

BLOQUE 3

CONCLUSIONES DEL PROYECTO

1 CONCLUSIONES

En este bloque se sintetizan las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto. Primero se exponen las conclusiones relativas al bloque teórico incorporando las obtenidas de los estudios particulares planteados como objetivos secundarios en la introducción al proyecto. Y seguidamente se muestran las conclusiones obtenidas tras la campaña experimental.

1.1 BLOQUE TEÓRICO

En primer lugar se discute la necesidad de modificar la normativa convencional de hormigón armado:

- Los materiales compuestos exhiben un comportamiento lineal elástico hasta la rotura, a diferencia del acero que muestra un comportamiento elasto-plástico. De hecho es la fluencia del acero lo que otorga al elemento ductilidad. Sus propiedades varían dependiendo de la dirección de las cargas, es decir, tienen un comportamiento anisótropo debido a la orientación preferencial de las fibras. Poseen una excelente resistencia a la tracción del orden de dos a tres veces superior a la de un acero normal, pero sin embargo a compresión son bastante débiles. Y se caracterizan por un módulo elástico relativamente bajo. Con lo cual, es notable el diferente comportamiento de este material respecto del acero, planteándose por tanto la necesidad de modificar la formulación convencional tal como se desarrolla a lo largo del proyecto.

Aunque los FRP se caracterizan principalmente por su durabilidad ante ambientes agresivos y carencia de corrosión, esto no significa que realmente no les afecten a las propiedades mecánicas y por tanto sea necesario contemplarlo desde el punto de vista de diseño. A continuación se exponen las conclusiones más destacables:

- La alcalinidad del propio hormigón es un factor que afecta fuertemente a las propiedades de los FRP, seguido muy de lejos por la humedad. Sin embargo ataques ácidos o iones cloruro parecen no perjudicarles. Estos efectos particularmente se muestran más acusados sobre los GFRP y AFRP siendo los CFRP menos vulnerables
- Hay que prestar gran atención al fenómeno de creep por el que, mantenido el refuerzo a una tensión por debajo de su tensión última a corto periodo, puede fallar trascurrido un determinado periodo de tiempo. Este fenómeno no depende sólo del tiempo pues los factores ambientales así como la temperatura pueden actuar como agentes aceleradores. Análogamente, los CFRP son los menos susceptibles.
- Habida cuenta de lo comentado en los párrafos anteriores, surge la necesidad de definir un coeficiente reductor de las propiedades mecánicas de los FRP en busca de un diseño seguro de la estructura. Este factor reductor se define con sumo detalle en el capítulo 6 del bloque de teoría y depende de las condiciones ambientales así como de la vida útil de diseño [16].

- En concreto, para el caso de los GFRP y AFRP sus propiedades iniciales pueden reducirse aproximadamente a la mitad, para una vida de diseño de 100 años y bajo unas condiciones ambientales peninsulares, y por tanto conservando una resistencia de diseño cercana a un acero normal. Por el contrario los CFRP bajo las mismas condiciones a penas se ven afectados.

Llegado a este punto, en el que se conocen las propiedades de los materiales compuestos y la forma de evaluarlas desde el punto de vista de diseño, seguidamente se comentan las ideas más relevantes en relación a la modificación de la formulación correspondiente a los Estados Límite Últimos. Concretamente los primeros cuatro párrafos se hacen referencia a las solicitaciones normales y el resto a cortante. Hay que recordar que este documento se centra sólo en elementos a flexión simple, no obstante debido a la profundidad del análisis puede ser extrapolado al resto de los casos.

- Datos experimentales obtenidos por diferentes investigadores a nivel internacional avalan que las mismas hipótesis de partida del hormigón armado convencional son aplicables al armado por medio de barras de FRP. Comentar además que este hecho es objeto de estudio en la parte experimental, sacando por supuesto las conclusiones oportunas [16].
- En lo que se refiere a los dominios de deformación, la carencia de un comportamiento plástico implica que el dominio 3 desaparece. En el caso del armado convencional este dominio es el preferencial de cara al diseño, pues promueve un comportamiento dúctil del elemento aprovechando la máxima capacidad tanto del hormigón como del acero. En el caso de los materiales compuestos sólo se queda reducido en una línea que separa los dos dominios únicos dominios de diseño, esto es, el 4 y el 2. A la profundidad de la fibra neutra que delimita dicha línea se le llama distiguidamente fibra neutra balanceada.
- La filosofía de diseño cambia drásticamente siendo marginalmente preferible el fallo por compresión del hormigón que rotura de la armadura a tracción. Este cambio se realiza principalmente para paliar los efectos negativos del bajo módulo elástico de los materiales compuesto y que se resumen en lo siguiente:
 - Profundidad de la fibra neutra muy baja y por tanto cabeza de compresión muy pequeña. Planteando el equilibrio de fuerzas en la sección y teniendo en cuenta la alta resistencia de los FRP promueve que en la mayoría de los casos la sección se encuentre sobre-reforzada.
 - Fuerte gradiente de deformaciones en el hormigón.
 - Escasa capacidad de la sección de absorber momento debido a la pequeña cabeza de compresión.
 - Grandes flechas y aberturas de fisuras.

Por todo ello que el dominio adecuado de diseño sea el 4 en busca de controlar la deformación del refuerzo. Añadir además que dentro de lo que cabe, la rotura frágil del hormigón presenta un grado de deformabilidad mayor que el colapso súbito de las barras.

- En base al párrafo anterior, habida cuenta que el modo de diseño preferible es por rotura del hormigón, la formulación se complica sensiblemente al incorporar una nueva incógnita que es la deformación del refuerzo.

- Es manifiesto que las propiedades de los refuerzos, a parte por supuesto de la resistencia del hormigón, afectan fuertemente a los mecanismos de resistencia a cortante.
- En lo que concierne a la contribución del hormigón (V_{cu}), debido al bajo módulo elástico la deformación del refuerzo es considerable, y por tanto la contribución a cortante de la zona no fisurada y rozamiento entre los labios de la grieta del hormigón son notoriamente inferiores respecto al armado con acero. No obstante, sigue siendo de aplicación la fórmula convencional sin más que contemplar una cuantía de acero equivalente de refuerzo longitudinal.
- Y por último, el diseño de la armadura transversal debe hacerse bajo un control en deformación, a diferencia que el acero que se hace en tensión, en busca de no perjudicar al resto de los mecanismos de resistencia a cortante.

Ahora se exponen las conclusiones más relevantes sobre los Estados Límite de Servicios:

- Bajo similares condiciones, en términos de hormigón, cargas, geometría del elemento y área de refuerzo, el armado con FRP desarrolla normalmente mayores flechas que el acero (del orden de tres a cuatro veces superior). De ahí la reciente importancia de los Estados Límite de Servicio de cara al diseño.
- El método de cálculo de la flecha instantánea puede ser tomado igual que para el armado convencional. Esto es, basado en las fórmulas de resistencia de materiales y definiendo una inercia equivalente intermedia entre la propia al elemento sin fisurar y completamente fisurado. Si para este último se toma la ecuación de Branson [14] hay que tener en cuenta que tiende a sobre estimar la rigidez y hay que corregirlo según propone el código ACI 440 [3]. Aunque se recomienda personalmente que se utilice la inercia propuesta por Bischoff and Scanlon [13] pues no dependen directamente de la relación entre cuantía dispuesta y balanceada y deriva del Eurocódigo 2 [6].
- La flecha diferida, que se debe fundamentalmente a los fenómenos de fluencia y retracción del hormigón, puede ser del orden de la flecha instantánea, luego es importante tenerla en cuenta en el cómputo de la flecha total. Se puede tomar la misma formulación que en el armado convencional (método del coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea) teniendo en cuenta la recomendación dada por el código ACI 440 que reduce el coeficiente multiplicativo ξ un 40%. Esta reducción informa doblemente sobre diferentes niveles de compresión en el hormigón y mayores flechas instantáneas producidas. No obstante, debido a la mencionada importancia y a que depende de muchos otros factores que no se tiene en cuenta en esta formulación es objeto de un estudio más particularizado.
- Similar a lo que ocurre con las deformaciones, la fisuración en piezas armadas con FRP a flexión, tienden a desarrollar mayores aberturas que las de acero. De nuevo esto se debe al bajo módulo elástico. Hay que entender también que, los FRP están exentos de corrosión, luego la fisuración del elemento tiene menor relevancia en cuanto a durabilidad del refuerzo se refiere. Por ello más

que un tema de diseño estructural, la limitación atiende más bien a fines estéticos, pudiendo relajar la limitación aplicada al acero.

- La formula convencional para evaluar la abertura de flecha es directamente aplicable al armado con FRP debido a que es suficientemente sofisticada para informar sobre el diferente comportamiento de este material.

Una vez comentado las principales ideas y conclusiones sobre la metodología de diseño de estos elementos armados con barras de FRP, es hora de dar paso a los estudios particulares planteados como objetivos secundarios.

A continuación se muestran las conclusiones del estudio de la influencia del tipo de refuerzo en cuanto a capacidad de la sección a absorber momento, y tomando como referencia el acero. Para ello es instructiva la siguiente gráfica en la que se muestra el momento resistente adimensional en función de la cuantía longitudinal, para cada tipo de refuerzo y según su dominio preferencial de diseño (esto es, para el acero el dominio 3 y para los FRP el dominio 4). Se supone que se han tomado las propiedades típicas de cada uno de ellos siendo las propiedades de los AFRP muy similares que las de los GFRP y englobándose por tanto dentro de este último:

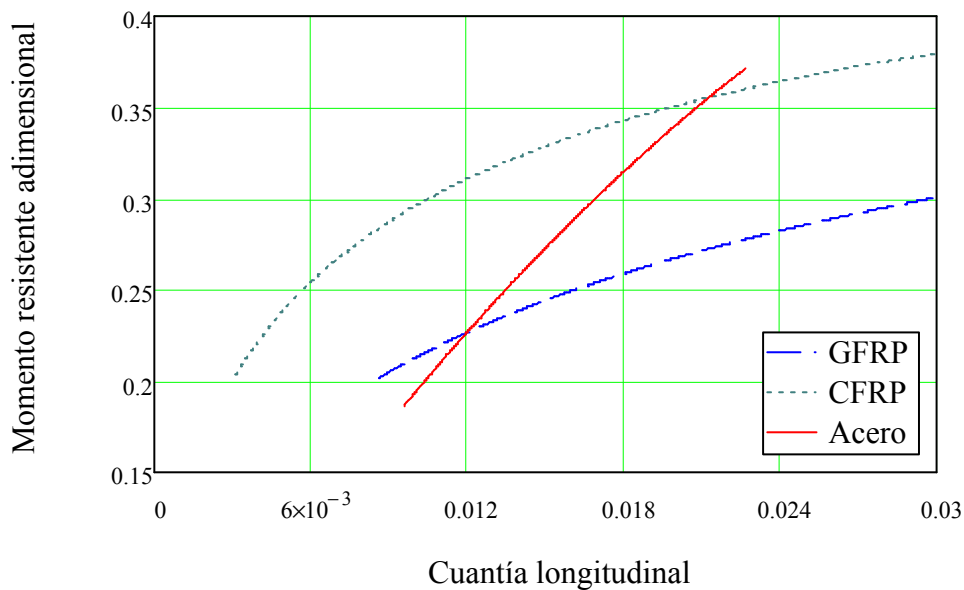


Fig. 1: Momento resistente adimensional en función de la cuantía longitudinal, para cada uno de los refuerzos internos y en sus respectivos dominios de diseño.

- La alta resistencia de los FRP no implica, necesariamente, una mayor capacidad de la sección para soportar mayores momentos. Más bien promueve que la cantidad de refuerzo, para soportar el mismo momento, sea algo menor. No obstante, debido a que el dominio recomendado de diseño es el 4, esta diferencia de cuantías tiende a reducirse a medida que sea mayor el momento demandado ya que el rendimiento del refuerzo cae progresivamente. Es más, para el caso de los GFRP y AFRP se ha visto que su resistencia de diseño, después de aplicarles sus factores reductores ambientales son del orden del acero, luego incluso necesitan mayor cantidad de refuerzo que el propio acero.

- La propiedad realmente influyente es el módulo elástico. Esto se debe igualmente a que, el dominio de diseño recomendado es el 4, de manera que, módulos elásticos más elevados provocan curvas de momentos altas y, consiguientemente, mayores capacidades de la sección. Sin embargo, los FRP se caracterizan por tener módulos elásticos discretos. Hay que recurrir a los CFRP para optar a valores similares al acero, o superiores, si se eligen CFRP de alto módulo.
- Por último, mencionar la planeidad que presentan las curvas de momentos frente a cuantía, independientemente del tipo de FRP en la región de diseño recomendada. Lo cual implica un aumento considerable de la cuantía para incrementar algo el momento resistente necesario.

Ya ha sido ampliamente discutido, tanto a lo largo de este documento así como en este bloque, las implicaciones negativas del bajo módulo elástico que suelen caracterizar a los FRP. Entre ellas cabe destacar la baja profundidad de la fibra neutra que promueve, pequeña cabeza de compresión y por tanto escasa capacidad de la sección de absorber momento. Es lógico pensar que si se aumentara la resistencia del hormigón se podría mejorar la capacidad de la sección, de ahí la necesidad de estudiar la influencia del tipo de hormigón en estos elementos. A continuación se muestra las conclusiones obtenidas. Para ello sirve de utilidad la siguiente gráfica en la que se dibuja el momento resistente en función de la resistencia del hormigón. En ellas se ha supuesto una sección genérica y un refuerzo GFRP típico. Estas suposiciones no son influyentes pues sólo se estudia la tendencia de la curva y no sus valores absolutos.

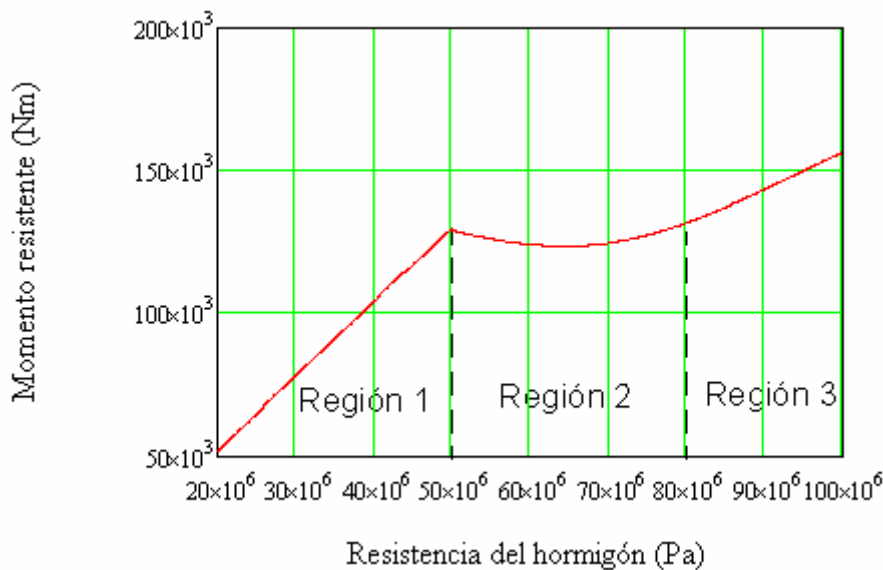


Fig. 1.2: Momento resistente en función de la resistencia del hormigón para un refuerzo típico de GFRP y sección genérica.

- Como se esperaba, la capacidad de la sección aumenta directamente proporcional a la resistencia del hormigón, sin embargo, cuando se salta a hormigones de alta resistencia la tendencia cambia drásticamente. Esto se debe a la fragilización de estos hormigones y en concreto a la propia formulación de la EHE-08 para interpretar este fenómeno. Es decir, para hormigones convencionales la normativa impone una deformación última del

0.35%, pero una vez pasado los 50 MPa impone una reducción paulatinamente de la deformación a medida que se gana en resistencia. De ahí, el cambio tan drástico de la curva. Sin embargo en realidad sería algo más suave pues la fragilización del hormigón es progresiva en todo el rango de resistencia y no sólo en hormigones de alta resistencia.

Y por último, en lo que se refiere al bloque teórico, a continuación se trata el estudio de la flecha diferida. En él se ha analizado la conveniencia de aplicar el método del coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea a elementos armados con material compuesto pues es comúnmente utilizado por la mayoría de las normas, en concreto por el código ACI y EHE. Para ello se ha comparado con el método alternativo propuesto por la EHE-08 que contempla, además del tiempo en el que evalúa la flecha diferida, una serie de variables que dependen de las propiedades de los materiales y de las condiciones externas [26]. Como conclusiones de este estudio comparativo se puede extraer:

- El uso de un único coeficiente multiplicativo de la flecha instantánea conlleva una serie de simplificaciones y suposiciones que no tiene en cuenta muchas de las variables de las que depende. Por ello, el método alternativo propuesto por la EHE-08 es capaz de ajustarse a un espectro mayor de casos e incluso pudiendo acoger en su formulación las diferencias que conlleva el armado con barras de FRP.
- Las propiedades de los elementos, las condiciones externas así como la geometría del mismo, influyen fuertemente en la flecha diferida para un determinado tiempo de evaluación.
- El módulo elástico de los FRP es sensiblemente inferior al acero, lo que conlleva a que el término de flecha diferida por fluencia cambie drásticamente. Esto acompañado a que la resistencia de los FRP suelen ser superiores, y por tanto se necesita menor cuantía, provoca que aún haya más discrepancia en este término.
- La utilización de un coeficiente multiplicativo único puede conducir a valores inadecuados de las deformaciones diferidas. Concretamente para el caso de altos coeficientes de fluencia, de retracción, y longitud del elemento, se puede obtener deformaciones superiores a las predichas para altos valores del producto $n\rho$ (siendo n la relación entre el módulo elástico del FRP y del hormigón y ρ la cuantía longitudinal). Mientras que en el resto de los casos suele proporcionar valores seguros.

1.2 BLOQUE EXPERIMENTAL

El objetivo principal de este bloque es analizar el comportamiento real de vigas a flexión de cara a compararlo con los resultados predichos según la formulación desarrollada. Para ello se diseñaron las vigas según la EHE convenientemente adaptada y en adición también según el código ACI en vista a compararlas entre sí. De este bloque se puede extraer las siguientes conclusiones:

- Realmente las deformaciones y aberturas de fisuras son bastante considerables por lo que los Estados Límite Últimos juegan un papel muy

importante en el diseño de estos elementos tal como se preveía analíticamente. De ahí la necesidad de sobre-reforzar la sección en busca de controlar la deformación del refuerzo.

- El modo de diseño en dominio 4 es bastante ventajoso porque se logra controlar las deformaciones en el refuerzo, siendo menos crítico los Estados Límite de Servicios, y la sección es capaz de absorber un mayor momento.
- La respuesta carga flecha según el código ACI 440.1R-06 es bastante acertado independiente del modo de fallo. Igualmente sucede con la EHE utilizando la inercia equivalente propuesta por Bischoff and Scanlon en la que no depende de la cuantía dispuesta en relación con la balanceada. De ahí que se considera esta última que es la más acertada para adaptarla.
- Es sorprendente la linealidad de la curva de la flecha frente a carga antes y después de la fisuración, que unido a que la formulación es muy acertada, se concluye que existe un excelente control de la flecha en estos elementos.
- Las deformaciones unitarias, y fibra neutra concuerdan bastante bien con los cálculos según la EHE para cargas mayores a la fisuración. De ahí que las suposiciones de partida sean acertadas. Esto es, la sección se mantiene plana antes y después de la deformación y se despreja la colaboración del hormigón a tracción.
- En cuanto a las cargas últimas, los cálculos a flexión según la EHE son más acertados que los proporcionados por el código ACI que son demasiados conservadores. Esto se debe principalmente a que la hipótesis de partida sobre la deformación última del hormigón del código ACI es demasiado conservador y además contempla un coeficiente por cansancio del hormigón que en este caso experimental no es necesario. Mientras que en lo que respecta al cortante parece que los resultados del código ACI son más seguros, siendo los de la EHE aún cuestionables.

1.3 RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES

Finalmente, las conclusiones más importantes de este proyecto se pueden resumir en lo que sigue:

- La formulación convencional desarrollada para el armado con acero es aplicable, en términos generales, al armado con materiales compuestos, sin más que modificar ciertas ecuaciones para tener en cuenta el diferente comportamiento de este material.
- Los Estados Límite de Servicio juegan un importante papel en el diseño del elemento. Por ello, que el dominio preferencial de diseño sea el 4 en busca de controlar la deformación del refuerzo.
- Las excelentes propiedades de los FRP, concretamente la alta resistencia que poseen (del orden de 2 a 3 veces la del acero) y no corrosividad de las armaduras, hacía imaginar una gran batería de beneficios que, junto con la

utilización del hormigones de alta resistencia, se preveía obtener muy buenos resultados. Pero, después de ver los mencionados estudios, desde el punto de vista estructural, todas las expectativas se vienen abajo. Y más que un excelente sustitutivo del armado convencional, se convierte en una alternativa puntual para determinados casos concretos, como su uso bajo ambientes agresivos donde la durabilidad del acero puede ser crítica.

- Mientras que a nivel experimental se puede comprobar que la formulación desarrollada se ajusta con suficiente precisión al comportamiento real.