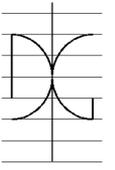




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de
Proyectos de Ingeniería Civil

Análisis de pérdidas de pretensado en vigas de hormigón
con tendones de polímeros reforzados con fibras

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

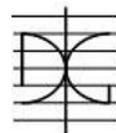
AUTOR/A: Arias Delgado, Anabel

Tutor/a: Martí Vargas, José Rocío

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DE
LA CONSTRUCCIÓN
Y DE PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO ACADÉMICO 2022/2023

Análisis de pérdidas de pretensado en
vigas de hormigón con tendones de
polímeros reforzados con fibras

Autor/a: Anabel Arias Delgado

Tutor/a: José Rocío Martí Vargas

Valencia, septiembre de 2023

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



MUIH

Resumen

El hormigón pretensado como técnica estructural tiene su origen primario en el deseo de resolver un problema concreto planteado en el hormigón armado: la fisuración. Ello se vio favorecido por otra circunstancia ligada a la tecnología de materiales: la aparición paulatina de hormigones y aceros de alta resistencia. La idea de evitar la fisuración, que siempre aparece en mayor o menor medida en el hormigón armado desde sus comienzos, condujo a pensar en el pretensado, sometiendo previamente a compresión al hormigón, mediante tesado de armaduras de acero ancladas sobre el propio hormigón. De esta forma, bajo las cargas permanentes y las de uso se podrían evitar las tracciones y, por tanto, la aparición de la fisuración del hormigón.

El gran problema de las estructuras de hormigón tanto armado como pretensado es la corrosión del acero lo que conlleva un enorme coste de mantenimiento. Ello invita a buscar un material con las mismas o mejores características resistentes que las del acero pero sin las desventajas propias del mismo, es decir, la oxidación y todo lo que ella conlleva. En este contexto es donde aparecen las barras y tendones de polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés, *Fiber Reinforced Polymer*). El uso de barras y tendones de FRP como refuerzo interno para elementos de hormigón es cada vez más popular, ya que constituyen una alternativa eficiente a la armadura pasiva y activa convencional de acero en casos en los que se quiera aumentar la durabilidad de la estructura con el fin

de incrementar la vida útil, por ejemplo, en zonas de ambientes agresivos como son las estructuras en el entorno marino, la producción química, los tableros de puentes cuando se utilizan sales de deshielo o las instalaciones de tratamiento de aguas, entre otras. Sin embargo, su elevado precio y el comportamiento elástico lineal hasta la rotura ha hecho que hasta el momento sean pocas las aplicaciones reales por lo que esta tecnología de refuerzo estructural presenta áreas que demandan mayor investigación como son el comportamiento y la resistencia a flexión de elementos de hormigón pretensado con armadura activa de FRP.

Los principales códigos nacionales e internacionales establecen una serie de prescripciones relativas a estos materiales, tanto a nivel de materiales constituyentes como de tecnología para sus aplicaciones y criterios de diseño, basados en investigaciones y experiencias previas, de las cuales todavía existen grandes campos por estudiar, como lo es el caso de las pérdidas de pretensado, la adherencia y el comportamiento de las armaduras pretensas, con elementos de hormigón pretensado de alta resistencia utilizando FRP como armadura activa.

En consecuencia, en este trabajo de investigación, el objetivo principal es analizar las pérdidas de pretensado en vigas de hormigón con tendones de diferentes tipos de FRP considerando los principales factores de influencia y de acuerdo con los resultados experimentales disponibles en la literatura.

Abstract

Prestressed concrete as a structural technique has its primary origin in the desire to solve a specific problem posed in reinforced concrete: cracking. This was favored by another circumstance linked to materials technology: the gradual appearance of high-strength concrete and steel. The idea of avoiding cracking, which always appears to a greater or lesser extent in reinforced concrete from its beginnings, led to thinking about prestressing, previously subjecting the concrete to compression, by tensioning steel reinforcements anchored to the concrete itself. In this way, under permanent and use loads, traction and, therefore, the appearance of concrete cracking could be avoided.

The big problem with both reinforced and prestressed concrete structures is the corrosion of the steel, which entails enormous maintenance costs. This invites us to look for a material with the same or better resistant characteristics than those of steel but without its own disadvantages, that is, oxidation and everything that it entails. This is where fiber reinforced polymer (FRP) bars and tendons appear. The use of FRP bars and tendons as internal reinforcement for concrete elements is increasingly popular, since they constitute an efficient alternative to conventional passive and active steel reinforcement in cases where the durability of the structure is to be increased with in order to increase the useful life, for example, in areas with aggressive environments such as structures in the marine environment, chemical production, bridge decks when de-icing salts are used

or water treatment facilities, among others. However, its high price and linear elastic behavior until failure has meant that so far there are few real applications, which is why this structural reinforcement technology presents areas that demand further research, such as the behavior and flexural resistance of elements. prestressed concrete with active FRP reinforcement.

The main national and international codes establish a series of prescriptions related to these materials, both at the level of constituent materials and technology for their applications and design criteria, based on previous research and experiences, of which there are still large fields to study, as is the case of prestress losses, adhesion and the behavior of prestressed reinforcement, with high-resistance prestressed concrete elements using FRP as active reinforcement.

Consequently, in this research work, the main objective is to analyze the prestress losses in concrete beams with tendons of different types of FRP considering the main influencing factors and in accordance with the experimental results available in the literature.

Índice general

Introducción	1
Objetivos	4
Motivación	5
Estructura	5
1. Los FRP y sus propiedades	7
1.1. Antecedentes de los FRP	8
1.2. Propiedades de los FRP	10
1.2.1. Propiedades físicas	10
1.2.1.1. Densidad	10
1.2.1.2. Coeficiente de expansión térmica	11
1.2.2. Propiedades mecánicas a corto plazo del FRP	12
1.2.2.1. Resistencia a tracción	12
1.2.2.2. Resistencia a compresión	13
1.2.2.3. Resistencia al cizallamiento	15
1.2.3. Propiedades mecánicas a largo plazo del FRP	15
1.2.3.1. Fluencia	15
1.2.3.2. Fatiga	16
1.2.3.3. Relajación	17
2. Aspectos tecnológicos de las amaduras activas de FRP	19
2.1. Tendones y anclajes de FRP	22
2.1.1. Tendones comerciales	22
2.1.2. Descripción de los tendones	26
2.2. Sistemas de anclaje	27
2.2.1. Modos de rotura de los anclajes	30
3. Pérdidas de pretensado. Consideraciones de diseño	31
3.1. Metodología de diseño	32
3.1.1. Diseño a flexión	32
3.1.1.1. Metodología de diseño por resistencia	35
3.1.1.2. Armadura mínima a flexión	37

3.1.1.3.	Tensión de tesado	38
3.1.2.	Diseño a cortante	39
3.1.2.1.	Diseño con estribos de FRP	39
3.1.2.2.	Espaciamiento de estribos	40
3.1.2.3.	Armadura mínima de cortante	41
3.2.	Factores que influyen en las pérdidas de pretensado	41
3.3.	Pérdidas instantáneas	43
3.3.1.	Asentamiento del anclaje	43
3.3.2.	Rozamiento o fricción	44
3.3.3.	Acortamiento elástico	44
3.4.	Pérdidas diferidas	46
3.4.1.	Retracción del hormigón	46
3.4.2.	Fluencia del hormigón	49
3.4.3.	Relajación de los tendones	53
4.	Pérdidas de pretensado: análisis de trabajos e investigaciones	61
4.1.	Selección de estudios	61
4.2.	Criterios de inclusión y exclusión	62
4.3.	Resultados más relevantes	62
4.3.1.	CFRP	63
4.3.2.	GFRP	68
4.3.3.	AFRP	72
4.3.4.	BFRP	74
4.4.	Análisis comparativo	78
4.4.1.	Base de datos	78
4.4.2.	Influencia de parámetros en las pérdidas de pretensado	99
4.4.2.1.	Resistencia a compresión del hormigón	100
4.4.2.2.	Diámetro de la armadura activa	101
4.4.2.3.	Módulo de elasticidad	102
4.4.2.4.	Nivel de pretensado	104
4.4.2.5.	Relajación	106
	Conclusiones y futuras líneas de investigación	111
	Referencias	126
	Anexos	127
	A. Indicadores Bibliométricos	128

Introducción

La aparición del hormigón armado se atribuye a Lambot en el sur de Francia en 1845, quien comienza a fabricar objetos en los que combina un material aglomerante de cemento Portland con acero. Pero se dice que es Joseph Monier quien crea los primeros elementos de hormigón con alambre de acero en su interior para darle mayor estabilidad, y es Monier justamente a quien se le debe la primera patente del hormigón. Al introducir barras de acero al hormigón, se observó una mejora en las propiedades mecánicas del producto obtenido, y además se constató el hecho de que en un ambiente altamente alcalino como es el caso del hormigón, el acero de refuerzo podía mantenerse en estado inerte, sin oxidarse. Todo parecía indicar que se había logrado un "material eterno" (Howland *et al.*, 2016).

Muy pronto los investigadores descubrieron que esa piedra artificial no era completamente compacta y densa, haciendo evidente en su estructura ciertos mecanismos de transporte de los agentes agresivos hacia el interior de la masa, los poros capilares. A través de estos pequeños poros podían pasar los agentes agresivos presentes en la atmósfera, llegar hasta el acero de refuerzo, despasivándolo y creando las condiciones para su corrosión (Howland *et al.*, 2016).

La corrosión es, sin duda, el principal desafío al que deben enfrentarse los profesionales y es crucial que estén conscientes de ello y le dediquen especial atención. Prevenir la

corrosión es mucho más efectivo y sencillo que tratar de solucionarla una vez que ha comenzado el proceso. Cuando un experto se encuentra con un problema de corrosión en las armaduras de una estructura de hormigón armado, explicar las razones detrás de la corrosión y ofrecer una solución adecuada puede resultar complicado debido a las múltiples variables involucradas, provenientes de diversas fuentes. Esto implica que no es un proceso fácil ni rápido en muchas ocasiones. La corrosión del refuerzo de acero es una de las principales dificultades que enfrenta el hormigón armado. Este problema afecta significativamente la durabilidad de la estructura, lo que se traduce en costosos gastos de mantenimiento y reparación a lo largo de la vida útil de la obra.

Este fenómeno también afecta a las estructuras de hormigón pretensado debido a la corrosión de los torones de acero, especialmente en entornos corrosivos como aparcamientos, puentes, estructuras marinas y traviesas de ferrocarril. La corrosión del acero se acelera en estas estructuras como resultado de la influencia de un entorno rico en cloruros (sales de deshielo, etc.). Además de los problemas relacionados con la corrosión, la pérdida de la fuerza de pretensado que puede llegar hasta el 24 % es otra preocupación importante para los miembros de hormigón pretensado, por lo que existe una amplia investigación para reemplazar los cordones de acero por tendones de polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés, *Fiber Reinforced Polymer*) según (PCI, 1975) citado por Motwani *et al.* (2021).

Ante esta situación es realmente ventajoso procurar soluciones que permitan extender la vida útil de las estructuras, incluyendo de manera especial las construidas de hormigón reforzado con barras de acero. Recientes avances en el campo de los FRP han dado lugar al desarrollo de nuevos productos con excelentes potencialidades como armado para elementos de hormigón, en reemplazo del acero tradicional. Este nuevo refuerzo, prácticamente inerte ante la corrosión alcalina y de otros muchos orígenes, es ya una

realidad en el mercado de la construcción, lo mismo en forma de barras, perfiles, telas de malla y bandas, garantizando un incremento de dos a tres veces en la vida útil de las construcciones (Caneiro y Wainshtok, 2015). La alta resistencia del refuerzo FRP no se aprovecha lo suficiente cuando se utiliza en estructuras de condiciones normales de forma similar al uso del refuerzo de acero de alta resistencia. Debido a su excelente resistencia, su bajo peso y su resistencia a la corrosión, estos materiales atrajeron la atención internacional y fueron ampliamente investigados para fortalecer, reacondicionar y pretensar estructuras (Lämmlein *et al.*, 2021). El beneficio de este enfoque para el refuerzo de FRP es aún mayor, ya que el pretensado permite compensar el módulo de Young relativamente bajo y controlar el grado de reducción de las deformaciones (Moscoso, 2022).

Desde la invención de la técnica de pretensado, el comportamiento de flexión de carga de una estructura de hormigón pretensado estuvo relacionado con el nivel de pretensado y, por lo tanto, dependía del mismo. En consecuencia, era crucial para los diseñadores e ingenieros evaluar la cantidad de pérdida de pretensado a lo largo del tiempo, lo que debía tenerse en cuenta en sus diseños (Lämmlein *et al.*, 2021). El Comité ACI 318 (American Concrete Institute, 2019b) establece que las pérdidas de pretensado tienen poco efecto en la resistencia última de diseño de elementos reforzados con acero, pero pueden afectar a las condiciones de servicio como las deflexiones y la fisuración por lo que una predicción razonable de las pérdidas es importante para garantizar un comportamiento satisfactorio de las estructuras de hormigón en servicio. La sobreestimación de la pérdida de pretensado puede conducir a demasiada fuerza de pretensado, es decir, dar lugar a una curvatura excesiva y a un diseño antieconómico (Youakim y Karbhari, 2007), mientras que si se subestiman las pérdidas de pretensado, la resistencia a tracción del hormigón puede superarse bajo cargas de servicio completas, causando agrietamiento y

deformaciones inesperadas. Por tanto es necesario que en cada caso se haga la mejor valoración posible de las pérdidas (Mirshekari *et al.*, 2016b) y (ElMahdy y Fadel, 2008).

Si bien las ventajas de los materiales compuestos en el campo de la ingeniería civil despiertan el interés de muchos, exhiben también desventajas que no deben ser ignoradas. Aún 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, al margen de su mayor durabilidad y por tanto, reducción de costos de mantenimiento, unido a una mayor vida útil de la estructura en que se emplee. Por otro lado su comportamiento elástico reduce sensiblemente la ductilidad que se espera en situaciones de colapso; al presentar 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 (menor resistencia a la compresión, y al cortante transversal); no pueden ser doblados en ángulos cerrados una vez endurecidos y se presentan dificultades tecnológicas para garantizar las uniones entre piezas (Caneiro y Wainshtok, 2015).

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal ofrecer una actualización del estado del conocimiento de las pérdidas de pretensado en vigas de hormigón con tendones de FRP.

En el marco de esta investigación y con el fin de alcanzar el objetivo principal ha resultado necesario trazarse los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estudio de la bibliografía científica relacionada con el empleo de los

FRP en el uso del hormigón pretensado.

- Exponer en una base de datos bibliográfica, los principales resultados de estudios relacionados con las pérdidas de pretensado empleando FRP.
- Valorar los resultados obtenidos y presentar las conclusiones finales.

Motivación

La ingeniería estructural ha experimentado una revolución significativa con la introducción de materiales compuestos avanzados como los FRP. Estos materiales ofrecen una serie de ventajas notables, como alta resistencia específica, durabilidad excepcional y resistencia a la corrosión. A medida que nuestra sociedad busca soluciones constructivas más sostenibles y de mayor rendimiento, se ha incrementado el interés en la aplicación de FRP en la construcción.

En este contexto surge la presente investigación sobre el análisis de pérdidas de pretensado en vigas con tendones de FRP, surge de la necesidad de comprender en profundidad cómo estos materiales influyen en el comportamiento estructural a lo largo del tiempo. A medida que las estructuras se someten a cargas y condiciones ambientales cambiantes, es crucial evaluar las pérdidas de pretensado en vigas de FRP para garantizar la seguridad, la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de estas estructuras innovadoras.

Estructura

Este trabajo ha sido estructurado en cuatro capítulos que muestran las diferentes fases en las cuales se ha basado la investigación. En el primer capítulo se describen diferentes características y propiedades de los FRP.

Posteriormente en el segundo capítulo, se describen, de forma general, los principales aspectos tecnológicos de las armaduras activas de FRP, con los principales sistemas de anclaje utilizados.

En el tercer capítulo se exponen los principales modelos, ecuaciones y criterios teóricos sobre las pérdidas de pretensado empleando FRP.

Finalmente, en el cuarto capítulo se resumen resultados de ensayos realizados por diferentes investigadores, con algunas conclusiones específicas. Además, se procesan los datos recopilados y se realizan análisis comparativos entre las diferentes investigaciones.

Por último, se brindan las conclusiones generales de la investigación y las recomendaciones para futuros trabajos.

Capítulo 1

Los FRP y sus propiedades

La corrosión de las barras de acero es una de las principales razones por las que las estructuras de hormigón armado se deterioran. Para abordar esta situación, resulta muy beneficioso buscar soluciones que prolonguen la vida útil de dichas estructuras, incluso aquellas construidas con hormigón reforzado mediante barras de acero. Recientes avances en el ámbito de los materiales FRP han llevado al desarrollo de nuevos productos con grandes capacidades como sustitutos del acero convencional en el refuerzo de elementos de hormigón. El objetivo principal de estos avances es reducir el problema de corrosión asociado a este tipo de refuerzo.

Este tipo de tendones se caracterizan por tener una alta relación resistencia/peso, una alta resistencia a la fatiga y una baja pérdida de resistencia por relajación. Además, a causa de sus propias características de material, no se corroe. Son anisótropos y prácticamente su composición determina la capacidad resistente del sistema.

Los materiales compuestos FRP presentan un comportamiento frágil, por ello, combinados con el hormigón pueden ofrecer un compuesto de altas prestaciones con un comportamiento poco dúctil. La elevada resistencia a tracción de este material y su relativo bajo módulo de elasticidad hacen pensar que la mejor forma de combinarlo con el

hormigón es mediante la técnica del pretensado.

Las barras de FRP son un material compuesto, que según la definición dada por García (2013) es “la combinación de dos o más materiales diferentes, que presentan propiedades mecánicas y físicas especiales en donde se combinan las mejores propiedades de sus componentes suprimiendo sus defectos”.

En definitiva, los FRP componen de fibras de refuerzo y una matriz polimérica. Estos materiales combinan las propiedades mecánicas superiores de las fibras de refuerzo con la flexibilidad y la resistencia del polímero, lo que resulta en un material con características únicas y especiales. Además, los FRP ofrecen la ventaja de ser moldeables y versátiles, lo que permite su adaptación a una amplia gama de aplicaciones estructurales y arquitectónicas. Por todo lo anteriormente descrito puede resumirse que los FRP son materiales compuestos que combinan fibras de refuerzo y una matriz polimérica para proporcionar propiedades mecánicas excepcionales y una mayor resistencia en comparación con otros materiales convencionales.

1.1. Antecedentes de los FRP

A nivel mundial, se destacan tres potenciales interesados en el desarrollo y aplicación de los materiales poliméricos constituidos por fibras de alta resistencia. Europa motivada por el refuerzo y rehabilitación de patrimonios históricos, América del Norte, por resolver los problemas de durabilidad causados por la armadura del acero y Japón interesado en sistemas constructivos más eficientes, refuerzo y rehabilitación de estructuras y aplicaciones no magnéticas. Los FRP están formados generalmente por fibras de alta resistencia embebidas en una matriz de resina. La función principal de las fibras de refuerzo es brindar rigidez y resistencia transmitiendo las cargas a lo largo del compuesto en una dirección y constituyen el 30-60 % del volumen total y el 50 % del peso, mientras que la

matriz polimérica (normalmente de resinas epoxi o poliésteres) tiene la función de unir las fibras y protegerlas (Moscoso, 2022).

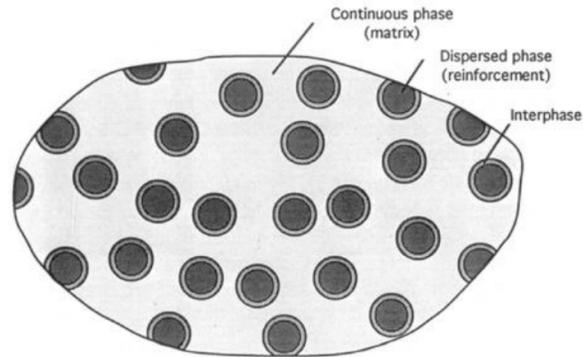


Figura 1.1: Composición básica del FRP (Moscoso, 2022).

Con respecto al proceso de fabricación de las barras el método más usual es el de la pultrusión que es un proceso productivo de conformado de materiales plásticos para obtener perfiles de plástico reforzado, de forma continua, sometiendo las materias primas a un arrastre y parado por operaciones de impregnado, conformado, curado y corte. Las fibras se utilizan en forma de hilos que viene arrolladas en bobinas. Las resinas más comúnmente utilizadas para el proceso son las epoxi, fenólica, viniléster y poliuretano (García, 2013), siendo su formulación y propiedades fisicoquímicas prácticamente ilimitadas.

Además, los materiales compuestos son heterogéneos y anisotrópicos. Las características finales del material compuesto FRP dependen de las propiedades de la fibra y la matriz, así como del proceso de fabricación.

1.2. Propiedades de los FRP

El uso de barras de refuerzo de FRP en estructuras de hormigón está fuertemente influenciado por sus propiedades físicas y mecánicas. Las barras de FRP se pueden diseñar y fabricar para satisfacer requisitos específicos de una aplicación particular. Las variables de diseño disponibles incluyen la elección de los constituyentes (fibra y matriz polimérica), las fracciones de volumen de la fibra y la matriz, la orientación de las fibras y el proceso de fabricación, ya que la calidad del material compuesto depende de la rugosidad de la superficie y de la adhesión entre el relleno y las matrices, que puede mejorarse con un tratamiento adicional (Haliza *et al.*, 2015).

Otros factores tales como los efectos dimensionales y el control de calidad durante la fabricación desempeñan un papel importante en la determinación de las características de las barras de FRP. Las propiedades de los FRP también están influenciadas por el historial de cargas, duración de la carga, temperatura y humedad.

En la actualidad, los materiales FRP más utilizados son el FRP de aramida (AFRP), el FRP de vidrio (GFRP), el FRP de basalto (BFRP) y el FRP de carbono (CFRP). Entre todos los materiales FRP, el CFRP muestra el mejor rendimiento y es el material sustituto ideal del acero, puede verse como el material técnicamente ideal para aplicaciones de pretensado (Yang *et al.*, 2018).

1.2.1. Propiedades físicas

1.2.1.1. Densidad

La densidad de un compuesto de FRP se obtiene en función a las densidades de sus constituyentes (ρ_f y ρ_m) y sus fracciones de volumen (V_f y V_m). Los subíndices f y m hacen referencia a la fibra y a la matriz polimérica respectivamente.

La Tabla 1.1 muestra densidades típicas para barras de armadura para $V_f = 0,5 - 0,75kg/m$ (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (1.1)$$

Tabla 1.1: Densidades típicas para barras de armado para $V_f = 0,5 - 0,75kg/m^3$ (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

Matriz	CFRP	AFRP	GFRP	Acero
Polyester	1430-1650	1310-1430	1750-2170	7900
Epoxy	1440-1670	1320-1450	1760-2180	
Vinylester	1440-1630	1300-1410	1730-2150	

Se observa que las masas específicas de las barras, varían de 1.3 a 1.7 g/cm , y para las barras de acero este valor es de 7.85 g/cm , por lo que se estima que en algunos casos las barras FRP con respecto a las barras de acero tienen un peso de 7 - 10 veces menor. Esto va a contribuir a una reducción de costos de transporte, manipulación del material y puesta en obra.

1.2.1.2. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica (CTE) de las barras de FRP dependen del tipo de fibra, resina y el volumen de fracción de sus constituyentes. Las matrices poliméricas y las fibras de vidrio pueden ser consideradas isotrópicas, mientras que las fibras de carbono y aramida son ortotrópicas. El CTE longitudinal (α_l) se rige por las propiedades de las fibras, mientras que el CTE transversal (α_t) está determinado principalmente por la matriz polimérica, tal y como se representa en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Coeficientes típicos de expansión térmica para el acero y materiales de FRP $V_f = 0,5 - 0,75 \text{ kg/m}^3$ (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

Dirección	Coeficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal	11.7	6.0 a 10.0	-9.0 a 0	-2.0 a 6.0
Transversal	11.7	21.0 a 23.0	74.0 a 104.0	60.0 a 80.0

1.2.2. Propiedades mecánicas a corto plazo del FRP

Las barras de FRP son fundamentalmente compuestos anisotrópicos unidireccionales y sus propiedades más importantes se presentan en la dirección de la fibra, siendo muy diferentes sus características de rigidez y resistencia en la dirección de la fibra con la dirección transversal. Las propiedades mecánicas en cualquier dirección dependen de la cantidad de fibras por volumen orientada en esa dirección (Caneiro y Wainshtok, 2015).

1.2.2.1. Resistencia a tracción

Cuando son sometidas a tracción, las barras de FRP no presentan ningún comportamiento plástico (fluencia) antes de la rotura, es decir, el comportamiento a tracción de las barras de FRP constituidas por un único tipo de material de fibra, se caracterizan por una relación tensión - deformación linealmente elástica hasta la rotura (American Concrete Institute, 2006), véase la Figura 1.2.

La resistencia a tracción y rigidez de una barra de FRP dependen de varios factores. Debido a que las fibras son el componente que soporta la carga principal, la relación entre el volumen de fibra y el volumen global (relación fibra - volumen) afecta significativamente las propiedades de tracción de una barra FRP. La velocidad de curado, el proceso de fabricación y el control de calidad de fabricación también afectan a las características mecánicas de la barra (American Concrete Institute, 2006).

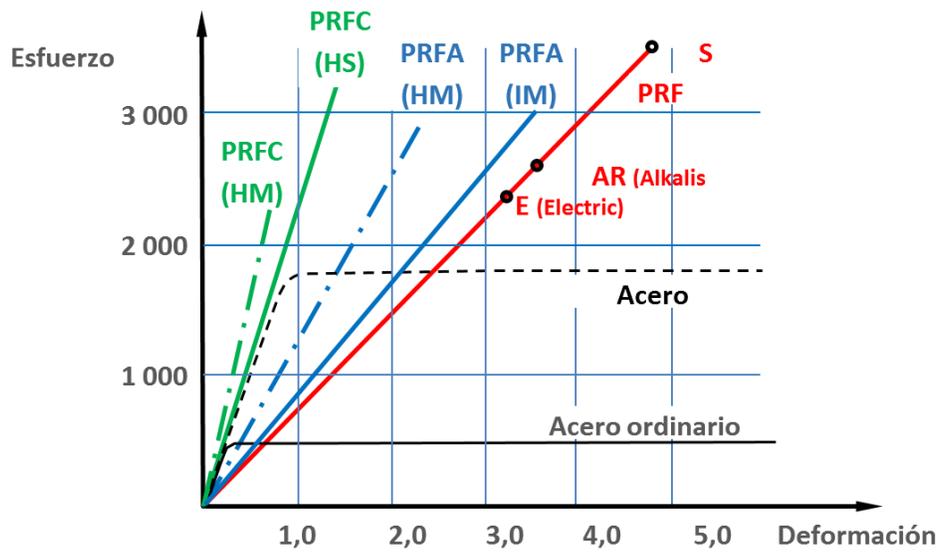


Figura 1.2: Diagramas tensión-deformación de compuestos epoxi unidireccionales en dirección de la fibra, y acero (Caneiro y Wainshtok, 2015).

1.2.2.2. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de las barras de FRP, por lo general, es mucho menor que su resistencia a tracción, siendo aproximadamente del 45 % de ésta última (Nanni *et al.*, 2014). Al ser mucho más débil ante este esfuerzo, la resistencia a compresión de las barras de FRP no es una preocupación en la mayoría de las aplicaciones, descartando su aporte al elemento estructural y restringiendo su uso como refuerzo a compresión, aunque en la actualidad se desarrollan investigaciones con el fin de optimizar y ampliar el empleo de las mismas. El módulo de elasticidad a compresión de las barras FRP es aproximadamente un 80 % del módulo de elasticidad a tracción de las mismas (American Concrete Institute, 2006), véase la Tabla 1.3.

La Tabla 1.4 muestra una comparación de las propiedades mecánicas a corto plazo tomando en cuenta las direcciones principales, longitudinal y transversal, del material.

Tabla 1.3: Propiedades típicas de FRP ($V_f = 0,5 - 0,75[kg/m^3]$) y barras de armadura de acero (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

Propiedad	Material			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Módulo longitudinal [GPa]	200	35 a 60	100 a 580	40 a 125
Resistencia longitudinal a tracción [MPa]	483 a 690	450 a 1600	600 a 3500	1000 a 2500
Deformación de tracción máxima [%]	6.0 a 12.0	1.2 a 3.7	0.5 a 1.7	1.9 a 4.4

Tabla 1.4: Propiedades mecánicas típicas a corto plazo de GFRP, CFRP y AFRP (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

Propiedad		E-glass/epoxy	Kevlar 49/epoxy	Carbono/epoxy
Fracción de volumen de fibra	-	0.55	0.60	0.65
Densidad	kg/m^3	2100	1380	1600
Módulo longitudinal	GPa	39	87	177
Módulo transversal	GPa	8.6	5.5	10.8
Módulo de cortante en el plano	GPa	3.8	2.2	7.6
Ratio de Poisson mayor	-	0.28	0.34	0.27
Ratio de Poisson menor	-	0.06	0.02	0.02
Resistencia longitudinal a tracción	MPa	1080	1280	2860
Resistencia transversal a tracción	MPa	39	30	49
Resistencia a cortante en el plano	MPa	89	49	83
Deformación longitudinal última en tracción	%	2.8	1.5	1.6
Deformación transversal última en tracción	%	0.5	0.5	0.5
Resistencia longitudinal a compresión	MPa	620	335	1875
Resistencia transversal a compresión	MPa	128	158	246

1.2.2.3. Resistencia al cizallamiento

Esta resistencia es determinada por las propiedades de la matriz y por la distribución local de las tensiones que en general es baja. Las barras de FRP pueden ser fácilmente cortadas con una sierra común en la dirección perpendicular a las fibras. El comportamiento de las barras de FRP bajo carga de corte transversal está influenciado principalmente por las propiedades de la matriz, estas son generalmente débiles en corte transversal. La resistencia al cizallamiento se puede aumentar trenzando o enrollando fibras adicionales en la dirección transversal a la longitudinal. La resistencia transversal típica al corte de las barras FRP oscila entre 30 a 50 MPa (American Concrete Institute, 2006).

1.2.3. Propiedades mecánicas a largo plazo del FRP

Las propiedades a largo plazo de los compuestos de FRP difieren significativamente de las propiedades del acero, lo que ocasiona consecuencias en el proceso de diseño, entre éstas se consideran la fluencia y la rotura por fluencia, la relajación y la fatiga.

1.2.3.1. Fluencia

Éste término se utiliza para describir la deformación progresiva del material a través del tiempo bajo una carga constante. Bajo cargas sostenidas y condiciones ambientales adversas existe la preocupación con relación a la fluencia dado que las barras o tendones pueden presentar una rotura por fluencia repentina después de un lapso. Debido a que las tensiones bajo carga sostenida aumentan las tensiones bajo cargas a corto plazo, el denominado “tiempo límite” disminuye; sin embargo los polímeros reforzados con fibra FRP por lo general empiezan una degradación del material a los 100°C por encima de la temperatura ambiente, por lo que estudios realizados comprueban que la rotura por

fluencia no ocurrirían si se mantuvieran cargas menores al 60 % de las cargas a corto plazo, siendo este un escenario común en estructuras de hormigón armado. Factores como la humedad rayos ultravioleta UV, presencia de álcalis, ciclos de hielo y deshielo podrían afectar la resistencia a fluencia (Moscoso, 2022). La Figura 1.3 muestra una curva histórica típica de deformación durante la deformación por fluencia.

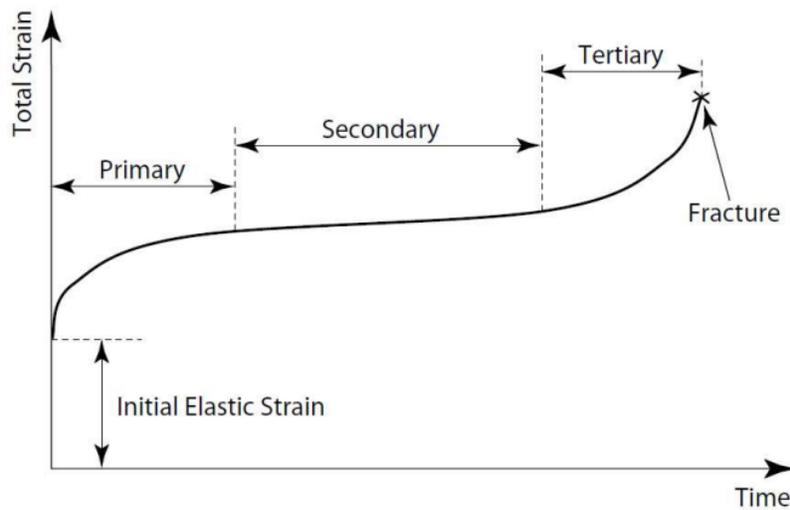


Figura 1.3: Curva histórica típica de deformación durante la deformación por fluencia (Gandarillas, 2019).

1.2.3.2. Fatiga

Se define como la degradación de la integridad del material como resultado de la aplicación repetida de un gran número de ciclos de carga. Ésta integridad se mide en términos de las propiedades mecánicas como resistencia y rigidez. Un compuesto de FRP unidireccional muestra un poco de daño justo antes de la falla, mientras que un compuesto multidireccional muestra una reducción gradual en términos de resistencia y rigidez (Gandarillas, 2019). Las armaduras de FRP presentan una resistencia a fatiga alto, a partir de estudios realizados estas barras pueden soportar más de cuatro millones

de ciclos de carga antes de iniciar la ruptura en la zona del anclaje (American Concrete Institute, 2006).

1.2.3.3. Relajación

La relajación de un material es la disminución de la tensión con el tiempo cuando el material se mantiene bajo una condición de deformación constante. El valor más común es el valor de relajación después de 1 millón de horas, que se conoce como tasa de relajación de un millón de horas (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007). En el apartado 3.2 se profundiza en este tema.

Capítulo 2

Aspectos tecnológicos de las amaduras activas de FRP

El pretensado es una técnica por la cual se introduce una precompresión a la pieza de hormigón para contrarrestar los efectos de las cargas externas, al realizar esta operación se disminuyen las tracciones que el mismo hormigón debe resistir debidas a las acciones exteriores, directas e indirectas (peso propio, sobrecargas de uso, viento, nieve, temperatura, etc.).

Los tendones de FRP destinados al pretensado pueden ser tendones individuales o agrupados en cordones. La textura de la superficie de los tendones también puede variar. A diferencia del refuerzo de acero convencional, no hay formas estándar. La configuración de la superficie, la orientación de la fibra, la constitución del material y las proporciones del producto final pueden ser definidas para cada aplicación. De la misma manera, no hay una estandarización del método de fabricación para una aplicación específica. Así, los materiales compuestos requieren un esfuerzo de ingeniería para su correcta utilización.

Los tendones FRP son fabricados, normalmente, de tres fibras básicas. Estas fibras son la aramida (AFRP: Aramid-FRP), el vidrio (GFRP: Glass-FRP) y el car-

bono (CFRP: Carbon-FRP), y recientemente se han introducido también los de basalto (BFRP: Basalt-FRP), véase la Tabla 2.1. En particular, CFRP, tiene la mayor resistencia y rigidez entre todos los FRP, por lo que puede verse como el material técnicamente ideal para aplicaciones de pretensado (Lämmlein *et al.*, 2021). Las fibras de vidrio generalmente no se recomiendan para aplicaciones de pretensado debido a la ruptura por fluencia ante una tensión sostenida baja, pero si bien es cierto que en la actualidad se han desarrollado estudios que validan el empleo de este tipo de tendón (Lou y Karavasilis, 2018). La selección de la fibra se basa principalmente en la consideración del coste, la resistencia, la rigidez y la estabilidad a largo plazo. Dentro de este grupo de fibras, hay un amplio abanico de posibilidades con la finalidad de obtener el rendimiento y las características necesarias (Puigvert, 2014).

Tabla 2.1: Identificación de la fibra, adaptado de American Concrete Institute (2004).

Tipo de fibra	Identificación
Fibra de Aramida	A
Fibra de Carbon	C
Fibra de Vidrio	G
Fibra de Basallto	B
Múltiples fibras	La primera letra indica cual es la fibra dominante (por ejemplo, CA para carbono/aramida indica que hay un mayor volumen de fibra de carbono)

Mientras que los tendones de GFRP y AFRP muestran resistencias a la tracción parecidas a la de los tendones de acero, los tendones de CFRP tienen un 20-25 % más de resistencia a la tracción que los tendones de acero. No obstante, la resistencia a corte de los tendones de material compuesto es de gran preocupación para las aplicaciones de pretensado donde el esfuerzo cortante es elevado en la zona de los anclajes.

Los módulos elásticos de los tendones GFRP y AFRP son del orden de 25-30 % de la de los tendones de acero, mientras que los tendones CFRP tienen módulos de elasticidad

del 75 al 85 % de los del acero. Según la norma ACI (American Concrete Institute, 2007), el material de fibra de carbono puede desarrollar las mismas propiedades mecánicas que el acero utilizado en las armaduras activas.

Las investigaciones realizadas hasta el momento indican que el hormigón pretensado con CFRP es una opción duradera en el diseño de estructuras para su uso en ambientes corrosivos (Mertol *et al.*, 2007). Además, por condiciones de durabilidad, fatiga y fluencia, los tendones muestran un mejor comportamiento. Por tanto, por criterios de durabilidad, los nuevos materiales de fibra de carbono resisten mejor las condiciones fisicoquímicas adversas. No obstante, aunque los materiales tienen excelentes propiedades para su uso en estructuras pretensadas, aun es necesaria la investigación en esta área. Una de las principales cuestiones es su anclaje. Debido a la gran anisotropía del material FRP, las fuerzas perpendiculares producidas por el anclaje podrían dañar el material compuesto a nivel transversal (Reda y Shrive, 2003). Es por esta razón que los sistemas convencionales de anclaje para tendones de acero no pueden ser utilizados con materiales compuestos debido a sus propiedades transversales.

El BFRP se desarrolló para aplicaciones en infraestructuras civiles como material de refuerzo estructural, y tiene una resistencia a la tracción, un módulo de elasticidad y un coste similares a los del GFRP. Por otra parte, el BFRP es más estable químicamente, tiene una gama más amplia de temperaturas de trabajo y es mucho más barato que el CFRP. Además, es duradero, resistente a las altas temperaturas, la corrosión, el ácido, la radiación, los rayos ultravioleta (UV) y la vibración; también tiene excelentes características electromagnéticas. El AFRP tiene buena resistencia al impacto, alta resistencia, alto módulo de elasticidad, la menor densidad y suficiente rigidez (Jokūbaitis y Valivonis, 2022). Además, el AFRP es suficiente para su aplicación en cordones y cables; sin embargo, tiene una baja resistencia a la compresión perpendicular a la dirección de

la fibra y una baja resistencia a largo plazo, así como un coste más elevado. El CFRP tiene la mayor resistencia de los materiales FRP y la mayor gama de resistencias, es más resistente a la rotura por fluencia y al fallo por fatiga que los demás FRP. Además, tiene una baja conductividad, un alto módulo de elasticidad y es resistente a los efectos químicos. Su mayor coste se ve compensado por su alta resistencia y su gran resistencia a los fallos cíclicos y por fatiga. El CFRP con un módulo de elasticidad ultraalto es popular en la industria aeroespacial porque su relación resistencia-peso es una de las más altas de todos los FRP, mientras que el CFRP con un módulo de elasticidad normal se utiliza en la industria de las infraestructuras.

2.1. Tendones y anclajes de FRP

Los tendones de FRP son producidos en una amplia gama de fibras, resinas, formas y tamaños como ya se ha comentado anteriormente.

2.1.1. Tendones comerciales

El resumen de las propiedades de los tendones disponibles en el mercado se muestra en la Tabla 2.2 y se basa en los datos publicados por los fabricantes. Se utilizan los nombres comerciales por claridad y perspectiva histórica, y se indican los de fibras de aramida y carbón por ser los recomendados por el American Concrete Institute (2004) para la utilización en hormigones pretensados.

Tabla 2.2: Propiedades de los tendones FRP (recopilación de varias referencias) (American Concrete Institute, 2004).

Propiedad	AFRP				CFRP	
	Arapree ®	FiBRA	Technora ®	Parafil ®	Leadline ™	CFCC
Fibra	Twaron	Kevlar49	Technora	Kevlar49	Carbon	Carbon
Resina	Epoxy	Epoxy	Vinyl ester	-	Epoxy	Epoxy
Relación de volumen de fibra	0.45	0.65	0.65	-	0.65	0.65
Densidad (g/cm ³)	1.25	1.28	1.3	1.44	1.53	1.5
Resistencia a la tracción longitudinal (GPa)	1.2 a 1.5	1.25 a 1.4	1.7 a 2.1	1.2 a 1.9	2.25 a 2.55	1.8 a 2.1
Resistencia a la tracción transversal (MPa)	-	30	-	-	57	-
Módulo longitudinal (GPa)	62 a 64	65 a 70	54	120 a 130	142 a 150	137

Continúa en la página siguiente.

Propiedad	AFRP				CFRP	
	Arapree®	FiBRA	Technora®	Parafil®	Leadline™	CFCC
Módulo transversal (GPa)	-	5.5	-	-	10.3	-
Resistencia al corte en el plano (MPa)	-	4.9	-	-	71	-
Módulo de corte en el plano (GPa)	-	2.2	-	-	7.2	-
Mayor coeficiente de Poisson	0.38	0.34 a 0.6	0.35	-	0.27	-
Menor coeficiente de Poisson	-	0.02	-	-	0.02	-
Fuerza de adherencia (MPa)	7.7	10 a 13	10 a 16	-	4 a 20	7 a 11
Tensión longitudinal máxima (%)	2.4	2.0 a 3.7	3.7 a 3.8	1.5 a 1.7	1.3 a 1.5	1.57

Continúa en la página siguiente.

Propiedad	AFRP				CFRP	
	Arapree®	FiBRA	Technora®	Parafil®	Leadline™	CFCC
Deformación transversal máxima (%)	-	-	-	-	0.6	-
Resistencia a la compresión longitudinal (MPa)	-	335	-	-	1440	-
Resistencia a la compresión transversal (MPa)	-	158	-	-	228	-
Coefficiente de dilatación térmica longitudinal (°C)	-210 ⁻⁶	-210 ⁻⁶	-310 ⁻⁶	-	-0,910 ⁻⁶	0,510 ⁻⁶
Coefficiente de dilatación térmica transversal (°C)	5010 ⁻⁶	6010 ⁻⁶	-	-	2710 ⁻⁶	2110 ⁻⁶
Relación de relajación a temperatura ambiente	11 a 14	12 a 103 h	8 a 13 hasta 103 h	6 a 9 hasta 105	2 a 3	0.5 a 1 hasta 102 h

2.1.2. Descripción de los tendones

Arapree®: es un desarrollo combinado de *AKZO Chemicals* y *Hollandsche Beton Groep* en Holanda. Consiste en fibras de aramida embebidas en una matriz de resina epoxy. Disponible en dos tipos de sección: rectangular y circular. El anclaje consiste en una manga metálica la cual es rellena con lechada o el tendón es fijado con una abrazadera entre dos cuñas.

FIBRA: producida por *Mitsui Construction Company* de Japón. Consiste en una trenza de cables de fibra seguido de una impregnación en resina epoxy y posterior curado. Las fibras usadas pueden ser de carbono o de aramida siendo esta última la más común, y el anclaje se da fundamentalmente de dos formas:

- Relleno de resina usado para un único tendón
- Anclaje de cuña usado para tendones múltiples. Formado por cuatro cuñas de acero que se introducen en una manga cónica. El interior del manguito y el exterior de las cuñas está lubricado para poder quitar el anclaje.

Technora®: Tendón de aramida desarrollado conjuntamente por *Sumitomo Construction Company* y *Teijin Corporation*, ambas japonesas. Se trata de un tendón pultrusionado en espiral cubierto por una resina de vinil ester. Utiliza anclajes tipo cuña y rellenos de resina. Los anclajes sirven para un tendón simple o para tendones múltiples (de 3 a 9).

Parafil®: *Linear Composites Limited of England* es el fabricante. No es estrictamente un FRP ya que no tiene resina que una todas las fibras que se sitúan en paralelo sino un recubrimiento exterior para mantener la forma del cable y proteger la aramida de los rayos UV a los que es susceptible. Uso en tendones externos o en tendones internos

no adheridos dentro de conductos. Tiene problemas con la alcalinidad del hormigón. Las tensiones están limitadas normalmente a 1000 MPa. El anclaje se desarrolla mediante un barril y una estaca que aprisiona las fibras. A continuación sus principales características:

- No puede ser adherido al hormigón.
- No contiene resina.
- No fue desarrollado originalmente para pretensado.

Leadline™: El fabricante es *Mitsubishi Kasei Corporation* de Japón. Son cables de carbono fabricado por pultrusión en una matriz de resina epoxy. Tiene diferentes tipos de acabado lisos y en cordón helicoidal. Utiliza un anclaje de cuñas con camisa de aluminio.

CFCC Carbon fiber composite cable: Desarrollado por *Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd.* y *Toho Rayon Co.*, ambos japoneses. Es un CFRP recubierto por resina epoxy. El recubrimiento de resina epoxy protege al tendón de los rayos UV y del daño mecánico mientras aumenta la adherencia con el hormigón.

2.2. Sistemas de anclaje

Los tendones de FRP en los procesos de pretensado son fijados mediante anclajes. Se pueden producir daños transversales en los tendones con el uso de los sistemas convencionales de anclaje utilizados para tendones de acero, debido a que los tendones de FRP se tratan de un material anisotrópico. Es así que se han desarrollado nuevos sistemas de anclaje específicos para materiales compuestos que permiten tesar los tendones hasta un 90% de su capacidad máxima resistente, antes de producirse el fallo por colapso en la zona de anclaje (Puigvert, 2014), asegurando de esta manera que el anclaje no afecte la capacidad del FRP y permita su deformación.

En función del sistema con el que se fija el tendón se pueden clasificar en dos tipos (véase la Figura 2.1):

- **Anclajes de sujeción mecánica:** se basan en la fricción entre el tendón y la superficie interna del anclaje; la superficie del anclaje no posee relieves excesivos que podrían dañar el material compuesto a diferencia de los anclajes convencionales. Sin embargo, el inconveniente que posee es que la fijación se realiza aplicando una fuerza de compresión perpendicular al tendón, lo cual debilita la matriz del FRP y produce daños que impide a los tendones desarrollar su capacidad máxima resistente. Este tipo de anclaje puede realizarse por medio de abrazaderas o cuñas (Schmidt *et al.*, 2012).
- **Anclajes de sujeción adhesiva:** consiste en un casquillo de acero de cobre en el cual se inserta el tendón y se distribuye un agente adhesivo o resina que use ambos elementos. El agente expansivo suelen ser morteros de cemento con o sin retracción, con o sin arena o expansivos con resina epoxi. Este tipo de anclaje tiene la ventaja de que pueden ser fabricados en laboratorio previo al tesado en comparación con el de sujeción mecánica lo cual incrementa la calidad y reduce la incertidumbre [13]; sin embargo, esto significa que se requiere esperar un tiempo de curado y precortado de la longitud del anclaje. En los anclajes sujeción adhesiva las fallas más comunes se dan por la excesiva deformación del material adhesivo o su ruptura. Los tipos de anclajes de sujeción adhesiva son: cilíndricos y cónicos (Puigvert, 2014).

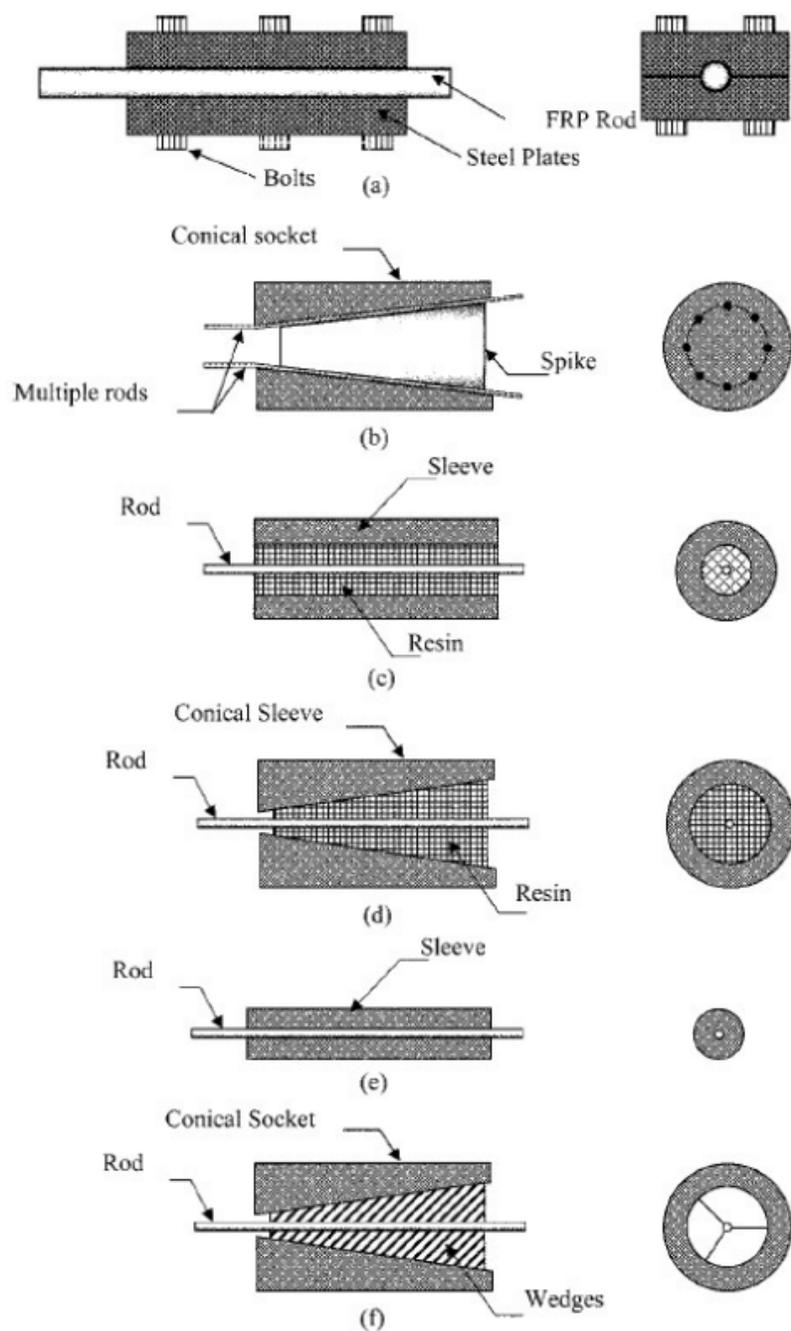


Figura 2.1: Tipos de anclaje: (a) abrazadera; (b) tapón y cono; (c) manga recta; (d) manga contorneada; (e) recubrimiento de metal; y (f) anclajes de cuña partidos (Gandarillas, 2019).

2.2.1. Modos de rotura de los anclajes

Se han observado varios modos de rotura con los anclajes en cuña y los tendones FRP, y estos se resumen separándolos en dos categorías principales: falla del sistema de anclaje y rotura del tendón (Gandarillas, 2019).

- Fallo del sistema de anclaje: este tipo de fallo se puede clasificar en cuatro modos:
 - Movimiento o deslizamiento del tendón hacia afuera del anclaje causado por una sujeción insuficiente (fuerza de corte baja) entre el tendón y el mango: se puede aumentar el agarre aumentando la fricción en las superficies de contacto, aumentando la fuerza normal aplicada, o ambas cosas.
 - Deslizamiento del manguito y el tendón juntos en relación con las cuñas: esto indica una alta fuerza de corte entre el tendón y el manguito junto con una menor fuerza de corte entre el manguito y las cuñas. Esto se puede superar de la misma manera que se menciona en 1.
 - Resbalón de las cuñas en relación con el cañón: esto rara vez ocurre, principalmente debido al diseño y la configuración geométrica de las cuñas y el cañón. A menudo se acompaña de aplastamiento del tendón.
 - Rotura de la barra dentro del anclaje: se pueden generar altas concentraciones de tensión en el tendón dentro del anclaje, lo que causa daños en las fibras. Un diseño de anclaje que produzca una baja concentración de tensión y una distribución uniforme de la carga en el anclaje supera este problema.
- Rotura del tendón fuera del anclaje: si el tendón no se rompe dentro del anclaje, entonces el anclaje no contribuye a la falla del tendón y se considera un diseño de anclaje satisfactorio.

Capítulo 3

Pérdidas de pretensado.

Consideraciones de diseño

Cuando un elemento de hormigón pretensado se somete a cargas de larga duración, los efectos de fluencia, contracción y relajación de los tendones de pretensado provocan una redistribución de tensiones en la sección, dando como resultado la pérdida de fuerza de pretensado y un aumento de la deformación a largo plazo (Páez, 2023). En el presente capítulo se exponen las principales ecuaciones y criterios teóricos sobre las pérdidas de pretensado empleando FRP. Se hace un resumen de los principales enfoques normativos (a partir del ACI, Código Modelo, EC2 y Monografías), especificando qué variables/factores consideran cada uno de ellos y señalando semejanzas/diferencias entre los diferentes modelos teóricos de pérdidas de pretensado.

3.1. Metodología de diseño

3.1.1. Diseño a flexión

La metodología del diseño estructural a flexión del hormigón pretensado con armaduras pretesas de FRP ha sido concebida similarmente a la teoría del hormigón con acero pretensado convencional.

Una viga de hormigón pretensado convencional con tendones de acero se deformará elásticamente hasta la fisuración, y luego la deflexión del elemento aumentará progresivamente a medida que los tendones se deforman en su fase plástica hasta que se produce un fallo por aplastamiento del hormigón o ruptura del tendón. Por otro lado, una viga pretensada con barras o tendones de FRP se deformará elásticamente hasta la fisuración, y luego continuará deformándose de forma lineal o casi lineal bajo carga creciente hasta que se rompa el tendón o se supere la deformación última de compresión del hormigón (American Concrete Institute, 2006), tal y como se representa en la Figura 3.1.

El comportamiento elástico lineal acompañado de un fallo frágil de los FRP puede considerarse una desventaja. Los elementos reforzados con FRP no tienen capacidad de deformación plástica debido a la falta de fluencia del reforzamiento. Por lo tanto, la ductilidad del miembro se contribuye solo al hormigón. Se define la ductilidad por Borosnyoi (2003) como, la capacidad de deformaciones plásticas antes de fallar sin reducción en la capacidad de carga.

Según (American Concrete Institute, 2006), se han identificado dos modos de rotura a flexión para vigas pretensadas con FRP:

1. Ruptura de la armadura de pretensado.
2. Aplastamiento del hormigón en compresión.

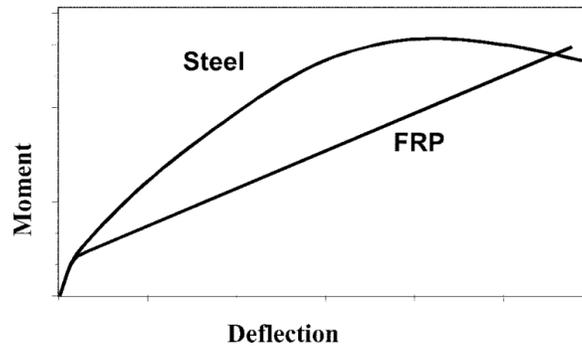


Figura 3.1: Diagrama esquemático momento - deformación (American Concrete Institute, 2006).

Estos modos de rotura dependen de la posibilidad de la sección transversal para desarrollar la suficiente capacidad de rotación que permita el esfuerzo de tracción final (tensile stress) de la armadura de FRP. Cuando la sección de hormigón tiene suficiente capacidad de rotación (suficiente área de hormigón en compresión), se produce un fallo por agotamiento a tracción del tendón. El agotamiento del FRP activo viene acompañado de una liberación de energía de deformación elástica que es parcialmente adsorbida por el hormigón, lo que provoca fisuras horizontales que derivan en el desprendimiento del recubrimiento de hormigón (Gandarillas, 2019). En la investigación desarrollada por Ehsani *et al.* (1997), se realizan unas pruebas experimentales donde se comparan la longitud de transferencia y el comportamiento de adherencia a la flexión de cinco tendones de FRP disponibles comercialmente, tres de aramida y los otros dos incluían fibras de carbono. Los cinco tendones analizados tienen un comportamiento elástico lineal hasta la rotura. Sin embargo, la probabilidad de una fractura frágil repentina del tendón FRP bajo estrés de momento nominal o condiciones de estrés localizado concentrado es alto y justifica la imposición de factores de seguridad más altos en estos materiales. En (Pavlović *et al.*, 2019b) se realizó el análisis de los modos de rotura de vigas pretensadas con tendones de BFRP, observándose una destrucción frágil, con deflexiones y grietas que progresaban

continuamente hasta la rotura, que se produjo por la ruptura de las barras de BFRP. Para aplicaciones prácticas, este problema podría abordarse de varias maneras, como el uso de refuerzo híbrido pretensado/no pretensado, monitoreo de la salud estructural, etc.

Cuando la rotura de una viga pretensada es causada por el aplastamiento del hormigón, o sea que la sección transversal tiene una capacidad de rotación insuficiente, la fisuración es menos extensa en comparación con aquellas vigas que fallan por agotamiento de los tendones. El fallo de vigas pretensadas con tendones de FRP por aplastamiento del hormigón resulta en un aumento de su ductilidad. Este comportamiento se atribuye a la rotura progresiva del hormigón en compresión (Grace y Abdei-Sayed, 1998). Diversos investigadores recomiendan, incluidas las pautas del ACI, que el modo de rotura deseado es el aplastamiento del hormigón en compresión porque es más dúctil que la ruptura de los tendones de FRP (Saeed, 2016).

En un estudio desarrollado por Abdelrahman y Rizkalla (1997), se estudió el comportamiento a flexión a través del ensayo de ocho vigas de hormigón parcialmente pretensadas con barras de CFRP y dos pretensadas con tendones de acero convencional. La comparación en el comportamiento a flexión de vigas de hormigón en condiciones similares, tanto pretensadas con FRP como con acero muestra que, en ambos casos, las vigas poseen rigideces antes de la fisuración muy similares entre sí, pero rigideces posteriores a la fisuración sensiblemente diferentes. Encontraron que las vigas pretensadas con FRP tenían una rigidez posterior a la fisuración mucho más baja, lo que daba como resultado mayores deformaciones después de la fisuración, sin embargo, la deflexión última en la viga pretensada con acero fue mucho mayor debido a la fluencia de la armadura de acero. Para concluir, encontraron que la carga final para las vigas pretensadas con CFRP fue mayor en comparación con las vigas pretensadas con acero.

En cuanto a la fisuración, Dolan *et al.* (2001) estudiaron elementos pretensados con

FRP adherente sometidos a flexión. Para estudiar los anchos de fisura se aplicaron cargas monotónicas y cíclicas. Los anchos de las fisuras eran más grandes que para las vigas pretensadas con acero de condiciones similares debido al menor módulo de elasticidad del FRP. La carga de fatiga incrementó ligeramente el ancho de la fisura. Las vigas pretensadas con CFRP dan suficiente aviso antes de la rotura. La deformabilidad de vigas postensadas con CFRP no adherente es mayor a otros tipos de vigas pretensadas con CFRP, en contraste su resistencia última es menor (Belarbi *et al.*, 2018).

3.1.1.1. Metodología de diseño por resistencia

El enfoque del diseño de la resistencia de las vigas pretensadas con FRP se basa en el concepto de cuantía balanceada (véase la Figura 3.2), que se define como la relación de armadura que simultáneamente resulta en la ruptura de los tendones y el aplastamiento del hormigón. La rotura del hormigón se toma como una deformación de compresión límite de $\varepsilon_{cu} = 0,003$. Este límite de deformación asume que no se permite el confinamiento del hormigón debido a la presencia de estribos cerrados (American Concrete Institute, 2004).

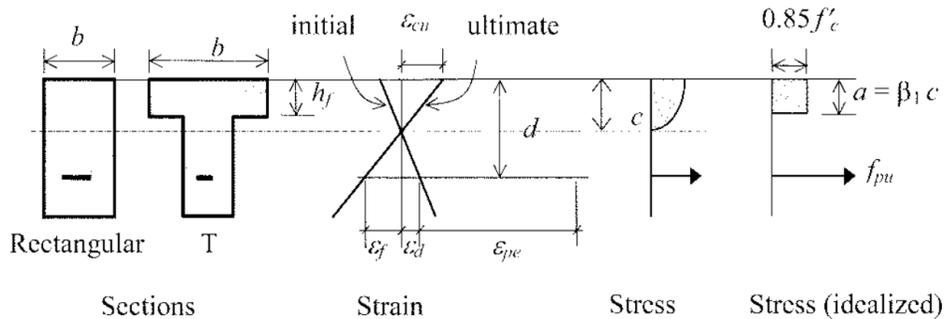


Figura 3.2: Cuantía balanceada: Condiciones de tensión y deformación (American Concrete Institute, 2004).

Se utiliza un bloque de tensiones rectangular para modelar el comportamiento del hormigón. La rotura del tendón se define como el momento en el que el tendón alcanza la

capacidad última de deformación a tracción del tendón, ε_{pu} . El comportamiento a flexión de una viga se puede describir según si la sección crítica es una sección controlada por compresión o controlada por tensión. Una condición de sección controlada por compresión ocurre cuando la relación de armadura ρ , es mayor que ρ_b , y el hormigón se aplasta sin que los tendones fallen. Cuando ρ es menor que ρ_b , se produce una condición de sección controlada por tensión como resultado de la ruptura de los tendones antes del aplastamiento del hormigón (American Concrete Institute, 2004).

- Sección por tensión controlada:

Momento nominal:

$$M_n = \rho b d^2 f_{pu} \left(1 - \frac{\rho}{1,7} \frac{f_{pu}}{f'_c}\right) \quad (3.1)$$

- Sección por compresión controlada:

$$\lambda = \frac{E_p \varepsilon_{cu}}{0,85 f'_c \beta_1} \quad (3.2)$$

Donde,

λ : constante que depende del material,

β_1 : factor que depende de la resistencia del hormigón, toma el valor de 0,85 para resistencias hasta 27,5 MPa, a partir de esta resistencia, su valor se reduce en 0,05 por cada 6,9 MPa de exceso de resistencia hasta un límite inferior de 0,65.

b : ancho de la cara de compresión del elemento, mm.

d : profundidad del tendón de FRP (distancia desde la fibra más extrema a compresión al cantroide de tensión del refuerzo), mm.

f_{pu} : resistencia última de diseño a tracción del tendón pretensado de FRP, MPa.

f'_c : resistencia del hormigón a compresión, MPa.

E_p : módulo de elasticidad del tendón pretensado, MPa.

ε_{cu} : deformación última del hormigón a compresión. ε_{pe} : deformación última del hormigón a compresión.

$$k_u = \frac{c}{d} = \sqrt{\rho\lambda + \left(\frac{\rho\lambda}{2}\left(1 - \frac{\varepsilon_{pe}}{\varepsilon_{cu}}\right)\right)^2} - \frac{\rho\lambda}{2}\left(1 - \frac{\varepsilon_{pe}}{\varepsilon_{cu}}\right) \quad (3.3)$$

Momento nominal:

$$M_n = 0,85f'_c b \beta_1 k_u d^2 \left(1 - \frac{\beta_1 k_u}{2}\right) \quad (3.4)$$

El enfoque de diseño general para los tendones de pretensado de FRP es utilizar las ecuaciones del comportamiento a flexión para establecer la cuantía de armadura que cumpla los requisitos de resistencia de la sección. Se selecciona un nivel de pretensado de 40 a 60 % de la resistencia del tendón para la fuerza de pretensado inicial y se verifican las tensiones a nivel de servicio. Si la sección es suficiente, se completa el diseño a flexión. Si no lo está, se aumenta el número o diámetro de los tendones o se ajusta el tamaño de la sección para cumplir con los requisitos de servicio, y luego se vuelve a verificar la capacidad de resistencia. La armadura de FRP no pretensada se puede utilizar para aumentar la resistencia de una sección (American Concrete Institute, 2004).

3.1.1.2. Armadura mínima a flexión

En cada sección de un elemento a flexión, la armadura mínima se considerará tal que:

$$M_r > 1,5M_{cr} \quad (3.5)$$

Donde el momento de fisuración, M_{cr} , se calcula usando el módulo de ruptura, f_r :

$$f_r = 0,6\lambda_{02}\sqrt{f'_c} \quad (3.6)$$

El efecto de la densidad del hormigón en la resistencia a la tracción y otras propiedades deben ser tomadas en cuenta por el factor λ_{02} . λ_{02} : 1,0 para hormigón de densidad normal,

λ_{02} : 0,85 para hormigón estructural de densidad media baja en el que el agregado fino es arena natural.

λ_{02} : : 0,75 para hormigón estructural de densidad media baja en el que el agregado fino no es arena natural.

Se puede aplicar interpolación lineal basada en la fracción de arena natural en la mezcla.

3.1.1.3. Tensión de tesado

En los tendones de acero la tensión típica es del 85 % de tensión de fluencia o 0,005 de deformación. La tensión permitida en los tendones de FRP está normalmente limitada del 40 al 65 % de la resistencia última debido a la limitación tensión-ruptura (Dolan *et al.*, 2001). Estas tensiones permitidas corresponden a deformaciones entre 0,008 y 0,012 o 1,5 a 2,5 veces la deformación de pretensado usada en tendones de acero.

Tabla 3.1: Tensiones recomendadas (Dolan *et al.*, 2001).

Tipo de FRP	Pretensado	Postesado
Carbon	$0,65f_{pu}$	$0,65f_{pu}$
Aramida	$0,60f_{pu}$	$0,50f_{pu}$
Vidrio	No recomendado	$0,45f_{pu}$

3.1.2. Diseño a cortante

Se deben tomar en cuenta varios problemas cuando se usa el FRP como armadura a cortante debido a las diferencias entre el FRP y el acero (Gandarillas, 2019):

- El FRP puede tener un módulo de elasticidad relativamente bajo.
- El FRP tiene una alta resistencia a la tracción y no tiene plataforma de fluencia.
- La resistencia a la tracción de la porción doblada de una barra de FRP es significativamente más baja que la porción recta.
- El FRP tiene menor resistencia por trabado o “dowel resistance” y resistencia a la tracción en cualquier dirección que no sea la de las fibras.
- Las características de adherencia de los estribos de FRP pueden variar.

3.1.2.1. Diseño con estribos de FRP

Los fallos por cortante son típicamente frágiles y deben evitarse como modo de rotura para miembros de hormigón con FRP. Se puede clasificar en dos tipos: modo de fallo por corte-tensión (controlado por la ruptura del refuerzo de corte de FRP) y modo de fallo por corte-compresión (controlado por el aplastamiento del alma de hormigón (Hassan y Tarek, 2003)).

La resistencia nominal a cortante está dada por la suma de los aportes del hormigón, los estribos y el componente vertical de la fuerza de pretensado, según se indica a continuación:

$$V_n = V_c + V_{frp} + V_p \quad (3.7)$$

Donde la resistencia a cortante del hormigón será:

$$V_c = 0,17\sqrt{f'_c}b_wd \quad [N] \quad (3.8)$$

La resistencia a cortante provista por los estribos de FRP cuando éstos están en posición vertical será:

$$V_{frp} = \frac{f_{fb}A_vd}{s} \quad (3.9)$$

$$f_{fb} = \phi_{bend}f_{fu} \quad (3.10)$$

$$\phi_{bend} = \left(0,11 + 0,05\frac{r}{d_b}\right) \quad 0,25 \leq \phi_{bend} \leq 1,0 \quad (3.11)$$

Donde r , es el radio de doblado o curvatura del estribo La tensión máxima en la armadura de FRP se limita a un valor límite inferior de 0,002 veces el módulo de elasticidad del estribo, o la resistencia de la porción doblada de los estribos $\phi_{bend}f_{fu}$ (Gandarillas, 2019).

3.1.2.2. Espaciamiento de estribos

En American Concrete Institute (2019b), Sección 11.5.4, se evita un ancho excesivo de fisura al limitar el espaciado máximo de la armadura a cortante para elementos pretensados de 0,75h o 600 mm. La separación máxima del estribo se reduce a la mitad en relación con el caso anterior cuando el valor máximo de V_{frp} es mayor a:

$$0,33\sqrt{f'_c}b_wd \quad (3.12)$$

El código canadiense (CAN/CSA-S6:19, 2019) limita la deformación de tracción en

la armadura a cortante de FRP a 0,002. Estas dos condiciones aseguran que las fisuras sean relativamente pequeñas y se distribuyan uniformemente a lo largo del elemento. Para estribos de FRP, el espaciamiento máximo debe limitarse a $d/2$ o 600 mm según para elementos no pretensados (American Concrete Institute, 2019b).

3.1.2.3. Armadura mínima de cortante

El American Concrete Institute (2019b) requiere una cantidad mínima de armadura de corte cuando V_u , la fuerza de corte factorizada en una sección excede de $V_c/2$. Este requerimiento evita el fallo a cortante en elementos donde la formación repentina de fisuras puede conducir a un agotamiento excesivo:

$$A_{v,min} = \frac{1}{16} \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{\phi_{bend} f_{fu}} \quad [mm^2] \quad (3.13)$$

3.2. Factores que influyen en las pérdidas de pretensado

La pérdida de pretensado se refiere a la disminución de la fuerza de tracción en los cables pretensados, lo cual conlleva a una reducción en la fuerza de pretensado inicial.

Los los principales códigos y normas internacionales coinciden en y definen las pérdidas de pretensado con tendones de FRP debido a los siguientes factores (American Concrete Institute, 2004), (Asociación Española de Normalización, 2020) y (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010):

- Asentamiento del anclaje en función del sistema del tendón (penetración de cuñas).
- Fluencia del hormigón.

- Retracción del hormigón.
- Acortamiento elástico.
- Relajación de los tendones.
- Rozamiento o fricción.

Adicionalmente, en el código canadiense (CAN/CSA-S806:12, 2021) se incluye también como una fuente de pérdida de pretensado los cambios de temperatura, pero para los efectos de esta investigación por ser la única norma que lo analiza de manera explícita, no se tendrá en cuenta.

La pérdida de asentamiento del anclaje es una función del sistema tendinoso. Las pérdidas debidas a la fluencia, retracción y acortamiento elástico pueden ser calculadas con métodos estándar de hormigón pretensado. Las pérdidas de pretensado de los tendones de FRP debido a estas tres causas son normalmente menores que las correspondientes pérdidas para tendones de acero debido al bajo módulo de elasticidad de los tendones de FRP. Las pérdidas debido a la relajación de los tendones son más problemáticas y menos entendidas, ya que hay pocos datos experimentales disponibles que describan perfiles de pérdida de relajación para tendones de FRP (American Concrete Institute, 2004).

Además, estas pérdidas pueden producirse instantáneamente (iniciales) o dependientes del tiempo (Asociación Española de Normalización, 2020). Las pérdidas instantáneas afectan a la fuerza de pretensado tan pronto como se transfiere al elemento de hormigón en el tiempo t_0 y pueden variar a lo largo del tendón. El Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020) y (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007) definen estas pérdidas como la diferencia entre la fuerza impuesta al tendón por el gato hidráulico P_{max} y la fuerza en el tendón inmediatamente después de la transferencia a

una distancia desde el extremo activo de la armadura $P_{m0}(x)$ como se muestra en la Figura 3.3.

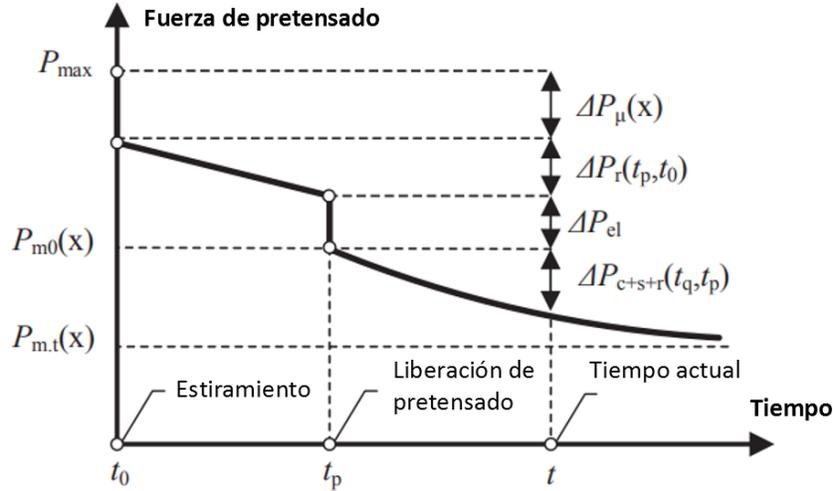


Figura 3.3: Dependencia de la fuerza de pretensado a lo largo del tiempo (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

Las pérdidas restantes se producen gradualmente con el transcurso del tiempo. Estas incluyen las pérdidas causadas por el acortamiento gradual del hormigón en el nivel de la armadura de pretensado debido a la fluencia y a la retracción y relajación de los tendones.

3.3. Pérdidas instantáneas

3.3.1. Asentamiento del anclaje

En armaduras postesas se suele emplear anclaje mediante cuñas, una vez que el gato aplica la fuerza de pretensado al tendón hay que proceder a anclar el tendón y extraer el gato, proceso que conlleva una pérdida en la fuerza de pretensado (Asociación Española de Normalización, 2020) y (American Concrete Institute, 2004).

3.3.2. Rozamiento o fricción

Las pérdidas por fricción pueden deberse a: pérdida por fricción interna del gato, pérdida por fricción de bamboleo debida a cambios no intencionados en la curvatura del pretensado, de curvatura en los conductos de pretensado, o pérdidas por fricción de curvatura debidas a la curvatura prevista de los tendones de pretensado dentro de los conductos. Estas pérdidas solo pueden afectar a las armaduras postesas

En (Asociación Española de Normalización, 2020) y (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010) se plantea que las pérdidas debidas al rozamiento se puede estimar a partir de:

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max.}(1 - e^{-\mu(\theta+kx)}) \quad (3.14)$$

Donde θ es la suma de las variaciones angulares sobre una distancia x (sin importar la dirección o signo), μ es el coeficiente de rozamiento entre las armaduras y las vainas, k es el coeficiente de rozamiento parásito (por unidad de longitud), y x es la distancia medida a lo largo de la armadura desde el punto en el cual la fuerza de pretensado es igual a $P_{max.}$ (la fuerza en el extremo activo durante el tesado). Los valores de μ y k se declaran en la documentación del sistema para los detalles particulares del tendón y se deducen de experiencias previas o pruebas con el mismo tipo de materiales y construcción, estos valores se declararán en los documentos de aprobación técnica cuando existan.

3.3.3. Acortamiento elástico

En elementos pretesos se procede a la fase de destesado cuando el cable está tesado y el hormigón endurecido y carente de tensiones, en esta fase se transmiten tensiones al hormigón. Estas tensiones provocan un acortamiento del elemento estructural debido a

que la fuerza de tesado comprime el hormigón. A su vez, el acortamiento de la viga de hormigón afecta al tendón ya que este experimenta una disminución de su longitud, lo que produce una nueva pérdida en la fuerza de tesado, denominada pérdida por acortamiento elástico. En el caso de pretensado postesado, si la tensión se transmite a la vez en todos los tendones no se produce pérdida por acortamiento elástico. En este tipo de elementos estas pérdidas aparecen en el caso de que se tensen los tendones sucesivamente (Hernández y Montes, 2007).

Como hipótesis se admite que la deformación a la altura del tendón es la misma en el hormigón que en el tendón ya que ambos se encuentran en la misma fibra, y por la hipótesis de las secciones planas, ambos tienen la misma deformación (Hernández y Montes, 2007).

Las pérdidas debidas a la deformación instantánea del hormigón, se puede suponer como una pérdida media en cada armadura activa de la manera siguiente (Asociación Española de Normalización, 2020):

$$\Delta P_{el} = A_p E_p \sum \frac{j \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \quad (3.15)$$

Donde $\Delta \sigma_c(t)$ es la variación de la tensión en el centro de gravedad de la armadura activa aplicado a una edad t , j es un coeficiente igual a $\frac{(n-1)}{2n}$ donde n es el número de armaduras activas idénticas pretensadas sucesivamente, como aproximación se puede tomar j como $1/2$

De manera similar, (Mirshekari *et al.*, 2016b) coincide con la Ecuación 3.15 y plantea que cuando los tendones pretensados se liberan, esto puede causar una deformación elástica del hormigón que puede ser calculada mediante la ecuación.

3.4. Pérdidas diferidas

Una vez anclada la armadura activa y después de haberse producido las pérdidas instantáneas, aparecen unas nuevas pérdidas a lo largo del tiempo. Estas pérdidas se deben esencialmente al acortamiento de hormigón (retracción y fluencia) y a la relajación de las armaduras activas (Asociación Española de Normalización, 2020). En dicha norma se describe un método simplificado para evaluar las pérdidas diferidas en la posición x bajo las cargas permanentes para el caso de armadura activa de acero, y no se establecen las ecuaciones para la utilización de torones de FRP. Es por ello que en lo adelante, se resumen las formulaciones dadas en otras normas internacionales.

3.4.1. Retracción del hormigón

Los modelos para predecir las deformaciones por fluencia y retracción como función del tiempo tienen el mismo principio: una curva hiperbólica que tiende a un valor asintótico llamado valor último. La forma de la curva y el valor final dependen de varios factores, tales como condiciones de curado, edad en la aplicación de la carga, dosificación de la mezcla, temperatura ambiente y humedad (American Concrete Institute, 2019a).

La retracción en el hormigón se debe principalmente al secado y al cambio químico en el hormigón. Es un fenómeno dependiente del tiempo y se contabiliza en términos de retracción por secado y formas de retracción autógena. Por tanto la retracción en el hormigón se puede definir como una disminución del volumen del hormigón, debida principalmente a la pérdida de humedad durante el secado y cambios de temperatura.

Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020):

La deformación unitaria total de retracción, de acuerdo con (Asociación Española de

Normalización, 2020) se puede determinar como:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (3.16)$$

Donde ε_{cs} es la deformación unitaria total de retracción, ε_{cd} es la deformación unitaria de retracción por secado, y ε_{ca} es la deformación unitaria autógena de retracción. La metodología para determinar dichas deformaciones se indica en el Artículo 3.1.4 de (Asociación Española de Normalización, 2020).

ACI 209R-08 (American Concrete Institute, 2019a):

Por su parte el ACI 209 (American Concrete Institute, 2019a), define la deformación por retracción $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ a la edad del hormigón t (días), medido desde el inicio del secado en t_c , mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} * \varepsilon_{shu} \quad (3.17)$$

Donde f (en días) y α se consideran constantes para una determinada forma y tamaño del elemento que definen la parte de relación de tiempo, ε_{shu} es la deformación última por retracción, y $(t - t_c)$ es el tiempo final desde el curado inicial. Para las condiciones estándar, en ausencia de condiciones específicas, datos de retracción para agregados locales y condiciones y en humedad relativa ambiente del 40%, el valor medio sugerido para la deformación última por retracción ε_{shu} , es (American Concrete Institute, 2019a):

$$\varepsilon_{shu} = 780 * 10^{-6} mm/mm \quad (3.18)$$

Model Code (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010):

De manera similar se calcula la deformación por retracción del hormigón en el Código modelo (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010), específicamente en el artículo 5.1.9.4.4. El citado modelo estima la deformación de retracción a partir de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r(t, t_s) = \varepsilon_{r,0} \beta_s(t - t_s) \quad (3.19)$$

Donde ε_r es la deformación de retracción total, $\varepsilon_{r,0}$ es la deformación a tiempo infinito, y β_s es una función que define el desarrollo a lo largo del tiempo de esta variable. Se tiene también que:

$$\varepsilon_{r,0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{hr} \quad (3.20)$$

Donde:

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - \frac{f_{cm}}{10MPa})]10^{-6} \quad (3.21)$$

$$\beta_{hr} = -1,55(1 - (\frac{hr}{100\%})^3) \quad ; \text{para } 40\% \leq h_r \leq 99\% \quad (3.22)$$

$$\beta_{hr} = +0,25; \quad \text{para } h_r \geq 99\% \quad (3.23)$$

Por otra parte, el valor de β_{sc} está determinado por el tipo de cemento aplicado, de manera que tiene un valor de 4 para cementos de fraguado lento, 5 en el caso de los cementos normales de fraguado rápido, y 8 para los cementos de rápido fraguado y alta resistencia. El valor de β_s está dado por:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{t - t_s}{350\left(\frac{h}{100mm}\right) + (t - t_s)}} \quad (3.24)$$

Se puede apreciar que la deformación por retracción, para este modelo (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010), depende del tiempo de curado, resistencia del hormigón y de la humedad relativa del ambiente, siendo un modelo adecuado para estimar la deformación debido a la retracción del hormigón de manera práctica.

Finalmente, se puede observar que las pérdidas debido a la retracción del hormigón dependen de las propiedades del hormigón y pueden limitarse mediante un diseño prudente de la mezcla de hormigón y un régimen de curado (Pavlović *et al.*, 2022).

3.4.2. Fluencia del hormigón

El hormigón sometido a cargas sostenidas muestra un aumento de la deformación con el tiempo, denominada fluencia. La fluencia se atribuye generalmente al movimiento interno del agua adsorbida, al flujo viscoso o deslizamiento entre las partículas de gel, a la pérdida de humedad y al crecimiento de microfisuras. La tasa de pérdida de pretensado debido a la fluencia del hormigón depende de los cambios en el nivel de tensión, que cambia constantemente a lo largo de la vida útil de la estructura.

Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020):

El Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020) indica un procedimiento para determinar la deformación por fluencia del hormigón ε_{cc} a edad $t = \infty$ para una tensión a compresión constante σ_c aplicada a la edad del hormigón t_0 :

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) * \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (3.25)$$

Donde φ es el coeficiente de fluencia que está relacionado con el módulo tangente del hormigón, el cual se puede tomar como $1,05E_{cm}$.

Si la tensión a compresión del hormigón a una edad t_0 es mayor que $0,45f_{ck}(t_0)$, se debería considerar una fluencia no lineal. En tales casos el coeficiente de fluencia no lineal se debería obtener como se indica a continuación (Asociación Española de Normalización, 2020):

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) * \exp[1,5(k_\sigma - 0,45)] \quad (3.26)$$

Donde $\varphi_{nl}(\infty, t_0)$ es el coeficiente de fluencia no lineal, el cual reemplaza a $\varphi(\infty, t_0)$, y k_σ es el coeficiente entre la tensión y la resistencia $\sigma_c/f_{ck}(t_0)$, donde σ_c es la tensión de compresión y $f_{ck}(t_0)$ es la resistencia a la compresión característica del hormigón en el momento de aplicación de la carga (Asociación Española de Normalización, 2020).

ACI 209R-08 (American Concrete Institute, 2019a):

El modelo para determinar la fluencia propuesto por ACI 209 (American Concrete Institute, 2019a) tiene dos componentes que determinan la asintótica y el tiempo de desarrollo de la fluencia. El parámetro determinado no es la deformación por fluencia, sino el coeficiente de fluencia $\phi(t, t_0)$ (definido como la relación entre la deformación por fluencia y la deformación inicial). Este último permite el cálculo de un valor de fluencia independiente de la carga aplicada, según se muestra en la siguiente ecuación.

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^\psi}{d + (t - t_0)^\psi} \phi_u \quad (3.27)$$

Donde $\phi(t, t_0)$ es el coeficiente de fluencia a la edad del hormigón t debido a una carga aplicada a la edad de t_0 ; d en días y ψ se consideran constantes para la forma y el tamaño de un elemento dado que definen la parte de razón de tiempo; $(t-t_0)$ es el tiempo desde la aplicación de la carga, y ϕ_u es el coeficiente de fluencia última. Para las condiciones estándar, en ausencia de condiciones específicas datos de fluencia para agregados y condiciones locales, el valor propuesto para el coeficiente ϕ_u es 2,35.

De manera similar a como se trata en el Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020), el ACI 209 (American Concrete Institute, 2019a) indica que para condiciones distintas a las condiciones estándar, se deben modificar los valores por un factor de corrección. En este caso se establece que el valor del coeficiente de fluencia última necesita ser modificado por factores de corrección, dependiendo de las condiciones particulares.

$$\phi_u = 2,35 * \gamma_c \quad (3.28)$$

$$\gamma_c = \gamma_{c,t_0} \gamma_{c,RH} \gamma_{c,vs} \gamma_{c,s} \gamma_{c,\psi} \gamma_{sh,\alpha} \quad (3.29)$$

Donde:

γ_c es el factor de corrección acumulativo,

γ_{c,t_0} , edad del factor de carga para la fluencia,

$\gamma_{c,RH}$, factor de humedad debido a la humedad relativa ambiental,

$\gamma_{c,vs}$, coeficiente de variación volumen - superficie,

$\gamma_{c,s}$, factores de corrección para la variación del asentamiento,

$\gamma_{c,\psi}$, factor agregado fino,

$\gamma_{sh,\alpha}$, factor de contenido de aire.

Estos factores de corrección se indican en el Artículo A.1.2. b) del American Concrete Institute (2019a).

Model Code (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010):

Este método es ventajoso cuando la desviación de temperatura es grande con respecto a las condiciones estándar. El método considera el efecto de la temperatura cambiando la madurez del hormigón durante el curado y después del curado. El método puede manejar el rango de temperatura de 5°C a 30°C. El efecto de la temperatura se puede incorporar finamente reduciendo los pasos de tiempo a expensas del esfuerzo computacional. El modelo asume una variación lineal de la fluencia con una tensión de hasta el 40 % de su resistencia y la tensión en el hormigón para la determinación de la fluencia está limitada al 40 % de la resistencia última.

En el caso de la fluencia según el Código Modelo (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010), el coeficiente de fluencia (φ) se estima mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi = \varphi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (3.30)$$

Donde φ_0 es el coeficiente de fluencia a tiempo infinito. De forma análoga al modelo de retracción, β_c es una función que describe cómo se desarrolla el coeficiente de fluencia a lo largo del tiempo, en comparación a su valor a tiempo infinito. El valor de φ_0 es el siguiente:

$$\varphi_0 = \varphi_{hr} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (3.31)$$

Donde:

$$\varphi_{hr} = 1 + \frac{1 + \frac{hr}{100\%}}{0,46 \frac{e}{100mm}} \quad (3.32)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\sqrt{f_{cm}/10MPa}} \quad (3.33)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0} \quad (3.34)$$

Retomando la Ecuación 3.30:

$$\beta_c(t - t_0) = \frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)} \quad (3.35)$$

Donde:

$$\beta_H = 150 \left[1 + \left(1, 2 \frac{h_r}{100\%} \right)^{18} \right] \frac{e}{100mm} + 250 \leq 1500 \quad (3.36)$$

El modelo para determinar el coeficiente de fluencia según el Código Modelo (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010) depende de variables como la humedad relativa del ambiente, la edad del hormigón en el momento de la puesta en carga y el espesor del elemento.

3.4.3. Relajación de los tendones

Según el desarrollo actual, los FRP tienen una excelente resistencia a la fluencia, pero para un tendón de pretensado, la relajación es más importante que la fluencia, ya que la relajación reduce la fuerza de pretensado disponible (Atutis *et al.*, 2018), precisamente Motwani *et al.* (2022) define la relajación como la disminución de la tensión en la barra con el tiempo bajo constante deformación.

En términos de pérdidas de tensión en los tendones de FRP, el ACI (American Con-

crete Institute, 2004) y las regulaciones europeas, ya sea el Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020) y Código Modelo (Federation Internationale du Béton (FIB), 2010), no especifican fórmulas particulares para las pérdidas de pretensado causadas por los principales tipos FRP, y los valores de relajación de tensiones propuestos en esta normativa se basan en resultados de ensayos experimentales (Atutits y Shiho, 2020). En los elementos de hormigón pretensado, la fluencia y la retracción del hormigón interactuarían con la relajación de los tendones de pretensado y esta interacción conduciría a una pérdida de tensión adicional en los tendones. Por lo tanto, al calcular la relajación de los tendones de las vigas de hormigón pretensado, habría que tener en cuenta dicha interacción de acuerdo con el cambio en la tensión del tendón debido a la fluencia y retracción del hormigón (Lou *et al.*, 2014). Las pérdidas por relajación en los tendones (REL) de FRP son una combinación de tres fuentes y puede calcularse evaluando estos tres efectos por separado (Dolan *et al.*, 2001) y (Nordin, 2005):

$$REL = REL_1 + REL_2 + REL_3 \quad (3.37)$$

- Relajación del polímero (REL_1).

Cuando el tendón está inicialmente tensionado parte de la carga recae sobre la matriz de resina, con el tiempo la matriz se relaja y se pierde esta capacidad de contribución. Esto ocurre en las primera 24 a 96 horas y puede verse acelerado por el calor de curado del hormigón.

Esta relajación puede obtenerse mediante (Mirshekari *et al.*, 2016b):

$$n_r = \frac{E_r}{E_f} \quad (3.38)$$

Donde, n_r es la relación modular de la resina, E_r es el módulo elástico de la resina,

y E_f es el módulo de la fibra.

El volumen de fibras en el tendón puede determinarse a partir de $v_f + v_r = 1, 0$, donde v_f y v_r son las fracciones de volumen de fibra y resina, respectivamente.

Por tanto, REL_1 se puede expresarse como sigue:

$$REL_1 = n_r * v_r \quad (3.39)$$

Para las resinas utilizadas en pultrusión la relación modular es aproximadamente 1,5 % para el carbón y 3 % para la aramida. El volumen de resina está entre el 35 a 40 % de la sección transversal del tendón. El total de relajación en esta primera fase es del rango del 0,6 al 1,2 % de la transferencia de tensión. Esta pérdida por relajación se puede compensar con mediante un sobretensado. El sobretensado no está recomendado debido a que la pérdida no se produce en la fibras y estas pueden quedar sobrecargadas (García, 2013).

- Enderezamiento de las fibras (REL_2).

Las fibras en secciones pultrusionadas son prácticamente paralelas. Las fibras tensionadas fluyen a través de la matriz para estirarse. Este estiramiento aparece como una pérdida por relajación. El estiramiento de las fibras depende del proceso de control de calidad de la pultrusión. Se considera entre un 1 y un 2 % la relajación por esta causa a efectos de cálculo (Mirshekari *et al.*, 2016b).

- Relajación de las fibras (REL_3).

El informe CAN/CSA-S806-02 (CAN/CSA-S806:12, 2021) indica que la relajación de la fibra depende del tipo de fibra empleado. Según este informe, a falta de información específica pueden utilizarse los siguientes valores de relajación, R (con t = tiempo en días), expresados como porcentaje de la tensión de transferencia.

- Para CFRP:

$$R(\%) = 0,231 + 0,345\log(t) \quad (3.40)$$

- Para AFRP:

$$R(\%) = 3,38 + 2,88\log(t) \quad (3.41)$$

En el caso de la aramida la relajación a largo plazo ha sido constatada entre el 6 y el 18 % en los 100 años de vida útil (García, 2013).

En el caso de las barras de refuerzo FRP, la mayoría de los códigos de diseño no permiten el uso de pretensado y, por lo tanto, las ecuaciones de relajación no están disponibles en los códigos. En tal caso, se resumen a continuación resultados de estudios diversos. En un estudio realizado Youakim y Karbhari (2007), se observa que, aplicando las ecuaciones empíricas utilizadas para predecir la pérdida de los torones de acero a los torones de FRP no puede dar resultados precisos o incluso resultados razonables en todos los casos. Por este motivo, de manera aproximada, algunos autores, como ElMahdy y Fadel (2008), proponen calcular las pérdidas debido a la relajación de los tendones de FRP a partir de diferentes expresiones, como las que se relacionan a continuación:

$$\Delta f_{pr}(t) = \frac{f_{pi}(\log t)}{k_1} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.42)$$

Donde f_{pr} es la pérdida de pretensado debida a la relajación del tendón de pretensado; t es el tiempo transcurrido desde el inicio del tensado en horas (máx. 1000 horas); f_{pi} es la tensión en el tendón de pretensado después de las pérdidas iniciales pero antes de la aparición de pérdidas dependientes del tiempo; f_{py} es la tensión de fluencia del tendón de pretensado; k_1 es un coeficiente que depende del tipo de tendón del tipo de tendón igual a 10 para el acero de relajación normal aliviado de tensiones y 45 para el acero de relajación baja aliviado de tensiones.

Otros autores como (Atutis *et al.*, 2018), plantean que deben estimarse las pérdidas de pretensado debidas a la relajación, utilizando la fórmula empírica sugerida a continuación:

$$R = (-0,067xP^2 + 0,697xP + 0,304)xln(t) + 1 \quad (3.43)$$

Donde R es la relajación en %, P el nivel de pretensado, y t el tiempo en horas.

El Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020) proporciona fórmulas para estimar la pérdida por relajación de los tendones de acero pretensado. El factor aplicado representa una pérdida por relajación de 1.000 horas (en %) que, o bien proporciona el fabricante, o bien es un valor recomendado por la norma. La relajación a largo plazo (final) puede estimarse para un tiempo de 500.000 horas. No se dispone de información sobre la pérdida por relajación de los tendones de FRP.

Además, hay investigadores como (Dolan *et al.*, 2001) que plantean que las pérdidas debida a la relajación debe basarse en datos de ensayos aprobados.

En el capítulo 4 se dan resultados de ensayos realizados por diferentes investigadores para evaluar las pérdidas debido a la relajación de los tendones.

A modo de resumen, se presenta en la Tabla 3.2 las principales ecuaciones encontradas en la literatura para determinar la relajación en tendones de FRP.

Tabla 3.2: Fórmulas de relajación para diferentes tipos de tendones.

Referencia	Ecuación	Condiciones
(Asociación Española de Normalización, 2020)	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39\rho_{1000}e^{6,7\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)}10^{-5}$	Acero, Clase 1
(Asociación Española de Normalización, 2020)	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66\rho_{1000}e^{9,1\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)}10^{-5}$	Acero, Clase 2
(Asociación Española de Normalización, 2020)	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98\rho_{1000}e^{8\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)}10^{-5}$	Acero, Clase 3
(CAN/CSA-S806:12, 2021)	$0,231 + 0,345\log(t)$	CFRP
(CAN/CSA-S806:12, 2021)	$3,38 + 2,88\log(t)$	AFRP
(Abdelrahman, 1995)	$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1,009 - \frac{\log(t)}{65,19}$	AFRP
(ElMahdy y Fadel, 2008)	$\Delta \frac{f_{pi}(\log t)}{k_1} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right)$	-
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	$(-0,067xP^2 + 0,697xP + 0,304)x\ln(t) + 1$	-
(Sen <i>et al.</i> , 1998)	$\sigma_{pr} = \frac{\sigma_{pi}}{100}[0,75\log(t24) + 1,5]$	GFRP

En Federation Internationale du Béton (FIB) (2010), se especifica el comportamiento de relajación sobre la base de las investigaciones experimentales basada en pruebas de relajación de 3000 horas. En la Tabla 3.3 se muestran los rangos de relajación de diferentes tipos de compuestos de FRP según el tipo de fibras, donde se excluyen los tendones de BFRP.

Tabla 3.3: Porcentaje de Relajación bajo cargas sostenidas en barras de FRP (Federation Internationale du Béton (FIB), 2007).

Tipo de tendón	1000 h (%)	50 años (%)
GFRP	1.8 - 2.0	4.0 - 14.0
CFRP	0.5 - 1.0	2.0 - 10.0
AFRP	5.0 - 8.0	11.0 - 25.0

Capítulo 4

Pérdidas de pretensado: análisis de trabajos e investigaciones

En este capítulo se analizan críticamente los estudios e investigaciones revisadas, resaltando las similitudes y diferencias claves entre ellos en relación con las pérdidas de pretensado en vigas empleando tendones de FRP.

4.1. Selección de estudios

La selección de estudios para esta revisión bibliográfica se basó en criterios específicos con el propósito de identificar investigaciones relevantes y actualizadas sobre el análisis de pérdidas en vigas pretensadas utilizando tendones de FRP. Se llevaron a cabo búsquedas exhaustivas en bases de datos académicas como Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, Redalyc, Scielo, Google Scholar, etc. Las palabras clave utilizadas incluyeron "*prestress losses*", "*prestressed beams*", "*FRP strands*", entre otras. En el Anexo A se muestran los principales indicadores bibliométricos obtenidos de la Web of Science.

4.2. Criterios de inclusión y exclusión

Los estudios seleccionados debían cumplir con los siguientes criterios de inclusión:

- Fecha de publicación dentro de los últimos veinte años para garantizar la actualidad de la información. Aunque es válido destacar que se incluyen algunas referencias más antiguas por constituir guías básicas y/o contener resultados relevantes en la actualidad.
- Contenido relacionado específicamente con el análisis de pérdidas de pretensado en vigas pretensadas con tendones de FRP.
- Disponibilidad del texto completo del estudio.

Se excluyeron aquellos estudios que no cumplían con estos criterios o que no proporcionaban información relevante para el análisis.

4.3. Resultados más relevantes

Los estudios revisados emplean una variedad de métodos de análisis para evaluar las pérdidas de pretensado en vigas con tendones de FRP. Se encuentran enfoques basados en análisis numéricos, experimentales y modelos analíticos simplificados. Aunque los métodos numéricos permiten una alta precisión, los modelos analíticos simplificados son atractivos para el diseño práctico debido a su simplicidad y rapidez.

Para cada estudio seleccionado, se extrajeron datos relevantes que incluían información sobre la metodología de análisis utilizada, factores considerados en el estudio, tipos de materiales analizados y los resultados de las pérdidas de pretensado, además de cualquier conclusión relevante. A continuación, se brindan los principales resultados de

las investigaciones analizadas estructurados por tipo de tendón y presentando las ideas principales en orden cronológico.

Un punto de convergencia importante es la influencia de las propiedades del material FRP en las pérdidas de pretensado, especialmente el tipo, tamaño y forma de la fibra. Varios estudios coinciden en que las propiedades mecánicas y el comportamiento a largo plazo del FRP desempeñan un papel significativo en la magnitud de las pérdidas. Investigar el comportamiento a largo plazo de las estructuras de hormigón pretensado con barras de FRP es de gran importancia porque la viabilidad de usar refuerzo pretensado depende de su desempeño bajo cargas sostenidas (Brimah *et al.*, 2003). En la literatura analizada se identifica la relajación como un factor importante que afecta el comportamiento a largo plazo de los tendones de FRP empleados en el pretensado, y según Mirshekari *et al.* (2016b), constituyen la diferencia más significativa en comparación con el acero. Respecto a las pérdidas de pretensado y el comportamiento a largo plazo, se plantea un año para estudiar dicho efecto, ya que se ha demostrado por varios investigadores que la mayoría de las pérdidas suele ocurrir dentro de los primeros meses, y un año después no se observan cambios significativos (Mahmoud, 1997), (Mahmoud *et al.*, 1999).

4.3.1. CFRP

Propiedades del material FRP y efecto del tipo de tendón en la relajación

Los tendones de CFRP presentan mejores propiedades que el resto (AFRP, GFRP, BFRP) en términos de fluencia o relajación y alta resistencia a la tracción, así como un módulo elástico moderado.

En el caso específico de la relajación, en los tendones de CFRP es inferior al 1% después de 1000 horas de carga (Zou, 2003). Esto se confirma con su pequeño coeficiente

de fluencia, por lo que como recomendación de los autores se indica que para diseños críticos, se puede utilizar una pérdida de relajación máxima del 3%, incluso en algunas ocasiones se plantea que en el caso de las fibras de carbono, se dice que no sufren pérdidas por relajación (Legasa, 2021), lo que coincide con lo planteado por Dolan *et al.* (2001) quien plantean que los tendones de CFRP tienen pérdidas de relajación de aproximadamente 2 al 3%. Sin embargo, Saadatmanesh y Tannous (1999), obtuvieron pérdidas un poco más elevadas, de 5,87% para los tendones CFRP, después de 50 años.

Sasaki y Nishizaki (2012) hicieron pruebas en diferentes tendones de CFRP, expuestos a diferentes condiciones ambientales como luz solar directa y agua de mar, para evaluar su comportamiento a largo plazo y la relajación de tensiones. Los compuestos se pretensaron inicialmente a $0,8P_u$ y $0,6P_u$ (P_u - resistencia a la tracción FRP). Después de 17 años, las muestras de CFRP mostraron una relajación de 10-20% sin luz solar directa, y 20-30% con luz solar directa. La pérdida de fuerza de pretensado en CFRP después de 17 años fue insignificante. Por tanto, los efectos directos de la luz solar pueden alterar la relajación de las muestras de CFRP debido a la degradación del material por los rayos ultravioleta y la fatiga térmica. En general, la durabilidad práctica de los tendones de CFRP parece ser buena, y los resultados sugieren que son opciones viables para aplicaciones de refuerzo a largo plazo.

Hay otras investigaciones experimentales que han evaluado el tema del pretensado con tendones de FRP en losas de hormigón, sobre todo para puentes, pero que igualmente por presentar un comportamiento estructural similar a las vigas se comentan a continuación. Por ejemplo, Martin y Soudki (2015) analizaron experimentalmente el comportamiento de fatiga de tiras de puente de losa a escala real con un sistema de refuerzo que combina barras de refuerzo de GFRP pasivas y tendones de CFRP activos, junto con modelos analíticos para predecir sus vidas de fatiga y cambios en la rigidez resultan-

tes de la carga repetida. Los tendones de CFRP postensados mejoraron efectivamente la capacidad de servicio de las losas en términos de deflexiones y anchos de fisura al tiempo que aumentaron su capacidad de carga máxima y deformabilidad. Los tendones pretensados también redujeron significativamente las tensiones de refuerzo de GFRP en la carga de servicio y, por lo tanto, se pueden usar para aumentar sustancialmente la vida de fatiga de las losas de GFRP. Dado que el CFRP posee un rendimiento de fatiga excepcional y no se espera que el hormigón falle debido a la fatiga, excepto con cargas muy altas, la respuesta a la fatiga del sistema estructural en su conjunto generalmente se rige por la vida útil de las barras de GFRP.

Nivel de pretensado

Domenico (1995) examinó las características de adherencia de tendones pretensados de plástico reforzado con fibra de carbono (CFCC). Como resultado de la investigación, se dan además los valores de pérdidas medidos mediante galgas extensiométricas para tres niveles de pretenasdo 50, 60 y 70 %. Las pérdidas debido al acortamiento elástico oscilaron entre 1,4 y 2,51 %. Las pérdidas debido a la fluencia y la relajación oscilaron entre 6,31 y 11,16 %. Por lo tanto, las pérdidas totales oscilaron entre 7,71 y 13,67 %. Los mayores valores de pérdida se dieron para los casos de los tendones pretensado a un 50 %, por lo que este parámetro no tiene una relación lineal con las pérdidas totales de pretensado. Estos rangos de valores de pérdidas están en consonancia con los obtenidos por Ehsani *et al.* (1997), donde se mostraron pérdidas instantáneas con valores entre 1,4 y 4,5 %, mientras que las pérdidas finales oscilaban entre 8,4 y 17,5 %.

Abdelrahman (1995) estudió la capacidad de servicio de vigas de hormigón pretensadas con refuerzos de CFRP. Entre los parámetros considerados destacan el nivel de pretensado (50 y 70 %). Las pérdidas de pretensado oscilaron entre 8,0 y 17,8 %.

En un programa experimental donde se evalúa el comportamiento de vigas con armadura pasiva de FRP y vigas pretensadas con tendones de CFRP, se analizan parámetros de ensayos tales como el nivel de pretensado (30 %, 45 % y 60 %). Los tendones de CFRP de 12,7 mm de diámetro pretensados al 30 %, 45 % y 60 % tuvieron valores promedios de pérdida de 3,17 %, 2,29 % y 3,33 %, respectivamente, lo que revela que la variación del nivel de pretensado no tuvo una influencia significativa sobre las pérdidas instantáneas obtenidas (Krem, 2013).

Otro estudio desarrollado con puentes de losa con refuerzo pasivo de GFRP a escala real postensadas con tendones de CFRP, mostró una capacidad de servicio significativamente mejorada y una capacidad máxima de carga con buena deformabilidad ya que después de la ruptura de los tendones de CFRP, el refuerzo pasivo de GFRP todavía estaba muy por debajo de su capacidad máxima de deformación, lo que resultó en una redistribución de las tensiones internas y permitió una deflexión posterior significativa (Noël y Soudki, 2013).

Saeed (2016) realizó un programa experimental para investigar el comportamiento a la flexión de cuatro vigas de hormigón pretensado con tendones de CFRP. Se probaron bajo carga cíclica durante cinco ciclos, seguidos de una carga que aumentaba monótonamente hasta la falla. Aunque las pérdidas totales generalmente se asocian con $t = 5+$ años, las pérdidas en este estudio se refieren a la diferencia entre la tensión aplicada inicialmente y la tensión en CFRP inmediatamente antes de la prueba de flexión, que fue un lapso de tres a cuatro semanas. Los resultados muestran que las pérdidas totales promedio en la fuerza de pretensado se pueden estimar en 7,3 %. Las vigas de CFRP mostraron mayor resistencia pero menor ductilidad. La resistencia a la flexión de las vigas de hormigón pretensadas con tendones de CFRP pueden predecirse utilizando la teoría convencional, ya que las características momento - deflexión de las vigas pretensadas de

CFRP muestran comportamiento bilineal típico (Arockiasamy *et al.*, 1995).

(Lou y Karavasilis, 2018) realizan un análisis numérico que ignora la relajación de los tendones de pretensado para aislar la contribución de la fluencia y la retracción del hormigón al comportamiento dependiente del tiempo. La pérdida de pretensado en tendones de CFRP y acero inicialmente aumenta rápidamente y luego disminuye con el tiempo. Para un tipo de tendón y una condición de carga determinados, un pretensado inicial mayor conduce a una pérdida de pretensado significativamente mayor. Debido a que el módulo elástico de los tendones de CFRP (149,6 GPa) es menor que el de los de acero (195 GPa), los tendones de CFRP exhiben una pérdida de pretensado considerablemente menor que los tendones de acero cuando se ignora la relajación del tendón en el análisis numérico. Sin embargo, la relajación de tensiones de los tendones de CFRP es significativamente mayor que la de los de acero, y los tendones de CFRP exhiben una pérdida de pretensado mucho mayor debido a la fluencia del hormigón, la retracción y la relajación del tendón a pesar de tener menor módulo de elasticidad que el acero.

Una mayor fluencia en los tendones da como resultado una mayor pérdida de pretensado (debido a la relajación), mientras que un módulo elástico más bajo significa que las deformaciones del hormigón dependientes del tiempo (debido a la fluencia y la contracción) causan menos pérdida de pretensado Zou y Shang (2007). Este criterio es respaldado también por Knight *et al.* (2015), quien experimentó en vigas con tendones de CFRP y acero en las que observó que debido a la menor relajación y módulo de elasticidad de los tendones de CFRP, estaba presente una menor pérdida de pretensado. Estas vigas eran idénticas, diferenciando únicamente el tipo de tendón pretensado empleado, en un caso se usaron 2 tendones de CFRP de 8 mm mientras que en el otro se emplearon 2 barras de acero de 9,3 mm. Se aplicó la misma fuerza de pretensado así como propiedades idénticas del hormigón. Debido a la menor relajación y módulo de elasticidad de

los tendones de CFRP, se observó que estaba presente una menor pérdida de pretensado en las etapas iniciales de carga. De igual forma opinan Maaskant *et al.* (1997), quienes obtuvieron que las pérdidas de pretensado fueron un 25 % más bajas para los tendones de CFRP en comparación con los tendones de acero.

4.3.2. GFRP

Propiedades del material FRP y efecto del tipo de tendón en la relajación

En tendones de GFRP, a partir de pruebas experimentales se observan procesos donde se registra una pérdida por relajación del 3,2 % durante un período de tiempo de 5.000 horas (Zou, 2003).

Por su parte, Sasaki y Nishizaki (2012) realizaron pruebas en tendones de GFRP, expuestos a diferentes condiciones ambientales como luz solar directa y agua de mar, para evaluar su comportamiento a largo plazo y la relajación de tensiones. Las muestras de vidrio se cargaron inicialmente a valores de 0,4Pu y 0,2Pu. Después de 17 años, los tendones de GFRP pretensados a 0,2Pu de resistencia a la tracción, presentaron una relajación de alrededor del 10 % con y sin exposición a la luz solar, respectivamente. Sin embargo, todos los cables cargados con 0,4Pu se rompieron por comportamiento de fluencia. De esta investigación se destaca que los efectos directos de la luz solar no tienden a alterar la relajación de las muestras de GFRP.

Otros factores analizados para evaluar el comportamiento a largo plazo de las vigas de hormigón pretensado con tendones de GFRP son la resistencia del hormigón (40 MPa y 80 MPa) y el diámetro de la barra GFRP (12 mm y 16 mm). Zawam *et al.* (2019) hicieron pruebas experimentales en vigas de 40 MPa y 80 MPa de resistencia a compresión del hormigón, con diámetros de tendones de 12 mm y 16 mm. El efecto de la resistencia del hormigón se puede ver comparando los resultados de las deflexiones en las vigas,

observándose que no hubo una diferencia significativa por lo que no es determinante la resistencia del hormigón sobre los resultados a largo plazo. La comparación entre los dos grupos no mostró tampoco una relación directa entre el comportamiento de deflexión a largo plazo de la viga y el diámetro de la barra de GFRP pretensado. De cualquier modo un aumento de la resistencia del hormigón implica un mayor módulo de elasticidad, menores deformaciones por retracción y fluencia, por lo que estos efectos dan pérdidas por acortamiento elástico más pequeñas y pérdidas a largo plazo menores (Mitchell *et al.*, 1993), (Páez, 2023).

Dominik *et al.* (2023) examinaron las propiedades de relajación de barras de refuerzo de GFRP a lo largo del tiempo. A partir de un modelo matemático desarrollado se determinaron las tasas de relajación y se compararon con resultados obtenidos en ensayos de tracción a corto y largo plazo bajo carga sostenida. Las tasas de relajación obtenidas experimentalmente, hasta 1000 h, oscilan entre 1,55% hasta 3,97%. Además, se comprueba que las muestras del mismo tipo pero con un diámetro de barra diferente también muestran propiedades de relajación en rangos similares, por lo que este factor no es determinante en la relajación de los materiales. Estos valores están en correspondencia con los obtenidos por Wolff y Miesslerer (1993), donde se prevé que la pérdida de tensión debido a la relajación en tendones de GFRP sea de aproximadamente un 3,2% después de 57 años. En el caso de no contar con resultados de ensayos o datos de fabricantes, se pueden estimar las pérdidas por relajación de los tendones de GFRP en un 5% (Mohsen *et al.*, 1993).

Nivel de pretensado

En el caso de tendones de GFRP, por ejemplo, el Código Canadiense de Puentes de Carreteras (CAN/CSA-S6:19, 2019) impone un tope en la tensión de pretensado en

la etapa de transferencia (momento en el cual la tensión se transfiere de la barra al hormigón) para barras de GFRP, limitándola al 25 % de la resistencia máxima de dichas barras. En el contexto del Código Canadiense de Diseño y Construcción de Estructuras de Edificios con Polímeros Reforzados con Fibra (CAN/CSA-S806:12, 2021), el uso de barras de GFRP como pretensado no está permitido, y esta práctica tampoco es respaldada por las recomendaciones presentes en (American Concrete Institute, 2004). Se han desarrollado nuevos tipos de barras GFRP con propiedades mecánicas mejoradas adecuadas para aplicaciones de pretensado, lo que plantea la pregunta de si las limitaciones del código deben aplicarse a todos los tipos de barras GFRP o si las limitaciones deben depender del rendimiento de las barras en estándar (Zawam *et al.*, 2017).

Youssef y Benmokrane (2011) investigaron cómo se comportan las barras de GFRP bajo cargas sostenidas en situaciones de servicio. En este análisis, se examinaron varios factores esenciales: el nivel de carga sostenida aplicada, el diámetro de las barras y la variabilidad entre diferentes tipos de barras provenientes de distintos fabricantes. Los niveles de carga sostenida que se evaluaron abarcaron desde un 15 % hasta un rango entre el 25 % y 30 % de la máxima resistencia a la tracción que las barras pueden soportar. En términos de diámetro, se consideraron las dimensiones de 9,5 mm, 12,7 mm, 12,0 mm y 15,9 mm. Los hallazgos extraídos de este estudio indicaron que, durante un período de 416 días, el nivel de carga sostenida no mostró una influencia definida en los niveles de deformación por fluencia. No obstante, se observó que la magnitud de la deformación por fluencia se incrementa conforme aumenta el diámetro de las barras.

Adicionalmente se consulta también literatura sobre el comportamiento de losas de hormigón pretensado con GFRP. Singh (2014) examinó el comportamiento de estos elementos a la flexión con el de las losas de hormigón pretensado con acero. Se fabricaron 12 losas, tres de ellas con tendones de GFRP sin pretensar, tres más pretensadas al 24 %

y otras tres pretensadas al 35 % del nivel de carga última de pretensado. Además, tres losas, que actuaron como muestras de control, se reforzaron con acero pretensadas entre el 65 % y 70 %. Durante el período de aproximadamente 10 meses de observación, la pérdida en la deformación del pretensado de GFRP es menor que la pérdida observada en los tendones de acero. Sobre la base de lecturas de galgas extensométricas, las losas con GFRP pretensadas al 24 % habían perdido 8,3 %, 15,5 %, 10,0 %, las losas con GFRP pretensadas al 35 % habían perdido 7,1 %, 14,6 %, 8,9 %, y las losas con tendones de acero habían perdido 12,4 % y 12,1 %.

Por otra parte, Zawam *et al.* (2017) analizaron 12 vigas para investigar el comportamiento a largo plazo de las vigas de hormigón pretensado con GFRP. Se probaron tres vigas hasta fallar en una prueba de carga monotónica de cuatro puntos, y nueve vigas se sometieron a carga sostenida durante 300 días. Los parámetros analizados fueron el nivel de pretensado 25 % (300 MPa) y 40 % (500 MPa) de la resistencia última, y el nivel de carga sostenida 35, 60 y 80 % de la capacidad última de la viga. Los resultados mostraron que la carga sostenida durante 300 días no afectó la capacidad máxima de las vigas, lo que sugiere que la fluencia o relajación de las barras de GFRP no fue significativa y no afectó la resistencia de las vigas. Se concluyó que el pretensado disminuyó la deflexión total y de largo plazo en el centro del vano y las deformaciones totales y de largo plazo del hormigón, principalmente en los niveles de carga sostenidos más bajos.

Posteriormente, Zawam *et al.* (2019) complementan la investigación anterior, analizando esta vez el efecto de diferentes factores como el nivel de pretensado (25 % y 40 %), y el nivel de carga sostenida (35 %, 60 % y 80 %) en el comportamiento a largo plazo de las vigas de hormigón pretensado con GFRP. Los resultados mostraron que el aumento del nivel de pretensado de las barras de GFRP disminuyó las deflexiones de la viga bajo niveles regulares de carga sostenidos, especialmente al nivel del 60 %, que representa el

caso de una viga pretensada fisurada bajo cargas de servicio.

4.3.3. AFRP

Propiedades del material FRP y efecto del tipo de tendón en la relajación

Cuando un tendón de pretensado se estira entre dos puntos, estará sujeto a una deformación constante. Debido a la fluencia, la tensión en el tendón disminuye (o se relaja) con el tiempo para mantener el estado de tensión constante. Si bien los tendones de acero sujetos a tensiones inferiores al 50 % del límite elástico no muestran una cantidad apreciable de relajación, las pruebas en tendones AFRP han demostrado que muestran relajación bajo tensiones muy bajas. El nivel de relajación de los tendones AFRP depende de muchos factores, incluida la temperatura ambiente, el entorno (por ejemplo, aire, soluciones alcalinas, ácidas o salinas), la relación entre la tensión inicial, y su resistencia última, y el tiempo transcurrido después (Youakim y Karbhari, 2007).

La relajación en los tendones pretensado de AFRP ha sido menos estudiada. Resultados experimentales indican que los tendones de AFRP tienen una relativa alta relajación cuando se utiliza como tendón de pretensado, lo que pueden afectar su eficacia a largo plazo (ElMahdy y Fadel, 2008). La relajación, según resultados experimentales, suele estar en el orden de 7 % después de 1000 horas de carga (Zou, 2003) y 10,9 %, después de 50 años (Saadatmanesh y Tannous, 1999).

Debido a la marcada relajación de las fibras de aramida en edades tempranas, la pérdida de pretensado a largo plazo es significativa incluso en una viga de un mes de antigüedad. Analíticamente, empleando la ecuaciones desarrolladas por Pisani (2000a) se encontró que el valor medio de la pérdida de pretensado en los cables de AFRP es del 12,8 %. Esta pérdida de pretensado es similar a la de los cables de acero después de 100 años de carga, debido a la fluencia y la contracción del hormigón (la pérdida

de pretensado de la viga considerada en el estudio debe ser aproximadamente del 40 % después de 100 años de carga).

Sasaki y Nishizaki (2012) investigaron también tendones de AFRP, expuestos a luz solar directa y agua de mar, para evaluar su comportamiento a largo plazo y la relajación de tensiones. Los compuestos de aramida se pretensaron a los límites de $0,75P_u$ y $0,55P_u$. Después de 17 años, las muestras de AFRP mostraron una relajación de 20-30 % independientemente de la luz solar directa, lo que implica que los efectos directos de la luz solar no afecta a los compuestos de AFRP.

Nivel de pretensado

Lou *et al.* (2016) desarrollaron un modelo numérico basado en el método de elementos finitos para predecir el comportamiento a largo plazo de vigas de hormigón pretensado con tendones de AFRP y tendones de acero. Se investigaron diversas variables, como el tipo de tendones, el nivel de pretensado inicial, el nivel de carga y la cantidad de acero no pretensado en las vigas de hormigón pretensado con AFRP. Los resultados mostraron que la relajación de tensiones en los tendones AFRP fue significativamente más pronunciada que en los tendones de acero, lo que resultó en una mayor pérdida de pretensado en los tendones AFRP por relajación. Sin embargo, la pérdida de pretensado debida a la fluencia y retracción del hormigón fue menor en los tendones AFRP en comparación con los tendones de acero. Por lo tanto, cuando se considera la relajación del tendón, los tendones AFRP registran una menor tensión a largo plazo que los tendones de acero. Este fenómeno es particularmente aparente para un pretensado inicial más bajo y cuando se aplican cargas externas. Los resultados obtenidos muestran que el aumento en la relajación de los compuestos de FRP es proporcional al aumento en el límite de pretensado. Sin embargo, en el caso de las fibras de aramida, la relajación tiende a ser

independiente de la tensión inicial aplicada (Oskouei y Taleie, 2010).

4.3.4. BFRP

Propiedades del material FRP y efecto del tipo de tendón en la relajación

Para los tendones de BFRP, se observan tasas de relajación, a las 1000 h, de entre 4,2 % y 6,4 % (Shi *et al.*, 2015b). Además, en un reciente estudio realizado, Pavlović *et al.* (2022), compararon valores obtenidos experimentalmente con los valores calculados mediante el uso de fórmulas existentes disponibles en los códigos estructurales, confirmando la hipótesis de que las pérdidas de pretensado en vigas con tendones de BFRP pueden calcularse utilizando un enfoque similar al del acero.

En el contexto de este análisis, Shi *et al.* (2022) efectuaron un experimento en cuatro vigas de hormigón pretensadas con tendones de BFRP. Uno de los focos del estudio fue considerar variables como el tipo de tendón y la resistencia del hormigón, resultando que las dimensiones de los tendones no incidieron en el comportamiento de relajación ni en las pérdidas finales. Asimismo, los resultados indicaron que la tasa de pérdida fue comparable entre las vigas que presentaban diferente resistencia a la compresión del hormigón, por lo que no tiene influencia significativa sobre la pérdida de pretensado.

Otro comportamiento observado en vigas pretensadas con tendones de BFRP es una rápida disminución de la tensión durante las primeras horas después del estiramiento de los tendones. Este comportamiento se justifica dado que los tendones de BFRP están compuestos por fibras de basalto y matriz de resina, una parte de la carga aplicada es transportada primero por la matriz de resina cuando las barras se someten a la tensión inicial, lo que da como resultado la deformación viscoelástica. Posteriormente la matriz de resina se relaja y pierde su capacidad de carga con el tiempo (Shi *et al.*, 2016), (Shi *et al.*, 2022). Esta pérdida inicial por relajación de la matriz ocurre dentro de las primeras

24 h según Dolan (1990) citado por Motwani *et al.* (2022).

En términos cuantitativos, la relajación en tendones de BFRP experimentan pérdidas de entre 3 y 7 %, aplicando un pretensado inicial del 50 % de la resistencia última de los tendones BFRP (Motwani *et al.*, 2022). Resultados similares dan Dominik *et al.* (2023), donde se obtienen tasas de relajación entre 2,45 % y 5,82 %. Además, se comprueba que el diámetro de barra no es un factor determinante en la relajación de las barras de BFRP.

Nivel de pretensado

Shi *et al.* (2015a) estudian de manera experimental el comportamiento de fluencia de tendones BFRP pretensados. Los niveles de tensión se determinaron en 0,8 fu, 0,78 fu, 0,75 fu y 0,7 fu. El valor medio de la resistencia a la tracción de los tendones BFRP alcanza 1571 MPa con una pequeña variación del coeficiente de 2,74 %, lo que demuestra la calidad superior de los tendones de BFRP pretensados. Los resultados muestran que los tendones BFRP pretensados pueden soportar un nivel de tensión de 0,7 fu sin fractura en 1000 h, un 17 % más que los tendones BFRP no pretensados (0,6 fu). Las bajas tasas de deformación por fluencia pueden desarrollar menos pérdida de pretensado cuando se aplican BFRP como elementos de pretensado.

Para niveles de pretensado iniciales de 0.4fu, 0.5fu y 0.6fu, las curvas de relajación muestran que la tasa de relajación aumenta proporcionalmente al nivel de pretensado, siendo de 4,2 %, 5,3 % y 6,4 % (Shi *et al.*, 2016). Las curvas de relajación (relación de la carga modificada a la carga inicial, en porcentaje contra el tiempo), se muestran en la Figura 4.1. Resultados similares obtuvo Atutis *et al.* (2018), con una relajación medida cercana al 6 % con tres niveles de pretensado 40 %, 45 % y 55 %.

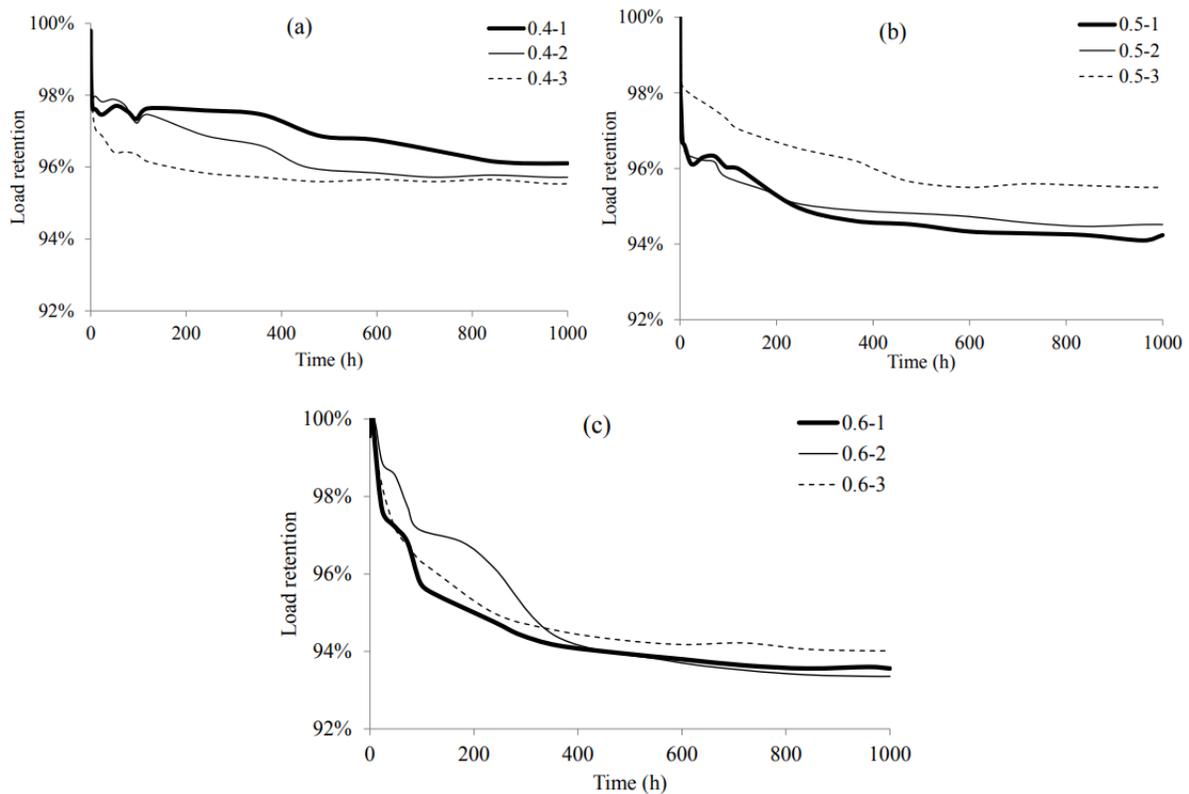


Figura 4.1: Curvas de relajación para a) 0.4fu, b) 0.5fu y c) 0.6fu (Shi *et al.*, 2016).

Con niveles de pretensado menores, 20 %, 30 % y 40 %, el análisis de la carga última alcanzada durante la prueba de flexión demuestra que el aumento en la capacidad de carga de las vigas reforzadas con BFRP en comparación con el acero es significativa, de alrededor del 78 % al 95 % de la carga última (Pavlović *et al.*, 2019b). El pretensado de elementos reforzadas con BFRP con más del 30 % de la capacidad máxima de tracción de las barras mejora el rendimiento de servicio de las vigas a un nivel superior al del acero (Mirshekari *et al.*, 2016a), (Pavlović *et al.*, 2019b).

En campañas experimentales se ha analizado también las pérdidas de pretensado debido a la retracción del hormigón, la fluencia y el acortamiento elástico utilizando

tendones de BFRP en vigas de hormigón. En el caso específico de la campaña desarrollada por Pavlović *et al.* (2019a), se analizaron estos factores variando además los niveles de pretensado: 20 %, 30 % y 40 % de la capacidad última de tracción de los tendones. Para ello se utilizaron fórmulas basadas en el Eurocódigo 2 (Asociación Española de Normalización, 2020) para calcular y predecir las pérdidas de pretensado. En base a los resultados observados experimental y analíticamente, las pérdidas debidas a la fluencia y la retracción del hormigón, así como al acortamiento elástico, pueden calcularse suficientemente bien utilizando las fórmulas EC2 y sustituyendo las propiedades del material del BFRP (Pavlović *et al.*, 2022). Al final del período monitoreado, no se observó una correlación evidente entre el nivel de pretensado y el porcentaje de disminución de la tensión (véase la Figura 4.2).

Atutits y Shiho (2020), analizan elementos de hormigón a flexión pretensados con BFRP, considerando fases consecutivas de la carga aplicada. Se propone un método analítico que considera las pérdidas de pretensado para la estimación de la deflexión y se evalúa experimentalmente la influencia del nivel de pretensado en 12 vigas de hormigón pretensado a escala real con barras BFRP. Como resultado principal se indica que con un aumento del nivel de tensión inicial, la relajación de la tensión aumenta proporcionalmente desde el comienzo del pretensado de FRP. En el caso del refuerzo de acero, el mismo aumento proporcional de la relajación de la tensión aparece en la elección más alta del nivel de tensión inicial. Se puede concluir que, contrariamente a las barras de acero pretensadas, el aumento del nivel de tensión inicial produce una tasa de relajación más constante para los FRP durante el mismo intervalo de tiempo.

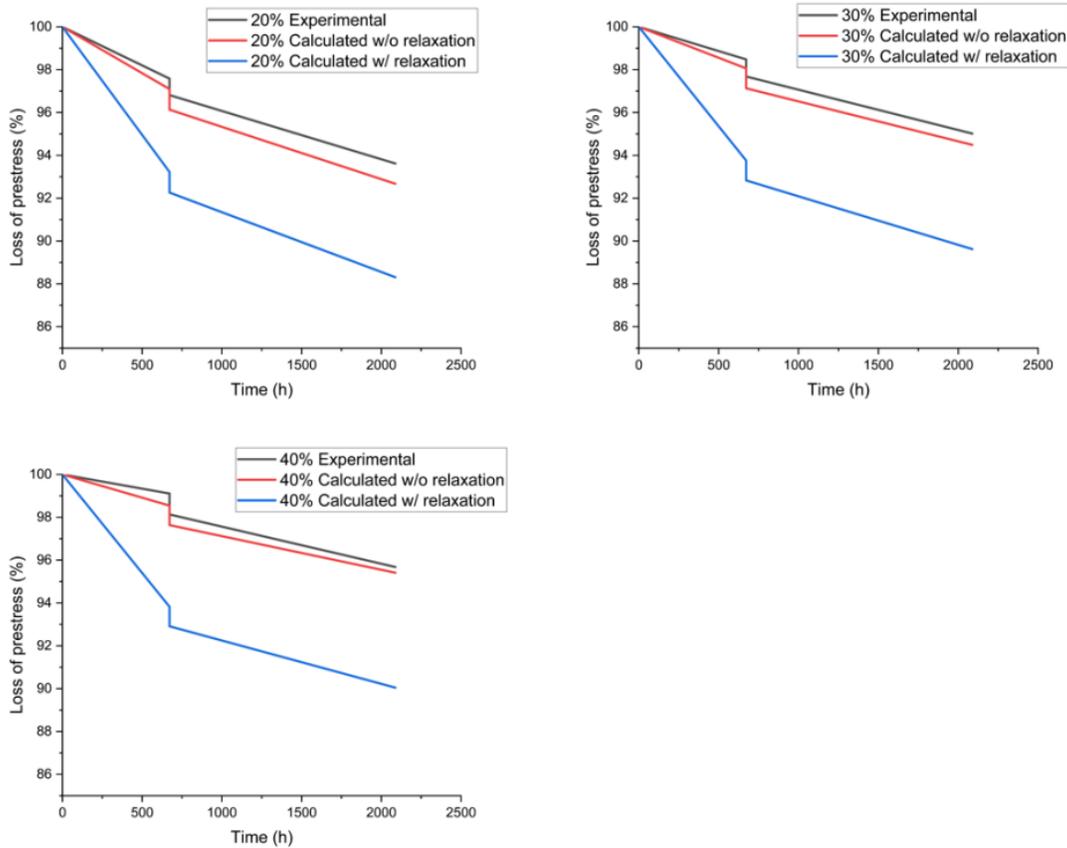


Figura 4.2: Disminución teórica y experimental de la deformación durante la fase de prueba sin carga (Pavlović *et al.*, 2022).

4.4. Análisis comparativo

4.4.1. Base de datos

En el presente apartado se hace un análisis de los estudios que aportan los resultados más relevantes en cuanto al tema en estudio, para ello se muestran en la Tabla 4.1 las investigaciones destacadas. En el Anexo A se hace un análisis bibliométrico de este conjunto de referencias.

Tabla 4.1: Resumen de los estudios con resultados más relevantes para la presente investigación.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Mohsen <i>et al.</i> , 1993)	Artículo	Experimental	Pruebas de tracción	longitud de transferencia; fibra de vidrio; comportamiento a largo plazo	GFRP; Acero
(Domenico, 1995)	Tesis (maestría)	Análítico; Experimental	Ensayos estáticos de flexión; análisis numérico	adherencia; CFCC; vigas de hormigón pretensado; longitud de transferencia	CFCC
(Pisani, 2000a)	Artículo	Análítico	Análisis numérico	relajación; fluencia; pérdidas de pretensado; cables compuestos de aramida	AFRP

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Pisani, 2000b)	Artículo	Análítico	Análisis numérico	relajación; fluencia; pérdidas de pretensado; cables compuestos de aramida	AFRP
(Dolan <i>et al.</i> , 2001)	Informe técnico	Experimental	Pruebas de tracción	pretensado; relajación; tendón FRP; deformación; pérdidas de pretensado	CFRP
(Zou, 2003)	Artículo	Experimental	Ensayos de tracción, fluencia y relajación	relajación; tendones FRP; fluencia	CFRP; GFRP; AFRP
(Brahmah <i>et al.</i> , 2006)	Artículo	Experimental	Pruebas de fatiga	FRP; anclaje; tendón; fatiga; postensado; hormigón; viga; pruebas	CFRP; acero

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Youakim y Karbhari, 2007)	Artículo	Análítico	Análisis numérico	FRP; pérdida de pretensado; hormigón pretensado; relajación; retracción	AFRP; CFRP
(Zou y Shang, 2007)	Artículo	Análítico	Análisis numérico	CFRP; tendón; comportamiento dependiente del tiempo; vigas de hormigón	CFRP; acero
(ElMahdy y Fadel, 2008)	Memoria de un congreso	Análítico	Análisis numérico	tendones de FRP; pérdidas de pretensado instantáneas y dependientes del tiempo; módulo de elasticidad; longitud de transferencia; comportamiento a largo plazo	AFRP; CFRP; GFRP; Acero
(Oskoueï y Taleie, 2010)	Artículo	Experimental	Ensayos de relajación	relajación; FRP; pretensado; experimental; polímero; fibra; epoxi	CFRP; AFRP

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Youssef y Benmokrane, 2011)	Artículo	Experimental	Pruebas de fluencia	fluencia; carga sostenida; tracción; GFRP	GFRP
(Sasaki y Nishizaki, 2012)	Artículo	Experimental	Ensayos de tracción y relajación	relajación; durabilidad; tendones de FRP	CFRP; GFRP; AFRP; VFRP (vinilo)
(Krem, 2013)	Tesis (doctorado)	Análítico; Experimental	Pruebas de flexión	comportamiento; adherencia; pretensado; CFRP	CFRP
(Noël y Soudki, 2013)	Artículo	Experimental	Pruebas de carga flexión	FRP; postensado; losas de hormigón; hormigón pretensado	CFRP

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Singh, 2014)	Tesis (maestría)	Experimental	Pruebas de carga y flexión	comportamiento a largo plazo; losas de hormigón pretensadas; GFRP; flexión	GFRP
(Knight <i>et al.</i> , 2015)	Artículo	Análítico	Análisis numérico	fluencia y retracción; hormigón pretensado; rigidez; teoría de la interacción parcial	FRP; acero
(Martin y Soudki, 2015)	Artículo	Experimental; Análítico	Análisis numérico; Ensayos de fatiga	FRP; losas; pérdidas de pretensado; comportamiento en servicio	CFRP; GFRP (armadura pasiva)
(Shi <i>et al.</i> , 2015b)	Memoria de un congreso	Análítico; Experimental	Ensayos de relajación	Tendón de BFRP; relajación; pretensado	BFRP
(Shi <i>et al.</i> , 2015a)	Artículo	Experimental	Pruebas de fluencia	BFRP; comportamiento de fluencia; Pretensado; Tasa de deformación por fluencia	BFRP

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Lou <i>et al.</i> , 2016)	Artículo	Análítico	Análisis numérico	Fibra de aramida; relajación de la tensión; modelado computacional	AFRP; acero
(Shi <i>et al.</i> , 2016)	Artículo	Análítico; Experimental	Ensayos de relajación	Tendón de BFRP; relajación; pretensado	BFRP
(Saeed, 2016)	Tesis (maestría)	Experimental	Pruebas de carga flexión	vigas de hormigón pretensado; CFRP; adherencia; anclaje	CFRP
(Zawam <i>et al.</i> , 2017)	Artículo	Experimental	Pruebas de carga flexión	GFRP; vigas de hormigón pretensado; fallo; comportamiento a largo plazo	GFRP
(Lou y Karavasilis, 2018)	Artículo	Análítico	Modelo numérico	CFRP; comportamiento dependiente del tiempo; tendones no adheridos; vigas	CFRP; Acero

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Przygocka y Kotynia, 2018)	Artículo	Análítico	Revisión bibliográfica	FRP; comportamiento a largo plazo; pérdidas de pretensado; relajación	FRP
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	Artículo	Experimental; Análítico	Ensayos de relajación	vigas de Hormigón pretensado; BFRP; pérdidas de pretensado; viscoelasticidad lineal; relajación	BFRP
Zawam <i>et al.</i> (2019)	Artículo	Experimental	Ensayos de flexión	Comportamiento dependiente del tiempo; fluencia; hormigón; nivel de pretensado	GFRP
(Pavlović <i>et al.</i> , 2019a)	Memoria de un congreso	Experimental	Pruebas de carga y flexión	BFRP; pérdidas de pretensado; comportamiento a largo plazo	GFRP; BFRP

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Pavlović <i>et al.</i> , 2019b)	Artículo	Experimental	Prueba de flexión estática	BFRP; pérdidas de pretensado; comportamiento a flexión	BFRP
(Atutits y Shiho, 2020)	Artículo	Experimental; Analítico	Enfoque analítico; Pruebas de carga y flexión	BFRP; flexión; deformación; análisis	BFRP
Shi <i>et al.</i> (2022)	Artículo	Analítico; Experimental	Análisis numérico; Pruebas de flexión o carga	tendón de BFRP; pretensado; pérdida de pretensado; deformación a largo plazo	BFRP

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Documento	Tipo de estudio	Metodología utilizada	Palabras claves	Materiales
(Pavlović <i>et al.</i> , 2022)	Memoria de un congreso	Experimental	Pruebas de carga y flexión	BFRP; pérdidas de pretensado; comportamiento a largo plazo	GFRP; BFRP
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	Artículo	Análítico; Experimental	Análisis numérico (MEF) ¹ ; Ensayos de relajación y flexión	BFRP; Elementos finitos; Longitud de transferencia	BFRP
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	Artículo	Experimental; Analítico	Enfoques matemáticos; Ensayos de tracción	Fluencia; FRP; relajación; pretensado	GFRP; BFRP

1

¹Método de Elementos Finitos

A partir de estos estudios, se obtienen los resultados experimentales de las pérdidas de pretensado de diferentes tipos de tendones de FRP y acero. En la Tabla 4.2 donde se proporciona un resumen de los parámetros iniciales. Se muestran el número de tendones pretensados en el elemento analizado ($No.$), diámetro de los tendones (\emptyset), resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$), módulo de elasticidad del tendón (E_s) y nivel de pretensado inicial ($\%f_u$).

Tabla 4.2: Resumen de los parámetros iniciales de la base de datos.

Tipo de tendón	No.	\emptyset (mm)	$f'c$ (MPa)	$\%f_u$	E_s (GPa)
GFRP	6	15,8	46,0 - 72,1	24 -35	54,95
BFRP	1	8,0	43,0	50	45,0
AFRP	1	7,39 - 10,4	35	60	48,3 - 127,5
CFRP	1 - 4	7,92 - 15,2	35,0 - 75,2	30 - 60	136 - 147
Acero	1 - 4	9,52 - 15,8	35,0 - 74,2	50 - 75	180 - 198

En total, se encontraron 62 especímenes, de los cuales 6, 4, 3 y 49 eran especímenes pretensados con tendones de GFRP, BFRP, AFRP y CFRP, respectivamente. Desafortunadamente, sólo se han encontrado en la literatura unos pocos estudios sobre las pérdidas de pretensado en tendones de BFRP, AFRP y GFRP, sobresaliendo la cantidad de investigaciones realizadas para los CFRP. Otro aspecto válido de destacar es el tiempo en el que se realizaron las mediciones, el cual tiene una variabilidad considerable entre los estudios pues depende de las condiciones particulares de cada investigación. El menor se corresponde con el monitoreo realizado a los 20 días después de la transferencia del pretensado, para el caso de las vigas de BFRP analizadas por Motwani *et al.* (2022), y el mayor plazo monitoreado se corresponde con vigas de CFRP analizadas por Domenico (1995), alcanzando los 169 días después de la transferencia del pretensado. En ningún caso, las mediciones sobrepasan el año recomendado para estudiar el efecto de las pérdidas

de pretensado y el comportamiento a largo plazo.

La Tabla 4.3 proporciona todos los datos de los parámetros iniciales comentados anteriormente, así como las pérdidas instantáneas (*P. inst.*) y totales (*P. tot.*). Los resultados están organizados por tipo de tendón y disposición cronológica.

Tabla 4.3: Resultados de las pérdidas de pretensado instantáneas y/o totales para diferentes tipos de tendones.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	% f_u	P. inst.	P. tot.
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	GFRP	6	15,8	46,0	54,95	24	-	15,5
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	GFRP	6	15,8	67,1	54,95	24	-	10,0
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	GFRP	6	15,8	72,1	54,95	24	-	8,5
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	GFRP	6	15,8	46,0	54,95	35	-	14,6
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	GFRP	6	15,8	67,1	54,95	35	-	8,9
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	GFRP	6	15,8	72,1	54,95	35	-	7,1
(Motwani et al., 2022)	Viga rectangular	0,1x0,2x3	BFRP	1	8	43,0	45,0	50	5,5	10,0
(Motwani et al., 2022)	Viga rectangular	0,1x0,2x3	BFRP	1	8	43,0	45,0	50	9,6	13,0

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	$\%f_u$	P. inst.	P. tot.
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	Viga rectangular	0,1x0,2x3	BFRP	1	8	43,0	45,0	50	13,5	15,0
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	Viga rectangular	0,1x0,2x3	BFRP	1	8	43,0	45,0	50	10,9	19,0
(Ehsani <i>et al.</i> , 1997)	Viga rectangular	1,02x1,02x3,05	AFRP	1	7,39	35,0	68,6	60	8,2	14,4
(Ehsani <i>et al.</i> , 1997)	Viga rectangular	1,02x1,02x3,05	AFRP	1	9,9	35,0	127,5	60	5,1	12,2
(Ehsani <i>et al.</i> , 1997)	Viga rectangular	1,02x1,02x3,05	AFRP	1	10,4	35,0	48,3	60	9,5	13,8
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	15,2	35,8	137,0	50	2,51	12,57
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	15,2	35,8	137,0	50	2,42	10,51

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	$\%f_u$	P. inst.	P. tot.
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	15,2	40,2	137,0	50	2,32	13,67
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	15,2	40,2	137,0	50	1,65	7,71
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	12,5	56,3	137,0	50	1,44	9,04
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	12,5	56,3	137,0	50	1,40	8,34
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	12,5	41,4	137,0	50	1,67	11,24
(Domenico, 1995)	Viga T	0,15x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	12,5	51,4	137,0	50	1,52	7,91
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	12,5	50,0	137,0	60	1,79	11,51

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	$\%f_u$	P. inst.	P. tot.
(Domenico, 1995)	Viga T	0,1x0,25; 0,08x0,3	CFRP	1	15,2	45,1	137,0	70	2,18	11,33
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,28; 0,05x0,6	CFRP	4	8	47,0	147,0	50	-	16,0
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,28; 0,05x0,6	CFRP	4	8	61,0	147,0	50	-	17,8
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,28; 0,05x0,6	CFRP	4	8	64,0	147,0	50	-	8,0
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,26; 0,07x0,2	CFRP	4	8	64,0	147,0	50	-	12,6
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,28; 0,05x0,6	CFRP	2	8	70,0	147,0	50	-	13,5
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,26; 0,07x0,2	CFRP	2	8	70,0	147,0	50	-	9,9

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	% f_u	P. inst.	P. tot.
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,26; 0,07x0,2	CFRP	4	8	61,0	147,0	70	-	13,3
(Arockiasamy <i>et al.</i> , 1995)	Viga rectangular	0,254x0,254x2,49	CFRP	2	12,5	60,6	141,0	60	6,10	-
(Arockiasamy <i>et al.</i> , 1995)	Viga rectangular	0,254x0,254x2,49	CFRP	2	12,5	75,2	141,0	60	6,60	-
(Arockiasamy <i>et al.</i> , 1995)	Viga rectangular	0,254x0,254x2,49	CFRP	2	12,5	53,3	141,0	60	5,0	-
(Arockiasamy <i>et al.</i> , 1995)	Viga rectangular	0,254x0,254x2,49	CFRP	2	12,5	47,9	141,0	60	4,8	-
(Ehsani <i>et al.</i> , 1997)	Viga rectangular	1,02x1,02x3,05	CFRP	1	8,3	35,0	137,2	60	1,4	8,4
(Ehsani <i>et al.</i> , 1997)	Viga rectangular	1,02x1,02x3,05	CFRP	1	7,92	35,0	149,6	60	4,5	17,5

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	$\%f_u$	P. inst.	P. tot.
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	62,1	144,0	30	3,23	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	62,1	144,0	30	3,20	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	49,6	144,0	30	3,21	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	49,6	144,0	30	3,0	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	70,9	144,0	45	1,8	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	70,9	144,0	45	2,48	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	70,9	144,0	45	2,49	-

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	$\%f_u$	P. inst.	P. tot.
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	70,9	144,0	45	2,41	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	62,1	144,0	60	2,89	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	62,1	144,0	60	2,99	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	49,6	144,0	60	3,6	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	64,5	144,0	60	3,32	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	64,5	144,0	60	3,2	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	64,5	144,0	60	4,39	-

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	% f_u	P. inst.	P. tot.
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	64,5	144,0	30	3,23	-
(Krem, 2013)	Viga rectangular	0,15x0,25x3,6	CFRP	1	12,7	49,6	144,0	60	2,90	-
(Saeed, 2016)	Viga rectangular	0,4x0,76x4,1	CFRP	1	12,7	52,6	136,0	55	3,6	5,1
(Saeed, 2016)	Viga rectangular	0,4x0,76x4,1	CFRP	1	12,7	50,1	136,0	60	4,8	9,2
(Saeed, 2016)	Viga rectangular	0,4x0,76x4,1	CFRP	1	12,7	51,8	136,0	60	4,7	6,4
(Saeed, 2016)	Viga rectangular	0,4x0,76x4,1	CFRP	1	12,5	49,5	136,0	65	4,1	8,6
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,28; 0,05x0,6	Acero	2	13	67,0	180,0	70	-	17,0

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de elemento	Dimensiones viga	Tipo de tendón	No.	Ø mm	f'c MPa	E_s GPa	% f_u	P. inst.	P. tot.
(Abdelrahman, 1995)	Viga T	0,105x0,26; 0,07x0,2	Acero	2	13	67,0	180,0	50	-	16,6
(Ehsani <i>et al.</i> , 1997)	Viga rectangular	1,02x1,02x3,05	Acero	1	9,52	35,0	192,7	75	0,10	-
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	Acero	4	15,8	69,7	198,0	65-70	-	12,0
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	Acero	4	15,8	66,5	198,0	65-70	-	12,4
(Singh, 2014)	Losa	0,23x0,61x6,6	Acero	4	15,8	74,2	198,0	65-70	-	12,1

La pérdida de pretensado más elevada se observa en una muestra de BFRP - 19,0 %, seguida por CFRP - 17,8 %, Acero - 17,0 %, y AFRP - 14,4 % (véase la Tabla 4.3). En cuanto a los valores promedios, las pérdidas fueron de 14,25 %, 14,02 %, 13,47 %, 10,88 % y 10,77 % para el BFRP, Acero, AFRP, CFRP y GFRP, respectivamente, tal y como se representa en la Figura 4.3.

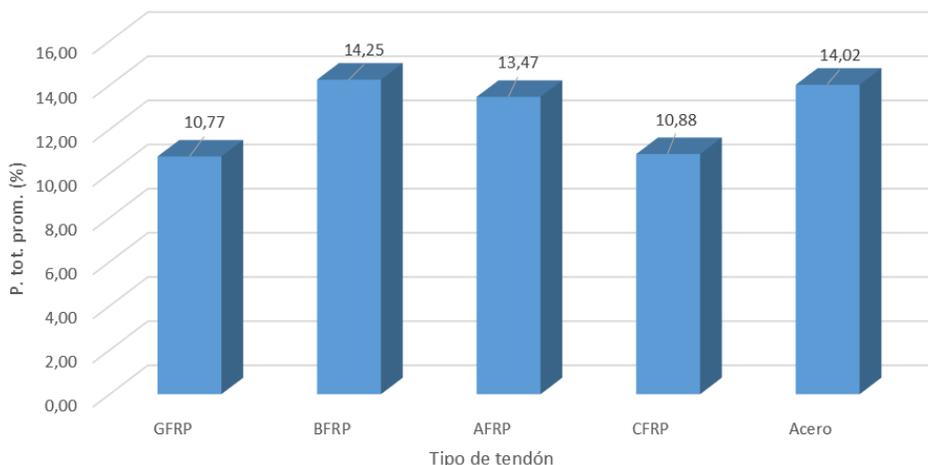


Figura 4.3: Resumen de los resultados de las mayores pérdidas por tipo de tendón.

Los resultados de la Tabla 4.3 indican que, las pérdidas instantáneas promedio son menores en los elementos de CFRP (3,25 %), seguidos por los de AFRP (7,6 %), y los de BFRP (9,88 %). En los tendones de GFRP y Acero no se tiene datos suficientes de pérdidas instantáneas para establecer esta comparación.

4.4.2. Influencia de parámetros en las pérdidas de pretensado

Los datos extraídos fueron analizados de manera sistemática para identificar patrones, similitudes y diferencias en los resultados. Esta sección presenta una visión general de la influencia de diferentes parámetros en las pérdidas de pretensado de diferentes tendones FRP pretensados (GFRP, CFRP, AFRP y BFRP).

4.4.2.1. Resistencia a compresión del hormigón

La Figura 4.4 muestra la distribución de las pérdidas de pretensado de diferentes tipos de tendones bajo la influencia de la resistencia a compresión del hormigón en el momento de la transferencia ($f'c$). Los resultados muestran que las pérdidas de pretensado disminuyen con el aumento de la resistencia a la compresión del hormigón en el momento de la liberación del pretensado en el caso de los tendones de GFRP, CFRP y Acero. En general, el aumento de la resistencia a la compresión del hormigón implica un mayor módulo de elasticidad del hormigón, menores deformaciones por retracción y fluencia, por lo que estos efectos dan pérdidas por acortamiento elástico más pequeñas y pérdidas a largo plazo menores. Las investigaciones de otros autores confirman la tendencia de que las pérdidas de pretensado disminuyen con el aumento de la resistencia del hormigón.

En el caso particular del BFRP y AFRP los datos no son suficientes para concluir un resultado específico. Sin embargo, Shi *et al.* (2022) efectuaron un experimento en cuatro vigas de hormigón pretensadas donde concluyeron que no hubo una diferencia significativa para pruebas en tendones de BFRP por lo que no es determinante la resistencia del hormigón sobre la tasa de pérdida.

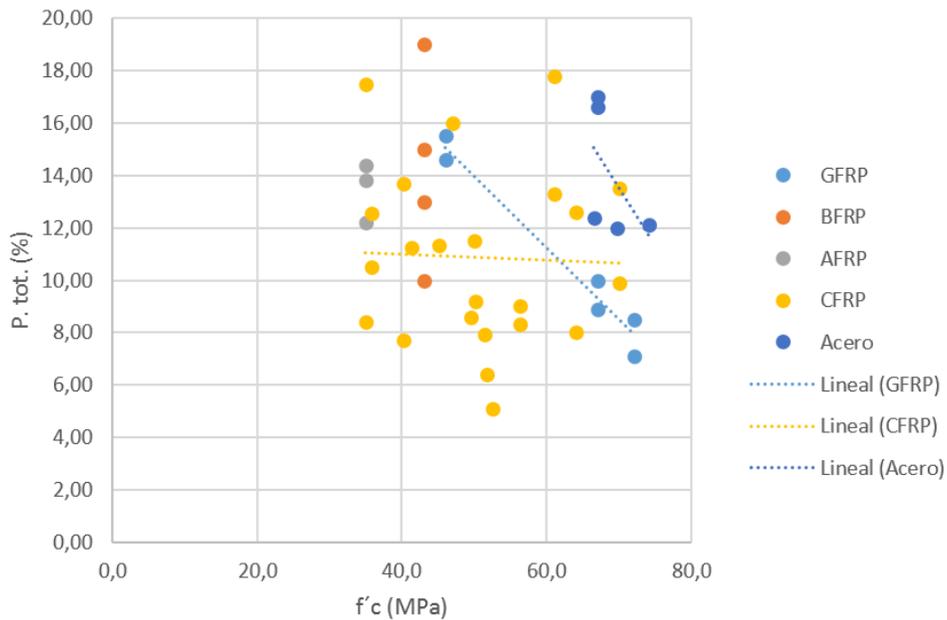


Figura 4.4: Relación entre las pérdidas de pretensado y la resistencia a compresión del hormigón ($f'c$).

4.4.2.2. Diámetro de la armadura activa

La Figura 4.5 muestra la distribución de las pérdidas de pretensado de diferentes tipos de tendones bajo la influencia del diámetro de los tendones (\emptyset). Las pérdidas de pretensado de los diferentes tipos de refuerzo FRP pretensado aparentemente disminuyen con el incremento del diámetro de la armadura, pero realmente los datos obtenidos son insuficientes para determinar una influencia directa entre las pérdidas de pretensado y el diámetro de la armadura activa. En la literatura se pueden encontrar algunos resultados que muestran poca o ninguna relación directa entre el comportamiento a largo plazo de las vigas y el diámetro de la barra de FRP (Zawam *et al.*, 2019), (Dominik *et al.*, 2023), (Youssef y Benmokrane, 2011). También se comprueba que para el caso del BFRP el diámetro de barra no es un factor determinante en la relajación de las barras de BFRP,

por lo que no tendría una influencia en las pérdidas diferidas (Dominik *et al.*, 2023).

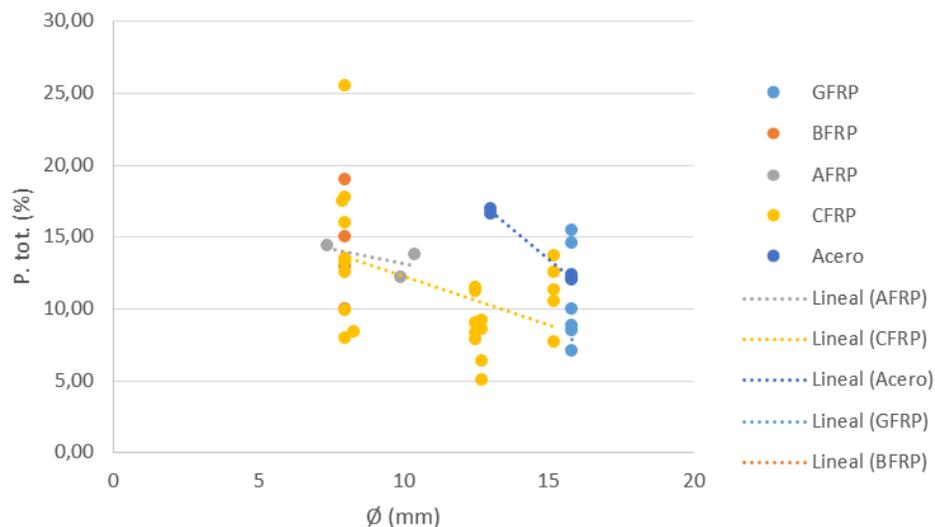


Figura 4.5: Relación entre las pérdidas de pretensado y el diámetro de los tendones (\emptyset).

4.4.2.3. Módulo de elasticidad

Una comparación de las pérdidas de pretensado y el módulo de elasticidad de diferentes tipos de refuerzo FRP se muestra en la Figura 4.6).

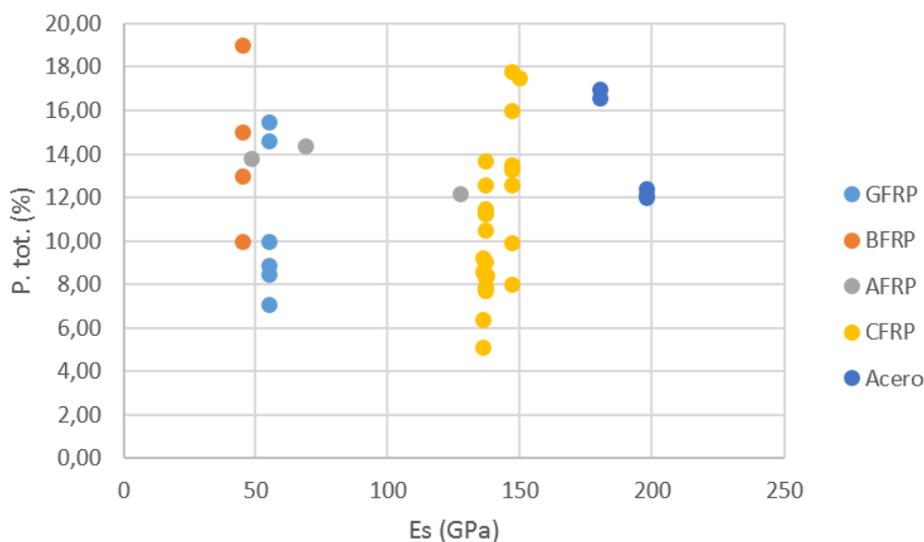


Figura 4.6: Relación entre las pérdidas de pretensado y módulo de elasticidad de los tendones (E_s).

Knight *et al.* (2015) y Maaskant *et al.* (1997) afirman que un menor módulo de elasticidad provocará una menor pérdida de pretensado. Sin embargo, la Figura 4.6 no permite establecer una relación directa entre la influencia del módulo de elasticidad sobre las pérdidas de pretensado, esto puede estar relacionado con la escasez de resultados experimentales y la variación adicional de otros parámetros.

Para intentar arribar a una conclusión más precisa, se analiza el caso de los CFRP por ser el material de los que se dispone más datos (véase la Figura 4.7). Aparentemente la línea de tendencia indica que las pérdidas de pretensado aumentan con el incremento del módulo de elasticidad en tendones de CFRP, lo que está en concordancia con los autores mencionados anteriormente.

Con el propósito de alcanzar una inferencia más rigurosa, se procede al escrutinio del caso de los CFRP, dada la mayor disponibilidad de datos pertinentes (véase la Figura 4.7). De acuerdo con la tendencia percibida, las pérdidas de pretensado exhiben una

propensión al incremento conforme aumento del módulo de elasticidad en los tendones de CFRP. Este hallazgo concuerda lo planteado por los autores mencionados anteriormente.

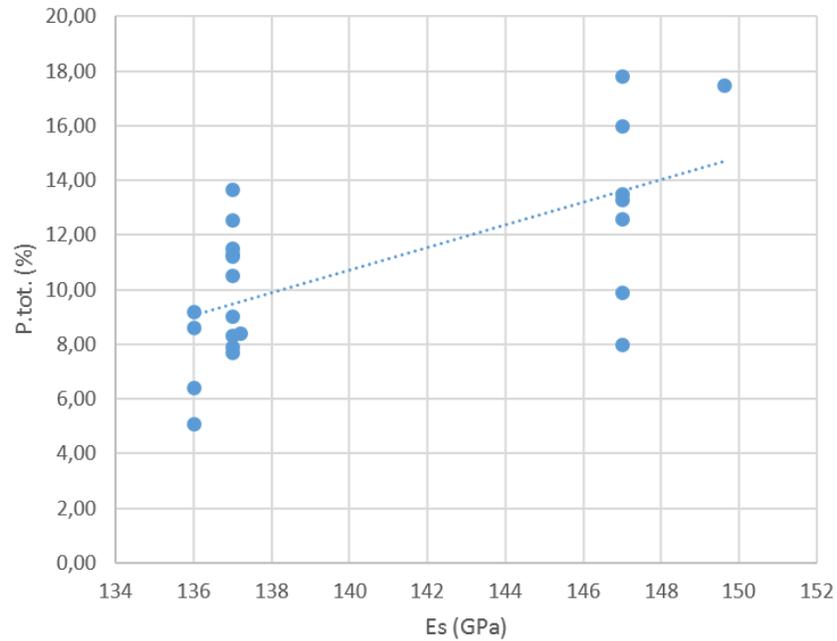


Figura 4.7: Relación entre las pérdidas de pretensado y módulo de elasticidad (E_s) de los tendones CFRP.

4.4.2.4. Nivel de pretensado

La Figura 4.8 muestra la distribución de las pérdidas de pretensado de diferentes tipos de tendones bajo la influencia del nivel de pretensado inicial ($\%f_u$). Las pérdidas de pretensado aparentemente tienden a disminuir con el incremento del nivel de pretensado inicial. Este es un resultado interesante, pues a priori, puede parecer que al ser mayores las tensiones, las pérdidas debidas a la relajación podrían causar que la trndencia fuera la contraria a la que aquí se observa.

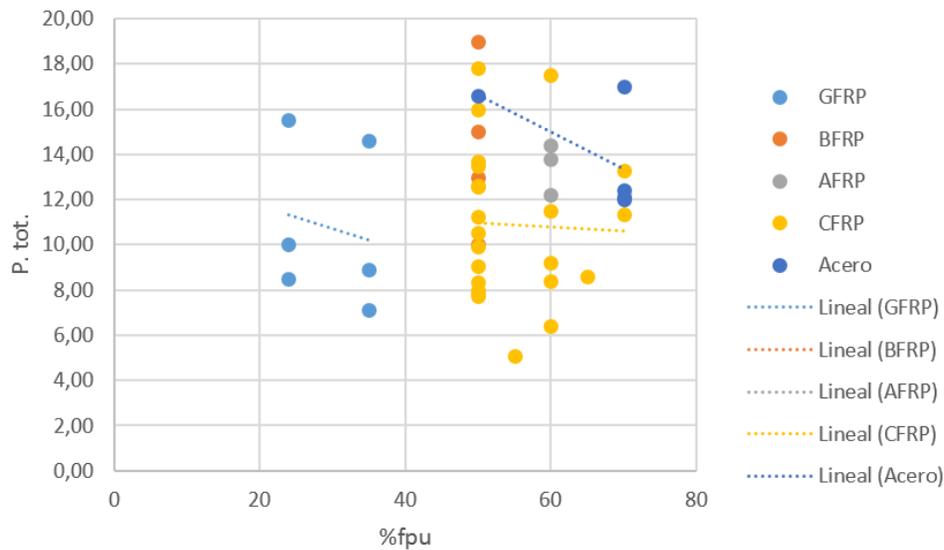


Figura 4.8: Relación entre las pérdidas de pretensado y el nivel de pretensado inicial ($\%f_u$).

Se pueden encontrar algunos resultados en la literatura que muestran poca influencia del nivel de pretensado en las pérdidas de pretensado o porcentaje de disminución de la tensión, especialmente en el caso del CFRP (Krem, 2013), y el BFRP Pavlović *et al.* (2022). Por otro lado, en (Lou y Karavasilis, 2018) se afirma que para un tipo de tendón de CFRP y una condición de carga determinados, un pretensado inicial mayor conduce a una pérdida de pretensado significativamente mayor. En el caso del AFRP, resultados obtenidos muestran que el aumento en la relajación de los compuestos de FRP es proporcional al aumento en el límite de pretensado. Sin embargo, la pérdida de pretensado debida a la fluencia y retracción del hormigón es menor en los tendones AFRP en comparación con los tendones de acero Lou *et al.* (2016), por lo que no es posible establecer una relación directa entre el nivel de pretensado y las pérdidas.

Se han observado algunas discrepancias en los resultados relacionados con las pérdidas de pretensado y el refuerzo de FRP presentados por diferentes autores. Sin embargo,

la tendencia predominante que sugiere la falta de influencia de las pérdidas de pretensado a medida que aumenta el nivel de pretensado se ha mantenido constante para diversos tipos de armadura activa de FRP, especialmente el BFRP y CFRP. No obstante, esta afirmación requiere un análisis más exhaustivo, ya que parece no coincidir con los datos representados en la Figura 4.8. Esta discrepancia podría indicar que los datos experimentales no se están procesando adecuadamente o que la cantidad de datos disponible puede ser insuficiente para llegar a una conclusión sólida, ya que en el caso del CFRP que es el material con más representación, la línea de tendencia indica una pendiente casi horizontal. Además, es evidente que el nivel de pretensado por sí solo no puede considerarse el principal factor que influye en las pérdidas de pretensado.

4.4.2.5. Relajación

La relajación de los tendones FRP son un componente integral de las pérdidas generales de pretensado (Dominik *et al.*, 2023), y deben determinarse con precisión para la predicción de las pérdidas iniciales y finales. En la revisión de la literatura, se reconoce que la relajación se presenta como un elemento significativo que influye en el desempeño a largo plazo de los tendones de FRP utilizados en el proceso de pretensado. La Tabla 4.2 proporciona los parámetros encontrados, mostrándose el tipo y diámetro de tendón (\emptyset), el nivel de pretensado inicial ($\%f_u$), y la relajación (R (%)). Los resultados están organizados por tipo de tendón y disposición cronológica.

Tabla 4.4: Relajación para diferentes tipos de tendones.

Referencia	Tipo de tendón	Ø mm	% f_u	E_s (GPa)	R(%)
(Wolff y Miesslerer, 1993) (Abdelrahman, 1995) (Zou, 2003)	GFRP	7,5	25	-	3,20
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	25	48,4	2,00
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	25	48,4	1,76
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	25	48,4	3,01
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	25	48,4	3,82
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	25	48,4	1,55
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	40	48,4	3,81
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	40	48,4	3,97
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	8,0	40	48,4	2,22
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	12,0	20	49,76	3,57
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	GFRP	12,0	20	49,76	2,60
(Shi <i>et al.</i> , 2015b)	BFRP	6,0	40	55,5	4,20
(Shi <i>et al.</i> , 2015b)	BFRP	6,0	50	55,5	5,30
(Shi <i>et al.</i> , 2015b)	BFRP	6,0	60	55,5	6,40
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	40	45,0	5,42
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	40	45,0	5,76
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	40	45,0	5,98
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	45	45,0	6,01

Continúa en la página siguiente.

CAPÍTULO 4: PÉRDIDAS DE PRETENSADO: ANÁLISIS DE TRABAJOS E INVESTIGACIONES

Referencia	Tipo de tendón	Ø mm	% f_u	E_s (GPa)	R (%)
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	45	45,0	6,09
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	45	45,0	6,02
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	55	45,0	6,50
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	55	45,0	7,11
(Atutis <i>et al.</i> , 2018)	BFRP	12,45	55	45,0	6,40
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	BFRP	8,0	50	45,0	3,05
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	BFRP	8,0	50	45,0	4,98
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	BFRP	8,0	50	45,0	6,09
(Motwani <i>et al.</i> , 2022)	BFRP	8,0	50	45,0	6,80
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	8,0	40	47,6	3,30
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	8,0	40	47,6	3,96
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	8,0	50	47,6	5,82
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	8,0	50	47,6	2,64
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	8,0	50	47,6	4,02
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	10,0	40	42,8	2,45
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	10,0	40	42,8	3,95
(Dominik <i>et al.</i> , 2023)	BFRP	10,0	70	42,8	3,93
(Abdelrahman, 1995), (Dolan <i>et al.</i> , 2001), (Zou, 2003)	CFRP	8,0	-	-	3,00
(Abdelrahman, 1995)	CFRP	12,5	-	-	3,50
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	147,13	1,11

Continúa en la página siguiente.

Referencia	Tipo de tendón	Ø mm	% f_u	E_s (GPa)	R (%)
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	147,36	1,09
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	147,54	1,02
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	146,06	1,10
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	146,05	1,14
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	146,4	1,05
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	150,4	1,18
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	142,87	1,15
(Yang <i>et al.</i> , 2018)	CFRP	8,0	50	148,02	1,12
(Abdelrahman, 1995)	AFRP	6,0	-	-	14,0

Es imprescindible, para las pruebas de relajación, tener en cuenta la experimentación en condiciones de contorno tales como combinaciones de materiales, niveles de carga y duración de la prueba. La literatura consultada recomienda que las tasas de relajación se deben comparar después de 1000 h, momento a partir del cual la relajación de la matriz generalmente se completa. En la Tabla 4.4 se observa que la relajación es insignificante para los tendones de CFRP (menores al 3,5%); muestras de GFRP exhiben valores de relajación similares de hasta 3,97%. Los resultados para los tendones de BFRP indican valores más elevados, en un rango que oscila entre 2,45 hasta 7,11%. En el caso específico de los tendones de AFRP exhiben mayores valores de relajación en comparación con los demás tendones, llegando hasta 14%, pero los datos experimentales encontrados son escasos. Sin embargo, Przygocka y Kotynia (2018) y Lou *et al.* (2016) plantean que a pesar de los índices más elevados de relajación que exhiben estos tendones, la pérdida total de la fuerza de pretensado no se verá afectada de forma notable ya que el módulo

de elasticidad de los tendones de AFRP es bajo. De manera general, se puede resumir que las pérdidas debido a la relajación varían con el tipo de fibra y generalmente son menos del 14 %.

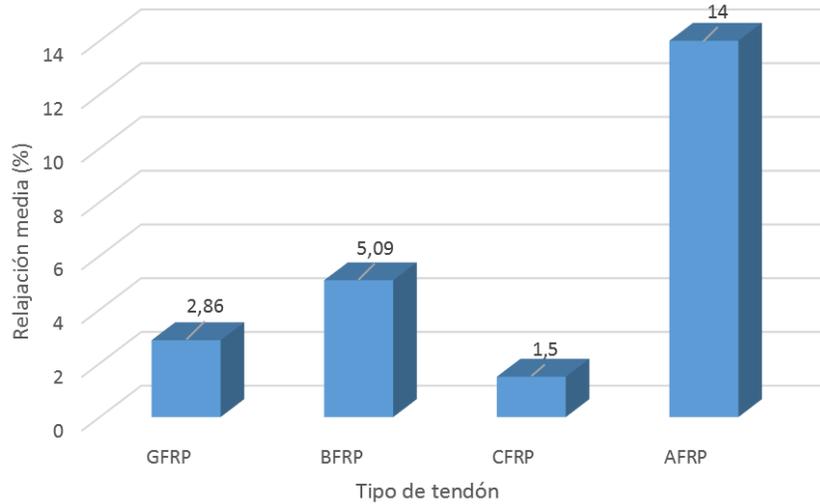


Figura 4.9: Relajación media para cada tipo de tendón.

Finalmente, como muestran los valores promedio en la Figura 4.9, se puede afirmar que las muestras de CFRP investigadas tienden a mostrar tasas de relajación más bajas ($R_{CFRP} \approx 1,5\%$), seguidas de las muestras de GFRP ($R_{GFRP} \approx 2,86\%$), BFRP ($R_{BFRP} \approx 5,09\%$) y AFRP ($R_{AFRP} \approx 14,0\%$), esta diferencia se pudiera atribuir a la diferencia de los módulos elásticos de las fibras o el contenidos de volumen de fibra.

Adicionalmente, al comparar los valores de pérdidas totales de la Tabla 4.3 con los datos de relajación presentados en la Tabla 4.4 para el AFRP, se observan valores similares. Esto constituye una discrepancia ya que se estaría atribuyendo la totalidad de las pérdidas solo al fenómeno de la relajación. Por ello se debe profundizar y hacer un análisis más detallado sobre las pérdidas de pretensado en vigas de hormigón con tendones de AFRP.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Las principales conclusiones obtenidas son:

- El FRP es un material anisótropo lo que se traduce en mejores propiedades mecánicas en la dirección longitudinal. Las propiedades materiales de los FRP dependen de las fibras, las matrices y las relaciones fibra-volumen. Sin embargo, sus propiedades mecánicas son elásticas lineales y, respecto de las del acero, presentan menores módulos de elasticidad y a su vez ofrecen mayores tensiones de rotura por tracción.
- La implementación del pretensado utilizando FRP incrementa la durabilidad de las estructuras debido a su resistencia a la corrosión, lo que convierte al FRP en una posible alternativa frente al empleo de armaduras activas convencionales de acero.
- Al igual que ocurre en el caso de tendones de acero, cuando se emplean tendones de FRP en las vigas de hormigón pretensado, es fundamental tener en cuenta las pérdidas, dado que estas pueden influir en la capacidad de carga y en el desempeño estructural de las vigas con el transcurso del tiempo.
- Los códigos de diseño estructural actuales no proporcionan una orientación clara

para el cálculo de las pérdidas de pretensado cuando se emplean tendones de FRP.

- Las pérdidas de pretensado de los tendones de FRP debidas al acortamiento elástico, la fluencia y la retracción del hormigón suelen ser menores que las pérdidas correspondientes de los tendones de acero debido al menor módulo de elasticidad del FRP. Este tipo de pérdidas pueden calcularse suficientemente bien utilizando los códigos de diseño estructural actuales, como por ejemplo, el Eurocódigo 2.
- Aunque los efectos de la fluencia y retracción en el hormigón han sido ampliamente estudiados y cuentan con respaldo en códigos de diseño soportados por resultados experimentales, no ocurre lo mismo con la relajación del FRP, por lo que una estimación imprecisa de la relajación en la tensión de los tendones de FRP podría llevar a una valoración inadecuada, ya sea subestimando o sobreestimando las pérdidas de pretensado.
- El nivel de la fuerza de pretensado observado en los ensayos realizados es entre 24 % y 35 % para el GFRP (máximo permitido de 45 %), 50 % para el BFRP, 60 % en el AFRP (máximo permitido de 60 %) y entre 50 % y 70 % (máximo permitido de 65 %) de la resistencia máxima de los tendones de FRP. Las normativas de diseño establecen límites, normalmente del 40 al 65 %, con el propósito de prevenir la ruptura causada por la deformación gradual bajo carga constante.
- Los resultados indican que, las pérdidas totales son menores en el caso GFRP (10,77 %), seguidos por CFRP (10,88 %), mientras que los de BFRP (14,25 %) muestran las mayores pérdidas. En los tendones de AFRP no se tienen datos suficientes para incluirlos en esta comparación.
- En lo que respecta a las vigas pretensadas con tendones de AFRP y BFRP se encuentran menos investigaciones experimentales en la literatura revisada. Por lo

que los datos son escasos en comparación con los dados, por ejemplo, para las vigas con tendones de CFRP. En este sentido es difícil distinguir una influencia clara de los diferentes parámetros en las pérdidas de pretensado de los tendones de BFRP y AFRP. De cualquier forma resalta que, los parámetros que influyen en las pérdidas de pretensado no se pueden analizar independientes del resto.

En cuanto a futuras líneas de investigación cabe considerar:

- No existen valores específicos consensuados para la relajación de tensiones en el refuerzo FRP, utilizados en la evaluación de pérdidas en pretensado. Calcular las disminuciones en el pretensado a través de la relajación de tensiones de manera análoga a cómo se realiza con el acero, podría llevar a resultados de estimación poco precisos, lo que subraya la necesidad de una mayor exploración en este ámbito.
- Los enfoques de predicción de pérdidas de pretensado utilizando FRP han generado avances en los últimos años. No obstante, encontrar soluciones prácticas y sencillas para la estimación precisa de las pérdidas de pretensado ha resultado ser un desafío debido a la carencia de resultados exitosos en experimentos que involucren diversos tipos de FRP. En ese sentido sería interesante plantear investigaciones para profundizar en los siguientes aspectos:
 - Realizar un estudio en el que se compare de forma viable todos los FRP (GFRP, CFRP, AFRP y BFRP) en relación con el acero como armadura activa en vigas de hormigón pretensadas. Esto implica evaluación de propiedades a largo plazo y en condiciones ambientales similares, para comparar cómo los materiales FRP mantienen su integridad con el tiempo. Para ello se plantea una duración del estudio de un año como mínimo, ya que la mayoría de las pérdidas suele ocurrir dentro de los primeros meses, y un año después no se

debieran observar cambios significativos. Se recomienda seleccionar una variedad de materiales FRP representativos, como GFRP, CFRP, AFRP y BFRP, junto con el acero como material de referencia, garantizando la homogeneidad y calidad de los especímenes. También se deberán establecer procedimientos de prueba estandarizados para medir las pérdidas de pretensado en cada tipo de material. Además, se deberán considerar diversas condiciones de carga que simulen situaciones de diseño realistas, como cargas de servicio y sobrecargas, evaluando el impacto de diferentes niveles de pretensado.

- Estudiar consideraciones económicas y de sostenibilidad al utilizar materiales FRP en comparación con el acero. Esto podría incluir análisis de costo-beneficio, evaluación del ciclo de vida y el impacto ambiental de los materiales utilizados en la construcción.

Referencias

- Abdelrahman, A. (1995). *Serviceability of Concrete Beams Prestressed by Fibre Reinforced Plastic Tendons*. Phd thesis, University of Manitoba, Winnipeg.
- Abdelrahman, A. and Rizkalla, S. (1997). “Serviceability of concrete beams prestressed by carbon-fiber-reinforced-plastic bars,”. *ACI Structural Journal*, 94(4):pp. 447–457. <https://doi.org/10.14359/496>.
- American Concrete Institute (2004). *ACI Committee 440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*. Technical Report 440.4R-04.
- American Concrete Institute (2006). *ACI Committee 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. Technical Report 440.1R-06.
- American Concrete Institute (2007). *ACI Committee 440.7R-07. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for concrete structures*. Technical Report 440.7R-07.
- American Concrete Institute (2019a). *ACI Committee 209-08. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. Technical Report 209R-92.

- American Concrete Institute (2019b). *ACI Committee 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. Technical Report 318-19.
- Arockiasamy, M., Sowrirajan, R., and Zhuang, M. (1995). “Behaviour of beams prestressed or strengthened with fiber reinforced plastic composites,”. *IABSE Reports*, 997-1002:pp. 996–1002. <https://doi.org/10.5169/seals-55301>.
- Asociación Española de Normalización (2020). *Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación*. Technical Report UNE-EN 1992-1-1.
- Atutis, M., Valivonis, J., and Atutis, E. (2018). “Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers. Part II: Stress relaxation phenomenon,”. *Composite Structures*, 202:pp. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.109>.
- Atutits, M. and Shiho, K. (2020). “Analysis of flexural concrete beams prestressed with basalt composite bars. Analytical-experimental approach,”. *Composite Structures*, 243:pp. 112–172. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112172>.
- Belarbi, A., Reda, M., Poudel, Tahsiri, H., Dawood, M., and Gencturk, B. (2018). Prestressing Concrete with CFRP Composites for Sustainability and Corrosion-Free Applications. In *MATEC Web of Conferences. 2nd International Congress on Materials Structural Stability (CMSS-2017)*, volume 149.
- Borosnyoi, A. (2003). *Serviceability of CFRP prestressed concrete beams*. Phd thesis, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Civil Engineering, Budapest.

- Braimah, A., Green, M., and Campbell, T. (2006). “Fatigue behaviour of concrete beams post-tensioned with unbonded carbon fibre reinforced polymer tendons,”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(9):1140–1155. <https://doi.org/10.1139/106-063>.
- Braimah, A., Green, M. F., and Soudki, K. (2003). “Long-Term Behavior of CFRP Prestressed Concrete Beams,”. *PCI Journal*, 48:pp. 98–107. <https://doi.org/10.15554/pcij.03012003.98.107>.
- CAN/CSA-S6:19 (2019). *Canadian highway bridge design code*. Technical report, Canadian Standards Association, Ottawa, Ontario, Canada.
- CAN/CSA-S806:12 (2021). *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. Technical report, Canadian Standards Association, Ottawa, Ontario, Canada.
- Caneiro, J. and Wainshtok, H. (2015). La seguridad en el diseño estructural con el empleo de barras de PRF como refuerzo del hormigón. In *1er Taller de Seguridad Estructural*.
- Dolan, C., Bakis, C., and Nanni, A. (2001). *Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons*. Technical report, United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- Domenico, N. (1995). Bond properties of CFCC prestressing strands in pretensioned concrete beams. Master en ciencias en ingeniería civil, University of Manitoba, Winnipeg.
- Dominik, H., Proske, T., Graubner, C., Bujotzek, L., and El Ghadioui, R. (2023). “Theoretical and experimental investigation of the time-dependent relaxation rates of GFRP and BFRP reinforcement bars,”. *Structural Concrete*, 24:pp. 2800–2816. <https://doi.org/10.1002/suco.202200212>.

- Ehsani, M., Saadatmanesh, H., and C., T. (1997). “Transfer and flexural bond performance of Aramid and Carbon FRP tendons,”. *PCI Journal*, 42:pp. 76–86. <https://doi.org/10.15554/pcij.01011997.76.86>.
- ElMahdy, G. and Fadel, A. (2008). Effect of type of FRP tendon on prestress losses. In *5th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-V)*, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Federation Internationale du Béton (FIB) (2007). *FRP reinforcement in RC structures*. Technical report.
- Federation Internationale du Béton (FIB) (2010). *Model Code*. Technical report.
- Gandarillas, G. (2019). Estudio del comportamiento estructural de elementos de hormigón pretensados con armadura de FRP. Trabajo final de máster, Escola Tècnica Superior d’Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Barcelona.
- García, J. (2013). Estructuras de hormigón pretensado armadas con FRP. Master’s thesis, Universitat Politècnica de València, València.
- Grace, N. and Abdei-Sayed, G. (1998). “Behavior of Externally Draped CFRP Tendons in Prestressed Concrete Bridges,”. *PCI Journal*, 43(5):pp. 88–101. <https://doi.org/10.15554/pcij.09011998.88.101>.
- Haliza, J., Mohd, O., Hazizan, A., and Zainal, A. (2015). “Effect of Surface Modification on Sawdust Reinforced High Density Polyethylene Composites Under a Wide Range of Strain Rates,”. *Materiale Plastice*, 53:pp. 84–89.
- Hassan, S. and Tarek, H. (2003). “Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures,”. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5(1):pp. 16–28. <https://doi.org/10.1002/pse.139>.

- Hernández, E. and Montes, L. M. (2007). *Hormigón armado y pretensado*. Grupo de Investigaciones TEP-190 Ingeniería e infraestructuras, Granada.
- Howland, J., Castañeda, A., Corvo, F., and Martín, A. (2016). “Estudio del ambiente agresivo costero de La Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado,”. *CENIC. Ciencias Químicas*, 46:pp. 1–8.
- Jokūbaitis, A. and Valivonis, J. (2022). “An Analysis of the Transfer Lengths of Different Types of Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement,”. *Polymers*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/polym14193931>.
- Knight, D., Visintin, P., and Oehlers, D. (2015). “Displacement-based simulation of time-dependent behaviour of RC beams with prestressed FRP or steel tendons,”. *Structural Concrete*, 16(3):406–417. <https://doi.org/10.1002/suco.201400039>.
- Krem, S. (2013). *Bond and Flexural Behaviour of Self Consolidating Concrete Beams Reinforced and Prestressed with FRP Bars*. Phd thesis, University of Waterloo.
- Legasa, T. (2021). Comportamiento en Estado Límite Último de Cortante de vigas de hormigón pretensadas con FRP. Master en ingeniería de caminos, canales y puentes, Escola Tècnica Superior d’Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Barcelona.
- Lou, T. and Karavasilis, T. (2018). “Time-dependent assessment and deflection prediction of prestressed concrete beams with unbonded CFRP tendons,”. *Composite Structures*, 194:365–376. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.013>.
- Lou, T., Lopes, S., and Lopes, A. (2014). “A finite element model to simulate long-term behavior of prestressed concrete girders,”. *Finite Elements in Analysis and Design*, 81:pp. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.11.007>.

- Lou, T., Lopes, S., and Lopes, A. (2016). “Time-dependent behavior of concrete beams prestressed with bonded AFRP tendons,”. *Composites Part B: Engineering*, 97:pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.070>.
- Lämmlein, T., Justs, J., Terrasi, G., and Lura, P. (2021). “Prestressing low clinker structural concrete elements by ultra-high modulus carbon fibre reinforced polymer tendons,”. *Materials and Structures*, 54(1):pp. 51. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01634-9>.
- Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R., Tadros, G., Rizkalla, S., and Guha-Thakurta, A. (1997). “Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring,”. *Cement and Concrete Composites*, 19(1):pp. 21–33. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(96\)00040-6](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(96)00040-6).
- Mahmoud, Z. (1997). *Bond characterisitcs of fibre reinforced polymers prestressing reinforcement*. Phd thesis, Alexandria University, Egypt.
- Mahmoud, Z., Rizkalla, S., , and Zaghoul, R. (1999). “Transfer and development lengths of carbon fiber reinforced polymers prestressing reinforcement,”. *ACI Structural Journal*, 96:pp. 594–602. <https://doi.org/10.14359/696>.
- Martin, N. and Soudki, K. (2015). “Fatigue Behavior of Full-Scale Slab Bridge Strips with FRP Reinforcement,”. *Journal of Composites for Construction*, 19(2):pp. 04014047. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000514](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000514).
- Mertol, H., Rizkalla, S., and Scott, P. (2007). “Durability of Concrete Beams Prestressed with CFRP,”. *ACI Symposium Publication*, 245. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000233](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000233).

- Mirshekari, M., Donchev, T., Petkova, D., and Limbachiya, M. (2016a). Deformability of pretensioned PC beams with BFRP reinforcement. In *8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2016)*.
- Mirshekari, M., Donchev, T., Petkova, D., and Limbachiya, M. (2016b). Differences in losses of prestress between steel and FRP reinforcement. In *Concrete Solutions 2016, 6th International Conference on Concrete Repair*.
- Mitchell, D., Cook, W., Khan, A., and Tham, T. (1993). “Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand,”. *PCI Journal*, 38:pp. 52–66. <https://doi.org/10.15554/pcij.05011993.52.66>.
- Mohsen, A., Rajan, S., and Amer, A. (1993). “Comparative study of transfer length in fiberglass and steel pretensioned concrete members,”. *Pci Journal*, 38:pp. 52–63. <https://doi.org/10.15554/pcij.11011993.52.63>.
- Moscoso, C. (2022). Estudio numérico del comportamiento de elementos pretensados pretesos con barras de polímeros reforzados con fibras bajo solicitaciones de flexión. Trabajo final de máster, Escola Tècnica Superior d’Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Barcelona.
- Motwani, P., Dhruw, S., and Laskar, A. (2021). “Finite Element Analysis and Design of Test Setup for Determination of Transfer Length in BFRP Prestressed Concrete Beams,”. *Advanced Materials Letters*, 12(9):pp. 1–7. <https://doi.org/10.5185/amlett.2021.091660>.
- Motwani, P., Rather, A. I., and Arghadeep, L. (2022). “Transfer stage parameters for concrete beams prestressed with BFRP bars: Experimental and fi-

- nite element studies,”. *Construction and Building Materials*, 315:pp. 125639. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125639>.
- Nanni, A., Zadeh, A., and Jawaheri, H. (2014). *Reinforced concrete with FRP bars. Mechanics and design*. Taylor Francis Group.
- Nordin, H. (2005). Strengthening structures with externally prestressed tendons. Master’s thesis, Luleå University of Technology, Structural and Construction Engineering.
- Noël, M. and Soudki, K. (2013). “Effect of Prestressing on the Performance of GFRP-Reinforced Concrete Slab Bridge Strips,”. *Journal of composites for construction*, 17(2):pp. 188–196. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000326](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000326).
- Oskouei, A. and Taleie, S. (2010). “Experimental Investigation on Relaxation of Fiber-reinforced Polymer Composites,”. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29:pp. 2705 – 2718. <https://doi.org/10.1177/0731684409357256>.
- Pavlović, A., Donchev, T., Petkova, D., and Limbachiya, M. (2019a). Initial estimate of short and long-term prestress losses of BFRP pretensioned RC beams. In *14th International Fibre Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures Conference (FRPRCS-14)*.
- Pavlović, A., Donchev, T., Petkova, D., and Limbachiya, M. (2022). “Short and Long-Term Prestress Losses in Basalt FRP Prestressed Concrete Beams under Sustained Loading,”. *Journal of Composites for Construction*, 26(6):pp. 04022069. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001259](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001259).
- Pavlović, A., Donchev, T., Petkova, D., Limbachiya, M., and Almuhausen, R. (2019b). Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: Flexural behaviour and estimation of

- initial prestress losses. In *MATEC Web of Conferences. Concrete Solutions 2019 – 7th International Conference on Concrete Repair*, volume 289.
- Pisani, M. (2000a). “Long-term behaviour of beams prestressed with aramid fibre cables: Part 1: a general method,”. *Engineering Structures*, 22(12):1641–1650. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(99\)00107-8](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(99)00107-8).
- Pisani, M. (2000b). “Long-term behaviour of beams prestressed with aramid fibre cables: Part 2: an approximate solution,”. *Engineering Structures*, 22(12):1651–1660. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(99\)00108-x](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(99)00108-x).
- Przygocka, M. and Kotynia, R. (2018). “Pre-Stress Losses in FRP Pre-Stressed Reinforced Concrete – Subject Overview,”. *Archives of Civil Engineering*, 64(4):pp. 257–268. <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0073>.
- Puigvert, F. (2014). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. Omnia Publisher SL, Barcelona, España.
- Páez, P. (2023). “A simplified approach to determine the prestress loss and time-dependent deflection in cracked prestressed concrete members, prestressed with fiber reinforced polymers or steel tendons,”. *Engineering Structures*, 279:115523. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115523>.
- Reda, M. and Shrive, N. (2003). “New concrete anchors for carbon fiber-reinforced polymer post-tensioning tendons - Part 1: State-of-the-art review/design,”. 100:pp. 86–95. <https://doi.org/10.14359/12442>.
- Saadatmanesh, H. and Tannous, F. (1999). “Relaxation, creep and fatigue behavior of carbon fiber reinforced plastic tendons,”. *ACI Materials Journal*, 96:pp. 143–153. <https://doi.org/10.14359/438>.

- Saeed, Y. (2016). Behavior of prestressed concrete beams with CFRP strands. Master of science in civil environmental engineering.
- Sasaki, I. and Nishizaki, I. (2012). Tensile load relaxation of FRP cable system during long-term exposure test. In *Proceedings of 6th International. Conference on FRRP, Composites in Civil Engineering (CICE2012)*.
- Schmidt, J., Bennitz, A., and Täljsten, B. (2012). “Mechanical anchorage of FRP tendons – A literature review,”. *Construction and Building Materials*, 32:pp. 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.049>.
- Sen, R., Shahawy, M., Rosas, J., and Sukumar, S. (1998). “Durability of aramid pretensioned elements in a marine environment,”. *ACI Structural Journal*, 95(5):pp. 578 – 587. <https://doi.org/10.14359/572>.
- Shi, J., Wang, X., Huang, H., and Wu, Z. (2016). “Relaxation behavior of prestressing basalt fiber-reinforced polymer tendons considering anchorage slippage,”. *Journal of Composite Materials*, 51:pp. 1275–1284. <https://doi.org/10.1177/0021998316673893>.
- Shi, J., Wang, X., Wu, Z., Wei, X., and Ma, X. (2022). “Long-term mechanical behaviors of uncracked concrete beams prestressed with external basalt fiber-reinforced polymer tendons,”. *Engineering Structures*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114309>.
- Shi, J., Wang, X., Wu, Z., and Zhu, Z. (2015a). “Creep behavior enhancement of a basalt fiber-reinforced polymer tendon,”. *Construction and Building Materials*, 94:pp. 750–757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.118>.
- Shi, J., Wang, X., Wu, Z., and Zhu, Z. (2015b). Relaxation behavior of BFRP tendon

- for prestressing application. In *International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering*.
- Singh, M. (2014). Long Term and Short Term Deflection of GFRP Prestressed Concrete Slabs. Master of science, University of Manitoba, Manitoba, Canadá.
- Wolff, R. and Miesslerer, H.-J. (1993). Glass Fibre Prestressing System. In Nanni, A., editor, *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Developments in Civil Engineering, pages pp. 305–332. Elsevier, Oxford.
- Yang, D., Zhang, J., Song, S., Zhou, F., and Wang, C. (2018). “Experimental Investigation on the Creep Property of Carbon Fiber Reinforced Polymer Tendons under High Stress Levels,”. *Materials*, 11(11):pp. 2273. <https://doi.org/10.3390/ma11112273>.
- Youakim, S. and Karbhari, V. (2007). “An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons,”. *Construction and Building Materials*, 21(5):pp. 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.006>.
- Youssef, T. and Benmokrane, B. (2011). “Creep behavior and tensile properties of GFRP bars under sustained service loads,”. *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, 2:pp. 675–694. <https://doi.org/10.14359/51682449>.
- Zawam, M., Soudki, K., and West, J. S. (2017). “Effect of Prestressing Level on the Time-Dependent Behavior of GFRP Prestressed Concrete Beams,”. *Journal of Composites for Construction*, 21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000783](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000783).
- Zawam, M., Soudki, K., and West, J. S. (2019). “Factors affecting the time-dependent behaviour of GFRP prestressed concrete beams,”. *Journal of Building Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.007>.

REFERENCIAS

Zou, P. (2003). “Long-term properties and transfer length of fiber-reinforced polymers,”. *Journal of Composites for Construction*, 7(1):pp. 10 – 19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2003\)7:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:1(10)).

Zou, P. and Shang, S. (2007). “Time-dependent behaviour of concrete beams pretensioned by carbon fibre-reinforced polymers (CFRP) tendons,”. *Construction and Building Materials*, 21(4):pp. 777–788. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.008>.

Anexos

Anexo A

Indicadores Bibliométricos

A continuación se brinda un resumen de los datos más relevantes sobre las principales investigaciones de los últimos años. La búsqueda incluyó palabras claves como: *prestress*, *beams*, *FRP tendons*, *losses*, *fiber-reinforced polymer*. Los siguientes gráficos y figuras fueron extraídos de la *Web Of Science* (<https://www.webofscience.com/>).

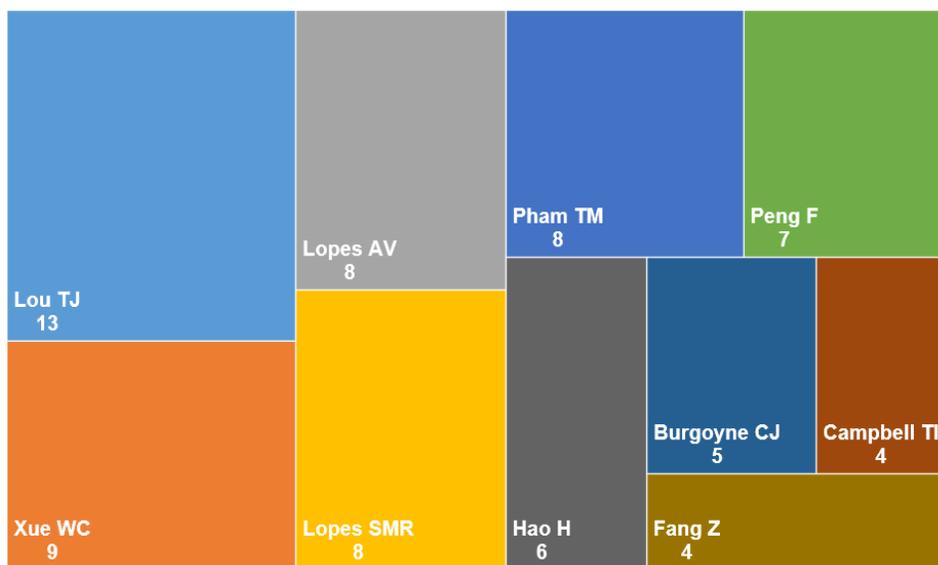


Figura A.1: Autores más destacados.

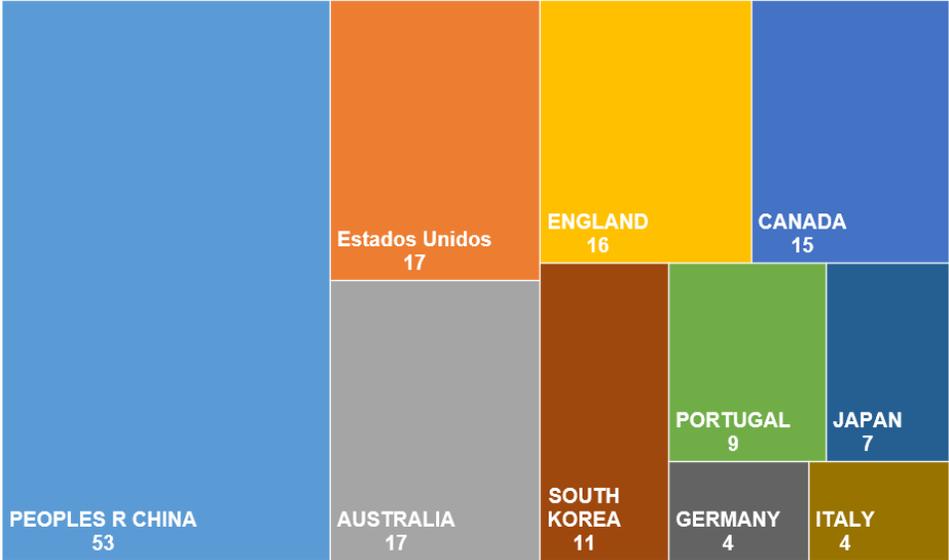


Figura A.2: Número de publicaciones por países.

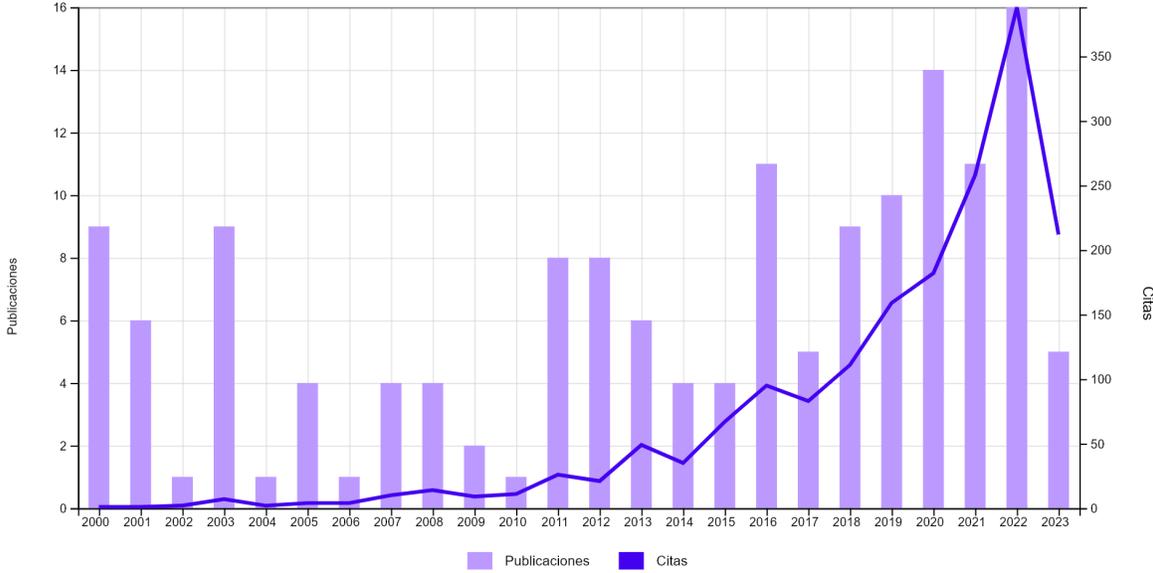


Figura A.3: Número de publicaciones en los últimos 20 años.

Partiendo de la información genérica, se hace una selección de los trabajos más re-

levantes que finalmente han sido incluidos en la presente investigación, formando una subbase de datos representada en la Tabla 4.1. Se presenta a continuación un análisis bibliométrico de este conjunto de referencias.

En la Figura A.4 se relaciona el número de estudios por año para obtener una visión general de cómo se distribuyen los datos. La tendencia observada revela un notorio progreso en la investigación sobre las pérdidas de pretensado en vigas reforzadas con tendones de FRP a lo largo de los años. Este avance se hace particularmente evidente en el período comprendido entre 2015 y 2022. Sin embargo, es relevante señalar que, en lo que respecta al año 2023, no es posible formular una conclusión definitiva debido a que el año aún está en curso y, por lo tanto, no se dispone de datos completos para evaluar la dirección de esta tendencia en ese año específico.

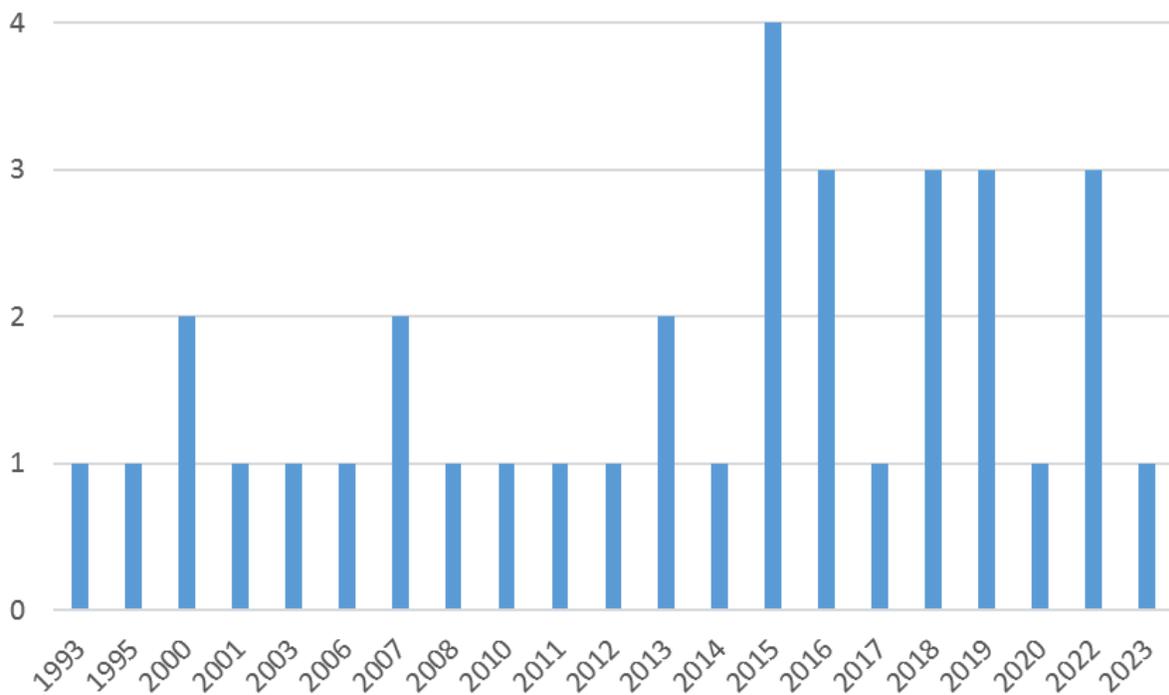


Figura A.4: Cantidad de estudios a lo largo de los años.

En relación a la naturaleza de los estudios examinados, es importante resaltar que los artículos científicos se presentan como la fuente predominante en la investigación de pérdidas de pretensado en vigas con tendones de FRP, con una representación del 74 %. Sin embargo, para lograr una comprensión completa y exhaustiva de este campo, se han considerado diversas fuentes, tales como tesis académicas (11 %), memorias de congresos (12 %) y detallados informes técnicos (3 %). Esta diversidad de fuentes garantiza una amplia cobertura de enfoques metodológicos y perspectivas, lo que enriquece la investigación y ofrece una visión multidimensional de las pérdidas de pretensado en esta área específica.

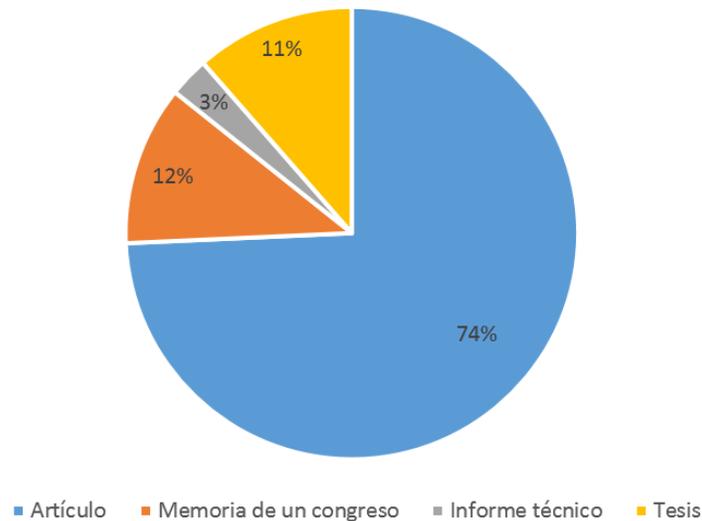


Figura A.5: Naturaleza de los estudios.

Análisis de tipo de estudios

En cuanto a la distribución de los tipos de estudios en el corpus de investigación, se destaca que la categoría predominante corresponde a los trabajos de naturaleza analítica, contabilizándose un total de 19 estudios que siguen esta metodología. No obstante, resulta igualmente notable que los trabajos de corte experimental, que suman un total de 16, se

presentan en una proporción cercana. Además, se identifican 10 trabajos que combinan ambas aproximaciones, caracterizándose por desarrollar inicialmente un enfoque teórico que posteriormente se respalda y valida mediante la obtención de datos experimentales. Este enfoque híbrido brinda una perspectiva integral y rigurosa en la investigación, al fusionar la formulación teórica con la confirmación empírica de los resultados.

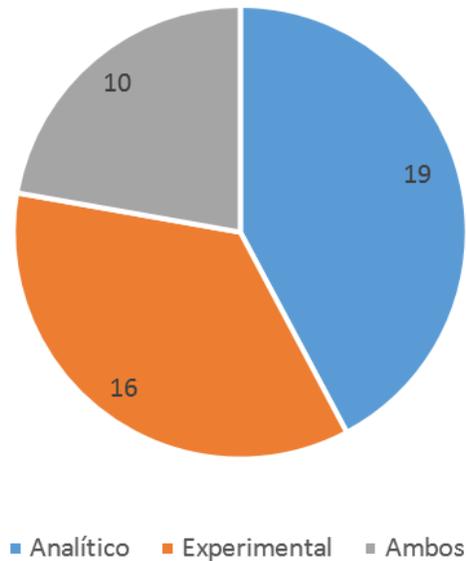


Figura A.6: Tipos de estudios.

Análisis de palabras claves

La representación visual de las palabras clave más utilizadas en los estudios mediante un gráfico de nube de palabras se presenta como una herramienta fundamental para identificar las temáticas y enfoques predominantes en el ámbito de investigación. Este enfoque gráfico permite una rápida visualización de los conceptos más recurrentes, lo que contribuye a destacar las áreas de mayor interés, ofreciendo una visión panorámica de las principales áreas de investigación y las interconexiones conceptuales en el campo de estudio, lo que resulta invaluable para comprender mejor el estado actual de la

subraya la importancia de estos conceptos en la investigación de pérdidas de pretensado en vigas con tendones de FRP. Estas conclusiones sobre las palabras clave ofrecen valiosas perspectivas:

- **Énfasis en la pérdida de pretensado:** La repetición de «pérdidas» sugiere que la comunidad de investigadores prioriza el estudio de este fenómeno en estructuras pretensadas con FRP. Esta constante atención puede indicar la creciente conciencia de la necesidad de abordar las pérdidas de pretensado de manera efectiva para garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras.
- **Relevancia del pretensado:** La frecuente aparición de «pretensado» destaca la centralidad de este proceso en la investigación.
- **Énfasis en el FRP:** La presencia de «FRP» como una palabra clave principal subraya el interés en los materiales compuestos de fibra de polímero reforzado y su aplicación en estructuras de hormigón pretensado. Esto refleja la creciente popularidad de estos materiales en la construcción debido a sus ventajas en términos de durabilidad y resistencia a la corrosión.
- **Relajación y fluencia:** Las palabras «relajación» y «fluencia» sugieren que la investigación se centra en comprender cómo estos fenómenos afectan el comportamiento a largo plazo de los tendones de FRP en vigas pretensadas. Estos conceptos son cruciales para garantizar la integridad estructural a lo largo del tiempo.
- **Diversidad en materiales FRP:** La inclusión de «AFRP», «CFRP», «BFRP» y «GFRP» en la nube de palabras indica que la comunidad de investigadores se interesa en una amplia variedad de materiales compuestos de fibra de polímero reforzado en sus estudios. Cada tipo de FRP tiene propiedades únicas, lo que

sugiere que se busca comprender cómo estas propiedades influyen en las pérdidas de pretensado y el comportamiento estructural.

- Comportamiento de vigas de hormigón: Las palabras «comportamiento», «vigas» y «hormigón» indican un enfoque en el análisis y comprensión del comportamiento estructural de las vigas de hormigón pretensado con tendones de FRP. Esto sugiere un interés en garantizar la eficiencia y seguridad de estas estructuras.

En resumen, la nube de palabras revela que la comunidad de investigadores se encuentra inmersa en la exploración y el entendimiento de las pérdidas de pretensado en vigas con tendones de FRP, con una atención especial en conceptos claves como el pretensado, los materiales FRP y el fenómeno de relajación. Se enfatiza sobre la necesidad de considerar las particularidades de cada tipo de material en las investigaciones y en la aplicación práctica de estos materiales en la construcción de vigas de hormigón pretensado.