

Estrategias para evaluar estructuras de hormigón armado con patologías por falta de adherencia

M. MOLINA HUELVA

Dra. Arquitecta. Cesuga - University College Dublin

J. P. GUTIÉRREZ JIMÉNEZ

Dr. Ingeniero de Caminos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC

M. D. GARCÍA ALONSO

Dra. Arquitecta. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, UPM

El siguiente trabajo resume la investigación que ha obtenido el primer premio, dotado por Gas Natural SDG, correspondiente a la segunda edición de los Premios de Investigación que convoca la Fundación Escuela de la Edificación.

Resumen

La adherencia es el principio básico del funcionamiento del hormigón armado como material estructural por la cual se transmiten los esfuerzos de tracción del hormigón al acero. Una de las hipótesis básicas en el cálculo de estructuras de hormigón es suponer la misma deformación para ambos materiales admitiendo que la adherencia es perfecta. Sin embargo, algunos síntomas patológicos que se producen durante las diferentes fases del proceso constructivo, del período de utilización o durante el mantenimiento, pueden debilitar el mecanismo de transferencia de tensiones entre las armaduras y el hormigón y disminuir la capacidad portante y las condiciones de seguridad de las estructuras.

El objetivo fundamental de este artículo es aportar información y criterios con base teórico - experimental para abordar la evaluación de una estructura de hormigón armado afectada por una pérdida de adherencia. En

este artículo se resume el trabajo realizado, por un lado un amplio programa experimental, y por otro, la propuesta de un modelo teórico para la evaluación de estructuras existentes que incorpora los fenómenos de degradación de la adherencia.

1. Introducción

La adherencia es el fenómeno de transferencia de tensiones entre el acero y el hormigón. Ésta es la que hace posible combinar el buen comportamiento del hormigón a compresión y la alta resistencia del acero a tracción en las estructuras de hormigón armado.

Cuando una barra embebida se somete a una fuerza de tracción, la transferencia de tensiones desde el acero al hormigón se produce a través de unas fuerzas de compresión inclinadas que se originan en las corrugas según un ángulo α . La componente radial de estas fuerzas de compresión se equilibra con un anillo de tracciones que aparece en el hormigón rodeando a la barra originando fisuras longitudi-



nales internas. Si no existe armadura confinante estas fisuras atraviesan el recubrimiento y se producirá un fallo frágil en la superficie del hormigón, fallo por splitting (Figura 1a). Sin embargo, si la barra de acero tiene buenas condiciones de confinamiento, el fallo se originará por un desgarramiento de la barra respecto al hormigón que la rodea, fallo por *pull-out* (Tepfers 1973).

La complejidad del fenómeno de la adherencia

entre el hormigón y el acero se debe a que son muchos los factores y parámetros que intervienen, tanto de carácter físico como químico. Además de los relacionados con las características de la barra hay que tener en cuenta otros aspectos tales como las propiedades del hormigón, el recubrimiento, la posición de las barras respecto a la dirección de hormigonado, el confinamiento, la historia de carga, etc., (CEB-FIP 1996, fib 2000).

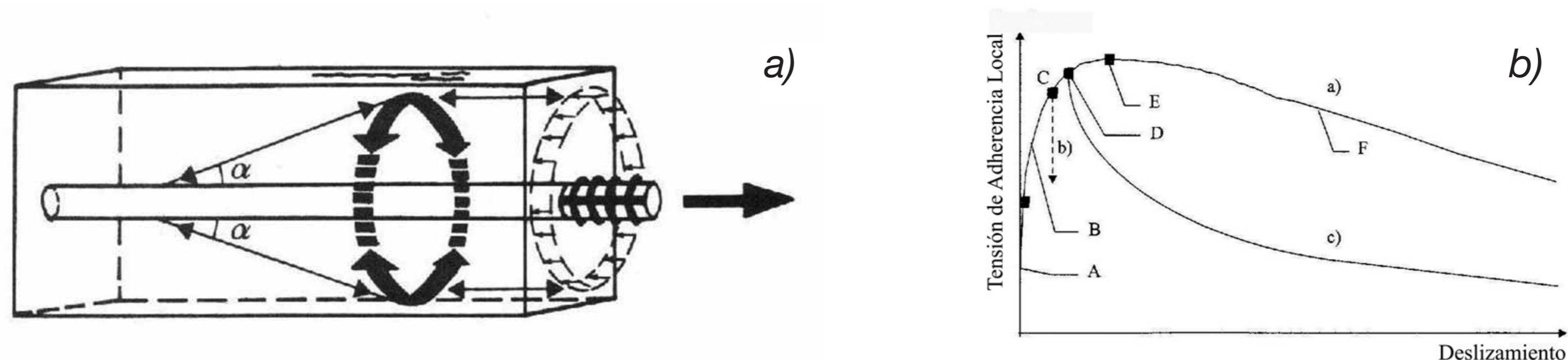


Figura 1. a) Formación de anillo de tracción en el hormigón equilibrando las fuerzas de adherencia (Tepfers 1973), b) Relación tensión de adherencia local / deslizamiento (Magnusson 2000).



Figura 2. Probetas del ensayos pull - out.

Para caracterizar el fenómeno de la adherencia se emplean curvas tensión de adherencia local - deslizamiento, que se obtienen de ensayos normalizados *pull-out* o *beam test*, que se refieren al desplazamiento relativo entre la barra embebida y el hormigón que la rodea al aplicar una fuerza creciente en el extremo (Figura 1b). En éstas se pueden apreciar los diferentes mecanismos resistentes que intervienen en el fenómeno de la adherencia: adhesión química, rozamiento e interacción mecánica; dependiendo la importancia de cada uno de ellos de las características superficiales de la armadura. Por ejemplo, para barras lisas la adherencia depende fundamentalmente de la adhesión química y, tras el deslizamiento, del rozamiento, mientras que para barras corrugadas depende de la interacción mecánica existente entre las corrugas y el hormigón que las rodea (CEB 1982, Balazs 1986).

2. Programa experimental

Se ha llevado a cabo un programa experimental para relacionar la adherencia hormigón-acero con el comportamiento resistente de piezas de hormigón armado y estudiar los principales factores que influyen en ella. Se reali-

zan: a) ensayos de adherencia tipo *pull-out*, b) ensayos tipo *beam test*, y c) ensayos de flexión en vigas.

a) Ensayos de adherencia tipo *pull - out*

El objeto de esta parte del programa experimental es determinar el efecto de la relación recubrimiento/diámetro (c/\varnothing) en la capacidad de adherencia de elementos estructurales.

Este ensayo consiste en la extracción de una barra de acero embebida en hormigón y medir la fuerza necesaria que se aplica para romper la adherencia. Se realizan 31 ensayos sobre probetas prismáticas según las especificaciones del ensayo normalizado *pull-out* propuesto por el CEB (1983) en el Bulletin d'Information n° 13, introduciendo algunas modificaciones en lo que respecta a la posición de la barra para simular piezas de hormigón armado con recubrimientos variables (Figura 2).

Se ensayan tres series con barras de diámetros representativos empleados en edificación: $\varnothing 12$, $\varnothing 16$ y $\varnothing 20$. Para cada diámetro se ha variado la posición de la barra desde el centro de la probeta (recubrimiento máximo) hasta la posición extrema (recubrimiento mínimo).

Serie	Ø	Probeta	Recubrimiento teórico (mm)	c/Ø
1	12	12A	94	7,8
	12	12B	47	3,9
	12	12C	31	2,5
	12	12D	23	1,9
	12	12E	0	0
2	16	16A	92	5,7
	16	16B	64	4
	16	16D	32	2
	16	16E	0	0
3	20	20A	90	4,5
	20	20B	60	3
	20	20D	40	2
	20	20E	0	0

Tabla 1. Programa de ensayos pull-out.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las probetas ensayadas: serie, diámetro, recubrimiento de hormigón en *mm* y relación recubrimiento/diámetro (*c/Ø*). La longitud adherente es en todos los casos 5Ø . En la Figura 3 se presentan unas fotografías del ensayo.

b) Ensayos de adherencia tipo beam test

Consiste en realizar un ensayo de flexión sobre una viga biapoyada mediante dos cargas puntuales. De este ensayo se obtiene la relación tensión de adherencia local-deslizamiento, la tensión media de adherencia y la tensión de rotura en barras corrugadas. Se llevan a cabo dos series siguiendo las especificaciones

del "Ensayo de la viga" normalizado en la UNE 36740 (AENOR 1998), una con barras de diámetro 16 mm y otra, con barras de diámetro 25 mm. En la Figura 4 se presenta el dispositivo de ensayo según la norma.

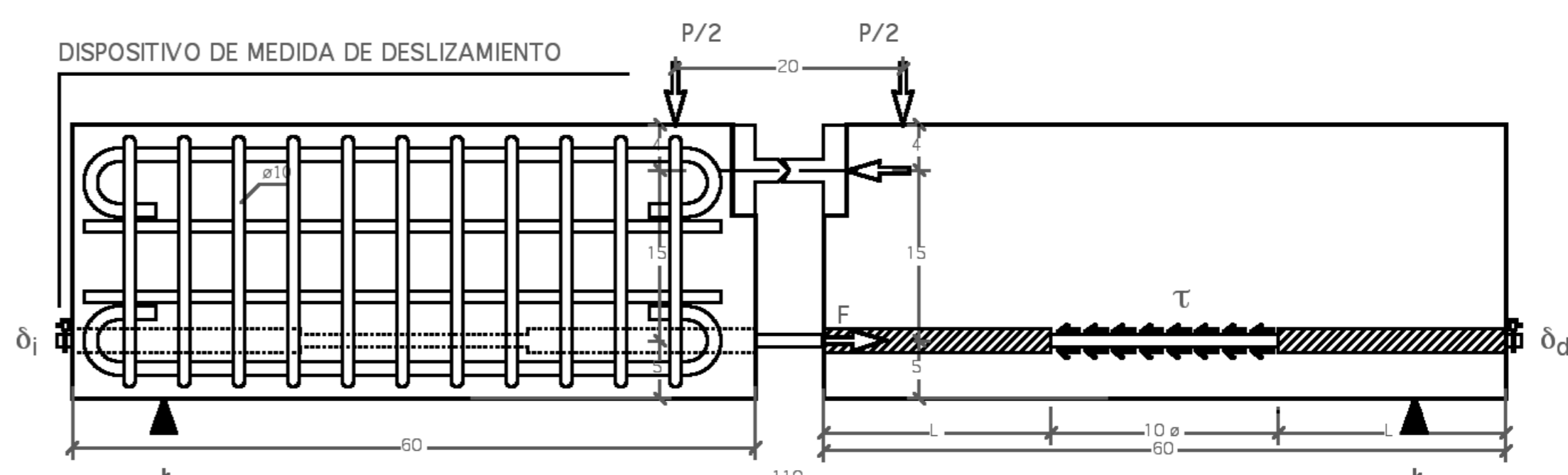


Figura 4. Dispositivo del ensayo beam test para Ø = 16 mm (UNE 36740.98).

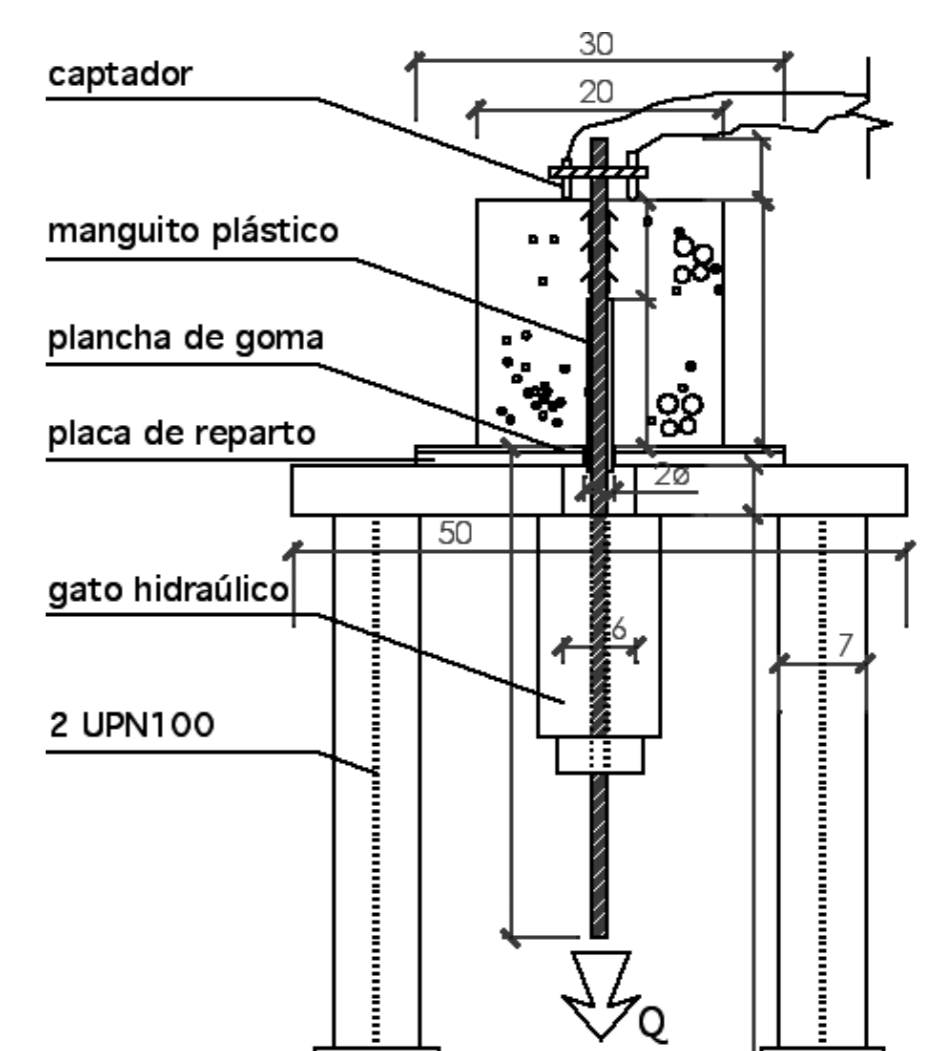


Figura 3. Probetas y dispositivo del ensayo pull - out.

c) Ensayos de flexión en vigas

Una vez caracterizado el fenómeno de la adherencia y los mecanismos en los que se basa, se ha realizado un programa experimental en vigas con adherencia hormigón - acero degradada. Se analiza la influencia de varios parámetros tales como el porcentaje de degradación de adherencia, la armadura transversal y el recubrimiento en el comportamiento resistente de estas piezas.

El rango de niveles de degradación se ha establecido en función del porcentaje de la armadura traccionada sin adherencia, comprendido entre un nivel bajo (aproximadamente 30% de falta de adherencia) y un nivel alto (aproximadamente 70% de falta de adherencia).

Se ensayan vigas simplemente apoyadas sometidas a carga creciente hasta la rotura y se registra la curva carga - desplazamiento en el centro de la viga, el mapa de formación de fisuras, la carga de rotura y la forma en que se produce (Figura 5).



Figura 5. Dispositivo de ensayos a flexión en vigas.

Se han obtenido resultados en vigas de pequeña y mediana esbeltez. En estas últimas se han ensayado vigas fabricadas con hormigones de resistencia a compresión en torno a 30 MPa y en torno a 50 MPa. Los ensayos se han dividido en tres series según la esbeltez y la resistencia del hormigón.

a) *Serie I*, vigas de esbeltez media con hormigón de resistencia en torno a 30 MPa. Se realizan 9 ensayos con pérdida parcial de adherencia en zonas localizadas de la armadura de tracción (73%, 55% y 0%) y diferente recubrimiento (20, 10 y 0 mm). Se ensayan vigas con armadura transversal y sin ella (Figura 6).

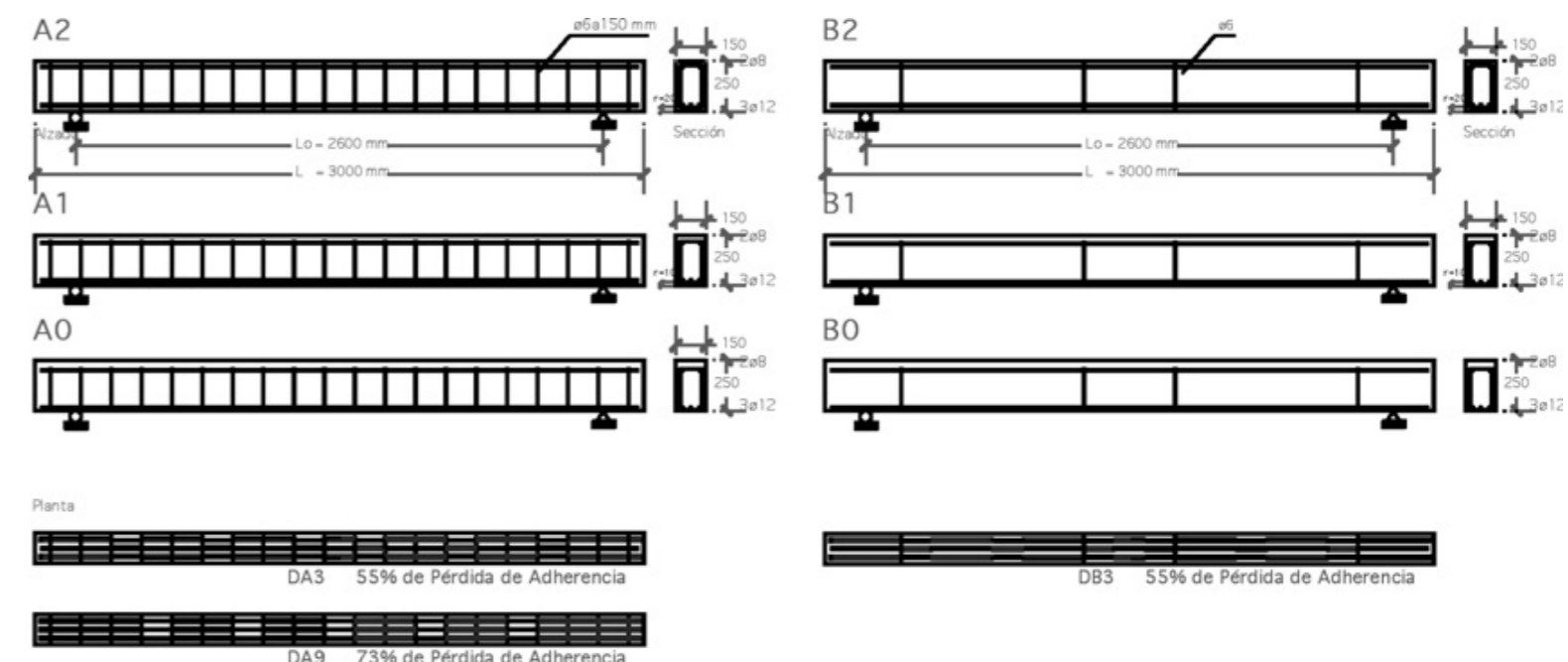


Figura 6. Programa de ensayos, Serie I.

b) *Serie II*, vigas de esbeltez media con hormigón de resistencia del orden de 50 MPa y sin armadura transversal. Se realizan 8 ensayos con diferente porcentaje de armadura adherida: 70%, 54%, 30% y 0% (Figura 7).



Figura 7. Programa de ensayos, Serie II.

c) *Serie III*, vigas de pequeña esbeltez. Se realizan 8 ensayos con diferente porcentaje de pérdida de adherencia (70% y 0%) y recubrimiento (20, 10 y 0 mm). Se ensayan vigas con armadura transversal y sin ella (Figura 8).

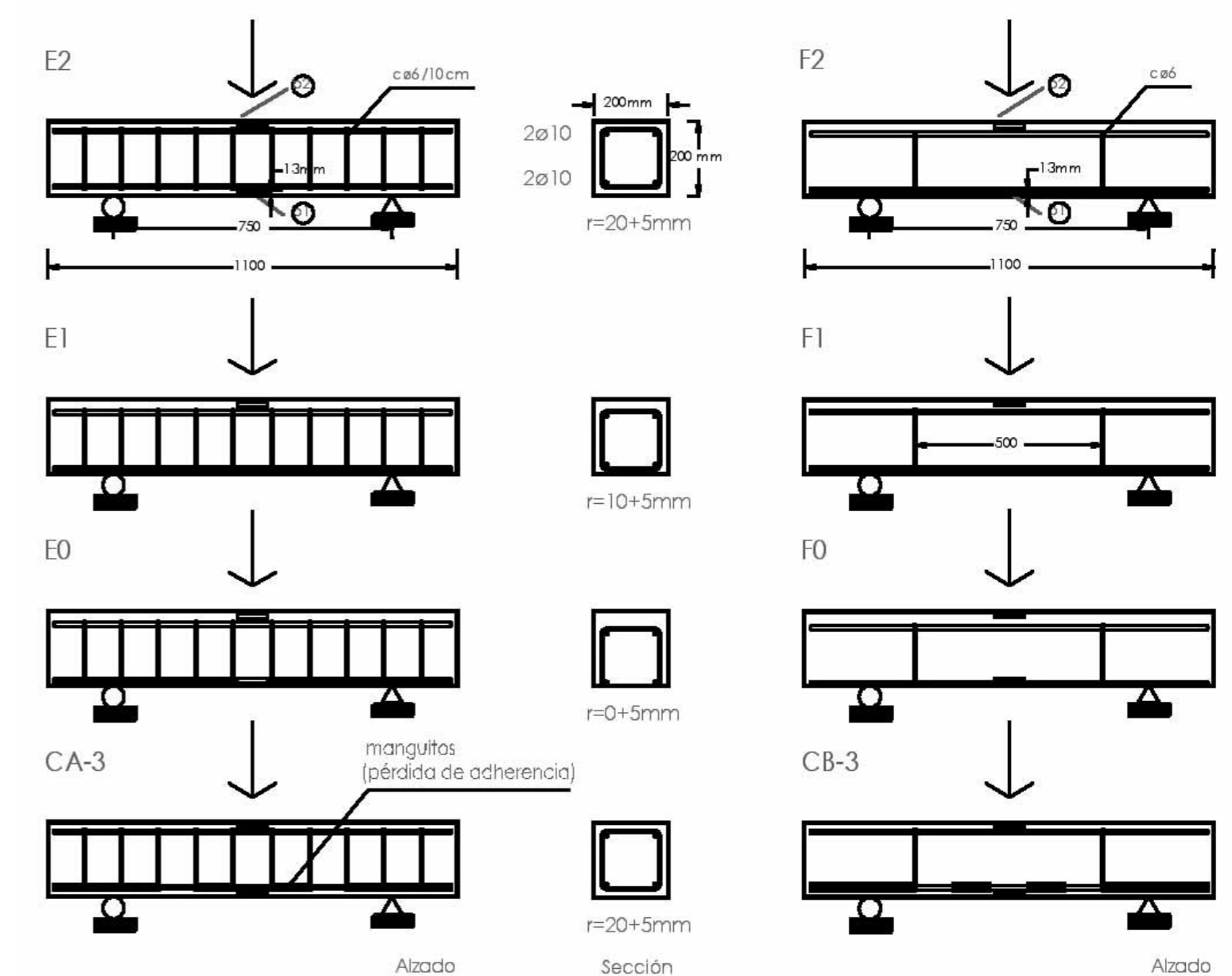


Figura 8. Programa de ensayos, Serie III, vigas de pequeña esbeltez.

Serie	Vigas	h/L	f _c (MPa)	bxh (mm)	Armadura
I	A, B, C	10,40	30	150x250	3Ø12+2Ø8
II	1,2,3,4	12,33	50	200x300	4Ø16+2Ø8
III	E,F	3,75	30	200x200	2Ø10+2Ø10

Tabla 2. Programa de ensayos en vigas.

En la Tabla 2 se presenta un esquema del programa de ensayos: serie, vigas, relación canto/luz (h/L), resistencia del hormigón a compresión f_c , sección de las vigas (bxh) en mm, y armadura (inferior y superior).

3. Resultados

A lo largo del desarrollo de este trabajo se han obtenido resultados que pueden considerarse de utilidad dentro del área del comportamiento resistente del hormigón armado y, concretamente, dentro del ámbito de la evaluación de aquellas estructuras existentes que presenten una deficiente transferencia de tensiones entre el acero y el hormigón, afectando por tanto, al principio básico del comportamiento de estas estructuras (Molina 2005).

3.1. Resultados relativos a la evaluación de la adherencia

Según los resultados obtenidos de ensayos pull-out se ha determinado la capacidad de adherencia de barras con recubrimiento variable de hormigón (Figura 9). Se deduce que la capacidad de anclaje de las barras disminuye con el recubrimiento. Para una relación entre el recubrimiento y el diámetro de la barra (c/\varnothing) mayor o igual que 2,8 no se produce variación en la tensión máxima de adherencia. Sin embargo, para relaciones menores de 2,8 la disminución de la capacidad de adherencia se puede aproximar de forma lineal entre el valor máximo y cero para $c/\varnothing = -1$ (simulación de barra exterior tangente a la sección de hormigón), mediante la expresión: $(\tau_{\text{máx}}/f_c) = 0,15 (c/\varnothing + 1)$.

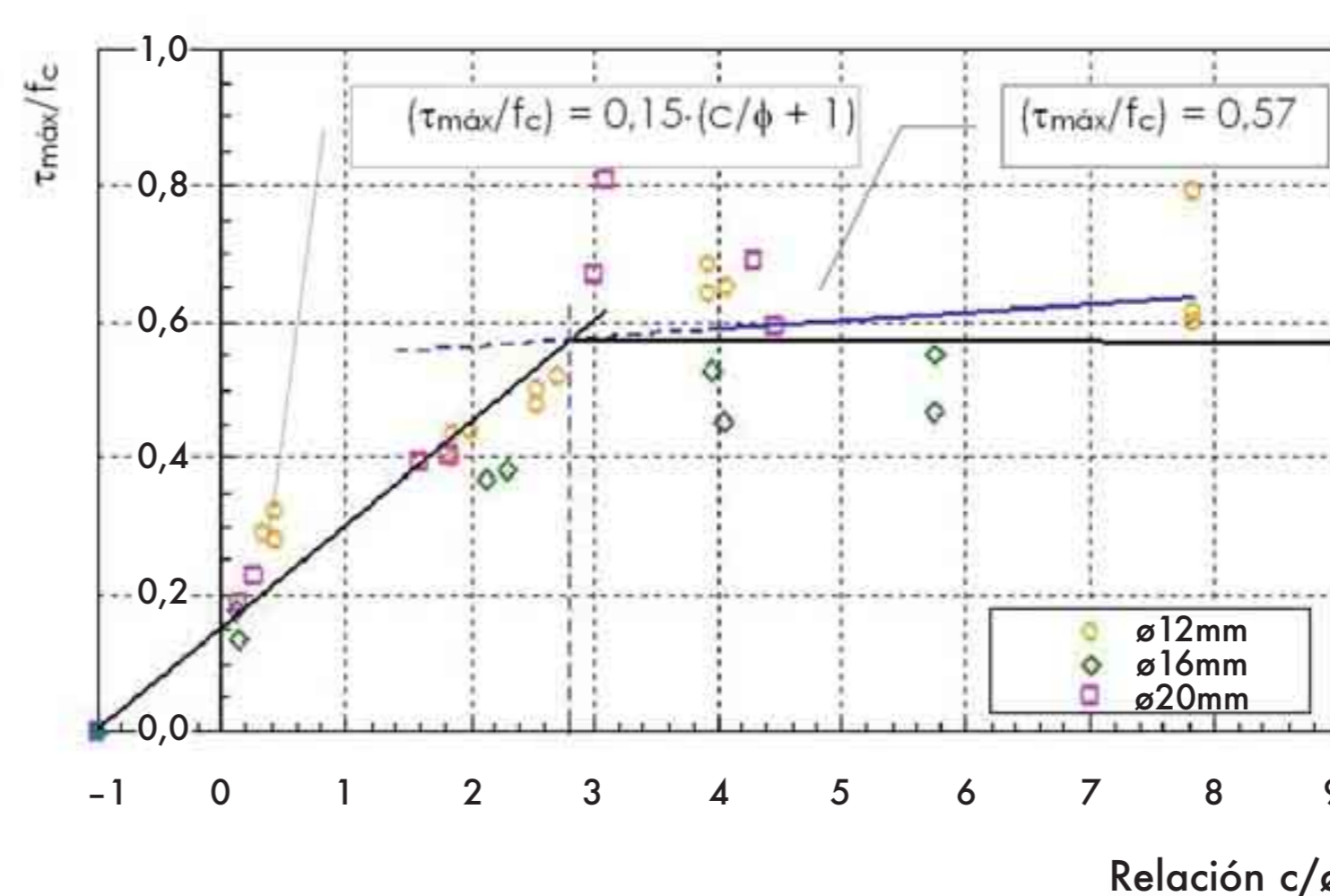


Figura 9. Efecto del recubrimiento en la tensión máxima de adherencia local.

La relación tensión de adherencia - deslizamiento se ha determinado mediante un programa de ensayos tipo *beam test* para diámetros de barras comprendidos entre 14 mm y 25 mm. El acero utilizado es B500S y la resistencia del hormigón ha variado entre 22 y 30 MPa.

Se ha adoptado como base, el tipo de curva propuesto por el Código Modelo, definida por cuatro tramos. Las barras corrugadas cumplen los requisitos de la UNE 36-068-94. La curva está definida por cuatro tramos, teniendo en cuenta la resistencia a compresión del hormigón f_c , el diámetro de la barra \varnothing , la resistencia a la adherencia $\tau_{\text{máx}}$, y los deslizamientos representativos s , (Figura 10).

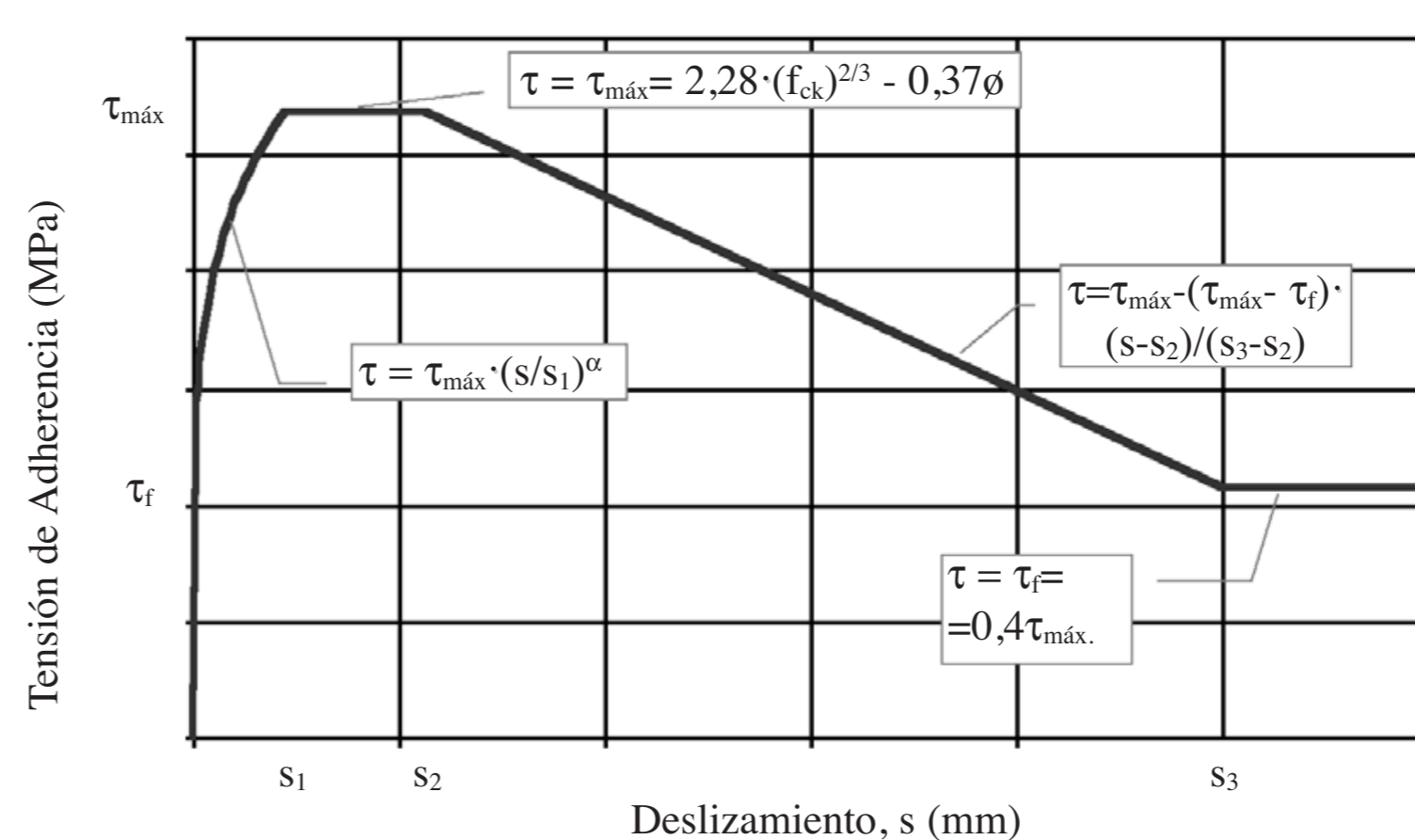


Figura 10. Relación tensión de adherencia deslizamiento obtenida de ensayos *beam test*.

En esta gráfica se pueden distinguir cuatro tramos: una rama ascendente hasta alcanzar el deslizamiento de cedencia para la tensión máxima de adherencia; un tramo sensiblemente horizontal; un tercer tramo descendente y un último tramo horizontal, con una tensión residual de adherencia aproximadamente igual a 40% de la tensión máxima.

3.2. Resultados relativos al comportamiento en flexión de elementos con adherencia acero - hormigón degradada

La pérdida de adherencia de la armadura de tracción de los elementos flectados produce una disminución de la rigidez de la pieza y, en consecuencia, un incremento de la deformación. En la Figura 11 se presenta el fallo de las vigas de la serie I, A2 y A0.

Figura 11.
Fallos en serie I (viga A0 y A2).



En vigas de esbeltez media con hormigones de resistencia en torno a 50 Mpa y sin armadura transversal (serie II), se produce una disminución significativa de la capacidad portante con la pérdida de adherencia. Así, para valores del 30% de pérdida de adherencia, se aprecia una disminución en la capacidad a flexión entre un 10% y un 20%. La reducción es del 35% para un deterioro de la adherencia en torno al 50% y se alcanza un 63% de pérdida de capacidad resistente cuando la falta de adherencia se sitúa en el entorno al 70%. La falta de adherencia en las zonas de anclaje provoca el fallo por deslizamiento de las barras. En las vigas ensayadas sin armadura transversal, el fallo de adherencia desencadenó una rotura por cortante. La existencia de un confinamiento proporcionado por la armadura transversal asegura la capacidad portante de las vigas incluso cuando la falta de adherencia se estima en más de un 70% de la longitud de la armadura.

En vigas sin armadura transversal la falta de adherencia de la armadura traccionada da lugar a una reducción de la capacidad resistente de la pieza y puede originar un fallo de adherencia por la fisuración del recubrimiento en la dirección de la armadura principal (*splitting*). En vigas de esbeltez media con cercos de 6 mm de diámetro cada 15 cm (serie I), una falta de adherencia del 55% ocasionó una reducción de la capacidad resistente del orden del 14%, así como un fallo de adherencia por *splitting*.

Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido en vigas de esbeltez media, en los ensayos de vigas de pequeña esbeltez y armadura transversal, sí se registra una disminución de la capacidad a flexión cuando la pérdida de adherencia es importante. Así, para pérdidas de adherencia del 70% se produce una disminución de la capacidad a flexión del orden del 25%, pero si no hay armadura transversal, la disminución de la capacidad resistente casi se duplica (es del 46% para el 70% de falta de adherencia). En la Figura 12 se presenta el fallo de las vigas CA3 y CB3 de la serie III de pequeña esbeltez.

Estos resultados ratifican el papel fundamental que juega el confinamiento proporcionado



Figura 12. Fallos en vigas de pequeña esbeltez CA3 y CB3 (serie III).

por la armadura transversal para asegurar una capacidad resistente suficiente en los elementos flectados, aunque se haya producido un deterioro de la adherencia.

4. Modelo teórico

Una vez concluido el programa experimental y a partir de los resultados obtenidos se ha propuesto un modelo de cálculo de aplicación práctica para la evaluación de estructuras de



hormigón armado, afectadas por diferentes patologías que impliquen variaciones del comportamiento resistente en relación con el previsto en el proyecto.

El modelo considera los tramos de pieza con armaduras no adheridas, zonas de armadura con escaso o nulo recubrimiento, e incorpora otros daños que disminuyen la sección geométrica resistente y afectan a la adherencia entre ambos materiales como: presencia de coqueas, defectos de geometría, defectos de materiales, etc. (Figura 13).

El modelo no considera la variable tiempo,



**Izquierda:
Figura 13.
Estructuras
afectadas por
pérdida de
adherencia.**

por lo que debe conocerse el grado de deterioro en la estructura para redefinir la geometría de la sección, las acciones (estado real de cargas) y las características de los materiales (resistencia del hormigón, cuantía y localización de armaduras, recubrimiento, etc.).

En el modelo de comportamiento que se propone, las deformaciones y curvaturas se estiman del siguiente modo:

a) en los tramos de la pieza donde la adherencia está totalmente deteriorada, y para longitudes pequeñas, se consideran como en un estado fisurado (Estado II),

b) en los tramos donde la adherencia es perfecta se incorpora el efecto tensión - stiffening que tiene en cuenta la rigidización por tracción del hormigón entre fisuras,

c) en los tramos con degradación parcial de la adherencia (situación intermedia a las anteriores) se consideran como un estado intermedio con efecto tensión - stiffening degradado, y

d) en los tramos con adherencia perfecta donde no se supere la resistencia a tracción del

hormigón, las deformaciones y curvaturas se estiman como en un estado no fisurado (Estado I).

Para un estado de cargas determinado, se lleva a cabo un proceso iterativo de cálculo. El método tiene en cuenta la no linealidad geométrica, mediante cambios de la geometría en el proceso iterativo, y la no linealidad mecánica, asociada al comportamiento de los materiales. Al final del proceso se obtienen tanto los esfuerzos, como los desplazamientos asociados a la estructura degradada.

En la figura 14 se presentan comparativamente los resultados del modelo propuesto y los experimentales, gráficas carga - flecha para la viga con 0% de deterioro [B2] y, para la viga con 55% de deterioro [DB3]. Se muestran en línea continua los resultados experimentales y con puntos los obtenidos en el modelo teórico, (la curva superior representa la viga de referencia sin degradación, y la inferior la viga con un 55% de falta de adherencia global en la armadura de tracción).

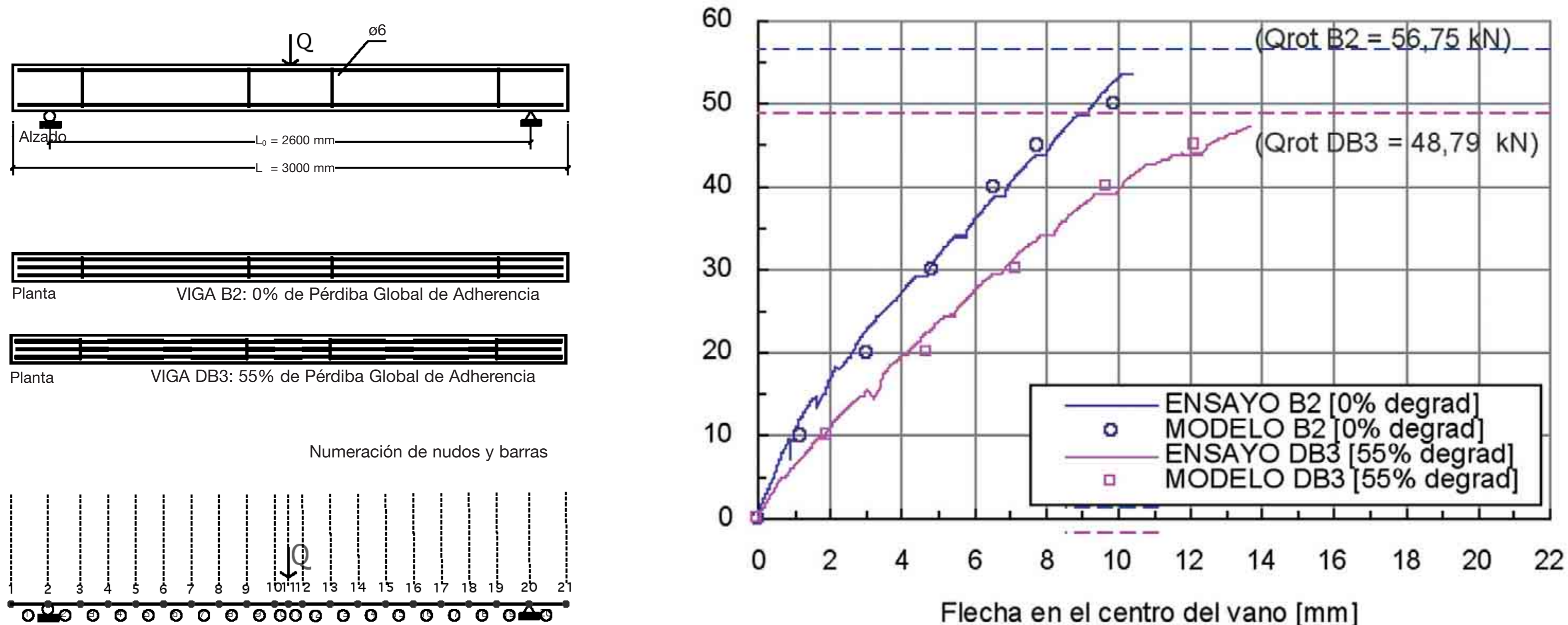


Figura 14. Curvas carga - flecha en vigas sin cercos: B2 sin degradación y DB3 con degradación (experimentales y teóricas), $Q_t = P$.

En la figura 14 se aprecia la buena correlación obtenida entre los resultados teóricos y experimentales para cualquier valor de carga aplicada. El modelo teórico se adapta correctamente a la forma de las curvas experimentales y se aprecia además, la sensibilidad del modelo a la pérdida de adherencia. El buen ajuste entre los resultados numéricos y los obtenidos experimentalmente, tanto en vigas con armadura transversal como sin ella, confirman la validez del modelo.

5. Conclusiones

Se resumen a continuación las principales aportaciones que se han realizado en este trabajo.

La propuesta de un diagrama teórico para estimar la tensión máxima de adherencia en función de la relación recubrimiento/diámetro (c/\varnothing). Este diagrama está formado por dos ramas: un primer tramo lineal en el que la tensión de adherencia crece con la relación c/\varnothing y un segundo tramo en el que la adherencia permanece constante independientemente del valor que tome c/\varnothing . Con el fin de poder analizar la influencia de recubrimientos variables en la

tensión de adherencia se ha modificado el ensayo normalizado *pull-out* propuesto por el CEB (1983).

En cuanto a los ensayos beam test, se ha planteado una curva tensión de adherencia local / deslizamiento (τ/s), según el diámetro de las barras (basada en el tipo de curva propuesto por el Código Modelo) teniendo en cuenta los resultados experimentales. Este diagrama está formado por cuatro tramos: una rama ascendente hasta alcanzar la $\tau_{\text{máx}}$, un tramo horizontal, un tramo descendente lineal y un último tramo horizontal con una tensión residual de adherencia.

En cuanto a los ensayos en vigas dirigidos a analizar la influencia de determinados factores, como son los porcentajes de degradación de la adherencia, la armadura transversal o el recubrimiento en el comportamiento resistente de vigas, destacar que la falta de adherencia en zonas parciales y distribuidas a lo largo de la armadura de tracción reduce la capacidad de carga de los elementos sometidos a solicitaciones de flexión. La forma en que se distribuye el deterioro tiene poca incidencia en la capacidad resistente para niveles de falta de adherencia de hasta el 50%, siempre que

quede garantizado el anclaje extremo de las armaduras. Si esto no ocurre la capacidad residual de vigas con adherencia irregular disminuye a partir de un 30% de pérdida de adherencia de la armadura principal sin confinamiento. En las vigas tanto de pequeña como de mediana esbeltez se ha constatado un incremento de la deformación bajo cargas de servicio con pérdidas de adherencia crecientes. Los fallos de adherencia en piezas sin armadura transversal pueden ocasionar fallos por cortante. Como consecuencia, no parece adecuado proyectar piezas de hormigón armado sin armadura de cortante, sobre todo si se piensa que pueden producirse fenómenos o patologías que afecten y degraden la adherencia hormigón - acero.

El modelo propuesto resulta de gran utilidad en cuanto que incluye el deterioro de los mecanismos de interacción resistente de las piezas, considerando también el efecto de *tensión stiffening* "degradado", aspectos imprescindibles para abordar con éxito la evaluación de una estructura de hormigón armado.

Entre las principales aplicaciones del modelo se puede mencionar la estimación del comportamiento estructural de vigas que presenten diferentes estados de degradación de adherencia hormigón - acero, causados por recubrimientos nulos o deficientes, existencia de coqueras, defectos de geometría, pérdida o disminución de la sección de acero, etc.

6. Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de investigación PB98-0515 "Análisis de estructuras de hormigón armado con una deficiente transferencia de tensiones hormigón acero" financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia desarrollado en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

7. Bibliografía

• AENOR (1998): Norma Española UNE 36740:1998. Determinación de la adherencia de las barras y alambres de acero para arma-

duras de hormigón armado. Ensayo de la viga, 11 pp.

• AENOR (1994): Norma Española UNE 36068:1994. Barras corrugadas de acero soldable para armaduras de hormigón armado, 20 pp.

• CEB Bulletin d'Information 151 (1982): Bond Action and Bond Behaviour of Reinforcement. State of the art report, prepared by TG VI/1: anchorage zones, 153 pp.

• Bulletin d'Information CEB Bulletin d'Information 13 (1983): Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete. Revised Edition of RC-6: Bond test for reinforcement steel: (2) Pull-out test, 5 pp.

• CEB-FIP (1996): Código Modelo 1990 para hormigón estructural. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; GEHO-CEB Grupo Español del Hormigón; Asociación Técnica Española del Pretensado, 572 pp.

• fib (2000): Fédération Internationale de Béton Bond of reinforcement in concrete, State-of-art report, Bulletin No. 10. Ed. by Fib Task Group 4/2 bond models, Convener Ralejs Tepfers, 427 pp.

• Magnusson J. (2000): Bond and anchorage of ribbed bars in high-strength concrete. Chalmers University of technology, division of concrete structures, Tesis Doctoral. Publication 00:1. Goteborg, 300 pp.

• Molina M. (2005): Comportamiento de estructuras de hormigón armado con una deficiente transferencia de tensiones hormigón-acero. Análisis experimental y propuesta de un modelo de evaluación estructural, UPM, Dpto. Estructuras de la Edificación. Tesis Doctoral, 229 pp.

• Rehm G. (1969): Adherencia y anclaje. Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, n282. Conferencia pronunciada en Madrid en enero de 1969, 27 pp.

• Tepfers R. (1973): A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars. Chalmers University of Technology. Division of Concrete Structures, Publication 73:2. Göteborg, 328 pp.

□