRFV/Yaroslavl
(ARMOTEX, 2015c)*

<i>Propiedad</i>	<i>Magnitud</i>
<i>Resistencia límite a tracción (f_{fu}^*)</i>	800MPa
<i>Resistencia límite a compresión (f_{fu}^{*c})</i>	300MPa
<i>Módulo de Elasticidad a tracción (E_{fu}^*)</i>	50 000MPa

<i>Módulo de Elasticidad a compresión (E_{fu}^*)</i>	40 000MPa
<i>Resistencia límite a Cortante (f_{fv})</i>	150MPa
<i>Alargamiento relativo máximo (ε_{fu}^*)</i>	0,022

*Tabla 2.2. Propiedades geométricas del surtido de barras PRFV/Yaroslavl.
(ARMOTEX, 2015c)*

<i>Designación</i>	<i>Diámetro Nominal (mm)</i>	<i>Área Nominal (mm²)</i>
APV 4	4,0	12,6
APV 5	5,0	19,62
APV 6	6,5	28,3
APV 8	8,0	50,3
APV 10	10,5	78,5
APV 12	12,5	113,1
APV 14	14,0	153,9
APV 16	16,0	201,0

La empresa ARMOTEX ofrece un catálogo para las barras de PRFV fabricados en la planta de Yaroslavl donde se ofrece información técnica de las barras comerciables. Un ejemplo de esta información técnica se ofrece a continuación en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Información técnica.(ARMOTEX, 2016b)

<i>Barra de polímero reforzado con fibra de vidrio</i>	<i>Diámetro: 12mm</i>
<i>PRFV-12</i>	
<i>Resistencia a la tracción, (MPa)</i>	800
<i>Módulo de elasticidad, (MPa)</i>	50
<i>Límite de resistencia a la compresión, (MPa)</i>	300

<i>Resistencia a la tracción en la sección transversal, (MPa)</i>	150
<i>Alargamiento relativo, %</i>	2,2
<i>Peso por metro lineal, (kg)</i>	0,221
<i>Resistencia a la corrosión</i>	Resistente
<i>Conductividad térmica, $\frac{WT}{m^2 \times K}$</i>	0,35
<i>Conductividad eléctrica</i>	No conduce
<i>Resistencia a los álcalis</i>	Resistente
<i>Sustitución equivalente de barras de acero</i>	Barra de acero de 16 mm

<i>Producción manufacturada</i>	<i>Barras, m</i>	1-12 m
	<i>Rollos</i>	L= 100 m , = 1,6 m

2.2 Sistema a base de placas (tipo cajón)

Mediante arreglos de placas verticales (muros) y horizontales (losas) se pueden formar sistemas de diversas características, los que en general se pueden denominar tipo cajón. El arreglo ideal para elementos placa es un sistema tipo cajón tridimensional, la ventaja más importante es que, existiendo elementos verticales en dos direcciones ortogonales, las fuerzas laterales cualesquiera son resistidas por los muros mediante fuerzas en su plano, para lo cual poseen gran rigidez y resistencia. Para el funcionamiento en cajón se requiere que la losa forme un diagrama horizontal que tenga alta rigidez para cargas en su plano, de manera que las cargas laterales se puedan transmitir a los muros más rígidos en cada dirección. En sistemas tipo cajón las cargas verticales se transmiten a la cimentación esencialmente por fuerzas axiales en los muros, los momentos flexionantes transmitidos por las losas son generalmente pequeños.

2.3 Notación

A_f : Área total de las barras longitudinales de PRFV en tracción.

$A_{f,\min}$: Área mínima de refuerzo de FRP necesaria para prevenir el fallo de miembros sometidos a flexión al agrietarse

$A_{f,reqd}$: Área total requerida de las barras longitudinales de PRFV en tracción

A_{fv} : Cantidad de PRFV como refuerzo cortante dentro de un espaciamiento s

A_g : Área bruta de la sección.

b : Ancho de la sección transversal.

b_w : Ancho del alma.

c : Distancia desde el extremo de la fibra más comprimida hasta el eje neutro.

c_b : Distancia desde el extremo de la fibra más comprimida hasta el eje neutro en la condición de tensión equilibrada

C : Dimensión de recubrimiento.

C_E : Factor reducción para los diferentes tipos de fibras según las condiciones de la exposición.

d : Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción.

d_b : Diámetro nominal de una barra.

d_c : Espesor de recubrimiento de hormigón medido desde el extremo de la fibra en tracción hasta el centro de la barra.

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón.

E_s :Módulo de elasticidad del acero.

E_f : Módulo de elasticidad del PRFV.

f'_c :Resistencia a compresión del hormigón.

f_f :Tensión en el refuerzo del PRFV en tracción.

f_{fb} :Fuerza de torsión de la barra de PRFV.

f_{fe} :Tensión en la barra que puede desarrollarse por la longitud embebida ℓ_e .

f_{fr} : Tensión requerida de la barra.

$f_{f,s}$:Nivel de tensión producido en las barras de PRFV debido a las cargas permanentes.

f_{fu} :La fuerza de tensión de diseño del PRFV, considerado las reducciones para el ambiente de servicio.

f_{fv} :Fuerza de tensión del PRFV para diseño de cortante, tomado como el valor más pequeño de la fuerza de tensión de diseño f_{fu} , la fuerza de torsión de los estribos de PRFV f_{fb} , o la tensión correspondiente a $0,004 E_f$.

h :Espesor total o altura de un elemento.

I_x :Momento de inercia con respecto al eje x.

I_{cr} :Momento de inercia de la sección fisurada transformada a concreto.

I_g :momento de inercia de la sección bruta del elemento con respecto al eje que pasa por el centroide, sin tener en cuenta el refuerzo.

I_e : momento de inercia efectivo.

k :La proporción de profundidad del eje neutro al refuerzo.

k_b :Coeficiente en dependencia del vínculo.

ℓ :Luz de la viga o losa en una dirección.

ℓ_a :longitud del embebimiento adicional al apoyo o al punto de inflexión

ℓ_e :Longitud embebida de barra de refuerzo.

ℓ_c :Longitud del elemento en compresión, medida extremo a extremo.

ℓ_d :Longitud de desarrollo.

M_a :momento máximo no mayorado presente en el elemento en la etapa para la que se calcula la deflexión.

M_{DL} :Momento producto de las cargas muertas.

M_{DL+LL} : Momento producto de las cargas muertas más las cargas vivas.

M_{LL} :Momento producto de las cargas vivas.

M_n :Resistencia nominal a flexión en la sección.

$M_{n,reqd}$: Resistencia nominal a flexión requerida en la sección

M_s :Momento debido a la carga permanente.

M_u :Momento mayorado en la sección.

n_f :Razón entre el módulo de elasticidad de las barras de PRFV y el módulo de elasticidad del hormigón.

P_n : Resistencia axial nominal de la sección transversal.

P_u : Fuerza axial mayorada.

r_b : Radio interior de dobladura en el refuerzo de PRFV.

s : Espaciamiento de las barras longitudinales de PRFV y espaciamento del estribo.

s_{\min} : Espaciamiento mínimo.

V_c : Resistencia del cortante nominal proporcionada por el hormigón.

V_u : Fuerza del cortante factorizado en la sección.

w : Ancho de grieta máximo.

w_{DL} : Carga muerta.

w_{LL} : Carga viva.

w_u : Carga mayorada por unidad de longitud de viga, o losa en una dirección.

x_m : distancia medida desde el apoyo de la cual más allá no necesita refuerzo por cortante.

α : Factor de modificación.

β : Relación entre la distancia del eje neutro y el extremo de la fibra en tracción y la distancia del eje neutro al centro del refuerzo en tensión.

β_1 : Factor que relaciona la profundidad de bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro.

β_d : Factor de reducción utilizado para calcular deformación.

$(\Delta_i)_{DL}$: Deformación debido a la carga muerta.

$(\Delta_i)_{LL}$: Deformación debido a la carga viva.

$(\Delta_i)_{DL+LL}$: Deformación debido a la carga muerta más la carga viva.

Δ_{LT} : Deformación a largo plazo.

ε_{cu} : Deformación última en el hormigón.

ε_{fu} : Deformación de ruptura de diseño del refuerzo de PRFV.

ϕ : Factor de reducción de resistencia.

λ : factor para deflexiones adicionales debidas a efectos de largo plazo.

ρ_f : Proporción de PRFV.

ρ_{fb} : Proporción de PRFV que produce las condiciones de tensión balanceada.

$\rho_{f,\min}$: Proporción mínima de PRFV

$\rho_{f,ts}$: Proporción del refuerzo por temperatura y retracción.

ξ : Factor que depende del tiempo para cargas sostenidas.

2.4 Metodología de diseño de los diferentes elementos estructurales

2.4.1 Diseño estructural del muro

El diseño de muros sometidos a cargas axiales de compresión debe basarse en:

$$\phi P_n \geq P_u \quad (2.1)$$

donde P_u es la fuerza axial mayorada y P_n es la resistencia nominal axial, calculada como:

$$P_n = 0,45 \times f'_c \times A_g \times \left[1 - \left(\frac{\ell_c}{32h} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Para determinar el refuerzo por temperatura y retracción se toman los criterios planteados por la ACI-440 en el epígrafe 10. La proporción del refuerzo por temperatura y retracción ($\rho_{f.ts}$) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{f.ts} = 0,0018 \times \frac{414E_s}{f_{fu}E_f} \quad (2.3)$$

En caso de que la proporción del refuerzo por temperatura y retracción sea menor que 0,0014 se utilizará como valor mínimo sugerido por la (ACI, 318S-08) para refuerzo de acero por temperatura y retracción.

Los esfuerzos horizontales producidos por el viento son absorbidos por los muros laterales que confinan a cada cara de la edificación de forma tal que ellos asumen las fuerzas horizontales. Este tipo de estructura se denomina tipo cajón y además, tiene la ventaja que los valores de flexión en su base y tope son de poca magnitud.

2.4.2 Diseño estructural de vigas rectangulares

Paso 1: Estime las dimensiones de la sección transversal apropiadas para la viga.

Un valor inicial para la profundidad de la viga de reforzada simplemente apoyada puede estimarse por la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Espesor mínimo recomendado para vigas y losas que trabajan en una dirección

<i>Elemento</i>	<i>h mínima de espesor</i>			
	<i>Simplemente apoyada</i>	<i>articulada</i>	<i>Empotrada</i>	<i>Voladizo</i>

<i>Losas que trabajan en una dirección</i>	$\frac{\ell}{13}$	$\frac{\ell}{17}$	$\frac{\ell}{22}$	$\frac{\ell}{5,5}$
<i>Vigas</i>	$\frac{\ell}{10}$	$\frac{\ell}{12}$	$\frac{\ell}{16}$	$\frac{\ell}{4}$

$$d = h - \text{recubrimiento} - d_{b, \text{cortante}} - 0,5 \times d_b \quad (2.4)$$

Paso 2: Calcular las cargas factorizadas.

$$w_{DL} = w_{SDL} + w_{SW} \quad (2.5)$$

Calcular la carga uniforme factorizada y el momento último

$$w_u = 1,4w_{DL} + 1,6w_{LL} \quad (2.6)$$

$$M_u = \frac{w_u \times \ell^2}{8} \quad (2.7)$$

Paso 3: Calcular la tensión de ruptura de diseño de las barras de PRFV.

Para obtener un factor de reducción se utilizará la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Factor reducción para los diferentes tipos de fibras según las condiciones de la exposición. (ACI, 440.1R-06)

<i>Condiciones de la exposición</i>	<i>Tipo de fibra</i>	<i>Factor de reducción</i> C_E
<i>Hormigón no expuesto a la tierra y a la intemperie</i>	<i>Carbono</i>	1
	<i>Vidrio</i>	0,8
	<i>Aramida</i>	0,9
<i>Hormigón expuesto a la tierra y a la intemperie</i>	<i>Carbono</i>	0,9
	<i>Vidrio</i>	0,7
	<i>Aramida</i>	0,8

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}^* \quad (2.8)$$

Paso 4: Determine el área de barras de PRFV requerido para los esfuerzos a flexión

Encuentre la proporción del refuerzo requerida para los esfuerzos a flexión mediante ensayo y error:

Asuma una cantidad inicial de refuerzo de PRFV

Calcule la proporción equilibrada de refuerzo de PRFV.

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.9)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (2.10)$$

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \quad (2.11)$$

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) bd^2 \quad (2.12)$$

Calcule el factor de reducción de fuerza.

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 & \text{para } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases} \quad (2.13)$$

Verifique que:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.14)$$

Paso 5: Verifique el agrietamiento.

Calcule el nivel de tensión en las barras de PRFV bajo la acción de la carga muerta más la carga viva.

$$M_{DL} = \frac{w_{DL}\ell^2}{8} \quad (2.15)$$

$$M_{LL} = \frac{w_{LL}\ell^2}{8} \quad (2.16)$$

$$M_{DL+LL} = M_{DL} + M_{LL} \quad (2.17)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4750\sqrt{f'_c}} \quad (2.18)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2.19)$$

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} \quad (2.20)$$

Determine el gradiente de tensión utilizado para transformar los niveles de tensión del refuerzo cercano a la superficie donde se espera el agrietamiento.

$$\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)} \quad (2.21)$$

Calcule la distancia entre fibra de tensión extrema del hormigón al centroide del refuerzo a tracción.

$$d_c = h - d \quad (2.22)$$

Calcule el espaciamiento entre barras.

$$s = b - 2d_c \quad (2.23)$$

Compare el ancho de grieta mediante la ecuación (2.24) usando un valor recomendado de $k_b = 1.4$ para las barras de PRFV deformadas.

Tabla 2.6 Ancho de grieta máximo para elementos sometidos a flexión reforzados con PRFV.(ACI, 440.1R-06)

<i>Ancho de grieta máxima para elementos exteriores</i>	0,5mm
<i>Ancho de grieta máxima para elementos interiores</i>	0,7mm

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.24)$$

Si el ancho de grieta obtenido es mayor que el permisible, pruebe aumentar la cantidad de refuerzo de PRFV

Paso 6: Verifique la deflexión a largo plazo de la viga

Calcule el momento de inercia para la sección.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (2.25)$$

Calcule las propiedades de la sección agrietada y el momento crítico.

$$f_r = 0,62\sqrt{f'_c} \quad (2.26)$$

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_x}{h} \quad (2.27)$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (2.28)$$

Calcule el factor de modificación β_d

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left[\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right] \quad (2.29)$$

Calcule la deflexión debido a la carga muerta más la carga viva

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_x + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (2.30)$$

$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL}\ell^2}{48E_c(I_e)_{DL+LL}} \quad (2.31)$$

Calcule la deflexión para la carga muerta y la carga viva por independiente.

$$(\Delta_i)_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} \quad (2.32)$$

$$(\Delta_i)_{LL} = \frac{w_{LL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} \quad (2.33)$$

Calcule el multiplicador para la deflexión en dependencia del tiempo usando un $\xi = 2.0$ (recomendado por ACI 318 para una duración de más de 5 años).

$$\lambda = 0,60\xi \quad (2.34)$$

Calcule la deflexión a largo plazo.

$$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda \left[(\Delta_i)_{DL} + 0,2(\Delta_i)_{LL} \right] \quad (2.35)$$

Verifique la deformación calculada contra la deformación admisible.

$$\Delta_{LT} \leq \frac{\ell}{240} \quad (2.36)$$

Paso 7: Comprobar que los niveles de tensión no sobrepasen la tensión de ruptura.

Calcule el momento debido a todas las cargas permanentes (la carga muerta más 20% de la carga viva).

$$M_s = \frac{w_{DL} + 0,20w_{LL}}{w_{DL} + w_{LL}} M_{DL+LL} \quad (2.37)$$

Calcule los niveles de tensión en las barras de PRFV.

$$f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} \quad (2.38)$$

Compare con el nivel de tensión ofrecido en la siguiente tabla para PRFV.

Tabla 2.7 Límite de nivel de tensión de ruptura en refuerzos de PRFV.

<i>Tipo de fibra</i>	<i>PRFV</i>	<i>PRFA</i>	<i>PRFC</i>
<i>Tensión de ruptura admisible, $f_{f,s}$</i>	$0,20 f_{fu}$	$0,30 f_{fu}$	$0,55 f_{fu}$

$$f_{f,s} \leq 0,20 f_{fu} \quad (2.39)$$

Paso 8: Diseño por cortante.

Determinar la demanda de refuerzo a cortante a una distancia d del apoyo.

$$V_u = \frac{w_u \ell}{2} - w_u d \quad (2.40)$$

Calcule la contribución a cortante del hormigón para un miembro reforzado con PRF.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (2.41)$$

Para determinar la cantidad de refuerzo a cortante de barras de PRFV es necesario determinar los niveles de tensión efectiva, estos se pueden determinar mediante la siguiente ecuación:

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{fu} \quad (2.42)$$

Nota: el radio de doblado (r_b) se considera $3d_b$.

La tensión de diseño debe cumplir la siguiente condición:

$$f_{fv} = 0,004E_f \leq f_{fb} \quad (2.43)$$

El espaciamiento requerido puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$s = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{(V_u - \phi V_c)} \quad (2.44)$$

Verifique que no se exceda el límite del espaciamiento máximo, el cual se puede determinar como $d/2$ ó 609,6mm

El espaciamiento máximo basado en el mínimo refuerzo a cortante se halla mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{A_{fv} f_{fv}}{0,35b_w} \quad (2.45)$$

$$x_m = \frac{V_u - \left(\frac{\phi V_c}{2} \right)}{w_u} = 3,03m \quad (2.46)$$

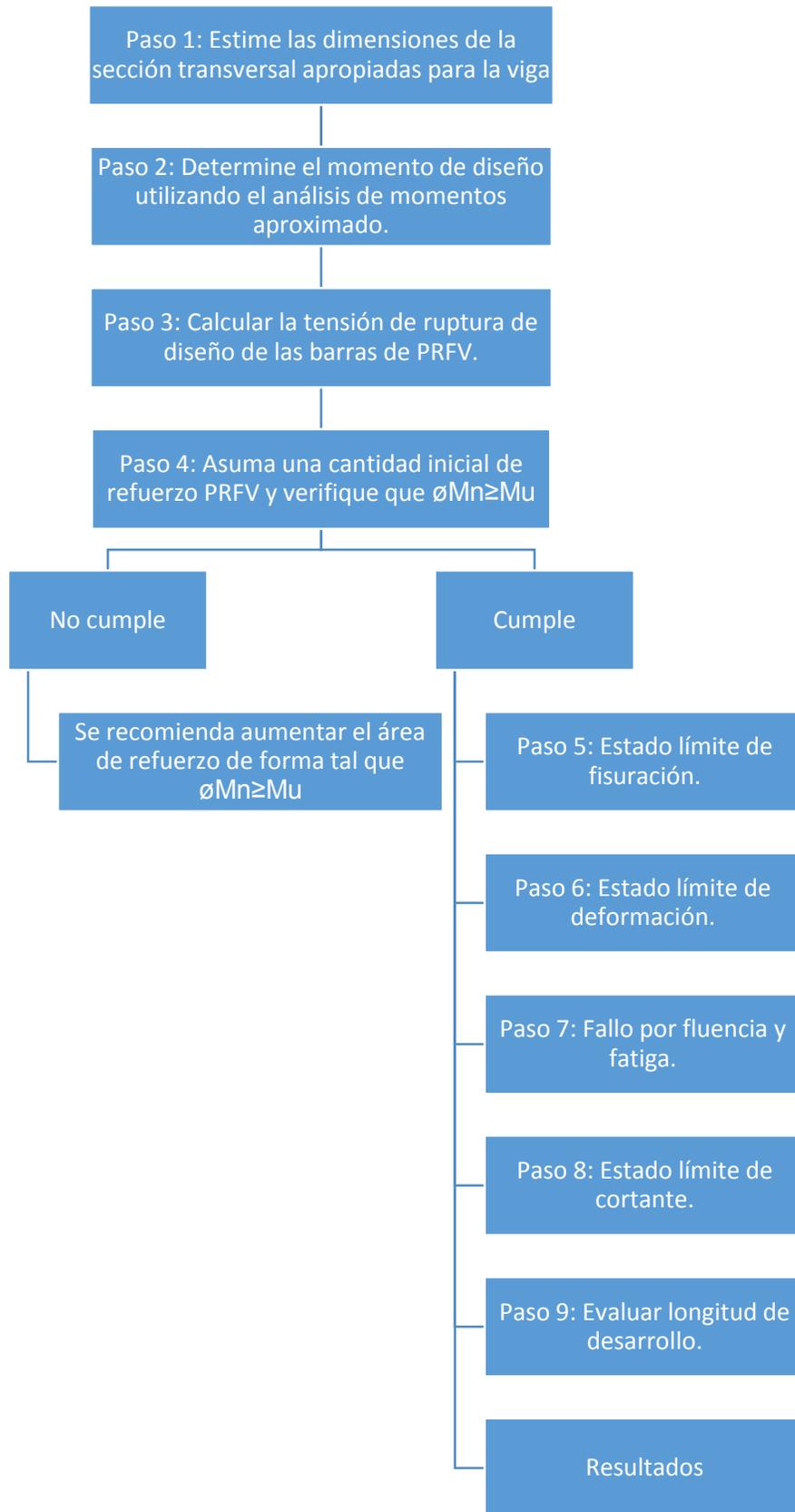
Paso 9: Calcular la longitud de desarrollo de las barras en tracción.

Evaluar la longitud recta de anclaje de la barra más allá del punto de inflexión, o del eje del apoyo:

$$\ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f'_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (2.47)$$

2.4.3 Procedimiento secuencial del diseño estructural de vigas rectangulares.

A continuación, se presenta un procedimiento secuencial de la metodología de cálculo de vigas rectangulares siguiendo los parámetros de diseños para elementos sometidos principalmente a flexión según la ACI-440-1R-06.



En caso de no cumplir con las condiciones de estado límite de fisuración, estado límite de deformación, estado límite de cortante y fallo por fluencia y fatiga se recomienda como posibles soluciones variar las dimensiones del elemento, aumentar la cuantía de barras de PRFV o utilizar barras de refuerzo de mayor resistencia.

2.4.4 Diseño estructural de losa en una dirección

Paso 1: Estime las dimensiones de la sección transversal apropiadas para la losa.

Un valor inicial para la profundidad de la viga de reforzada simplemente apoyada puede estimarse por la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Espesor mínimo recomendado para vigas y losas que trabajan en una dirección

<i>Elemento</i>	<i>h mínima de espesor</i>			
	<i>Simplymente Apoyada</i>	<i>articulada</i>	<i>Empotrada</i>	<i>Voladizo</i>
<i>Losas que trabajan en una dirección</i>	$\frac{\ell}{13}$	$\frac{\ell}{17}$	$\frac{\ell}{22}$	$\frac{\ell}{5,5}$
<i>Vigas</i>	$\frac{\ell}{10}$	$\frac{\ell}{12}$	$\frac{\ell}{16}$	$\frac{\ell}{4}$

Paso 2: Determine el momento de diseño utilizando el análisis de momentos aproximado.

$$w_{DL} = w_{SDL} + w_{SW} \quad (2.5)$$

Calcular la carga uniforme factorizada y el momento último

$$w_u = 1,4w_{DL} + 1.6w_{LL} \quad (2.6)$$

$$M_u = \frac{w_u \times \ell^2}{8} \quad (2.7)$$

Paso 3: Calcular la tensión de ruptura de diseño de las barras de PRFV.

Para obtener un factor de reducción se utilizará la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Factor reducción para los diferentes tipos de fibras según las condiciones de la exposición.

<i>Condiciones de la exposición</i>	<i>Tipo de fibra</i>	<i>Factor de reducción</i> C_E
<i>Hormigón no expuesto a la tierra y a la intemperie</i>	<i>Carbono</i>	1
	<i>Vidrio</i>	0,8
	<i>Aramida</i>	0,9
<i>Hormigón expuesto a la tierra y a la intemperie</i>	<i>Carbono</i>	0,9
	<i>Vidrio</i>	0,7
	<i>Aramida</i>	0,8

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}^* \quad (2.8)$$

Paso 4: Determine el refuerzo requerido y seleccione las barras.

Asuma que la sección se encuentra en tracción controlada

$$d = h - \text{recubrimiento} - 0,5 \times d_b \quad (2.48)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (2.49)$$

Utilice la ecuación de momento para determinar el área de refuerzo requerida.

$$M_u = \phi M_{n,reqd} = \phi A_{f,reqd} f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (2.50)$$

$$A_{f,reqd} = \frac{M_u}{\phi f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)} \quad (2.51)$$

Comprobar si:

$$A_{f,reqd} \geq A_{f,min} \quad (2.52)$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414E_s}{f_{fu}E_f} \leq 0,0036 \quad (2.53)$$

$$A_{f,min} = \rho_{f,min}bh \quad (2.54)$$

Verificar si presenta la supuesta conducta de tracción controlada.

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.9)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (2.10)$$

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{para } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad (2.11)$$

Paso 5: Verifique el agrietamiento.

Calcule el nivel de tensión en las barras de PRFV bajo la acción de la carga muerta más la carga viva.

$$M_{DL} = \frac{w_{DL}l^2}{8} \quad (2.15)$$

$$M_{LL} = \frac{w_{LL}\ell^2}{8} \quad (2.16)$$

$$M_{DL+LL} = M_{DL} + M_{LL} \quad (2.17)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4750\sqrt{f'_c}} \quad (2.18)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2.19)$$

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} \quad (2.20)$$

Determine el gradiente de tensión utilizado para transformar los niveles de tensión del refuerzo cercano a la superficie donde se espera el agrietamiento.

$$\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)} \quad (2.21)$$

Calcule la distancia entre fibra de tensión extrema del hormigón al centroide del refuerzo a tracción.

$$d_c = h - d \quad (2.22)$$

Calcule el espaciamiento entre barras.

$$s = b - 2d_c \quad (2.23)$$

Compare el ancho de grieta mediante la ecuación (2.24) usando un valor recomendado de $k_b = 1.4$ para las barras de PRFV deformadas.

Tabla 2.6 Ancho de grieta máximo para elementos sometidos a flexión reforzados con PRFV.

<i>Ancho de grieta máxima para elementos exteriores</i>	0,5mm
<i>Ancho de grieta máxima para elementos interiores</i>	0,7mm

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.24)$$

Si el ancho de grieta obtenido es mayor que el permisible, pruebe aumentar la cantidad de refuerzo de PRFV

Paso 6: Verifique la deflexión a largo plazo de la losa.

Calcule el momento de inercia para la sección.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (2.25)$$

Calcule las propiedades de la sección agrietada y el momento crítico.

$$f_r = 0,62\sqrt{f'_c} \quad (2.26)$$

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_x}{h} \quad (2.27)$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (2.28)$$

Calcule el factor de modificación β_d

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left[\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right] \quad (2.29)$$

Calcule la deflexión debido a la carga muerta más la carga viva

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (2.30)$$

$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL} \ell^2}{48E_c (I_e)_{DL+LL}} \quad (2.31)$$

Calcule la deflexión para la carga muerta y la carga viva por independiente.

$$(\Delta_i)_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} \quad (2.32)$$

$$(\Delta_i)_{LL} = \frac{w_{LL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} \quad (2.33)$$

Calcule el multiplicador para la deflexión en dependencia del tiempo usando un $\xi = 2.0$ (recomendado por ACI 318 para una duración de más de 5 años).

$$\lambda = 0,60\xi \quad (2.34)$$

Calcule la deflexión a largo plazo.

$$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda [(\Delta_i)_{DL} + 0,2(\Delta_i)_{LL}] \quad (2.35)$$

Verifique la deformación calculada contra la deformación admisible.

$$\Delta_{LT} \leq \frac{\ell}{240} \quad (2.36)$$

Paso 7: Comprobar que los niveles de tensión no sobrepasen la tensión de ruptura.

Calcule el momento debido a todas las cargas permanentes (la carga muerta más 20% de la carga viva).

$$M_s = \frac{w_{DL} + 0,20w_{LL}}{w_{DL} + w_{LL}} M_{DL+LL} \quad (2.37)$$

Calcule los niveles de tensión en las barras de PRFV.

$$f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} \quad (2.38)$$

Compare con el nivel de tensión ofrecido en la siguiente tabla para PRFV.

Tabla 2.7 Límite de nivel de tensión de ruptura en refuerzos de PRFV.

<i>Tipo de fibra</i>	<i>PRFV</i>	<i>PRFA</i>	<i>PRFC</i>
<i>Tensión de ruptura admisible, $f_{f,s}$</i>	$0,20 f_{fu}$	$0,30 f_{fu}$	$0,55 f_{fu}$

$$f_{f,s} \leq 0,20 f_{fu} \quad (2.39)$$

Conclusiones parciales del capítulo.

- Las metodologías de diseño planteadas responden a un sistema de prueba y error por lo que obtener un diseño óptimo mediante esta vía es bastante complejo.
- Se utiliza un coeficiente de reducción de la tensión de ruptura del material en dependencia de su tipo de fibra y exposición ambiental de 0,7 ó 0,8 para el PRFV que ofrece una holgura considerable con respecto a la tensión de ruptura real del material.
- Dado las propiedades del material y su asociación con un fallo frágil los parámetros de diseño con respecto al estado límite de servicio (fisuración y deformación) son muy conservadores con respecto a los del diseño tradicional.

CAPÍTULO 3 DISEÑO ESTRUCTURAL CON REFUERZO DE PRFV DE LA SUPERESTRUCTURA.

La obra se realizará sin la desactivación previa de la nave provisional existente dado que el funcionamiento de las bombas de enfriamiento debe ser continuo, este hecho dificulta la colocación de puntales por lo que se utilizará prelosas hormigón armado. Se trata de una construcción de 12,7m de luz, 13 intercolumnios de 3m y la altura de la nave es de 12m. La estructura será de muros y columnas de hormigón armado fundidos “in situ”, quedando las columnas embebidas en el muro en la mitad de su sección hasta una altura de 8m con la función de arriostre de dicho muro. Se colocarán vigas de hormigón armado prefabricado, espaciadas a 3m coincidiendo con la ubicación de las columnas, y apoyadas sobre el muro, se utilizarán prelosas prefabricadas de hormigón armado que servirán de encofrado de la losa de cubierta; encima de las mismas se colocará un completamiento de hormigón armado fundido in situ.

3.1 Aplicar la metodología de cálculo para el diseño estructural con PRFV a los elementos que componen la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.

A continuación, se expone el diseño estructural de los diferentes elementos de la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” basado en la metodología de diseño estructural con PRFV planteada en el capítulo 2.

3.1.1 Diseño estructural con refuerzo de PRFV de la losa prefabricada.

Datos:

$$f'_c = 30MPa$$

$$f_{fu}^* = 800MPa$$

$$E_f = 50\ 000MPa$$

Espesor complemento fundido “in situ” = 0,11m

Cargas de servicio:

w_{DL} = peso propio + peso del complemento fundido “in situ”

$$w_{LL} = 1 \text{ KN/m}^2$$

Peso del complemento fundido “in situ” = 2,64 kN/m^2

$$\ell = 2,8\text{m} = 2800\text{mm}$$

Paso 1: Estimación de las dimensiones de la sección transversal apropiadas para la losa.

Un valor inicial para la profundidad de la simplemente apoyada puede estimarse por la tabla 2.4.

$$h = 0,14\text{m}$$

Paso 2: Se determinará el momento de diseño utilizando el análisis de momentos aproximado.

$$w_{DL} = 6,14 \text{ kN/m} \quad (2.5)$$

Cálculo de la carga uniforme factorizada y el momento último

$$w_u = 1,4w_{DL} + 1.6w_{LL} \quad (2.6)$$

$$w_u = 1,4 \times 6,14 + 1.6 \times 1 = 10,2 \text{ kN/m}$$

$$M_u = \frac{w_u \times \ell^2}{8} = \frac{10,2 \text{ kN/m} \times (2,8\text{m})^2}{8} = 10 \text{ kNm} \quad (2.7)$$

Paso 3: Cálculo de la tensión de ruptura de diseño de las barras de PRFV.

Para obtener un factor de reducción se utiliza la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Factor reducción para los diferentes tipos de fibras según las condiciones de la exposición.

Condiciones de la exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción C_E
Hormigón no expuesto a la tierra y a la intemperie	Carbono	1
	Vidrio	0,8
	Aramida	0,9
Hormigón expuesto a la tierra y a la intemperie	Carbono	0,9
	Vidrio	0,7
	Aramida	0,8

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}^* = 0,7 \times 800 \text{MPa} = 560 \text{MPa} \quad (2.8)$$

Paso 4: Determinación del esfuerzo requerido y selección de barras.

Se asume que la sección se encuentra en tracción controlada.

Se asume barras PRFV-12 de refuerzo a tracción: $d_b = 12 \text{mm}$

$$d = h - \text{recubrimiento} - 0,5 \times d_b = 14 \text{cm} - 2 \text{cm} - 0,5 \times 1,2 \text{cm} = 11,4 \text{cm} \quad (2.48)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d = \left(\frac{0,003}{0,003 + \frac{560}{50\,000}} \right) 11,4 = 2,41 \text{cm} \quad (2.49)$$

Se utiliza la ecuación de momento para determinar el área de refuerzo requerida.

$$M_u = \phi M_{n,reqd} = \phi A_{f,reqd} f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (2.50)$$

$$A_{f,reqd} = \frac{M_u}{\phi f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)} \quad (2.51)$$

$$A_{f,reqd} = \frac{10 \times 10^6}{0,55 \times 560 \left(114 - \frac{0,85 \times 24,1}{2} \right)} = 313 \text{ mm}^2 = 3,13 \text{ cm}^2$$

Comprobar si: $A_{f,reqd} \geq A_{f,min}$ (2.52)

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414 E_s}{f_{fu} E_f} \leq 0,0036 \quad (2.53)$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0018 \times \frac{414 \times 200\,000}{560 \times 50\,000} \leq 0,0036$$

$$\rho_{f,ts} = 0,0014 \leq 0,0053 \leq 0,0036$$

Por tanto $\rho_{f,ts} = 0,0036$

$$A_{f,min} = \rho_{f,min} bh = 0,0036 \times 1000 \times 140 = 504 \text{ mm}^2 = 5,04 \text{ cm}^2 \quad (2.54)$$

$A_{f,reqd} \geq A_{f,min}$ esta condición no se cumple por tanto utilizamos $A_{f,min}$

Se seleccionan como refuerzo principal barras $\emptyset 12 \text{ mm} @ 200 \text{ mm}$ ($A_f = 565 \text{ mm}^2 / \text{m}$).

Verificar si presenta la supuesta conducta de tracción controlada.

$$\rho_{fb} = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.9)$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \times 0,85 \times \frac{30}{560} \times \frac{50\,000 \times 0,003}{50\,000 \times 0,003 + 560} = 0,0082$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{565}{1000 \times 114} = 0,0050 \quad (2.10)$$

Paso 5: Chequeo del agrietamiento.

Calculo del nivel de tensión en las barras de PRFV bajo la acción de la carga muerta más la carga viva.

$$M_{DL} = \frac{w_{DL}\ell^2}{8} = \frac{6,14 \times 2,8^2}{8} = 6,02kNm \quad (2.15)$$

$$M_{LL} = \frac{w_{LL}\ell^2}{8} = \frac{1 \times 2,8^2}{8} = 1kNm \quad (2.16)$$

$$M_{DL+LL} = M_{DL} + M_{LL} = 6,02 + 1 = 7,02kNm \quad (2.17)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4750\sqrt{f'_c}} = \frac{50\,000}{4750\sqrt{30}} = 1,92 \quad (2.18)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2.19)$$

$$k = \sqrt{2 \times 0,0050 \times 1,9 + (0,0050 \times 1,9)^2} - 0,0050 \times 1,9 = 0,129$$

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} = \frac{7,02 \times 10^6}{565 \times 114 \left(1 - \frac{0,129}{3}\right)} = 113,88MPa \quad (2.20)$$

Se determina el gradiente de tensión utilizado para transformar los niveles de tensión del refuerzo cercano a la superficie donde se espera el agrietamiento.

$$\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)} = \frac{140 - 0,129 \times 114}{114(1 - 0,129)} = 1,26 \quad (2.21)$$

Cálculo de la distancia entre fibra de tensión extrema del hormigón al centroide del refuerzo a tracción.

$$d_c = h - d = 140 - 114 = 26mm \quad (2.22)$$

Comparación del ancho de grieta mediante la ecuación (2.24) usando un valor recomendado de $kb = 1.4$ para las barras de PRFV deformadas.

Tabla 2.6 Ancho de grieta máximo para elementos sometidos a flexión reforzados con PRFV.

Ancho de grieta máxima para elementos exteriores	0,5mm
Ancho de grieta máxima para elementos interiores	0,7mm

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.24)$$

$$w = 2 \times \frac{113,88}{50000} \times 1,26 \times 1,4 \times \sqrt{26^2 + \left(\frac{200}{2}\right)^2} = 0,63mm$$

Dado que el ancho de grieta obtenido es mayor que el permisible, se decide aumentar la cuantía de refuerzo de PRFV, por lo cual se va a seleccionar un nuevo espaciamiento retomando el procedimiento desde este punto del paso 4.

Se seleccionan como refuerzo principal barras $\emptyset 12mm @ 150mm$ ($A_f = 753,6 \frac{mm^2}{m}$).

Verificar si presenta la supuesta conducta de tracción controlada.

$$\rho_{fb} = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.9)$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \times 0,85 \times \frac{30}{560} \times \frac{50\,000 \times 0,003}{50\,000 \times 0,003 + 560} = 0,0082$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{753,6}{1000 \times 114} = 0,0066 \quad (2.10)$$

$\rho_f \leq \rho_{fb}$ se encuentra en la condición de tracción controlada.

Paso 5: Chequeo del agrietamiento.

Cálculo del nivel de tensión en las barras de PRFV bajo la acción de la carga muerta más la carga viva.

$$M_{DL} = \frac{w_{DL}\ell^2}{8} = \frac{6,14 \times 2,8^2}{8} = 6,02 \text{ kNm} \quad (2.15)$$

$$M_{LL} = \frac{w_{LL}\ell^2}{8} = \frac{1 \times 2,8^2}{8} = 1 \text{ kNm} \quad (2.16)$$

$$M_{DL+LL} = M_{DL} + M_{LL} = 6,02 + 1 = 7,02 \text{ kNm} \quad (2.17)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4750\sqrt{f'_c}} = \frac{50\,000}{4750\sqrt{30}} = 1,92 \quad (2.18)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2.19)$$

$$k = \sqrt{2 \times 0,0066 \times 1,92 + (0,0066 \times 1,92)^2} - 0,0066 \times 1,92 = 0,147$$

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} = \frac{7,02 \times 10^6}{753,6 \times 114 \left(1 - \frac{0,147}{3}\right)} = 85,92 \text{ MPa} \quad (2.20)$$

Se determina el gradiente de tensión utilizado para transformar los niveles de tensión del refuerzo cercano a la superficie donde se espera el agrietamiento.

$$\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)} = \frac{140 - 0,147 \times 114}{114(1 - 0,147)} = 1,24 \quad (2.21)$$

Cálculo de la distancia entre fibra de tensión extrema del hormigón al centroide del refuerzo a tracción.

$$d_c = h - d = 140 - 114 = 26 \text{ mm} \quad (2.22)$$

Comparación del ancho de grieta mediante la ecuación (2.24) usando un valor recomendado de $k_b = 1.4$ para las barras de PRFV deformadas.

Tabla 2.6 Ancho de grieta máximo para elementos sometidos a flexión reforzados con PRFV.

Ancho de grieta máxima para elementos exteriores	0,5mm
Ancho de grieta máxima para elementos interiores	0,7mm

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.24)$$

$$w = 2 \times \frac{85,92}{50000} \times 1,26 \times 1,4 \times \sqrt{26^2 + \left(\frac{150}{2}\right)^2} = 0,48mm$$

$$w = 0,48 \leq 0,5 \quad \text{Cumple}$$

Paso 6: Verificar la deflexión a largo plazo de la losa

Cálculo del momento de inercia para la sección.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{1000 \times 140^3}{12} = 2,28666667 \times 10^8 mm^4 \quad (2.25)$$

Cálculo de las propiedades de la sección agrietada y el momento de fisuración.

$$f_r = 0,62 \sqrt{f'_c} = 0,62 \times \sqrt{30} = 3,4MPa \quad (2.26)$$

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_x}{h} = \frac{2 \times 3,4 \times 2,28666667 \times 10^8}{140} = 11,1kNm \quad (2.27)$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (2.28)$$

$$I_{cr} = \frac{1000 \times 114^3}{3} \times 0,147^3 + 1,92 \times 753,6 \times 114^2 \times (1 - 0,147)^2$$

$$I_{cr} = 1,52507289 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

Cálculo del factor de modificación β_d

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left[\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right] = \frac{1}{5} \left[\frac{0,0066}{0,0082} \right] = 0,16 \quad (2.29)$$

Cálculo de la deflexión debido a la carga muerta más la carga viva

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (2.30)$$

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{11,1}{7,02} \right)^3 \times 0,16 \times 2,28666667 \times 10^8 + \left[1 - \left(\frac{11,1}{7,02} \right)^3 \right] \times 1,52507289 \times 10^7$$

$$(I_e)_{DL+LL} = 9,95976696 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL} \ell^2}{48E_c (I_e)_{DL+LL}} \quad (2.31)$$

$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5 \times 7,02 \times 10^6 \times 2800^2}{48 \times 4750 \sqrt{30} \times 9,95976696 \times 10^7} = 2,21 \text{ mm}$$

Cálculo de la deflexión para la carga muerta y la carga viva por independiente.

$$(\Delta_i)_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{6,14}{7,14} \times 2,21 = 1,9 \text{ mm} \quad (2.32)$$

$$(\Delta_i)_{LL} = \frac{w_{LL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{1}{7,14} \times 2,21 = 0,31 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Cálculo del multiplicador para la deflexión en dependencia del tiempo usando un $\xi = 2.0$ (recomendado por ACI 318 para una duración de más de 5 años).

$$\lambda = 0,60\xi = 1,2 \quad (2.34)$$

Cálculo de la deflexión a largo plazo.

$$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda [(\Delta_i)_{DL} + 0,2(\Delta_i)_{LL}] \quad (2.35)$$

$$\Delta_{LT} = 0,31 + 1,2[1,9 + 0,2 \times 0,31] = 2,66mm$$

Chequeo de la deformación calculada contra la deformación admisible.

$$\Delta_{LT} \leq \frac{\ell}{240} \quad (2.36)$$

$$2,66mm \leq 11,7mm \text{ Cumple}$$

Paso 7: Comprobación de los niveles de tensión no sobrepasen la tensión de ruptura.

Calculo del momento debido a todas las cargas permanentes (la carga muerta más 20% de la carga viva).

$$M_s = \frac{w_{DL} + 0,20w_{LL}}{w_{DL} + w_{LL}} M_{DL+LL} = \frac{6,14 + 0,2 \times 1}{7,14} \times 7,02 = 6,23kNm \quad (2.37)$$

Calculo de los niveles de tensión en las barras de PRFV.

$$f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} = \frac{6,23}{753,6 \times 114 \times \left(1 - \frac{0,147}{3}\right)} = 76,25MPa \quad (2.38)$$

Comparación con el nivel de tensión ofrecido en la siguiente tabla para PRFV.

Tabla 2.7 Límite de nivel de tensión de ruptura en refuerzos de PRFV.

Tipo de fibra	PRFV	PRFA	PRFC
---------------	------	------	------

Tensión de ruptura admisible, $f_{f,s}$	$0,20 f_{fu}$	$0,30 f_{fu}$	$0,55 f_{fu}$
---	---------------	---------------	---------------

$$f_{f,s} = 76,25MPa \leq 0,20 f_{fu} = 112MPa \quad \text{Cumple.} \quad (2.39)$$

Para ver planos del diseño ver Anexo 3

3.1.2 Diseño estructural con refuerzo de PRFV de la viga prefabricada.

Datos:

$$f'_c = 35MPa$$

$$f^*_{fu} = 800MPa$$

$$E_f = 50\,000MPa$$

Espesor complemento fundido “in situ” = 0,11m

Cargas de servicio:

w_{DL} = peso propio + peso de la prelosa + peso del complemento fundido “in situ”

$$w_{LL} = 1 \text{ KN/m}^2$$

Peso del complemento fundido “in situ” = $2,64 \text{ kN/m}^2$

peso de la prelosa = $3,5 \text{ kN/m}^2$

$$\ell = 12,26m$$

Paso 1: Estimación de las dimensiones de la sección transversal apropiadas para la viga.

Un valor inicial para la profundidad de la viga de reforzada simplemente apoyada puede estimarse por la tabla 2.4.

$$h = 1,2m$$

$$d = h - \text{recubrimiento} - d_{b,\text{cortante}} - 0,5 \times d_b = 1200 - 38,4 - 10 - \frac{24}{2} = 1139,6mm \quad (2.4)$$

Paso 2: Cálculo del momento de diseño utilizando el análisis de momentos aproximado.

$$w_{DL} = w_{SDL} + w_{SW} = 30,42 \text{ kN/m} \quad (2.5)$$

Cálculo de la carga uniforme factorizada y el momento último

$$w_u = 1,4w_{DL} + 1,6w_{LL} = 1,4 \times 30,42 + 1,6 \times 1 \times 3 = 47,39 \text{ kN/m} \quad (2.6)$$

$$M_u = \frac{w_u \times \ell^2}{8} = \frac{47,39 \times 12,26^2}{8} = 890,38 \text{ kNm} \quad (2.7)$$

Paso 3: Cálculo de la tensión de ruptura de diseño de las barras de PRFV.

Para obtener un factor de reducción se utiliza la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Factor reducción para los diferentes tipos de fibras según las condiciones de la exposición.

<i>Condiciones de la exposición</i>	<i>Tipo de fibra</i>	<i>Factor de reducción C_E</i>
<i>Hormigón no expuesto a la tierra y a la intemperie</i>	<i>Carbono</i>	1
	<i>Vidrio</i>	0,8
	<i>Aramida</i>	0,9
<i>Hormigón expuesto a la tierra y a la intemperie</i>	<i>Carbono</i>	0,9
	<i>Vidrio</i>	0,7
	<i>Aramida</i>	0,8

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}^* = 0,8 \times 800 = 640 \text{ MPa} \quad (2.8)$$

Paso 4: Definición del área de barras de PRFV requerido para los esfuerzos a flexión

Se asume 10 barras Ø24mm ($A_f = 4521,6mm^2$)

Cálculo de la proporción equilibrada de refuerzo de PRFV.

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0,85^2 \times \frac{35}{640} \times \frac{50\,000 \times 0,003}{50\,000 \times 0,003 + 640} = 0,0075 \quad (2.9)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{4521,6}{400 \times 1139,6} = 0,0099 \quad (2.10)$$

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \quad (2.11)$$

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(50\,000 \times 0,003)^2}{4} + \frac{0,85^2 \times 35}{0,0099} \times 50\,000 \times 0,003} - 75 \right] = 548,51 MPa$$

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (2.12)$$

$$M_n = 0,0099 \times 548,51 \times \left(1 - 0,59 \frac{0,0099 \times 548,51}{35} \right) \times 400 \times 1139,6^2 = 2562,7 kNm$$

Cálculo del factor de reducción de fuerza.

$$\phi = 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \quad \text{para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \quad \phi = 0,3 + 0,25 \frac{0,0099}{0,0075} = 0,63$$

Se verifica que:

$$1614,5 kNm = \phi M_n \geq M_u = 890,38 kNm \quad (2.14)$$

Cumple

Paso 5: Chequeo del agrietamiento.

Calculo del nivel de tensión en las barras de PRFV bajo la acción de la carga muerta más la carga viva.

$$M_{DL} = \frac{w_{DL}\ell^2}{8} = \frac{30,42 \times 12,26^2}{8} = 571,54kNm \quad (2.15)$$

$$M_{LL} = \frac{w_{LL}\ell^2}{8} = \frac{3 \times 12,26^2}{8} = 56,37kNm \quad (2.16)$$

$$M_{DL+LL} = M_{DL} + M_{LL} = 571,54 + 56,37 = 627,91kNm \quad (2.17)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4750\sqrt{f'_c}} = \frac{50\,000}{4750\sqrt{35}} = 1,78 \quad (2.18)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = \sqrt{2 \times 0,017622 + (0,017622)^2} - 0,017622 = 0,17 \quad (2.19)$$

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} = \frac{627,91 \times 10^6}{4521,6 \times 1139,6 \times \left(1 - \frac{0,17}{3}\right)} = 129,14MPa \quad (2.20)$$

Cálculo del gradiente de tensión utilizado para transformar los niveles de tensión del refuerzo cercano a la superficie donde se espera el agrietamiento.

$$\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)} = \frac{1200 - 0,17 \times 1139,6}{1139,6(1 - 0,17)} = 1,06 \quad (2.21)$$

Cálculo de la distancia entre fibra de tensión extrema del hormigón al centroide del refuerzo a tracción.

$$d_c = h - d = 1200 - 1139,6 = 60,4mm \quad (2.22)$$

Cálculo del espaciamiento entre barras.

$$s = \frac{b - 2d_c}{(\# \text{ de barras}) - 1} = \frac{400 - 2 \times 60,4}{9} = 31mm \quad (2.23)$$

Comparación del ancho de grieta mediante la ecuación (2.24) usando un valor recomendado de $k_b = 1.4$ para las barras de PRFV deformadas.

Tabla 2.6 Ancho de grieta máxima para elementos sometidos a flexión reforzados con PRFV.

Ancho de grieta máxima para elementos exteriores	0,5mm
Ancho de grieta máxima para elementos interiores	0,7mm

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.24)$$

$$w = 2 \times \frac{129,14}{50\,000} \times 0,85 \times 1,4 \sqrt{60,4^2 + \left(\frac{31}{2}\right)^2} = 0,38\text{mm} \quad \text{Cumple}$$

Paso 6: Verificación de la deflexión a largo plazo de la viga

Cálculo del momento de inercia para la sección.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{400 \times 1200^3}{12} = 5,76 \times 10^{10} \text{mm}^4 \quad (2.25)$$

Cálculo de las propiedades de la sección agrietada y el momento crítico.

$$f_r = 0,62 \sqrt{f'_c} = 0,62 \times \sqrt{35} = 3,67 \text{MPa} \quad (2.26)$$

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_x}{h} = \frac{2 \times 3,67 \times 5,76 \times 10^{10}}{1200} = 352,32 \text{kNm} \quad (2.27)$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (2.28)$$

$$I_{cr} = \frac{400 \times 1139,6^3}{3} \times 0,17^3 + 1,78 \times 4521,6 \times 1139,6^2 \times (1 - 0,17)^2$$

$$I_{cr} = 8,17 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

Cálculo del factor de modificación β_d

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left[\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right] = \frac{1}{5} \times \left[\frac{0,0099}{0,0075} \right] = 0,264 \quad (2.29)$$

Cálculo de la deflexión debido a la carga muerta más la carga viva

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_x + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (2.30)$$

$$(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{352,32}{627,91} \right)^3 \times 0,264 \times 5,76 \times 10^{10} + \left[1 - \left(\frac{352,32}{627,91} \right)^3 \right] \times 8,17 \times 10^9 = 9,413 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL}\ell^2}{48E_c(I_e)_{DL+LL}} = \frac{5 \times 627,91 \times 10^6 \times 12260^2}{48 \times 4750 \times \sqrt{35} \times 9,413 \times 10^9} = 37,17 \text{ mm} \quad (2.31)$$

Cálculo de la deflexión para la carga muerta y la carga viva por independiente.

$$(\Delta_i)_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{30,42}{33,42} \times 37,17 = 33,83 \text{ mm} \quad (2.32)$$

$$(\Delta_i)_{LL} = \frac{w_{LL}}{w_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{3}{33,42} \times 37,17 = 3,34 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Cálculo del multiplicador para la deflexión en dependencia del tiempo usando un $\xi = 2.0$ (recomendado por ACI 318 para una duración de más de 5 años).

$$\lambda = 0,60\xi = 0,6 \times 2 = 1,2 \quad (2.34)$$

Cálculo de la deflexión a largo plazo.

$$\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda [(\Delta_i)_{DL} + 0,2(\Delta_i)_{LL}] \quad (2.35)$$

$$\Delta_{LT} = 3,34 + 1,2 \times [33,83 + 0,2 \times 3,34] = 44,74 \text{ mm}$$

Comprobación de la deformación calculada contra la deformación admisible.

$$44,74 \text{ mm} = \Delta_{LT} \leq \frac{\ell}{240} = \frac{12260}{240} = 51,08 \text{ mm} \quad (2.36)$$

Paso 7: Comprobación de los niveles de tensión.

Calculo del momento debido a todas las cargas permanentes (la carga muerta más 20% de la carga viva).

$$M_s = \frac{w_{DL} + 0,20w_{LL}}{w_{DL} + w_{LL}} M_{DL+LL} = \frac{30,42 + 0,2 \times 3}{33,42} \times 627,91 = 582,82 \text{ kNm} \quad (2.37)$$

Calculo de los niveles de tensión en las barras de PRFV.

$$f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f d \left(1 - \frac{k}{3}\right)} = \frac{582,82 \times 10^6}{4521,6 \times 1139,6 \times \left(1 - \frac{0,17}{3}\right)} = 119,92 \text{ MPa} \quad (2.38)$$

Comparación con el nivel de tensión ofrecido en la siguiente tabla para PRFV.

Tabla 2.7 Límite de nivel de tensión de ruptura en refuerzos de PRFV.

Tipo de fibra	PRFV	PRFA	PRFC
Tensión de ruptura admisible, $f_{f,s}$	0,20 f_{fu}	0,30 f_{fu}	0,55 f_{fu}

$$119,92 \text{ MPa} = f_{f,s} \leq 0,20 f_{fu} = 0,20 \times 640 = 128 \text{ MPa} \quad (2.39)$$

Cumple

Paso 8: Diseño por cortante.

Determinación de la demanda de refuerzo a cortante a una distancia d del apoyo.

$$V_u = \frac{w_u \ell}{2} - w_u d = \frac{47,39 \times 12,26}{2} - 47,39 \times 1,1396 = 236,5 \text{ kN} \quad (2.40)$$

Cálculo de la contribución a cortante del hormigón para un miembro reforzado con PRFV.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c = \frac{2}{5} \times \sqrt{35} \times 400 \times 0,17 \times 1139,6 = 183,4 \text{ kN} \quad (2.41)$$

Para determinar la cantidad de refuerzo a cortante de barras de PRFV es necesario determinar los niveles de tensión efectiva, estos se pueden determinar mediante la siguiente ecuación:

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{fu} \quad (2.42)$$

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{3 \times 24}{24} + 0,3 \right) 640 = 288 \text{ MPa}$$

La tensión de diseño debe cumplir la siguiente condición:

$$f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb} \quad (2.43)$$

$$f_{fv} = 200 \text{ MPa} \leq f_{fb} = 288 \text{ MPa}$$

Se utilizará para el refuerzo por cortante, barras de PRFV $\varnothing 10 \text{ mm}$ ($A_f = 78,5 \text{ mm}^2$)

$$s = \frac{f A_{fv} f_{fv} d}{(V_u - f V_c)} = \frac{0,75 \times 2 \times 78,5 \times 200 \times 1139,6}{(236500 - 0,75 \times 183400)} = 271 \text{ mm} \quad (2.44)$$

Se verifica que no se exceda el límite del espaciamiento máximo, el cual se puede determinar como $d/2$ ó 609,6mm.

$$s \leq d/2 = 1139,6/2 = 569,8mm$$

El espaciamiento máximo basado en el mínimo refuerzo a cortante se halla mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{A_{fv} f_{fv}}{0,35b_w} = \frac{2 \times 78,5 \times 200}{0,35 \times 400} = 225mm \quad (2.45)$$

$$x_m = \frac{V_u - \left(\frac{\phi V_c}{2}\right)}{w_u} = \frac{236,5 - \left(\frac{0,75 \times 183,4}{2}\right)}{47,39} = 3,54m \quad (2.46)$$

Se instalará como refuerzo a cortante, cercos $\emptyset 10mm@200mm$ hasta una distancia de 3,2m desde el apoyo.

Paso 9: Calculo de desarrollo de las barras en tracción.

Evaluar la longitud recta de anclaje de la barra más allá del punto de inflexión, o del eje del apoyo:

$$\ell \ell_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083\sqrt{f'_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (2.47)$$

$$\ell_d = \frac{1,5 \times \frac{548,51}{0,083\sqrt{35}} - 340}{13,6 + \frac{40}{24}} 24 = 2099,6mm$$

La longitud de desarrollo seleccionada por el autor es de 2100mm

Para ver planos del diseño ver Anexo 1 y 2

3.1.3 Diseño estructural del muro.

Datos:

$$f'_c = 30MPa$$

$$\ell_c = 14m = 14000mm$$

$$A_g = 36m^2$$

$$f_{fu} = 560MPa$$

$$w_{u,muro} = 345,6kN$$

Comprobación de que se cumpla la condición $\phi P_n \geq P_u$:

$$P_u = w_u \times \frac{\ell}{2} + w_{u,muro} = 47,39 \times \frac{12,26}{2} + 345,6 = 636,1kN$$

$$P_n = 0,45 \times f'_c \times A_g \times \left[1 - \left(\frac{\ell_c}{32h} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

$$P_n = 0,45 \times 30 \times 36 \times 10^6 \times \left[1 - \left(\frac{12}{32 \times 0,4} \right)^2 \right] = 58851kN$$

$$0,65 \times 58851 = 38253,15kN = \phi P_n \geq P_u = 636,1kN \quad (2.1)$$

Para determinar el refuerzo por temperatura y retracción se toman los criterios planteados por la ACI-440 en el epígrafe 10. La proporción del refuerzo por temperatura y retracción ($\rho_{f.ts}$) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{f.ts} = 0,0018 \times \frac{414E_s}{f_{fu}E_f} \quad (2.3)$$

$$\rho_{f.ts} = 0,0018 \times \frac{414 \times 200\,000}{560 \times 50\,000} = 0,0053$$

Por tanto se necesita un área de refuerzo por temperatura y retracción de 4320mm^2 por lo que se utilizarán una doble malla de PRFV $\varnothing 10$ mm espaciados a 20 cm.

Conclusiones parciales del capítulo.

- Se diseñaron los elementos estructurales de la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” utilizando como refuerzo PRFV según la metodología planteada en el capítulo 2.
- Dado los criterios de diseño por estado límite de servicio para hormigón armado con refuerzo de PRFV se obtienen grandes dimensiones de los elementos.

CONCLUSIONES

1. Los PRFV a pesar de su amplia gama de usos son principalmente recomendados en obras que se encuentran en zonas de alto nivel corrosivo, dada su alta resistencia a la corrosión.
2. La metodología de diseño con refuerzo de PRFV para elementos de hormigón sometidos principalmente a flexión responde a un procedimiento de prueba y error, que tiene como aspectos fundamentales la selección del área de refuerzo, la comprobación de que cumpla los criterios de diseño con respecto a la condición básica de diseño para el estado límite de resistencia a flexión, estados límites de fisuración y deformación, condición necesaria del fallo por fluencia y fatiga, determinar refuerzo por cortante y longitud de desarrollo.
3. Se diseñaron los elementos estructurales de la superestructura de la casa de bombas de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” utilizando como refuerzo PRFV según la metodología planteada en el presente trabajo.

RECOMENDACIONES

1. Dadas las características ambientales de Cuba y sus altos niveles de corrosión se recomienda a la EMPAI continuar en el estudio de polímeros reforzados con fibras para el desarrollo de las construcciones en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 318S-05. Requisitos de reglamento para concreto estructural. EEUU.
- ACI 318S-08. Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario. EEUU.
- ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. EEUU.
- ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. EEUU.
- ACMA 2012. Fiber reinforced polymer (FRP) composites rebar. EEUU.
- AGUIRRE, A., MEJÍA, R. (2013) Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas, *Materiales de Construcción*, 63(309), 7-38 (<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/issue/view/159>)
- ARMOTEX 2015a. Una solución frente al ataque de la corrosión en el hormigón armado. Rusia.
- ARMOTEX 2015b. Esferas de utilización. Rusia.
- ARMOTEX 2015c. Ficha técnica. Rusia.
- ARMOTEX 2015d. Normas, códigos y especificaciones de cálculo y diseño publicadas. Rusia.
- ARMOTEX 2015e. Barras de PRFV vs. barras de acero. Ventajas Rusia.
- ARMOTEX 2015f. Catalogo general. Rusia.
- ARMOTEX 2016a. Nueva tecnología para la construcción del hormigón armado, refuerzo de barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio. Rusia.
- ARMOTEX 2016b. Información técnica de las barras de PRFV. Rusia.

CANEIRO, J. A. H., RIVAS, H. W. & PÉREZ, I. D. C. D. 2015. Empleo de barras y telas de mallas de PRF como refuerzo del hormigón y el ferrocemento. Diseño estructural., La Habana, Cuba.

CIDC 2015. Documento de idoneidad técnica para productos y sistemas de construcción no tradicionales. Barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio YAROSLAVL APV. Cuba.

MATERIALS, T. Y. P. O. C. 2015. The Yaroslavl plant of composite materials.

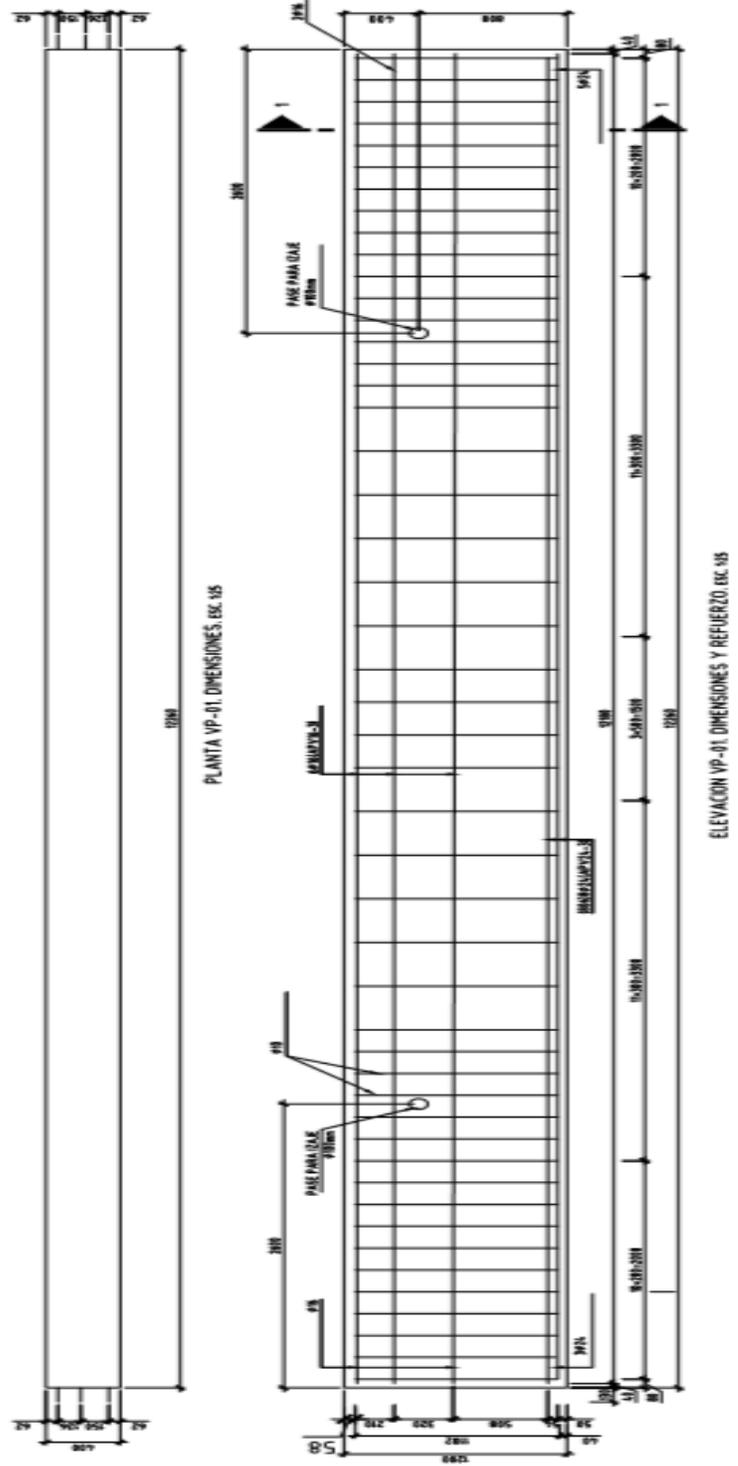
NANNY, A., LUCA, A. D. & ZADEH, H. J. 2014. Reinforced concrete with FRP bars. Mechanics and design., EEUU.

NOSTROY, S. 2.6.90-2013. Empleo de la armadura no metálica de materiales compuestos en las estructuras constructivas de hormigón y geotécnicas. Moscú, Rusia.

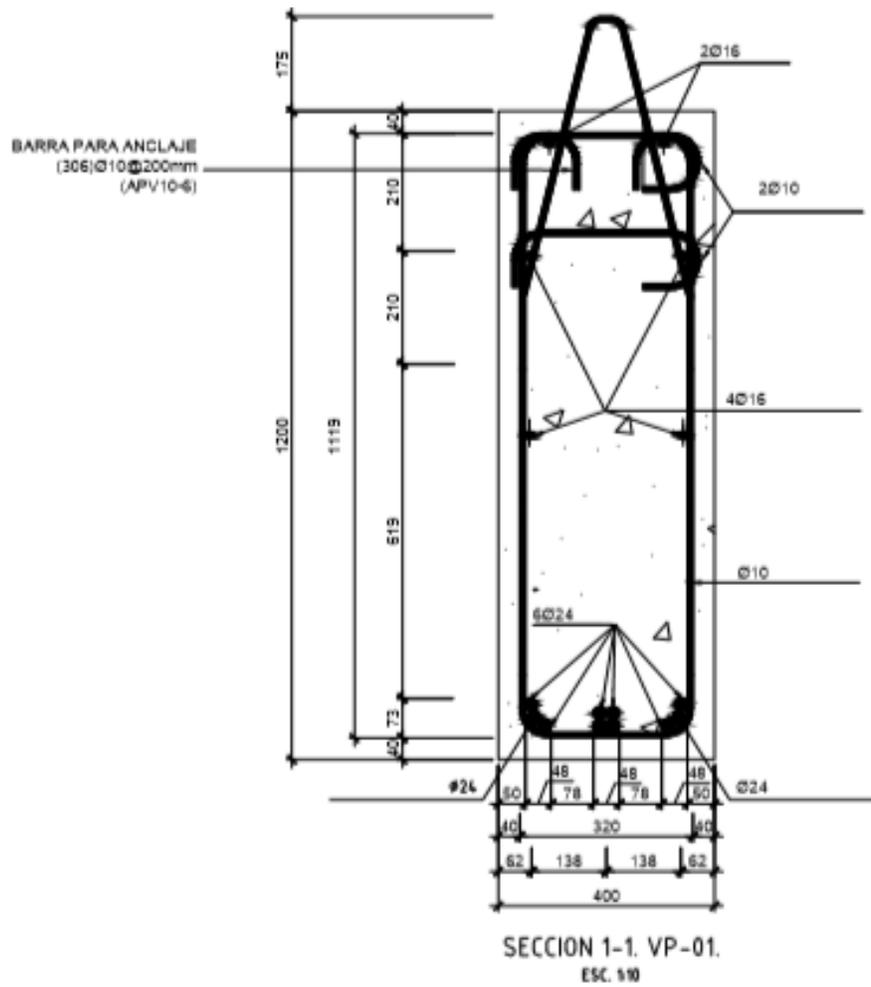
ONNCCE 2015. Dictamen de idoneidad técnica No. DIT/401.1/15. México.

ANEXOS

Anexo 1 Sección longitudinal y vista en planta de la viga prefabricada.



Anexo 2 Sección transversal de la viga prefabricada.



Anexo 3 Sección longitudinal y vista en planta de la losa prefabricada.

