



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LAS ESTRUCTURAS,
CIMENTACIONES Y MATERIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AJUSTE Y FIABILIDAD EN LA EVALUACIÓN DE
MODELOS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Autor:

Julio César López González
Ingeniero Civil

Directores:

D. Jaime Fernández Gómez
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

D. Juan Carlos López Agüí
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Madrid, 2012

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a los profesores Jaime Fernández Gómez y Juan Carlos López Agüí por la dirección de este trabajo, por la completa y afable disposición que mostraron en todo momento. Asimismo agradezco al cuerpo docente de la Cátedra de Edificación y Prefabricación de la E.T.S. de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid por el apoyo, consejos y trato familiar que me han brindado durante el desarrollo de este trabajo.

También quiero agradecer a mis amigos y compañeros, Lina Rojas, Marcos García, Ángel Fernández, Juan Manuel Gallego, Alejandro, Héctor Romero y Silvia por su excelente compañerismo. Asimismo agradezco a mi amigo ejemplar, Daniel Llord por el apoyo que me ha brindado en todo momento.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a Concepción García y al equipo de biblioteca que gentil y eficazmente me facilitaron la documentación científica para el desarrollo de este trabajo.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Resumen

En el campo de la ingeniería estructural como en otras ramas, es necesaria la calibración de modelos mediante soporte experimental debido a la complejidad que encierra el fenómeno que se intenta predecir. Las campañas experimentales llevadas a cabo por la comunidad científica a través de los años proporcionan información valiosa que puede ser empleada para la calibración y selección de modelos así como para la consolidación de modelos existentes. En el último caso, las técnicas empleadas para tal finalidad son fundamentalmente distintas a las de la selección de modelos (modelos ajustados con información experimental en común).

Los códigos estructurales incluyen modelos de muy variado tipo que han ido consolidándose con la práctica. Con gran frecuencia sucede que tales modelos son diferentes en los referidos códigos aun cuando aborden el mismo objetivo. Tales diferencias son lógicas pues esos modelos no deben entenderse sino como elementos de un sistema más amplio de fiabilidad estructural que incluye todos los modelos utilizados así como el formato de seguridad establecido en cada uno de ellos.

En el presente trabajo se realiza una comparación exhaustiva de modelos, empleando diferentes técnicas que permiten identificar patrones de comportamiento de los mismos. La metodología permite no sólo obtener una medida del ajuste y del poder predictivo de los modelos sino también del grado de conservadurismo.

Los modelos analizados están relacionados con el fallo de vigas de hormigón reforzadas a flexión con materiales compuestos. La capacidad portante de estos elementos estructurales está frecuentemente condicionada por el despegue del refuerzo, el cual puede tener origen bien el extremo o en la zona de fisura de flexión o flexión-cortante.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Tabla de Contenido.....	iii
Notación	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xii
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Organización del trabajo.....	2
2 La evaluación de modelos	3
2.1 Introducción.....	3
2.2 Técnicas para la evaluación y comparación de modelos	4
2.2.1 Métodos para cuantificar la seguridad.....	7
2.2.2 La seguridad en los códigos.....	8
2.2.3 Evaluación de estructuras existentes	9
3 Alternativas para la evaluación de modelos en ingeniería estructural	
12	
3.1 Introducción.....	12
3.2 Módulos de comparación	12
3.2.1 Factor de ajuste	12
3.2.2 Factor de seguridad	13
3.2.3 Factor de seguridad acotado.....	13
3.2.4 Factor de neutralidad de escala.....	13
3.2.5 Justificación de los módulos descritos y valores de los parámetros	13
3.3 Robustez de los modelos.....	14

4 Aplicación a un caso práctico:Refuerzo a flexión de vigas de hormigón con materiales compuestos	16
4.1 Introducción.....	16
4.2 Despegue en la zona de anclaje.....	19
4.2.1 Ziraba et al.	21
4.2.2 Varastehpour y Hamelin.....	23
4.2.3 Tumialan et al.	25
4.2.4 FIB bulletin 14 2001	25
4.2.5 ACI 440.2R-08	26
4.3 Despegue en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante.....	27
4.3.1 Modelos basados en la limitación de la deformación en la sección de máximo momento flector	27
4.3.2 Modelos basados en la limitación de la tensión media de adherencia	28
4.3.3 Modelos basados en la limitación del incremento de tensión en el laminado	28
4.3.4 Modelo de tensión media de adherencia basado en el de López González (2012)	30
4.4 Método de análisis	31
5 Evaluación de los modelos para el pronóstico del fallo de vigas de hormigón reforzadas a flexión con materiales compuestos	34
5.1 Introducción.....	34
5.2 Base de datos.....	35
5.3 Criterios clásicos	35
5.3.1 Modelos para el despegue en la zona de anclaje	36
5.3.2 Modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión-cortante	38
5.4 Descomposición de la suma cuadrática de los residuos.....	39
5.4.1 Modelos para el despegue en la zona de anclaje	39
5.4.2 Modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión-cortante	49
5.5 Módulos de comparación	53

5.5.1 Modelos para el despegue en la zona de anclaje	53
5.5.2 Modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión- cortante	64
6 Conclusiones y líneas futuras de investigación	69
6.1 Introducción.....	69
6.2 Conclusiones sobre la metodología para la evaluación de modelos.....	69
6.3 Conclusiones sobre el comportamiento de vigas reforzadas a flexión con materiales compuestos.....	70
6.3.1 Conclusiones sobre el despegue con origen en el extremo del laminado	71
6.3.2 Conclusiones sobre el despegue con origen en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante.....	71
6.4 Futuras líneas de investigación.....	72
7 Bibliografía	73
8 Anejo A	82

Notación

Mayúsculas romanas

A_s	área de armadura longitudinal de tracción.
A'_s	área de armadura longitudinal de compresión.
A_w	área de armadura transversal en la luz de cortante L_c
E_a	módulo de elasticidad longitudinal del adhesivo.
E_c	módulo de elasticidad del hormigón.
E_f	módulo de elasticidad longitudinal de las fibras.
E_m	módulo de elasticidad longitudinal de la resina.
E_p	módulo de elasticidad longitudinal del refuerzo FRP.
E_s	módulo de elasticidad de la armadura de tracción (N/mm ²).
E'_s	módulo de elasticidad de la armadura de compresión (N/mm ²).
G_a	módulo cortante del adhesivo.
$I_{trc,c}$	momento de inercia de la sección agrietada en términos de hormigón.
$I_{trc,p}$	momento de inercia de la sección agrietada en términos del refuerzo FRP.
$I_{tru,c}$	momento de inercia de la sección no agrietada en términos de hormigón.
$I_{tru,p}$	momento de inercia de la sección no agrietada en términos del refuerzo FRP.
I_c	momento de la sección bruta de hormigón.
I_p	momento de inercia de la sección del refuerzo FRP.
L	luz de la viga, considerada como la distancia entre soportes a ejes.
L_c	luz de cortante de la viga medida desde el eje del soporte a la línea de aplicación de la carga.
L_{sf}	distancia entre el soporte y el punto del momento de fisuración.
L_{sp}	distancia entre el soporte y extremo del laminado.
M_{cal}	momento calculado —pronosticado—.
M_{exp}	momento experimental.
M_f	momento de fisuración.
V_{cal}	cortante calculado —pronosticado—.
V_{exp}	cortante experimental.
V_f	fracción de volumen de fibras.
V_m	fracción de volumen de la resina.

Minúsculas romanas

a	distancia entre el soporte y el extremo del refuerzo FRP.
b	ancho de la viga de hormigón o ancho del prisma de hormigón.
b_p	ancho del refuerzo FRP.
d	canto útil de la armadura de tracción.
d'	recubrimiento de la armadura de compresión medido al eje de la misma.
d_p	distancia de la cara a compresión de la viga de HA al centroide del refuerzo FRP.
f_{ck}	resistencia característica a compresión del hormigón.
f_{ckt}	resistencia característica a tracción del hormigón.
f_{cm}	resistencia media a compresión del hormigón.
f_{ctm}	resistencia media a tracción del hormigón.
f_f	resistencia a tracción de las fibras.
f_m	resistencia a tracción de la resina.
f_y	límite de fluencia de la armadura de tracción.
f'_y	límite de fluencia de la armadura de compresión.
f_{yw}	límite de fluencia de la armadura transversal.
h	altura de la viga de hormigón.
l_b	longitud del refuerzo adherida al sustrato de hormigón.
l_{eb}	longitud efectiva de adherencia.
r	recubrimiento libre de hormigón.
s_m	separación media de fisuras de flexión.
s_w	separación de estribos en la luz de cortante L_c
t_a	espesor de la capa de adhesivo.
t_p	espesor del de refuerzo FRP.
$x_{trc,c}$	profundidad de la fibra neutra de la sección agrietada en términos de hormigón.
$x_{trc,p}$	profundidad de la fibra neutra de la sección agrietada en términos del refuerzo FRP.
$x_{tru,c}$	profundidad de la fibra neutra de la sección no agrietada en términos de hormigón.
$x_{tru,p}$	profundidad de la fibra neutra de la sección no agrietada en términos del refuerzo FRP.
y	Valor experimental —realización—.
\tilde{y}	Valor pronosticado.
y_{sp}	distancia entre el eje del acero a tracción y el eje del refuerzo FRP.
y_{cs}	distancia entre el eje del bloque comprimido y el eje del acero a tracción.

y_{cp} distancia entre el eje del bloque comprimido y el eje del refuerzo FRP.

Minúsculas griegas

ε_{pd} deformación del material FRP que produce el despegue del refuerzo.

ϕ_s diámetro de las barras del acero de refuerzo.

τ_{pm} tensión media de adherencia del refuerzo FRP.

τ_{sm} tensión media de adherencia del acero de refuerzo.

Lista de Figuras

Figura 2-1 Variable explicativa versus variable respuesta	5
Figura 4-1 Fallo tipo PECCS.Fuente: Pham Huy B., et al. (2006)	18
Figura 4-2 Despegue originado en la zona de fisuras de flexión-cortante.Fuente: Kurihashi Y., et al. (2006)	18
Figura 4-2 Análisis del despegue en el extremo del laminado	20
Figura 4-3 Enfoque basado en la fuerza máxima de anclaje	21
Figura 4-4 Diagrama del máximo incremento de tensión entre dos fisuras consecutivas según Niedermeier (2000) y tomada de la fib bulletin 14 (2001)	29
Figura 5-1 Diagrama predicción-realización de los modelos I y II de Ziraba et al. (1994) para el pronóstico de los fallos PEID y PECC respectivamente. 40	
Figura 5-2 Diagrama predicción-realización del modelo de Varastehpour & Hamelin (1997) para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje.	41
Figura 5-3 Diagrama predicción-realización del modelo de Tumialan et al. (1999) para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje.....	42
Figura 5-4 Diagrama predicción-realización del modelo del boletín 14 de la FIB para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje.....	42
Figura 5-5 Diagrama predicción-realización del modelo del ACI 440.2R-08 para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje.....	43
Figura 5-6 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico del fallo PEID.....	44
Figura 5-7 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico del fallo PEID.	44
Figura 5-8 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico del fallo PECCS.....	47
Figura 5-9 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico del fallo PEID.....	47
Figura 5-10 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico de los fallos PEID y PECCS.....	48

Figura 5-11 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico de los fallos PEID y PECCS.....	49
Figura 5-12 Diagrama predicción-realización del modelo del boletín 14 de la FIB para el pronóstico del fallo en la región entre fisuras (Enfoque 2).....	50
Figura 5-13 Diagrama predicción-realización del modelo del boletín 14 de la FIB para el pronóstico del fallo en la región entre fisuras.	50
Figura 5-14 Diagrama predicción-realización del modelo del ACI 440.2R-08 (ICD)	50
Figura 5-15 Diagrama predicción-realización del modelo de Said & Wu	51
Figura 5-16 Diagrama predicción-realización del modelo de JSCE.....	51
Figura 5-17 Diagrama predicción-realización del modelo de López González J. (2012).....	51
Figura 5-18 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico del fallo ICD	52
Figura 5-19 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico del modo de fallo ICD.....	52
Figura 5-20 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-1	53
Figura 5-21 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-3.....	54
Figura 5-22 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-5.....	54
Figura 5-23 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-6.....	54
Figura 5-24 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo PEID.....	55
Figura 5-25 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(\tilde{y}/y)$	56
Figura 5-26 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo II de Ziraba et al. (1994).....	57
Figura 5-27 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Varastehpour & Hamelin (1997) para el grupo de vigas de fallo PECCS	57
Figura 5-28 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Tumialan et al. (1999).....	58
Figura 5-29 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB.....	58
Figura 5-30 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del ACI 440.2R-08	58
Figura 5-31 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo PECCS.....	60
Figura 5-32 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$	60

Figura 5-33 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Varastehpour & Hamelin	61
Figura 5-34 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB (2001) para el grupo de vigas de fallo PEID y PECCS	61
Figura 5-35 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del ACI 440.2R-08 para el grupo de vigas de fallo PEID y PECCS	62
Figura 5-36 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo PEID y PECCS.	63
Figura 5-37 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(\tilde{y}/y)$	63
Figura 5-38 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB para el modo de fallo ICD (Enfoque 2).....	64
Figura 5-39 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB para el modo de fallo ICD (Enfoque 3).....	64
Figura 5-40 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Said & Wu (2008).....	65
Figura 5-41 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del ACI 440.2R-08 para el modo de fallo ICD.....	65
Figura 5-42 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB para el modo de fallo ICD (Enfoque 2).....	65
Figura 5-43 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo ICD-6	66
Figura 5-44 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo ICD	67
Figura 5-45 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$	67

Lista de Tablas

Tabla 5-1 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID	36
Tabla 5-2 Medidas de centralización y dispersión de la relación V_{exp}/V_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID	36
Tabla 5-3 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS.....	37
Tabla 5-4 Medidas de centralización y dispersión de la relación V_{exp}/V_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS.....	37
Tabla 5-5 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID y PECCS	37
Tabla 5-6 Medidas de centralización y dispersión de la relación V_{exp}/V_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID y PECCS.....	38
Tabla 5-7 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo ICD	38
Tabla 5-8 Medidas de centralización y dispersión de la relación M_{exp}/M_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo ICD	39
Tabla 5-9 Resumen de los errores predictivos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID.....	43
Tabla 5-10 Punto de corte de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID.....	45
Tabla 5-11 Resumen de los errores predictivos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS	46
Tabla 5-12 Punto de corte de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS.....	48
Tabla 5-13 Resumen de los errores predictivos de los modelos para el pronóstico de los modos de fallo PEID y PECCS	48
Tabla 5-14 Punto de corte de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS.....	49
Tabla 5-15 Resumen de los errores predictivos	52

Tabla 5-16 Módulos de comparación de los modelos para la predicción del modo de fallo PEID	55
Tabla 5-17 Factor de neutralidad de escala. Modelos para el pronóstico del fallo PEID	56
Tabla 5-18 Módulos de comparación. Modelos para la predicción del modo de fallo PECCS.....	59
Tabla 5-19 Factor de neutralidad de escala. Modelos para el pronóstico del fallo PECCS.....	61
Tabla 5-20 Módulos de comparación de los modelos para la predicción de los modos de fallo PEID y PECCS	62
Tabla 5-21 Factor de neutralidad de escala. Modelos PEID y PECCS	64
Tabla 5-22 Módulos de comparación. Modelos para la predicción del modo de fallo PECCS.....	66
Tabla 5-23 Factor de neutralidad de escala. Modelos para el pronóstico del fallo ICD	68

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Motivación.

Los modelos en ingeniería estructural frecuentemente parten del desglose del fenómeno físico que pretenden predecir; sin embargo, el comportamiento real es tan complejo y engloba tal cantidad de variables que es necesario llevar a cabo una calibración de uno o varios modelos simples para su aplicación práctica. En este contexto, la selección y validación de modelos juega un papel importante.

Los parámetros más comunes para este fin, son las medidas de centralización y dispersión de los residuos y de la relación valor experimental / valor calculado. De hecho, suelen aplicarse para la comparación entre modelos existentes y uno propuesto, empleando la misma base datos en la etapa de calibración y en la de comparación.

Por esta razón, en el presente trabajo ha surgido la motivación por ofrecer medidas complementarias que permitan realizar una valoración más robusta de modelos.

1.2 Objetivos

En el marco del presente trabajo, se desglosan los siguientes objetivos:

- Recabar las técnicas más empleadas para la comparación de modelos en ingeniería estructural haciendo un análisis reflexivo de los mismos.

- Proponer técnicas complementarias para analizar el ajuste de modelos existentes a partir de bases de datos recabadas de la literatura especializada.
- Aplicar las diferentes técnicas en un caso práctico de evaluación de modelos en ingeniería estructural, concretamente en modelos relacionados con el fallo de vigas de hormigón reforzadas a flexión con materiales compuestos.

1.3 Organización del trabajo

El presente trabajo está estructurado en cinco capítulos principales que se describen a continuación:

Capítulo 1. En este capítulo se recoge la motivación que condujo a desarrollar la investigación, los objetivos y la organización del trabajo.

Capítulo 2. En este capítulo se recogen las técnicas más empleadas para la evaluación y comparación de modelos en ingeniería estructural resaltando las bondades y desventajas de las mismas.

Capítulo 3. Este capítulo se recoge módulos de comparación, complementarios a las técnicas tradicionales, para analizar el ajuste y la fiabilidad de modelos.

Capítulo 4. Este capítulo está dedicado a la aplicación de las diferentes técnicas para la evaluación de modelos en un caso práctico, concretamente a modelos para el pronóstico del despegue del refuerzo en vigas reforzadas a flexión con materiales compuestos.

Capítulo 5. Finalmente, en este capítulo se enuncian las conclusiones derivadas del presente trabajo así como las futuras líneas de investigación.

Anejos. Se incluye un apartado de anejos que recoge las bases de datos empleada en el análisis del caso práctico.

CAPÍTULO 2

La evaluación de modelos

2.1 Introducción

La evaluación de modelos comúnmente se realiza con una base de datos recabada de la experimentación llevada a cabo a través de los años por distintos investigadores. El interés actual de realizar una comparación de modelos en ingeniería civil puede tener varios fines. A continuación se enuncian los más comunes.

- Modelos relacionados con las propiedades de los materiales. El interés actual se ha orientado en analizar si los modelos establecidos y ampliamente aceptados para la valoración de una propiedad, ya sea de durabilidad o de resistencia, son aplicables al mismo material con mejoras derivadas del avance científico y tecnológico. Un caso que ha sido objeto de este tipo de investigación es la aplicabilidad de modelos de diferente índole calibrados con resultados experimentales del hormigón convencional a hormigones con nuevas propiedades tales como hormigones ligeros, autocompactantes, de altas prestaciones, reforzados con fibras o, más recientemente, con nanoadiciones. Estudios recientes de esta naturaleza van desde propiedades reológicas, de adherencia, energía de fractura, ensayos de información, etc.
- Modelos relacionados con la resistencia de los elementos estructurales. A partir de la incursión de los materiales compuestos en el sector de la

ingeniería civil surgieron modelos para calcular la capacidad portante. Conforme se tiene información de resultados experimentales, los modelos obtenidos pueden ir mejorándose y, en estas circunstancias, es necesario llevar cabo una comparación de modelos.

Por otra parte, una comparación de modelos debe tener presente la seguridad subyacente en el mismo. Los modelos recogidos en la literatura especializada suelen ser modelo predictivos, es decir, no incluyen la seguridad en los mismos. Sin embargo, la seguridad de los modelos que pertenecen a una normativa está enmarcada de acuerdo a su propia filosofía.

En este contexto, cabe resaltar que la seguridad involucrada en los dos casos expuestos es distinta, pues en el primero se trata de propiedades de los materiales y, en el segundo, de la capacidad resistente de un elemento estructural o de la respuesta en estado límite de servicio. Por ello, la evaluación y comparación de modelos, a nuestro juicio debe tener presente estas diferencias fundamentales.

2.2 Técnicas para la evaluación y comparación de modelos

Con independencia del objetivo del modelo, bien un estado límite de servicio, a un estado límite último o de durabilidad, las técnicas más recurrentes para llevar a cabo la comparación de modelos suele realizarse de forma cualitativa representado el valor real en ordenadas frente al valor pronosticado en abscisas. Esta representación permite realizar una evaluación del modelo concerniente a su comportamiento general, es decir, si subestima o, por el contrario está del lado de la inseguridad.

Para evaluar los modelos cuantitativamente, lo más habitual es el cálculo de las siguientes medidas de dispersión:

- La varianza.
- La desviación típica.
- El recorrido o rango.

- Coeficiente de variación.

En este punto, cabe resaltar algunas cuestiones que se consideran relevantes. Un aspecto importante es la validez del comportamiento del modelo que, en el caso más simple, cuando la variable explicada o de respuesta está en función únicamente de una variable explicativa, y los investigadores han desarrollado campañas experimentales abarcando rangos distintos de la variable explicativa puede suceder que el modelo de cada uno sea distinto, pero en esencia, están describiendo por tramos el comportamiento de un modelo más amplio (Figura 2-1).

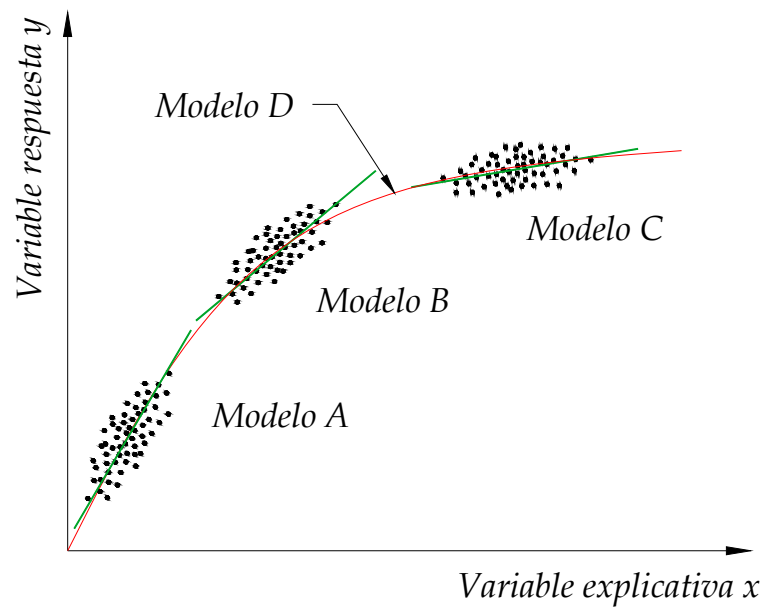


Figura 2-1 Variable explicativa versus variable respuesta

Lo anterior nos conduce a una reflexión más y nos permite entrar en la materia de comparación de modelos. Suponiendo que la información experimental disponible sobre el pronóstico de un determinado fenómeno cubre la variable explicativa de los modelos A y C. Un determinado investigador lleva a cabo una nueva campaña experimental cubriendo el rango B del que surge el modelo correspondiente por ajuste a sus resultados experimentales. Una comparación llevada a cabo con dicha experimentación conduciría a concluir que los modelos A y C no presentan buen poder predictivo. Por tanto, aunque

aparentemente obvio, es importante mencionar que el mejor modelo sería aquél que cubriese la experimentación que dio origen a los tres modelos.

En este contexto, surge otro aspecto importante y que se presenta con mucha frecuencia, consiste en que el investigador se ve enfrentado a analizar el poder predictivo de su modelo frente a los propuestos por la comunidad científica o los recogidos en la normativa. Actualmente, es común no hacer distinción en ningún caso, y la evaluación de los modelos se realiza mediante las medidas de dispersión. En este punto es importante hacer mención de los siguientes aspectos relevantes:

Si el modelo propuesto por el investigador se ha obtenido por ajuste, bien de los resultados de una campaña experimental, por una base datos recabada de la literatura especializada o por una combinación de ambos, y la comparación se realiza utilizando esta misma fuente de información, es evidente que el modelo propuesto se verá enormemente favorecido frente al resto, pues tras aplicar el ajuste se está asegurando que el modelo obtenido es el que dará menor valor de las medidas de dispersión aun cuando se haya tenido el esmero de cubrir un rango amplio de las variables involucradas.

En la Monografía M-19 de ACHE se recoge una técnica novedosa, que da significado a la descomposición de la suma cuadrática de los residuos borrados $SCRE = \sum \tilde{e}_i^2$ la cual ofrece suficiente información de las diferencias entre las predicciones y los valores reales. De la citada descomposición se obtiene el «error predictivo cuadrático medio»:

$$RPCM = \frac{1}{n} \sum \tilde{e}_i^2 = (\bar{y} - \bar{\tilde{y}})^2 + (s_y - s_{\tilde{y}})^2 + 2(1 - r)s_y s_{\tilde{y}}$$

El primer sumando es el cuadro del «residuo predictivo medio» (RPM) es el reflejo de un error sistemático de la predicción. El segundo sumando, el cuadrado del «residuo predictivo por varianzas diferentes» (RPVD), es la manifestación de los patrones diferentes de variabilidad de los valores reales y los predichos. Finalmente, el tercer sumando es el cuadrado del «residuo predictivo

por correlación incompleta» (RPCI) y es el reflejo de una correlación predicción-realización imperfecta, tal que $r \neq 1$.

De esta forma se realiza una comparación más ecuánime; no obstante, cabe resaltar que una comparación estricta sería aquella que se realiza con una base de datos ajena al ajuste de todos los modelos del estudio comparativo.

2.2.1 Métodos para cuantificar la seguridad

Debido al carácter estocástico del comportamiento de los materiales y de las acciones y, por ende, de las estructuras a corto y largo plazo, es necesaria la introducción de la seguridad. Por citar un ejemplo, la incertidumbre inherente del efecto de las deformaciones impuestas en una estructura hiperestática depende de su rigidez, pero ésta no es constante a lo largo del tiempo en una estructura de hormigón y existe una pérdida como consecuencia de la fisuración. Por tanto, el efecto es difícil de establecer de forma determinista.

En el campo de la ingeniería estructural, la seguridad se recoge en el valor de las acciones, en las propiedades de los materiales y la verificación de la estabilidad, siendo ésta última muy frecuente en ingeniería de cimentaciones. La filosofía de las normas desarrolladas en el mundo pueden tener variaciones pero, naturalmente, en esencia la filosofía recae en el principio fundamental del margen de seguridad.

Cabe señalar que, aunque el principio es el mismo, el concepto de seguridad es distinto en edificación y en geotecnia, pues se trata de dos ámbitos fundamentalmente distintos y el margen de la seguridad se establece en función de la experiencia y conocimientos que se tengan sobre los materiales en juego. Por ello, es ampliamente conocido que en ingeniería de cimentaciones no se mayoran las acciones, pero en cambio, la seguridad se recoge en la capacidad de carga del suelo.

En el campo de la ingeniería estructural, los denominados Estados Límites desarrollados en el seno del CEB (Comité Eurointernacional del Hormigón) y de la FIP (Federación Internacional del Pretensado) (Calavera, J. 2008 Tomo I).

Los estados límites están asociados bien a la capacidad de la estructura o de su utilización:

Estados límite últimos. Están asociados a la capacidad de la estructura para resistir las acciones.

Estados límite de servicio. Están asociados a la utilización de la estructura.

Las situaciones relacionadas a los estados límite dependen del tipo de estructura, llámese edificio, puente, taludes, cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas, etc.

Los estados límite pueden plantearse en tres niveles (Calavera, J. 2008):

Nivel I. Consiste en tomar los valores característicos de las acciones y de las propiedades de los materiales, asociándose coeficientes de seguridad. Este método se denomina comúnmente como método semiprobabilista.

Nivel II. En este nivel se consideran las acciones y las resistencias de los materiales como variables aleatorias aproximándose mediante funciones de distribución. Este nivel es la base sobre la cual se obtienen los coeficientes de seguridad del Nivel I.

Nivel III. Consiste en un análisis más amplio, en el que ya no sólo la sollicitación y la resistencia se consideran variables aleatorias sino también las variables que en ellas intervienen.

2.2.2 La seguridad en los códigos

La seguridad de los códigos está basada en la definición de estados límites de Nivel I.

El requerimiento de seguridad de la norma EHE-08 está asociado a unos niveles mínimos de fiabilidad. La definición de los estados límite establecidos en

la citada norma, junto con los criterios complementarios de ejecución y control, está asociada al cumplimiento de un nivel de fiabilidad, el cual para una vida útil de 50 años no deberá ser menor a 3.8

El American Concrete Institute (ACI-318-08), desde la edición del año 2002, los factores de combinación de carga correspondientes a la edición de 1999 fueron modificados y se recogen en el Anejo C de dicha norma. No obstante, ésta aún los considera aceptables. El requerimiento básico del ACI-318-08 en cuanto a resistencia, es el siguiente:

$$\phi(\text{Resistencia de cálculo}) \geq \text{Esfuerzo solicitante}$$

y el margen de seguridad viene dado multiplicando la carga de servicio por un factor de carga y la resistencia de cálculo por el factor de reducción ϕ , el cual depende del tipo de sollicitación. Cabe señalar que la norma trata separadamente elementos verticales especiales en situaciones de sismo, reduciendo el factor de cortante a 0,6. También se trata separadamente las estructuras de hormigón en masa fijando el valor de 0,6 para flexión, compresión y aplastamiento.

Las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal, salvo especificaciones concretas, aplican factores de reducción de la capacidad resistente según el tipo de esfuerzo.

2.2.3 Evaluación de estructuras existentes

El cambio de uso, fallos debidos a los materiales, fallos debidos a la ejecución, el deterioro o daño de una estructura, etc., son las razones por las cuales se requiere verificar los requisitos de seguridad de una estructura existente o parte de ella. La enmienda para cumplir con tales requisitos, como puede intuirse, depende enormemente de la inspección y, en este contexto, puede ser en muchos casos subjetiva.

Por otra parte, surge la siguiente interrogante: ¿Los coeficientes de seguridad aplicables a estructuras nuevas deben ser los mismos a la hora de evaluar estructuras existentes? Al respecto, cada norma recoge sus propias

consideraciones. Cabe mencionar un trabajo reciente llevado a cabo por el grupo de trabajo de ACHE 4/5 titulado “Evaluación de estructuras existentes mediante métodos semiprobabilistas”.

A continuación se realiza una revista sobre las consideraciones de estructuras existentes de las normas de mayor proyección internacional:

La norma ACI-318-08 establece dos posibles casos para evaluar la resistencia cuando se tiene duda de que una estructura reúne los requisitos de seguridad:

1. Cuando existe certeza del efecto de la pérdida de resistencia y es factible la medida de las propiedades de los materiales y las dimensiones necesarias para el cálculo, es posible realizar analíticamente la evaluación de la resistencia. Generalmente el esfuerzo axial, la flexión simple y flexión compuesta pueden ser analizadas de esta manera.
2. Cuando no es posible establecer de forma certera el efecto de la pérdida de resistencia o medir las variaciones de resistencia o geometría respecto del proyecto. Por tanto, será necesario realizar pruebas de carga. Casos típicos de esta situación está el esfuerzo cortante y resistencia de adherencia. Por otra parte, si además de la duda sobre la seguridad, la estructura presenta deterioro, la citada norma indica que será necesario realizar inspecciones periódicas; es decir, la aceptabilidad derivada de la prueba de carga no es constante en el tiempo.

Las especificaciones para obtener las propiedades de resistencia y geométricas para el caso 1, así como las prescripciones de las pruebas de carga y los criterios de aceptación están recogidas en la propia norma.

Además, para el primer caso, el ACI-318-08, permite utilizar coeficientes multiplicativos de reducción de la capacidad resistente mayores respecto de los de una estructura nueva (lo que equivale a aceptar capacidades resistentes de cálculo mayores). El fundamento está en la utilización las propiedades de los materiales obtenidas in situ.

La norma EHE-08, en el capítulo 18 referido al mantenimiento, recoge recomendaciones sobre el plan de inspecciones durante la vida útil de la estructura, mas no hace referencia a valoración sobre los coeficientes de seguridad de estructuras existentes.

CAPÍTULO 3

Alternativas para la evaluación de modelos en ingeniería estructural

3.1 Introducción

Con base en el estado del arte sobre los parámetros empleados para la evaluación y comparación de modelos a partir de bases de datos, en el presente capítulo se recogen módulos de comparación que pueden utilizarse para analizar el ajuste y la fiabilidad de los mismos. Asimismo, se describe una técnica que puede emplearse para analizar la robustez de los modelos.

3.2 Módulos de comparación

3.2.1 Factor de ajuste

El primer módulo consiste en evaluar el ajuste del modelo empleando la relación y/\tilde{y} ¹ en un acotamiento recíproco limitado por dos valores, a y b . La proporción dentro de este rango se ha denominado *factor de ajuste*.

¹ y es el valor efectivo (medido u observado) e \tilde{y} es el valor pronosticado o calculado al aplicar las expresiones de un modelo determinado.

3.2.2 Factor de seguridad

El segundo módulo consiste, análogamente al factor de ajuste, en obtener la proporción de los puntos que cumplan la condición $y/\tilde{y} > c$. El factor mide si el modelo es más o menos conservador y por tal motivo se ha denominado ***factor de seguridad***.

3.2.3 Factor de seguridad acotado

El tercer módulo de comparación consiste en obtener el número de puntos en la zona acotada por $d < y/\tilde{y} < e$, de esta manera también se valora el nivel de seguridad del modelo, pero además cuidando que el modelo no sea desmesuradamente conservador por lo cual se ha denominado ***factor de seguridad acotado***.

3.2.4 Factor de neutralidad de escala

El cuarto módulo de comparación consiste en analizar las características de la recta de ajuste de la relación en el diagrama $\ln(y/\tilde{y}), \tilde{y}$. En este gráfico interesa analizar el signo de la pendiente y su valor absoluto. Este factor se ha denominado ***factor de neutralidad de escala***.

3.2.5 Justificación de los módulos descritos y valores de los parámetros

Para el factor de ajuste se han elegido los valores de a y b en 0,5 y 2 respectivamente. Este módulo sirve como criba previa de modelos que no cumplan que su factor de ajuste sea superior al 90% dado que el rango es suficientemente amplio.

Para el factor de seguridad se ha establecido un valor del parámetro c en 0,9. Se ha considerado que este valor es razonable para valorar el nivel de conservadurismo de los modelos ya que en la mayoría de los casos los datos de entrada del modelo incluyen parte de la seguridad o bien los resultados pasan por otro tamiz. Por tanto, la zona comprendida entre 0,9 y 1,0 de la relación y_e/y_p se considera una zona aceptable.

Para el factor de seguridad acotado se ha tomado para el parámetro d el del límite inferior del factor de seguridad y para el parámetro e el del límite superior del factor de ajuste. En este contexto, el módulo de comparación también puede denominarse factor de seguridad y ajuste combinado.

Por último, interesa que los modelos posean un factor de neutralidad de escala pequeño, pues significa que el modelo no pierde precisión conforme aumenta el valor calculado (es decir, la escala), lo cual es una propiedad muy deseable en un modelo de cualquier naturaleza. De esta manera, el factor de neutralidad de escala conforma un criterio fundamental para la selección de modelos.

Los diseños experimentales deben optar en su dase de modelado por una de las dos siguientes perspectivas:

- a) Conseguir el mejor ajuste entre los valores calculados y medidos
- b) Incluir un margen de seguridad en la formulación cuando los códigos no abordan la experimentación referida y su aplicación necesita ser segura.

Es necesario identificar, si es posible, la perspectiva de cada diseño experimental para que la comparación sea correcta.

Si todos los modelos adoptan la perspectiva a) los factores de comparación fundamentales son los de ajuste (§3.2.1) y los de neutralidad de escala (§3.2.4). Si, por el contrario los diseños experimentales han adoptado la perspectiva b) son básicos los factores de seguridad (§3.2.2) y de neutralidad de escala (§3.2.4).

Se pueden aplicar todos los factores expuestos siempre que en la comparación y en las conclusiones se tenga en cuenta la doble perspectiva descrita.

3.3 Robustez de los modelos

La robustez de los modelos se puede evaluar al generar un bloque cuasi experimental asociado a un modelo y estudiar el resto de los modelos con dicha

información. El proceso ha de repetirse generando tantos bloques cuasi experimentales (por ejemplo por simulación de Monte Carlo) como modelos hayan sido aislados para efectuar las comparaciones. Este análisis es muy exigente porque requiere de las siguientes características:

- Todos los modelos involucran las mismas variables.
- El modelo patrón es un modelo predictivo y es conocida su desviación.
- El modelo patrón involucra una pequeña cantidad de variables.
- Las variables del modelo patrón son independientes entre sí.

La primera característica es necesaria para asegurar que los datos de entrada son los mismos en todos los modelos.

La segunda característica es necesaria para que los datos generados a partir de la simulación de Monte Carlo se aproximen a los resultados experimentales que dieron origen al modelo patrón.

La tercera característica es indispensable para evitar una combinación de variables desmesurada que vuelvan la simulación inabordable.

La cuarta característica también es necesaria para evitar que la elección de los valores de las variables no sea demasiado compleja. Por ejemplo, en el caso de algunos modelos para el pronóstico del despegue en la zona de anclaje interviene el momento de inercia de la sección reforzada y el ancho del refuerzo. La primera depende del valor elegido de la segunda, y por tanto es necesario definir la geometría de la viga lo cual da lugar una combinación de variables gigantesca para obtener el bloque cuasi experimental.

Es posible relajar alguna de las exigencias anteriores y aún así obtener medidas relativas de la robustez de los modelos. Una posibilidad muy utilizada con otras técnicas estadísticas (por ejemplo con procesos estocásticos y series temporales) descansa en el uso del criterio BIC (Bayesian Information Criterion) o de Schwarz. Usando esta metodología sería posible evaluar la robustez de modelos diferentes con variables de entrada diferentes. La idea subyacente es la de asignar probabilidades iguales a la verosimilitud «ex ante» de cada modelo y revisar después estas probabilidades siguiendo técnicas bayesianas a partir de la entrada de datos cuasi experimentales. El modelo con mayor probabilidad «a posteriori» de ser cierto a la luz de los nuevos datos sería el más robusto.

CAPÍTULO 4

Aplicación a un caso práctico: Refuerzo a flexión de vigas de hormigón con materiales compuestos

4.1 Introducción

En el presente trabajo se analiza la aplicación de las técnicas recogidas en los Capítulos 2 y 3 en modelos para el pronóstico del despegue en vigas de hormigón reforzadas a flexión con materiales compuestos. En el presente Capítulo se presenta un resumen de las técnicas de refuerzo a flexión con materiales compuestos y los modelos analizados en el estudio comparativo.

Las técnicas de refuerzo a flexión pueden desglosarse en las siguientes:

- I. Refuerzo con pletinas FRP prefabricadas (por pultrusión) encoladas en la parte inferior.
- II. Refuerzo con laminados FRP conformados in situ en la parte inferior.
- III. Refuerzo tipo «funda» (o tipo «U») conformado in situ (*wrapping*).
- IV. Refuerzo con tiras de FRP prefabricadas (NSM *strips*) insertadas a lo largo del elemento en la parte inferior.

- V. Refuerzo en la cara de tracción con pletina o laminado conformado in situ y sistema de anclaje con laminados (encamisados en forma U) en los extremos.
- VI. Refuerzo en la cara de tracción con pletina o laminado conformados in situ con anclaje en los extremos por medio de tornillos (anclaje mecánico).

En el presente trabajo se abordan los casos más frecuentes que son el I y el II. Para estas disposiciones de refuerzo, los modos de fallo reportados para por la comunidad de investigadores pueden clasificarse en los siguientes:

- 1) Despegue del refuerzo en uno de sus extremos a través de la interfaz FRP-Hormigón (PEID)
- 2) Despegue del refuerzo en uno de sus extremos al nivel inferior de la armadura de tracción (PECCS)
- 3) Despegue del refuerzo en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante (ICD)
- 4) Despegue del refuerzo originado por una grieta de cortante (CDC)
- 5) Rotura del refuerzo FRP (RP)
- 6) Flexión por fluencia del acero y rotura del refuerzo (FARP)
- 7) Compresión del hormigón (CC)

El despegue del refuerzo frecuentemente condiciona el diseño del elemento. El modo de fallo 1) se origina en el extremo del refuerzo debido a la concentración de tensiones (normales y tangenciales) en la interfaz. Al referirse a la interfaz, se intuye que se refiere al adhesivo; sin embargo, el fallo frecuentemente se produce en el hormigón en una capa de 1 a 2 mm por encima de la interfaz adhesivo-hormigón; en cualquier caso, se referirá indistintamente el fallo de la interfaz excepto en los casos en que sea necesario hacer la distinción. En algunos casos, la concentración de tensiones intercepta una fisura de flexión-cortante redirigiendo el despegue al nivel de la armadura de tracción

despojándola del recubrimiento (modo de fallo 2). La intersección puede darse justo en el extremo del refuerzo o a cierta distancia (Figura 4-1).



a) End debond in beam E1a

Figura 4-1 Fallo tipo PECCS. Fuente: Pham Huy B., et al. (2006)

En el modo de fallo 3 el despegue se origina en una fisura de flexión-cortante y continúa hacia el extremo más próximo (Figura 4-2). Este modo de fallo se produce cuando el refuerzo se extiende casi hasta los apoyos o se ha dispuesto un sistema de anclaje (encamisado o tornillos).

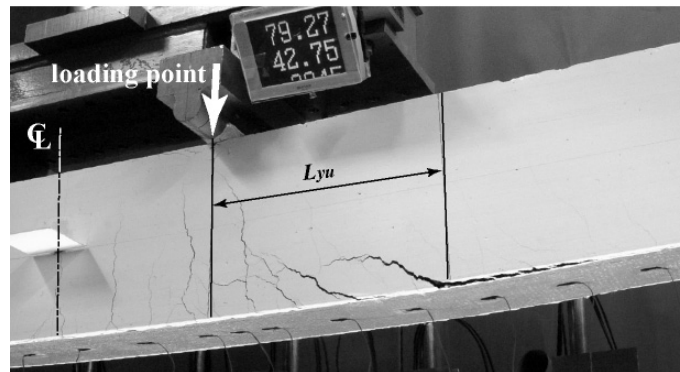


Figura 4-2 Despegue originado en la zona de fisuras de flexión-cortante. Fuente: Kurihashi Y., et al. (2006)

En el modo de fallo 4, aunque guarda relación con el despegue del laminado, el fallo se da inicialmente por cortante. El desplazamiento relativo de los labios de la grieta induce el despegue del refuerzo.

En el modo de fallo 5, atribuido a una cantidad de material FRP insuficiente, el refuerzo no despega sino rompe y, en algunos casos, antes incluso de la fluencia de la armadura de tracción.

En el caso del modo de fallo 6, el refuerzo soporta las tensiones en la interfaz, conforme aumenta la carga el incremento de tracción sobre la armadura y el refuerzo pueden asumirse proporcionales, pero una vez que la armadura de tracción fluye, existe un incremento importante de tracción sobre el laminado (el cual, aún puede seguir soportando carga con un comportamiento presumiblemente elástico lineal) y antes de que las tensiones en la interfaz puedan inducir el despegue del material, éste rompe en la zona donde la armadura de tracción ha alcanzado el límite de fluencia. Este modo de fallo está asociado a bajas cuantías de armadura y de refuerzo FRP (FIB C. (2001)).

Por último, el modo de fallo 7 es similar al fallo por compresión del hormigón en vigas comunes sin refuerzo exterior.

Los modelos estudiados en el presente trabajo están relacionados con los modos de fallo 1, 2 y 3, por ser los que condicionan la capacidad portante de las vigas reforzadas con más frecuencia.

4.2 Despegue en la zona de anclaje

Básicamente existen dos enfoques para abordar el despegue en la zona de anclaje. El primero de ellos consiste en obtener las tensiones tangenciales y normales en el extremo del laminado y asociarlas a un criterio de fallo (Figura 4-3).

La mayoría de las soluciones presentadas por los distintos investigadores asumen las siguientes hipótesis: comportamiento elástico y lineal de los materiales, adherencia perfecta entre el adhesivo y los adherentes, la deformación de los adherentes se debe a momentos flectores y fuerzas axiales y, la tensión es constante a través del espesor del adhesivo. Entre las soluciones más relevantes

encontradas en la literatura están las de Roberts TM, et al. (1989), Roberts TM. (1989), Malek A. M., et al. (1998) Smith S. T., et al. (2001), Abdelouahed Tounsi. (2006) Yang J., et al. (2007), Tounsi A., et al. (2007), Yang Jian, et al. (2007), Tounsi A., et al. (2009). Las soluciones encontradas en la literatura que sí toman en cuenta la variación de las tensiones a través del espesor de la capa del adhesivo son las de Rabinovich O., et al. (2000) y Shen Hui-Shen, et al. (2001).

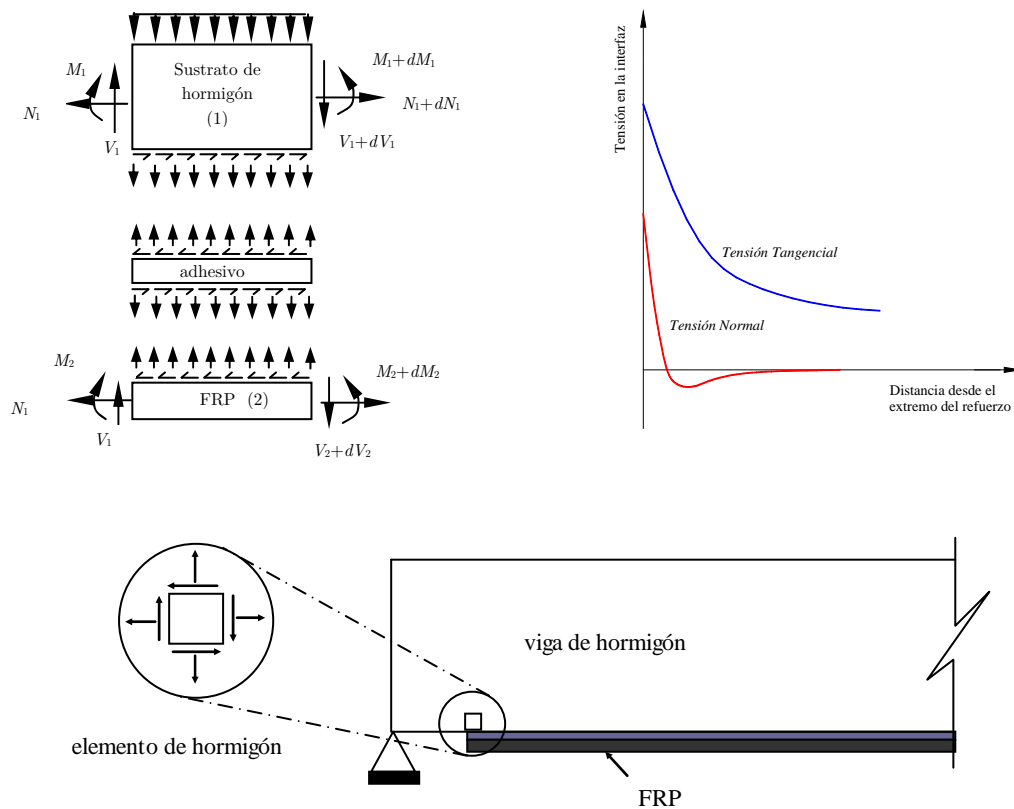


Figura 4-3 Análisis del despegue en el extremo del laminado

Las expresiones analíticas para el cálculo de las tensiones tangenciales y normales en la interfaz FRP-Hormigón obtenidas mediante un análisis como el descrito anteriormente, han sido empleadas por los investigadores para analizar el despegue del laminado en el extremo mediante la adopción de un criterio de fallo, generalmente el de Mohr-Coulomb, pues se asume que el fallo se produce en el hormigón. La solución más atractiva ha sido la de Roberts TM. (1989), por ser la más sencilla y por dar resultados muy similares a las soluciones más

complejas. Entre los modelos de despegue en el extremo que siguen este procedimiento están Ziraba Y. N., et al. (1994), Varastehpour H., et al. (1997), Saadatmanesh H., et al. (1998) y Tumialan J. G., et al. (1999).

El segundo enfoque consiste en obtener la fuerza máxima que puede transferirse a partir de la sección fisurada próxima al extremo del laminado (Figura 4-4), o bien desde el punto de momento máximo.

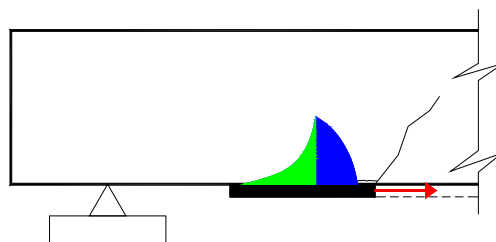


Figura 4-4 Enfoque basado en la fuerza máxima de anclaje

Algunos modelos no hacen distinción entre el modo PEID y PECCS pues consideran que el fallo se produce igualmente en el hormigón ya que se ha observado que cuando no se produce la separación del recubrimiento, el refuerzo despegado lleva consigo una delgada capa de hormigón. El modelo de la FIB (2001), a diferencia del resto de los modelos, limita la fuerza máxima que puede anclarse por medio de expresiones relacionadas con la energía de fractura. Finalmente, otros modelos simplemente recomiendan que se prolongue el refuerzo una distancia mínima del punto del momento de fisuración (ACI 440.2R-08).

4.2.1 Ziraba et al.

Ziraba et al. (1994) propuso dos modelos para predecir el despegue del refuerzo en vigas de hormigón armado producido en la zona de anclaje. Uno de los modelos predice el despegue en la interfaz FRP-hormigón y el otro la separación del recubrimiento de hormigón.

El primer modelo está basado en el criterio de fallo de Mohr-Coulomb. Las tensiones se obtienen de las siguientes expresiones:

$$\tau = \alpha_1 f_{ct} \left(\frac{C_{R1} V_0}{f_c} \right)^{5/4} \quad [4.1]$$

$$\sigma_y = \alpha_2 C_{R2} \tau \quad [4.2]$$

donde

$$C_{R1} = \left[1 + \left(\frac{K_s}{E_p b_p t_p} \right)^{1/2} \frac{M_0}{V_0} \right] \frac{b_p t_p}{I_{trc,p} b_a} (d_p - x_{trc,p}) \quad [4.3]$$

$$C_{R2} = t_p \left(\frac{K_n}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad [4.4]$$

C_{R1} y C_{R2} son obtenidos de la solución de Roberts et al. (1989) (Smith & Teng 2002a), mientras que α_1 y α_2 son factores empíricos calibrados para vigas de hormigón reforzadas con chapas de acero. La rigidez transversal y normal de la capa de adhesivo vienen dadas respectivamente por las expresiones siguientes:

$$K_s = \frac{G_a b_a}{t_a} \quad [4.5]$$

$$K_n = \frac{E_a b_a}{t_a} \quad [4.6]$$

siendo E_a , G_a , b_a , y t_a el módulo de elasticidad longitudinal, módulo de deformación transversal, el ancho y el espesor de la capa de adhesivo respectivamente. $I_{trc,p}$ es el momento de inercia de la sección fisurada y transformada en FRP, $x_{trc,p}$ es la profundidad del eje neutro de dicha sección. I_p es el momento de inercia del refuerzo FRP, d_p la distancia desde la fibra más comprimida de la viga de HA al centroide del laminado FRP. Finalmente M_0 y V_0 son respectivamente el momento de flector y la fuerza cortante en el extremo del laminado.

Para obtener la fuerza cortante que causa el despegue del refuerzo en la interfaz se sustituyen las ecuaciones [4.1] y [4.2] en la expresión de Mohr-Coulomb. La expresión que resulta es la siguiente:

$$V_{d,ext} = \frac{f_c}{C_{R1}} \left[\frac{C}{\alpha_1 f_{ct} (1 + \alpha_2 C_{R2} \tan \varphi)} \right]^{4/5} \quad [4.7]$$

La ecuación es válida para $a/h < 3$, donde h es la altura de la viga de HA. Los factores empíricos calibrados tienen los valores $\alpha_1 = 35$ y $\alpha_2 = 1,1$, y un ángulo de fricción interna $\varphi = 28^\circ$. En Ziraba et al. (1994) se usan dos valores para C en ejemplos numéricos específicos, 2,68 MPa y 5,36 MPa; sin embargo, no se detalla el criterio que ha seguido para adoptar dichos valores.

El segundo modelo propuesto en Ziraba et al. (1994) es una modificación de la normativa ACI 318-95 sobre la capacidad a esfuerzo cortante de vigas de HA, y consiste en la siguiente ecuación:

$$V_{d,ext} = V_c + kV_s \quad [4.8]$$

donde k es un factor empírico de eficiencia del armado a cortante y con base a un análisis de regresión de los resultados obtenidos de ensayos con vigas reforzadas con chapas de acero que fallaron por la separación del recubrimiento propusieron $k = 2.4e^n$, con $n = -0.08C_{R1}C_{R2} \times 10^6$, V_c y V_s son respectivamente la contribución del hormigón y la armadura transversal en la capacidad a cortante de la viga y son dados por las siguientes expresiones:

$$V_c = 1 / 6(\sqrt{f_c} + 100\rho_s)bd \quad [4.9]$$

$$V_s = (A_{sw}f_{yw}d) / s_w \quad [4.10]$$

4.2.2 Varastehpour y Hamelin.

Varastehpour & Hamelin (1997), desarrollaron un modelo para predecir el despegue del material FRP a través de la interfaz con origen en su extremo

empleando también el criterio de fallo Mohr-Coulomb . Los coeficientes de C de cohesión y ϕ de fricción interna fueron calculados a partir de ensayos experimentales obteniendo un promedio de 5,4 MPa y sugiriendo 33° respectivamente. La tensión cortante viene dada por la ecuación:

$$\tau = \frac{1}{2} \sqrt{\beta} (\lambda V_0)^{3/2} \quad [4.11]$$

donde

$$\lambda = \frac{t_p E_p}{I_{trc,c} E_c} (d_p - x_{trc,c}) \quad [4.12]$$

donde $x_{trc,c}$ es la profundidad del eje neutro de la sección fisurada y transformada en hormigón, el factor β de la ecuación [4.11] se obtiene de un estudio paramétrico para considerar las demás variables que pueden influir en la tensión tangencial, la expresión propuesta para obtener el valor del citado factor es la siguiente:

$$\beta = \frac{1.26 \times 10^5 a}{h^{0.7} t_p E_p} \quad [4.13]$$

La tensión normal se expresa en función de la tensión tangencial:

$$\sigma_y = C_{R2} \tau \quad [4.14]$$

donde C_{R2} es dado por la solución obtenida por Roberts et al. (1989). Finalmente, el esfuerzo cortante al final del laminado que produce el despegue del refuerzo se obtiene haciendo las sustituciones correspondientes resultando

$$V_{d,ext} = \frac{1,6 \tau_{\max}^{2/3}}{\lambda \beta^{1/3}} \quad [4.15]$$

4.2.3 Tumialan et al.

El modelo propuesto por Tumialan et al. (1999a) predice el modo de fallo PECCS mediante el cálculo de las tensiones en el extremo del refuerzo cuyas expresiones son similares a las obtenidas por Roberts et al. (1989) (Smith & Teng 2002a).

$$\tau = \bar{C}_{R1} \frac{E_p}{E_c} V_0 \quad [4.16]$$

$$\sigma_y = C_{R2} \tau \quad [4.17]$$

donde C_{R2} es dado por la ecuación [4.4] y \bar{C}_{R1} viene dado por

$$\bar{C}_{R1} = \left[1 + \left(\frac{K_s}{E_p b_p t_p} \right)^{1/2} \frac{M_0}{V_0} \right] \frac{b_p t_p}{I_{tru,c} b_a} (d_p - x_{tru,c}) \quad [4.18]$$

La tensión longitudinal σ_x se obtiene a partir de un análisis de flexión de la sección no fisurada. Finalmente, una vez obtenidas las tensiones en el extremo del laminado, se calcula la tensión principal la cual no deberá superar la resistencia media a tracción del hormigón f_{ctm} .

4.2.4 FIB bulletin 14 2001

El modelo recogido en el boletín 14 de la FIB está proporciona la fuerza máxima que puede ser anclada y la longitud máxima de anclaje:

$$N_{p,\max} = \alpha c_1 k_c k_b b \sqrt{E_p t_p f_{ctm}}$$

$$l_{b,\max} = \sqrt{\frac{E_p t_p}{c_2 f_{ctm}}}$$

donde α es un factor de reducción de valor 0,9 para tomar en cuenta la influencia de fisuras inclinadas sobre la resistencia de adherencia, para vigas con suficiente refuerzo a cortante y en losas $\alpha = 1$, k_c es un factor que toma en cuenta el estado de la superficie, de valor 0,67 para superficies fraguadas sin

contacto con el encofrado, c_1 y c_2 son constantes de valor 0,64 y 2 respectivamente y que pueden ser calibradas con resultado de ensayos, por último,

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b}}{1 + \frac{b_p}{400}}} \geq 1$$

4.2.5 ACI 440.2R-08

La recomendación del ACI 440.2r-08 consiste en limitar el esfuerzo cortante en el extremo del refuerzo a un valor de $0,67V_c$ para evitar la separación del recubrimiento de hormigón, donde

$$V_c = \left(1,9\lambda\sqrt{f_c} + 2500\rho_s \frac{V_u d}{M_u} \right) bd \quad (\text{lb-plg})$$

si el valor del cortante es superior, se deberán colocar anclajes en forma de «jackets» de material FRP, calculando el área necesaria según una expresión proporcionada por la citada norma y derivada de los estudios de Reed et al. (2005). No obstante, el ACI sugiere una manera más sencilla de evitar el despegue del refuerzo en los extremos con o sin la separación del recubrimiento, la cual consiste en prolongar el refuerzo una longitud l_{pf} derivada de los estudios de Teng et al. (2003) más allá del punto del momento de fisuración. Además, para sistemas de refuerzo multicapas, la distancia entre extremos de capas adyacentes debe ser al menos de 150 mm y la última capa debe cumplir con la restricción de la distancia l_{pf} antes mencionada. Esta longitud viene dada por la siguiente expresión:

$$l_{pf} = \sqrt{\frac{A_p E_p}{\sqrt{f_c}}}$$

La influencia de escalonar los extremos de las capas que conforman el refuerzo FRP ha sido ampliamente estudiada por Gao, B. (2005) cuyos

resultados demuestran un mejor anclaje para sistemas multicapas ya que ayuda a disminuir la concentración de tensiones en la interfaz FRP-Hormigón.

4.3 Despegue en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante

Los enfoques utilizados por la comunidad científica pueden clasificarse en los siguientes:

1. Limitación de la deformación del laminado en la sección de máximo momento flector.
2. Limitación de la tensión media de adherencia entre dos fisuras.
3. Limitación del incremento de tensión en el laminado entre dos fisuras.

4.3.1 Modelos basados en la limitación de la deformación en la sección de máximo momento flector

El boletín 14 de la FIB recoge tres enfoques para abordar el despegue en la región entre fisuras, el primero de ellos se basa en la limitación de la deformación en la sección de máximo momento flector en un rango de 0,0065 a 0,0085, lo cual evidentemente no puede ser aplicable de manera general a cualquier configuración dimensional viga-refuerzo.

El modelo del ACI-440.2R-08 se basa en el enfoque de la limitación de la deformación en la sección de máximo momento flector, la expresión es la siguiente:

$$\varepsilon_{pd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c}{A_p E_p}} \leq 0,9 \varepsilon_{pu}$$

Análogamente, el modelo de Said & Wu (2008), a partir de un modelo para la limitación de la deformación del laminado, ofrece una expresión para el cálculo del momento flector que produce el despegue del refuerzo asumiendo que se produce la plastificación de la armadura:

$$M_d = 0,9 A_s f_y d + 0,23 b_p (f_c)^{0,2} (E_p t_p)^{0,65} (0,9d + y_{sp})$$

4.3.2 Modelos basados en la limitación de la tensión media de adherencia

El boletín 14 de la FIB recoge una expresión que depende únicamente de la resistencia a tracción del hormigón para la limitación de la tensión media de adherencia entre dos fisuras:

$$\tau_m = 1,8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$

4.3.3 Modelos basados en la limitación del incremento de tensión en el laminado

La Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) recomienda limitar el incremento de tensión en el refuerzo al valor dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_p = \Delta\sigma_p = \sqrt{\frac{2G_f E_p}{t_p}}$$

El incremento de la tensión se calcula de forma general según la citada norma para una longitud entre 150 y 250 mm. En la expresión anterior, G_f es la energía de fractura de la interfaz FRP-hormigón cuyo valor puede tomarse, en ausencia de ensayos, de 0,5 N/mm.

El boletín 14 de la FIB recoge una formulación muy compleja para abordar el despegue en la región entre fisuras basada en el enfoque de la limitación del incremento de tensión en el laminado. El modelo consiste básicamente en tres etapas:

a) Determinación de la separación más desfavorable de fisuras de flexión, que de acuerdo con el boletín 14 de la FIB el promedio es igual a dos veces la longitud de transmisión y puede ser calculada asumiendo una tensión media de adherencia para el refuerzo interno y el externo de la siguiente manera:

$$s_m = 2 \frac{M_f}{z_m} \frac{1}{\left(\sum \tau_{pm} b_p + \sum \tau_{sm} \phi_s \pi \right)}$$

$$M_f = \frac{kf_{ctk,0.95}bh^2}{6} \quad ; \quad \tau_{sm} = 2,25f_{ctk,0.95} = 1,85f_{ctm} \quad ; \quad \tau_{pm} = 0,44f_{ctm}$$

$$z_m = 0,85 \frac{hE_pA_p + dE_sA_s}{E_pA_p + E_sA_s}$$

b) Determinación de la tensión de tracción al que está sometido el refuerzo en la zona delimitada por dos fisuras mediante un análisis convencional de equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones de la sección plana. El incremento de tensión obtenido se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta\sigma_{pd} = \sigma_{p\max} - \sigma_{p\min}$$

c) Finalmente, se calcula el incremento máximo de tensión que puede soportar el refuerzo antes de separarse del sustrato de hormigón en una longitud dada por la separación entre dos fisuras para una tensión $\sigma_{p\min}$.

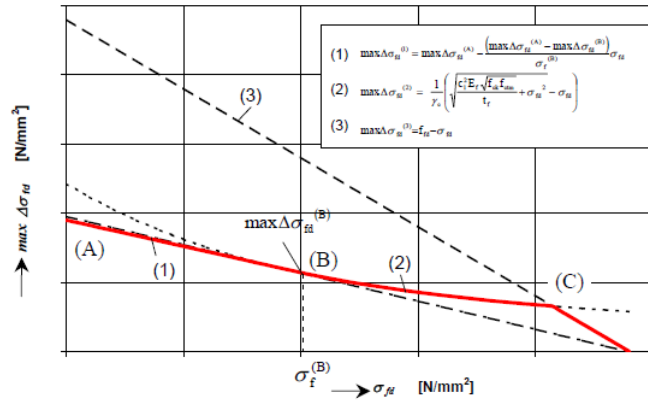


Figura 4-5 Diagrama del máximo incremento de tensión entre dos fisuras consecutivas según Niedermeier (2000) y tomada de la fib bulletin 14 (2001)

De acuerdo con el diagrama, se toma como punto de comparación $\sigma_p^{(B)}$ ($\sigma_f^{(B)}$ en la figura) para identificar en qué rama de la curva se encuentra $\sigma_{p\min}$. El incremento máximo de tensión se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\max \Delta \sigma_{pd} = \begin{cases} \max \Delta \sigma_{pd}^1 & \text{cuando } \sigma_{p \min} < \sigma_p^{(B)} \\ \min \left(\max \Delta \sigma_{pd}^2, \max \Delta \sigma_{pd}^3 \right) & \text{cuando } \sigma_{p \min} > \sigma_p^{(B)} \end{cases}$$

donde:

$$\sigma_p^{(B)} = \frac{0,185 E_p}{s_m} - 0,285 \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \frac{s_m}{4 t_p}$$

$$\max \Delta \sigma_{pd}^1 = \max \Delta \sigma_{pd}^{(A)} - \frac{\max \Delta \sigma_{pd}^{(A)} - \max \Delta \sigma_{pd}^{(B)}}{\sigma_p^{(B)}} \sigma_{p \min}$$

$$\max \Delta \sigma_{pd}^2 = \frac{1}{\gamma_c} \left[\sqrt{\frac{0.23 E_p \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_p} + (\sigma_{p \min})^2} - \sigma_{p \min} \right]$$

$$\max \Delta \sigma_{pd}^3 = f_{pu} - \sigma_{p \min}$$

$$\max \Delta \sigma_{pd}^{(A)} = \begin{cases} \frac{0.23}{\gamma_c} \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_p}} & \text{si } l_b > l_{b, \max} \\ \frac{l_b}{l_{b, \max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b, \max}} \right) \frac{0.23}{\gamma_c} \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_p}} & \text{si } l_b \leq l_{b, \max} \end{cases}, \quad l_{b, \max} = 1.44 \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}}$$

$$\max \Delta \sigma_{pd}^{(B)} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\sqrt{\frac{0.23 E_p \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_p} + (\sigma_p^{(B)})^2} - \sigma_p^{(B)} \right]$$

4.3.4 Modelo de tensión media de adherencia basado en el de López González (2012)

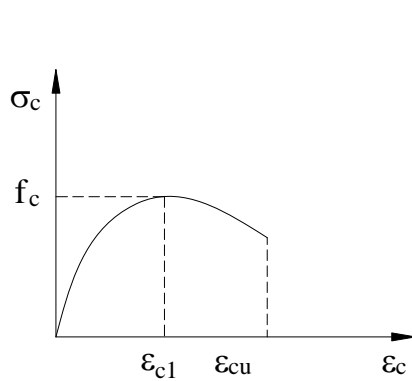
A partir del modelo de adherencia de López González, J. (2012) obtenido de una campaña experimental de ensayos *beam-test*, se añade al conjunto de modelos la siguiente expresión:

$$\tau_m = 2,4 \left(\frac{f_c^{0,3}}{2,8} \right)^{t_a} \leq f_{ctm}$$

4.4 Método de análisis

En los modelos que es necesario realizar un análisis seccional, se han adoptado los siguientes modelos para los materiales

- Ley de comportamiento hiperbólico. Esta ley de comportamiento, aunque fundamentalmente empleada para análisis no lineal, también se ha utilizado para obtener la deformación del refuerzo. Sus características son las siguientes:



$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)}$$

donde

$$k = 1,05 E_{cm} \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$$

$$\varepsilon_{c1} (\%) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8$$

$$\varepsilon_{cu} (\%) = \begin{cases} 3,5 & \text{si } f_{cm} \leq 58 \text{ MPa} \\ 2,8 + 27 \left[\frac{98 - f_{cm}}{100} \right]^4 & \text{si } f_{cm} > 58 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$E_{cm} = 2,2 \times 10^4 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

y las expresiones empleadas en el proceso iterativo se presentan a continuación:

$$FC = f_{cm} \frac{b}{\varphi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{k}{\varepsilon_{c1} \zeta^2} (\zeta \varepsilon_c - \ln(1 + \zeta \varepsilon_c)) \\ - \frac{1}{2(\varepsilon_{c1})^2 \zeta^3} \left[(1 + \zeta \varepsilon_c)^2 - 4(1 + \zeta \varepsilon_c) + 2 \ln(1 + \zeta \varepsilon_c) + 3 \right] \end{array} \right\}$$

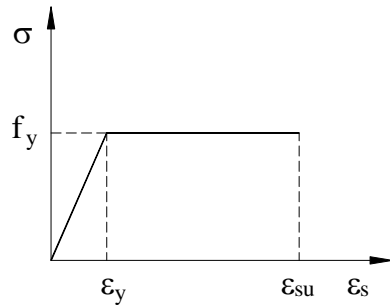
$$mfc = f_{cm} \frac{b}{\varphi^2} \left[\frac{k}{2\varepsilon_{c1}\zeta^3} \left((1 + \zeta\varepsilon_c)^2 - 4(1 + \zeta\varepsilon_c) + 2 \ln(1 + \zeta\varepsilon_c) + 3 \right) \right] -$$

$$f_{cm} \frac{b}{\varphi^2} \left[\frac{1}{6(\varepsilon_{c1})^2 \zeta^4} \left[2\zeta^3 (\varepsilon_c)^3 - 6 \ln(1 + \zeta\varepsilon_c) - 3\zeta^2 (\varepsilon_c)^2 + 6\zeta\varepsilon_c \right] \right]$$

siendo

$$\zeta = \frac{k-2}{\varepsilon_{c1}}$$

- Ley de comportamiento del acero. El Eurocódigo EC-2 permite el uso de dos hipótesis de comportamiento. En la primera se considera un módulo de endurecimiento y se limitan la deformación y la tensión. En la segunda, se asume un comportamiento elasto-plástico sin necesidad de limitar la deformación. En el presente trabajo se ha supuesto un comportamiento elasto-plástico con deformación última de 0,0225. El Eurocódigo EC-2, en la hipótesis de con endurecimiento, limita la deformación en función de la clase de acero, el valor recomendado es del 90% de la deformación característica, la cual, para acero clase A es de 2,5%. Debido a que la clase del acero no se recoge en la mayoría de las publicaciones, se ha optado por limitar la deformación del acero en dicho valor.



$$FS = \begin{cases} \frac{f_y}{\varepsilon_y} \varepsilon_s A_s & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ A_s f_y & \text{para } \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases}$$

- Ley de comportamiento del material compuesto. El comportamiento de los materiales compuestos es elástico-lineal hasta la rotura, por tanto, su contribución en el análisis seccional es el más simple de todos:

$$FP = E_p \varepsilon_p A_p$$

$$mfp = FP(d_p - c)$$

En los modelos basados en tensión media de adherencia, se ha asumido que se produce la plastificación de la armadura y el cálculo de la tensión media se simplifica a las siguientes expresiones:

$$\Delta F_p = \frac{\Delta M}{0,95d}$$

$$\tau_m = \frac{\Delta M}{0,95db s_f}$$

En el caso de vigas de 3 o 4 puntos de flexión, la tensión media se reduce a la siguiente expresión:

$$\tau_m = \frac{V}{0,95db}$$

Por tanto, el momento predicho por un modelo basado en tensión media de adherencia para el tipo citado de vigas es

$$M_{cal} = 0,95\tau_m db L_c$$

donde τ_m es la tensión media de adherencia y cuyo valor es el siguiente:

$$\tau_m = 1,8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \text{ según el boletín 14 de la FIB y,}$$

$$\tau_m = \frac{\sqrt{2G_f E_p t_p}}{s_f} \text{ según la JSCE.}$$

$$\tau_m = 2,4 \left(\frac{f_c^{0,3}}{2,8} \right)^{t_n} \leq f_{ctm} \text{ para el modelo de adherencia de López}$$

González, J. (2012).

CAPÍTULO 5

Evaluación de los modelos para el pronóstico del fallo de vigas de hormigón reforzadas a flexión con materiales compuestos

5.1 Introducción

Con el fin de analizar el ajuste de los modelos se ha recabado de la literatura especializada una base de datos de vigas reforzadas a flexión cuyo fallo se ha caracterizado por el despegue del laminado, bien con inicio en el extremo o en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante. La base de datos se recoge en el Anejo A.

Para llevar a cabo el análisis se ha realizado la transformación de la respuesta de todos los modelos a una misma variable, siendo el cortante para el fallo por despegue en el extremo del refuerzo y el momento flector para el fallo por despegue con origen en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante. Por otra parte, el análisis se ha realizado con los criterios de evaluación más utilizados, la descomposición de la suma cuadrática residual y los módulos de comparación. No se ha analizado la robustez de los modelos por no presentarse las condiciones necesarias para su análisis.

Con el objeto de facilitar la exposición de los modelos, se ha utilizado siglas para identificarlos. Los modelos para el pronóstico del despegue en la zona de anclaje son los siguientes:

- PED-1: Ziraba et al. (1994). Modelo I.
- PED-2: Ziraba et al. (1994). Modelo II.
- PED-3: Varastehpour & Hamelin (1997).
- PED-4: Tumialan et al (1999).
- PED-5: FIB Bulletin 14 (2001).
- PED-6: ACI 440.2R-08.

Los modelos para la comprobación del despegue en la región entre fisuras

- ICD-1: FIB Bulletin 14 (2001) (Enfoque 2).
- ICD-2: FIB Bulletin 14 (2001) (Enfoque 3).
- ICD-3: Said y Wu (2008).
- ICD-4: ACI 440.2R-08.
- ICD-5: JSCE
- ICD-6: López González J. (2012)

5.2 Base de datos

La base datos consiste en 91 vigas que fallaron por despegue en la zona de anclaje a nivel de la armadura de tracción (PECCS), 54 vigas que fallaron por despegue en el extremo a través de la interfaz FRP-hormigón y 59 vigas que fallaron por despegue en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante.

5.3 Criterios clásicos

En este epígrafe se analiza el comportamiento de los modelos mediante los estadísticos clásicos utilizados para la comparación de modelos, que consisten en medidas de centralización y dispersión de los residuos y de la relación valor experimental / valor pronosticado.

5.3.1 Modelos para el despegue en la zona de anclaje

En la siguiente tabla se recogen los resultados clásicos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID.

Tabla 5-1 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID

Modelo	Min (kN)	Max (kN)	Rango (kN)	Promedio (kN)	$\sqrt{\sum r^2}$
PED-1	-45,2	70,6	115,9	18,7	236
PED-3	-83,6	26,9	110,5	-17,6	225
PED-5	-31,0	36,6	67,6	3,6	111
PED-6	-12,4	72,1	84,4	10,2	152

Tabla 5-2 Medidas de centralización y dispersión de la relación V_{exp}/V_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID

Modelo	Min	Max	Rango	Promedio	Desviación	Coef. de variación (%)
PED-1	0,48	21,74	21,26	7,37	5,31	72,05
PED-3	0,27	1,92	1,65	0,73	0,34	45,78
PED-5	0,51	1,92	1,40	1,24	0,42	33,43
PED-6	0,72	3,82	3,10	1,54	0,74	48,11

Para este grupo de modelos, el que presenta menor coeficiente de variación es el modelo PED-5 en tanto que el modelo PED-1 es el que presenta el mayor. Éste modelo presenta un valor máximo de la relación V_{exp}/V_{cal} muy alto en comparación con el resto de los modelos contribuyendo de forma desfavorable en la evaluación del modelo. Sin embargo, el análisis no permite establecer más bondades de los modelos que las relativas a la dispersión de la relación predicción-realización.

En el caso del grupo de modelos para el pronóstico del fallo PECC nuevamente el modelo PED-5 es el presenta menor dispersión. Análogamente, en el caso de los modelos para el pronóstico de ambos modos de fallo, el citado modelo es el que presenta mejor comportamiento.

Tabla 5-3 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS

Modelo	Min (kN)	Max (kN)	Rango (kN)	Promedio (kN)	$\sqrt{\sum r^2}$ (kN)
PED-2	-985,7	49,8	1035,5	-53,9	2433
PED-3	-189,4	42,4	231,8	-26,4	532
PED-4	-193,0	81,6	274,6	14,0	473
PED-5	-23,5	41,3	64,8	6,7	152
PED-6	-21,55	60,06	81,61	22,29	276

Tabla 5-4 Medidas de centralización y dispersión de la relación V_{exp}/V_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS

Modelo	Min	Max	Rango	Promedio	Desviación	Coef. de variación (%)
PED-2	0,03	2,67	2,64	1,42	0,60	41,97
PED-3	0,21	2,37	2,16	0,91	0,60	66,12
PED-4	0,25	10,08	9,83	2,56	2,04	78,87
PED-5	0,45	2,01	1,56	1,12	0,34	30,03
PED-6	0,59	3,79	3,20	1,80	0,69	37,98

Tabla 5-5 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID y PECCS

Modelo	Min (kN)	Max (kN)	Rango (kN)	Promedio (kN)	$\sqrt{\sum r^2}$ (kN)
PED-3	-189,4	42,4	231,8	-23,2	578
PED-5	-31,0	41,3	72,3	5,7	190
PED-6	-21,6	72,06	93,61	17,8	315

Tabla 5-6 Medidas de centralización y dispersión de la relación V_{exp}/V_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID y PECCS

Modelo	Min	Max	Rango	Promedio	Desviación	Coef. de variación (%)
PED-3	0,21	2,37	2,16	0,85	0,53	62,16
PED-5	0,45	2,01	1,56	1,17	0,37	31,79
PED-6	0,59	3,82	3,23	1,71	0,72	41,95

5.3.2 Modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión-cortante

En este grupo de modelos destacan el ICD-4 y el ICD-6, presentando un promedio de los residuos de -1,5 y 0,3 respectivamente. Por otra parte, el coeficiente de variación de la relación M_{exp}/M_{cal} es similar en todos los modelos; sin embargo, el promedio es claramente distinto, estando el modelo ICD-2 del lado de la seguridad, pues el valor mínimo de la citada relación es de 1,05.

Tabla 5-7 Medidas de centralización y dispersión de los residuos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo ICD

Modelo	Min (mkN)	Max (mkN)	Rango (mkN)	Promedio (mkN)	$\sqrt{\sum r^2}$
ICD-1	-44,8	36,9	81,7	8,7	136
ICD-2	1,7	167,7	166,1	24,2	305
ICD-3	-216,9	13,3	230,1	-13,0	274
ICD-4	-103,4	20,6	124,0	-1,5	137
ICD-5	-65,3	144,3	209,6	13,0	261,6
ICD-6	-64,3	29,7	94,0	0,3	145

Tabla 5-8 Medidas de centralización y dispersión de la relación M_{exp}/M_{cal} de los modelos para el pronóstico del modo de fallo ICD

Modelo	Min	Max	Rango	Promedio	Desviación	Coef. de variación (%)
ICD-1	0,59	2,52	1,94	1,33	0,44	33,36
ICD-2	1,05	2,32	1,27	1,57	0,29	18,36
ICD-3	0,52	1,42	0,91	0,91	0,18	19,57
ICD-4	0,59	1,65	1,06	1,08	0,21	19,56
ICD-5	0,48	2,62	2,14	1,47	0,55	37,53
ICD-6	0,49	2,17	1,69	1,16	0,35	30,32

5.4 Descomposición de la suma cuadrática de los residuos

Para complementar el análisis anterior, en este epígrafe se hace uso de la descomposición de la suma cuadrática de los residuos. Este análisis nos permitirá desvelar la dispersión de cada uno de los modelos y establecer una valoración de los modelos más objetiva que el análisis anterior.

5.4.1 Modelos para el despegue en la zona de anclaje

En los gráficos de la Figura 5-1 se representan los diagramas predicción-realización de los modelos de Ziaraba et al. (1994). A partir de su inspección, se enuncian las siguientes observaciones:

- En el gráfico predicción-realización del modelo I de Ziraba et al. (1994) se observa que subestima el valor del cortante último para la mayoría de los casos excepto por 8 puntos en los que sobrestima el valor, conformando de esta manera, lo que en el área de estadística se conoce como un conglomerado o *cluster*. Estos puntos corresponden a ensayos en los que el autor indica que el refuerzo se ha extendido hasta los apoyos. Por tanto, modelo I de Ziraba et al. (1994) no se recomienda extrapolar su aplicación para vigas reforzadas con materiales compuestos.

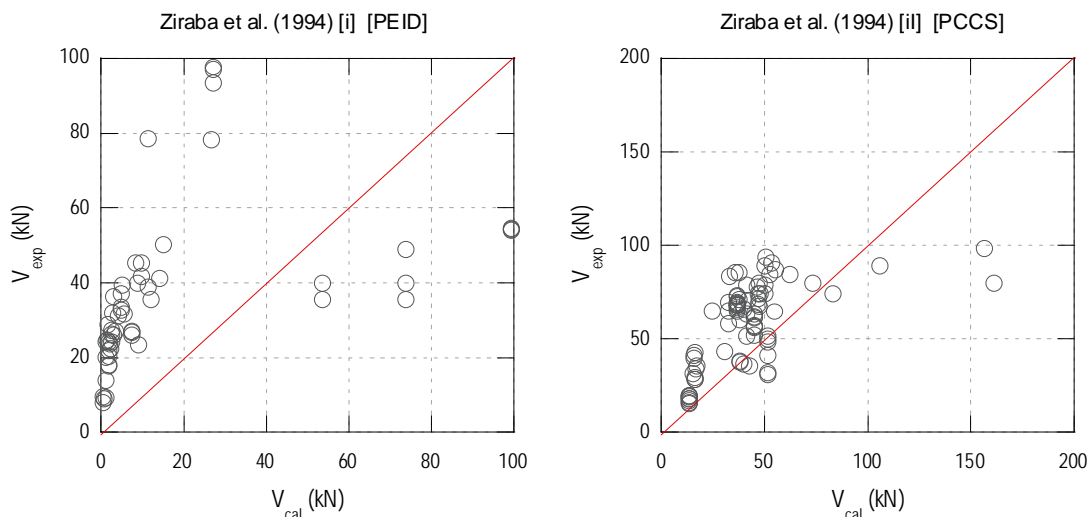


Figura 5-1 Diagrama predicción-realización de los modelos I y II de Ziraba et al. (1994) para el pronóstico de los fallos PEID y PECC respectivamente.

- Es importante señalar que los modelos basados en el primer enfoque de análisis para el cálculo de las tensiones en la interfaz, son muy sensibles a variaciones en la distancia entre el soporte y el extremo del refuerzo ya que interviene la relación M_0/V_0 en el cálculo. Asimismo, los modelos son muy sensibles a variaciones de los módulos longitudinal y transversal del adhesivo, pues intervienen en los factores K_n y K_s respectivamente.
- En el gráfico predicción-realización del modelo II de Ziraba et al. (1994) se han omitido los resultados correspondientes a los ensayos de los cuales el modelo pronostica un valor del cortante excesivamente alto para una mayor claridad del resto de los resultados. Aunque se ha identificado que los resultados anómalos corresponden a refuerzos aplicados con adhesivo de módulo de elasticidad bajo, se requiere mayor información de ensayos de vigas reforzadas con materiales FRP empleando adhesivos de módulo bajo para esclarecer el comportamiento del modelo ante tales circunstancias y poder establecer conclusiones concretas. Aislado el conglomerado antes mencionado, el modelo ofrece buenos resultados y del lado de la seguridad.

En la Figura 5-2 se muestran los diagramas predicción-realización del modelo de Varastehpour & Hamelin, en la Figura 5-3 el de Tumialan et al.

(1999), en la Figura 5-4 el del boletín 14 de la FIB y en la Figura 5-5 el del ACI 440.2R-08.

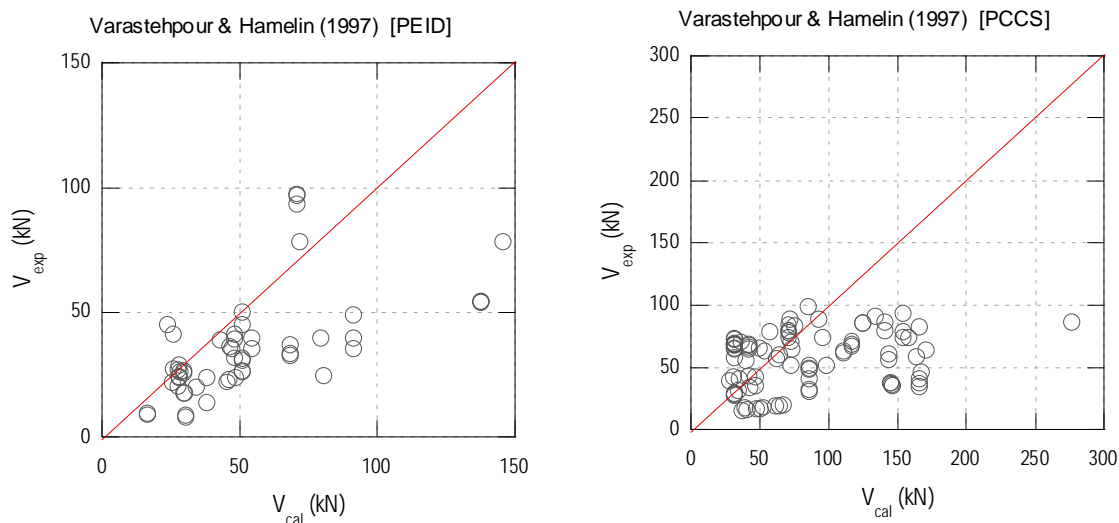


Figura 5-2 Diagrama predicción-realización del modelo de Varastehpour & Hamelin (1997) para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje.

El modelo de Varastehpour & Hamelin en general sobrestima tal como se puede apreciar en el gráfico predicción-realización; no obstante la dispersión de los resultados es considerable y también presenta puntos en la zona de sobrepredicción alejados de la nube.

El modelo de Tumialan et al. (1999) en general presenta un comportamiento conservador. Sin embargo, debe hacerse notar que los puntos que están fuera de la nube, en la zona de sobrepredicción, corresponden a ensayos en los que el autor de los mismos no indica la longitud del refuerzo con exactitud, sólo expone que se ha reforzado en toda la luz. En tales casos, como se ha indicado en el Anejo A, la falta del dato se ha sufragado asumiendo un valor de 25 mm entre el apoyo y el extremo del refuerzo. Y como se ha comentado antes, los modelos basados en el primer enfoque de análisis son muy sensibles a la distancia entre el soporte y el laminado o al módulo cortante del adhesivo, el primer caso es el cobra importancia en este modelo.

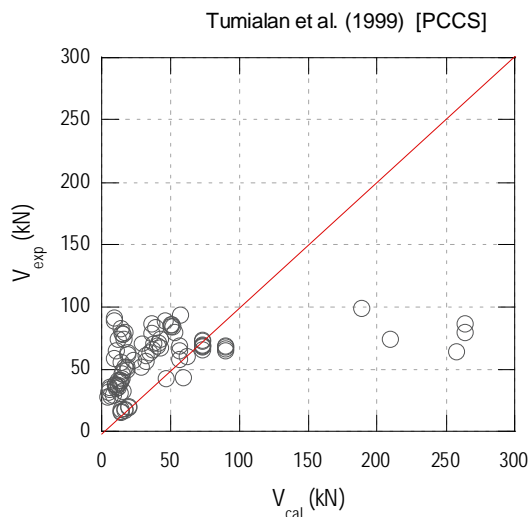


Figura 5-3 Diagrama predicción-realización del modelo de Tumialan et al. (1999) para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje

El modelo recogido en el boletín 14 de la FIB presenta gran dispersión, pero a diferencia de los modelos anteriores no presenta conglomerados. Sin embargo, una cantidad importante de puntos se ubican en la zona de sobrepredicción.

Por último, el modelo del ACI-440.2R-08 también presenta la mayoría de los puntos en la zona de subpredicción y tampoco presenta conglomerados.

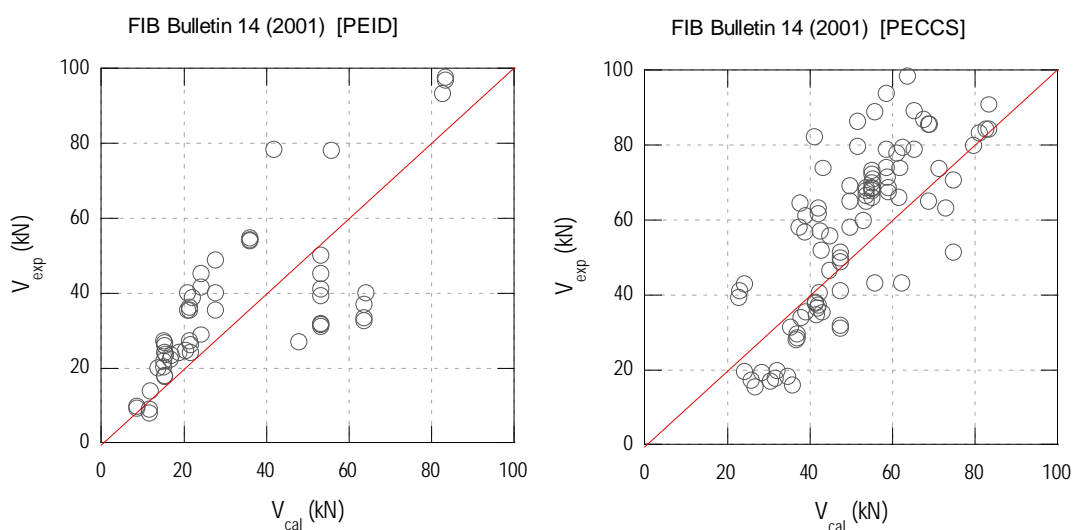


Figura 5-4 Diagrama predicción-realización del modelo del boletín 14 de la FIB para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje

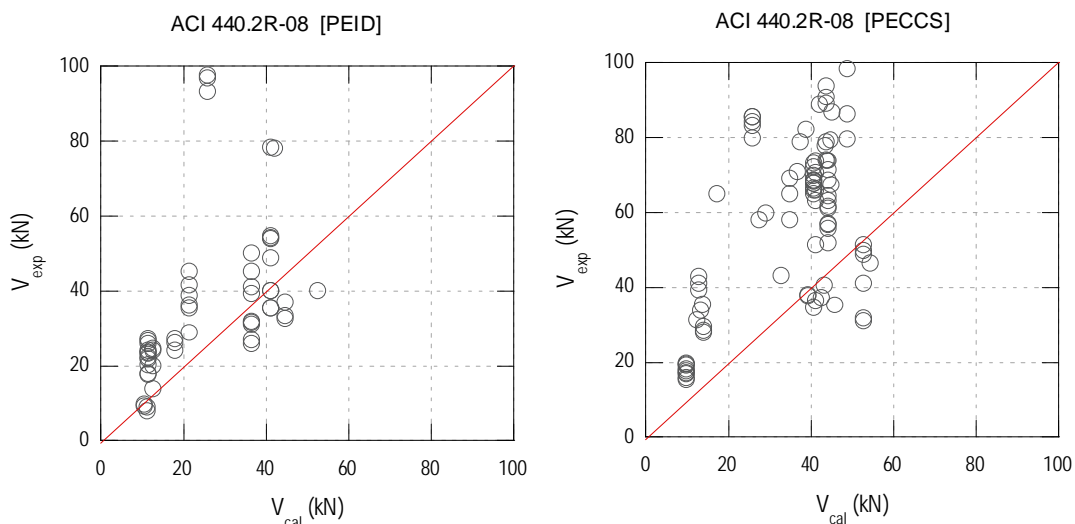


Figura 5-5 Diagrama predicción-realización del modelo del ACI 440.2R-08 para el pronóstico del fallo por despegue en la zona de anclaje

En las siguientes tablas se recoge la descomposición de la suma cuadrática de los residuos predictivos y el punto de corte de la regresión ortogonal con la bisectriz del diagrama predicción-realización. El análisis se ha realizado separadamente en función del modo de fallo. En primer lugar se presentan los resultados de la descomposición de la suma cuadrática para las vigas que fallaron por despegue en el extremo a través de la interfaz FRP-hormigón.

En la Tabla 5-9 se recoge la descomposición de los residuos y en las Figuras 5-6 y 5-7 se representa en diagrama de barras.

Tabla 5-9 Resumen de los errores predictivos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID

	RPCM	RPM	RPVD	RPCI
Ziraba et al. (1994) Modelo I [PED-1]	1029	18,70	-6,74	25,18
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	941	-17,64	-10,55	22,77
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	230	4,02	-0,26	14,73
ACI 440.2R-08 [PED-6]	430	10,16	7,30	16,53

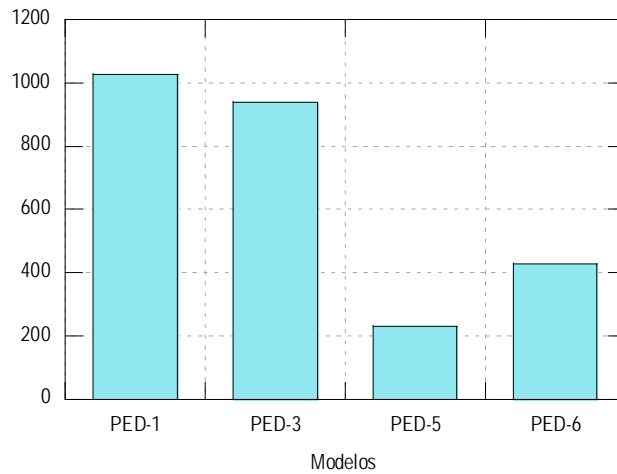


Figura 5-6 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico del fallo PEID.

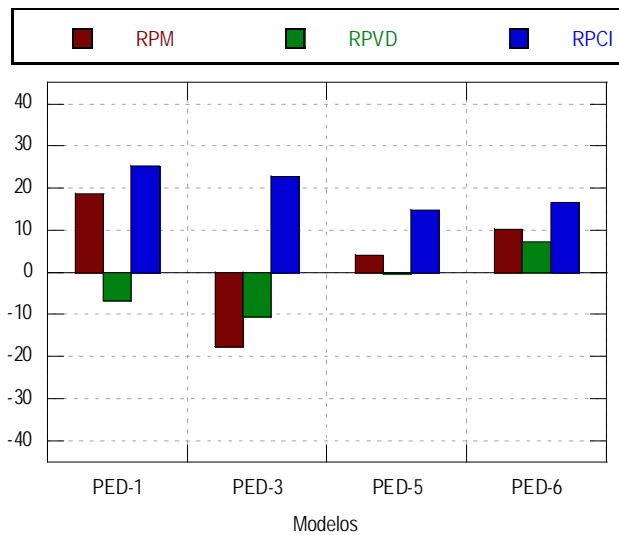


Figura 5-7 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico del fallo PEID.

A partir de los resultados recogidos en la Tabla 5-9 y de las Figuras anteriores puede concluirse que la dispersión en torno a la regresión ortogonal es la que tiene mayor peso sobre la dispersión de todos los modelos, siendo más notoria en modelo PED-1. El modelo PED-5 presenta un residuo por varianzas diferentes muy pequeño en comparación con el resto de los modelos, lo que significa que la pendiente de la recta de regresión ortogonal está próxima a la unidad.

El análisis de la descomposición de los residuos se complementa con el punto de corte de la recta de regresión ortogonal con la bisectriz del diagrama predicción-realización, ya que proporciona información sobre la transición de una zona a otra del citado diagrama. En la Tabla 5-10 se recogen los valores de cada modelo.

Tabla 5-10 Punto de corte de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PEID

	$\tan \theta$	Punto de corte (kN)
Ziraba et al. (1994) Modelo I [PED-1]	0,53	57,50
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	0,51	17,68
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	0,98	236,58
ACI 440.2R-08 [PED-6]	2,29	18,05

El valor negativo del punto corte del modelo del boletín 14 de la FIB indican el carácter conservador del mismo. En los modelos PED-1 y PED-3, el punto de corte indica el valor del pronóstico a partir del cual el modelo pasa de la zona de subpredicción a la de sobrepredicción para el grupo de ensayos experimentales de la base de datos. En cambio, en el modelo PED-6 el punto de corte indica el caso opuesto, es decir, el valor a partir del cual el modelo pasa de la zona de sobrepredicción a la de subpredicción.

Cabe resaltar que los modelos PED-5 y PED-6 pueden catalogarse como conservadores, pues el centroide de ambos modelos se ubica en la zona de subpredicción. Además, el RPCI es muy similar; sin embargo, el RPVD hace la diferencia en estos modelos, pues la pendiente de la regresión ortogonal es mayor en el modelo PED-6 lo que se traduce en un aumento de los residuos.

A continuación se presentan la evaluación de los modelos para el pronóstico del grupo de vigas con modo de fallo PECCS. En la Tabla 5-11 se recoge la descomposición de los residuos y en las Figuras 5-8 y 5-9 se muestran los diagramas de barras correspondientes.

Los resultados indican que el modelo PED-2 está del lado de la inseguridad de acuerdo con los valores y signos de los residuos RPM y RPVD. Este comportamiento no se visualiza claramente en la Figura 5-1 ya que no se muestran los resultados de los ensayos en los que el modelo pronostica un valor del cortante excesivamente alto. Estos puntos ubicados en la zona de sobrepredicción hacen que el centroide se ubique en dicha zona y la pendiente de la recta de regresión ortogonal sea muy tendida (el valor absoluto del residuo RPVD es muy alto). El modelo PED-3 tiene un comportamiento similar al anterior, pero en menor medida.

En el caso del modelo PED-4, también algunos puntos se ubican en la zona de sobrepredicción, pero a diferencia de los modelos anteriores, no ofrece valores excesivamente altos del pronóstico y presenta mayor cantidad de puntos en la zona de subpredicción. Por esta razón, el residuo RPM es positivo.

Por último, los modelos PED-5 y PED-6 presentan un comportamiento muy similar; pero el último exhibe un comportamiento más conservador pues el residuo RPM es notablemente superior en comparación con los residuos RPVD y RPCI.

Tabla 5-11 Resumen de los errores predictivos de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS

	RPCM	RPM	RPVD	RPCI
Ziraba et al. (1994) Modelo II [PED-2]	65061	-53,65	-226,25	104,84
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	3116	-26,44	-27,73	40,59
Tumialan et al. (1999) [PED-4]	2463	14,00	-30,58	36,49
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	254	6,67	7,54	12,35
ACI 440.2R-08 [PED-6]	838	22,29	8,46	16,43

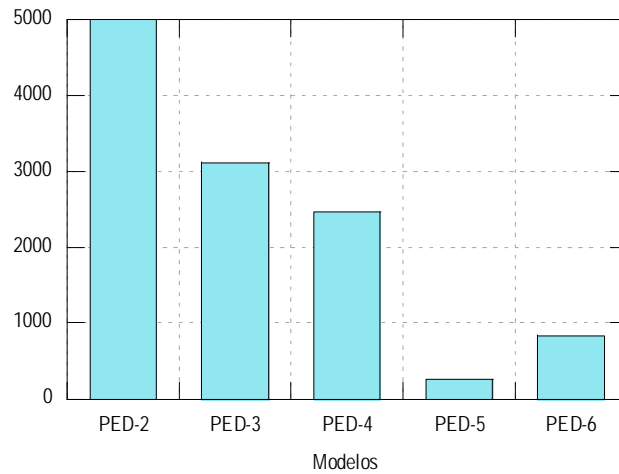


Figura 5-8 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico del fallo PECCS

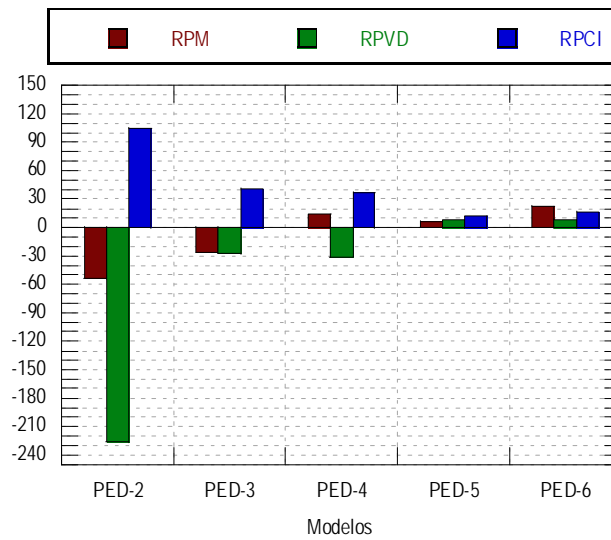


Figura 5-9 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico del fallo PEID

En la Tabla 5-12 se recoge el ángulo que forma la recta de la regresión ortogonal con la horizontal y los puntos de corte. El pequeño valor del ángulo θ se debe, como se ha hecho mención antes, a los casos en los que el modelo ofrece valores del pronóstico excesivamente altos.

Tabla 5-12 Punto de corte de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS

	$\tan \theta$	Punto de corte (kN)
Ziraba et al. (1994) Modelo II [PED-2]	0,00	56,93
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	0,14	52,67
Tumialan et al. (1999) [PED-4]	0,21	60,67
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	1,70	40,80
ACI 440.2R-08 [PED-6]	2,24	16,65

Por último, en la Tabla 5-13 se recoge la descomposición de la suma cuadrática de los residuos de los modelos para el pronóstico de los modos de fallo PEID y PECCS.

Tabla 5-13 Resumen de los errores predictivos de los modelos para el pronóstico de los modos de fallo PEID y PECCS

	RPCM	RPM	RPVD	RPCI
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	2306	-23,16	-22,33	35,65
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	249	5,68	4,35	14,08
ACI 440.2R-08 [PED-6]	686	17,77	9,64	16,66

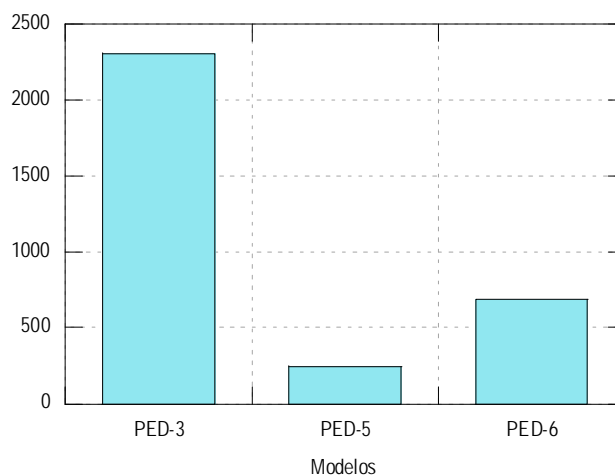


Figura 5-10 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico de los fallos PEID y PECCS

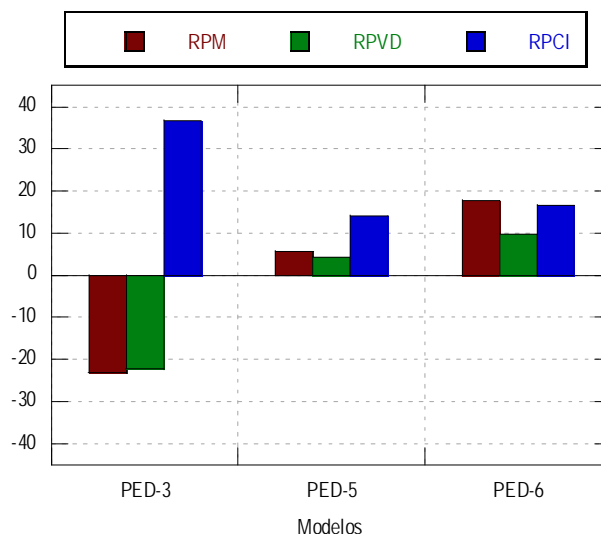


Figura 5-11 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico de los fallos PEID y PECCS

Los puntos de corte se recogen en la Tabla 5-14. Los modelos PED-5 y PED-6 pasan de la zona de subpredicción a la de sobrepredicción para un valor del momento muy pequeño, lo cual destaca el carácter conservador de estos modelos principalmente en el modelo PED-6.

Tabla 5-14 Punto de corte de los modelos para el pronóstico del modo de fallo PECCS

	$\tan \theta$	Punto de corte (kN)
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	0,27	40,45
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	1,29	24,03
ACI 440.2R-08 [PED-6]	2,28	17,56

5.4.2 Modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión-cortante

De forma análoga al análisis anterior, en este epígrafe se presentan los diagramas predicción-realización de los modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante.

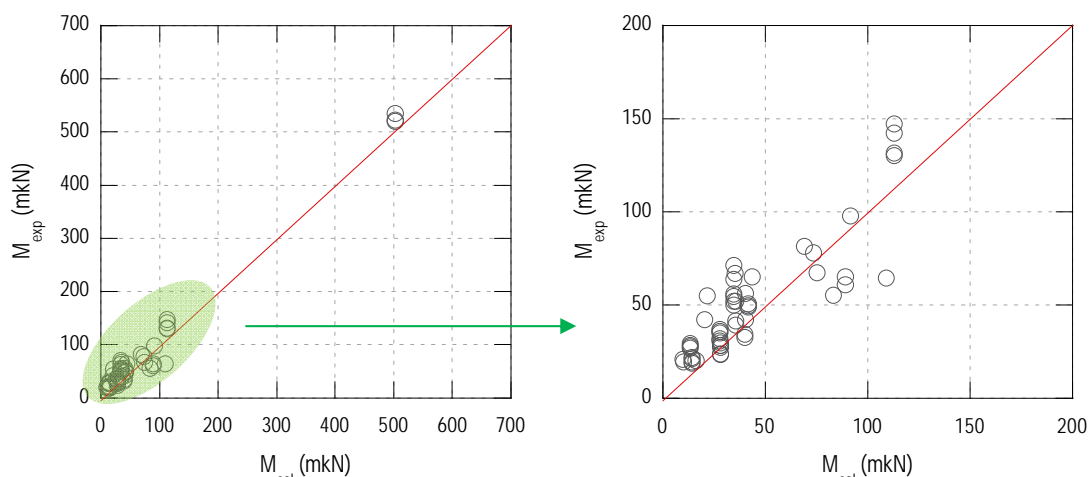


Figura 5-12 Diagrama predicción-realización del modelo del boletín 14 de la FIB para el pronóstico del fallo en la región entre fisuras (enfoque 2)

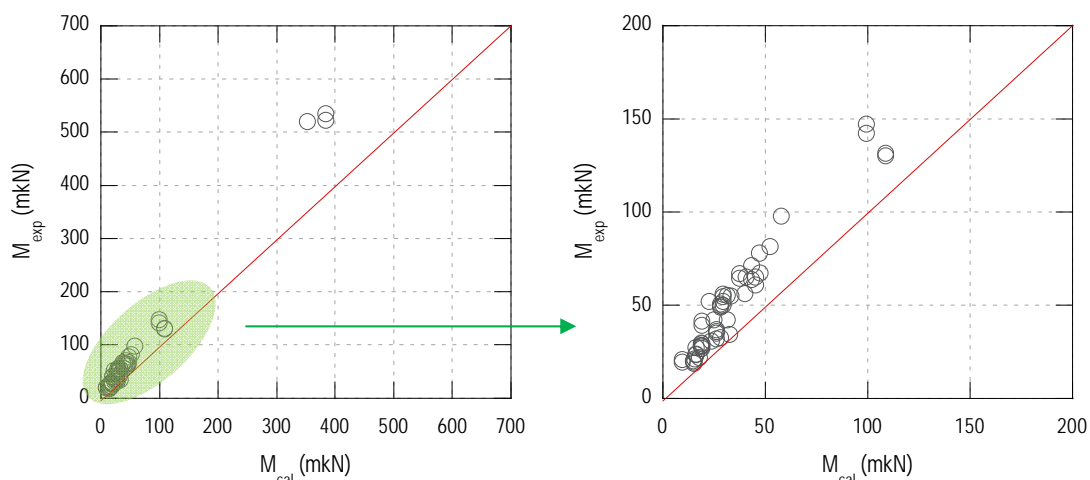


Figura 5-13 Diagrama predicción-realización del modelo del boletín 14 de la FIB para el pronóstico del fallo en la región entre fisuras (enfoque 3)

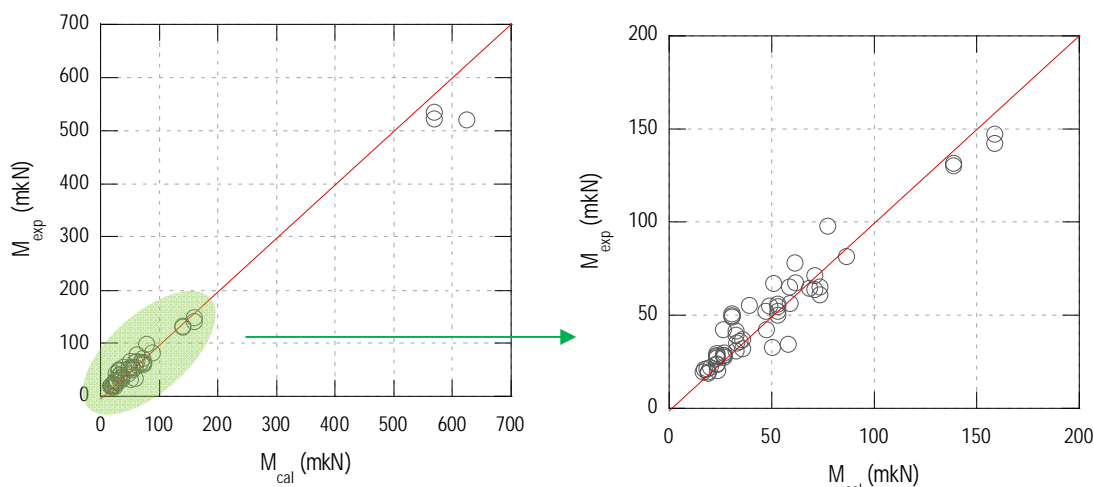


Figura 5-14 Diagrama predicción-realización del modelo del ACI 440.2R-08 (ICD)

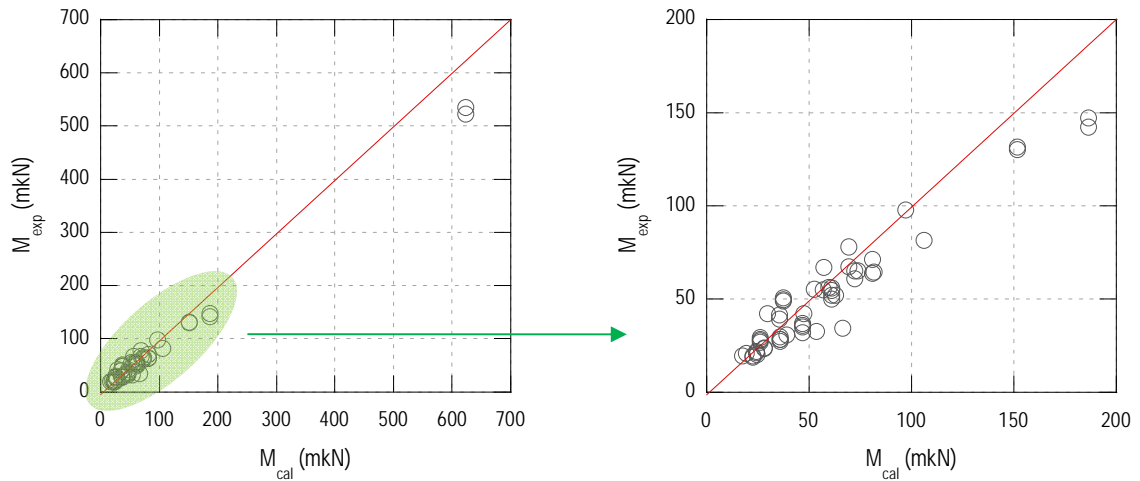


Figura 5-15 Diagrama predicción-realización del modelo de Said & Wu (2008)

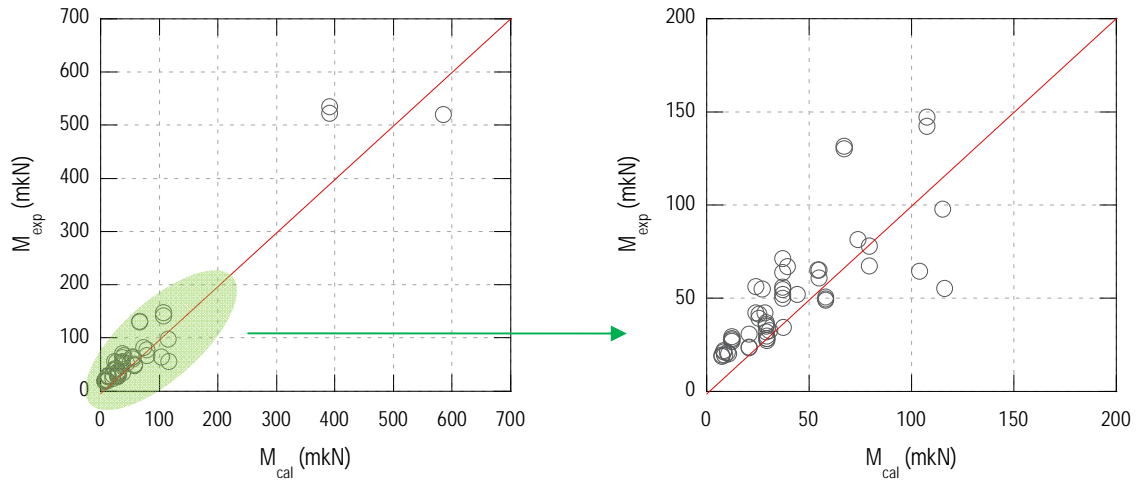


Figura 5-16 Diagrama predicción-realización del modelo de JSCE

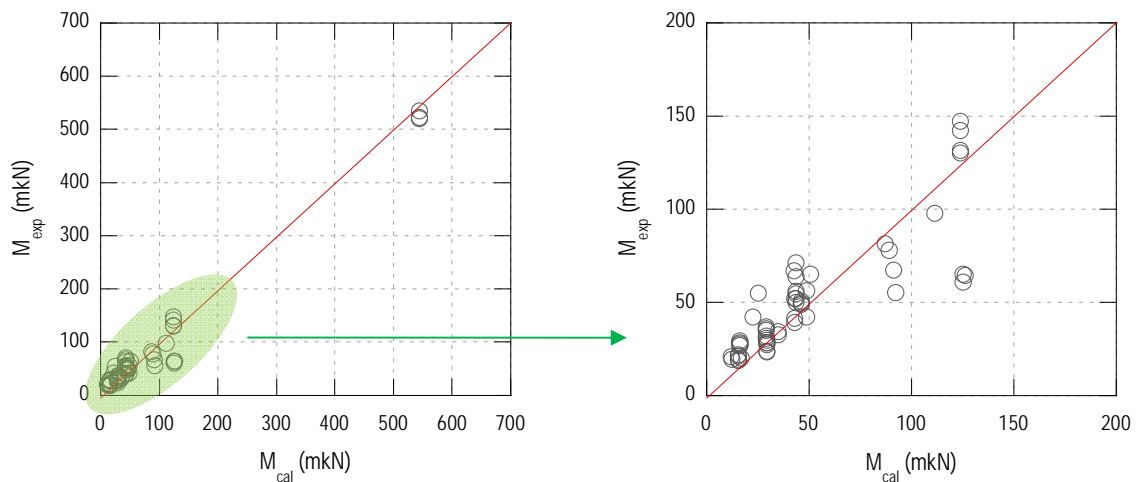


Figura 5-17 Diagrama predicción-realización del modelo de López González J. (2012)

Tabla 5-15 Resumen de los errores predictivos

	RPCM	RPM	RPVD	RPCI
ICD-1	311	8,75	3,49	14,92
ICD-2	1579	24,21	30,58	7,65
ICD-3	1268	-12,96	-29,72	14,73
ICD-4	319	-1,51	-14,21	10,74
ICD-5	1160	13,01	10,94	29,51
ICD-6	356	0,25	-5,43	18,08

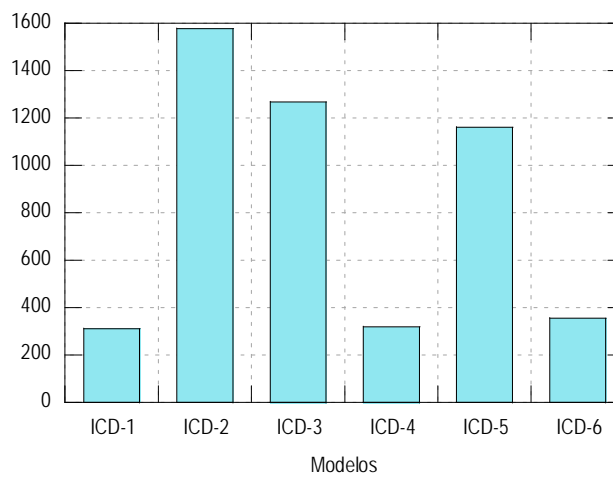


Figura 5-18 Residuo cuadrático medio de los modelos para el pronóstico del fallo ICD

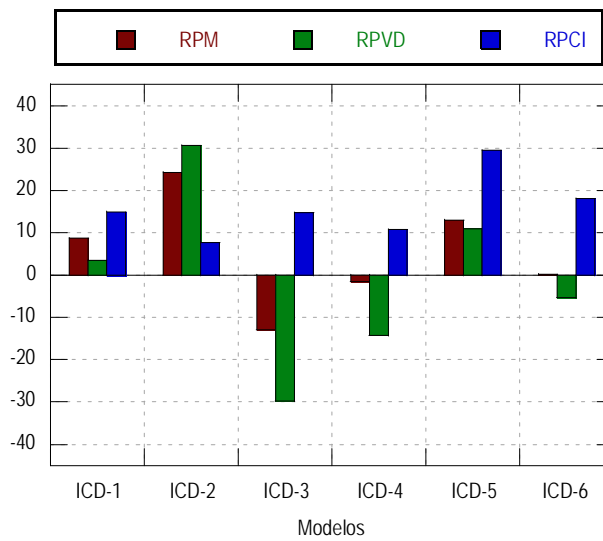


Figura 5-19 Residuo RPM, RPVD y RPCI de los modelos para el pronóstico del modo de fallo ICD

Los modelos con mejor poder predictivo son ICD-1, ICD-4 e ICD-6. En el primero la dispersión a uno y otro lado de la recta de regresión ortogonal es la que tiene mayor peso en la descomposición en el residuo predictivo cuadrático medio. No obstante, también el residuo RPM presenta un valor significativo en comparación con el residuo RPVD.

Por otra parte, en el caso del modelo ICD-4, el residuo RPVD es el que cobra mayor importancia en el poder predictivo, lo cual indica que la predicción del modelo no es «neutral» en el rango de predicción estudiado. En el caso del modelo ICD-6, la dispersión de la regresión ortogonal tiene una influencia notable en comparación con los residuos RPM y RPVD.

5.5 Módulos de comparación

5.5.1 Modelos para el despegue en la zona de anclaje

Con el objeto de ilustrar la definición de los módulos de comparación se ha representado el comportamiento del modelo en un diagrama cuyo eje de abscisas es el valor calculado y el eje de las ordenadas el logaritmo neperiano de la relación valor experimental/valor calculado. En estos diagramas se marca con línea roja la ordenada igual a cero, es decir cuando la citada relación tiene como valor la unidad y con líneas verdes, los límites que definen el factor de ajuste. En las Figuras 5-20 a 5-23 muestran el citado diagrama de los modelos para el pronóstico del fallo PEID.

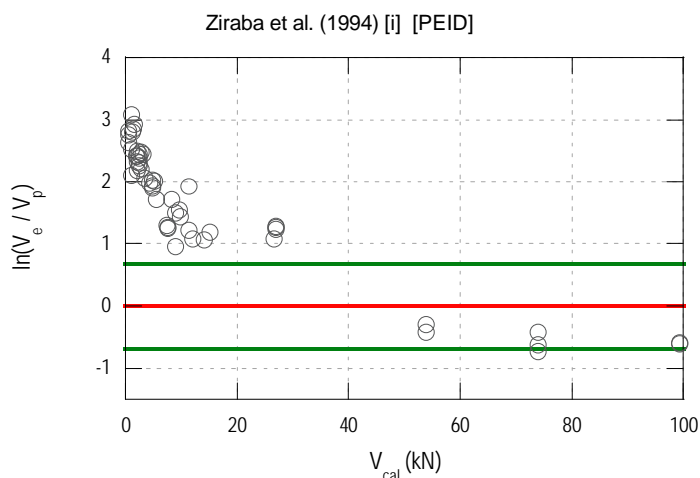


Figura 5-20 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-1

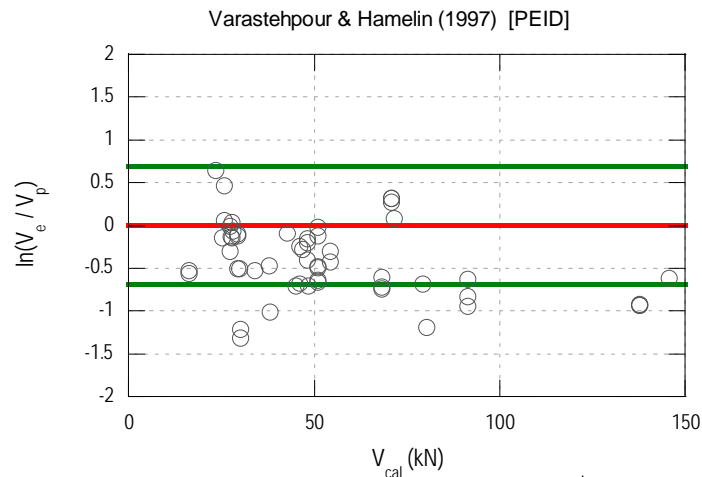


Figura 5-21 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-3.

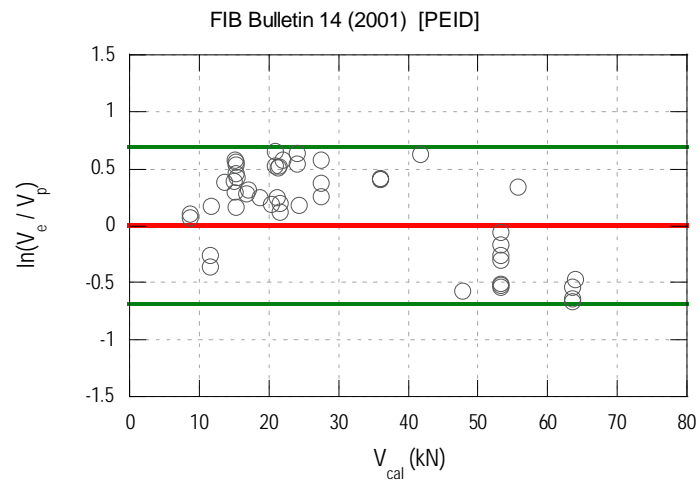


Figura 5-22 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-5

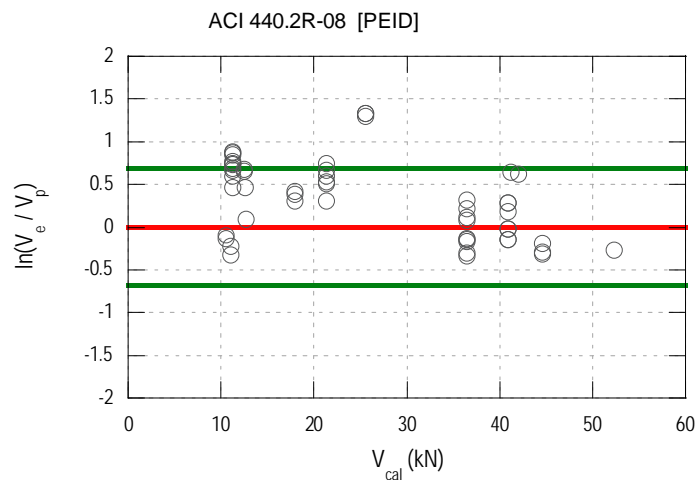


Figura 5-23 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo PED-6

En la Tabla 5-16 se recogen los valores del factor de ajuste, factor de seguridad y factor de seguridad acotado. Puede observarse que el modelo PED-5 es el que ofrece mayor factor de ajuste. El modelo PED-6 también presenta buen poder predictivo y el modelo PED-1 es el que presenta mayor factor de seguridad. Sin embargo, el factor de seguridad acotado es nulo, lo cual significa que en los casos en los que el modelo es conservador, lo es de forma muy marcada.

En la Figura 5-24 se representa el diagrama de barras el factor de seguridad acotado así como la proporción del total de resultados en la zonas inferior y superior. En estos diagramas, η es la relación y/\tilde{y} .

Tabla 5-16 Módulos de comparación de los modelos para la predicción del modo de fallo PEID

	FA	FS	FSA
Ziraba et al. (1994) Modelo I [PED-1]	12,96	85,19	0,00
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	75,93	24,07	24,07
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	98,15	74,07	74,07
ACI 440.2R-08 [PED-6]	81,48	74,07	55,56

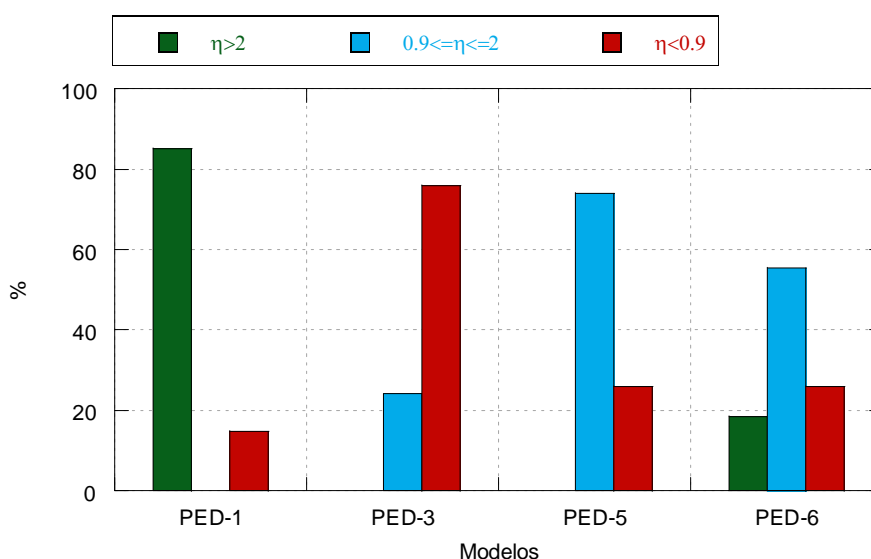


Figura 5-24 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo PEID

El histograma de la Figura 5-24 muestra que el modelo PED-1 no contiene casos con valor de η entre 0,9 y 2,0. Es decir, para un grupo de vigas subestima el valor del cortante, en tanto que para otro sobrestima el valor del esfuerzo cortante que produce el despegue del laminado a través de la interfaz FRP-hormigón. Por último, los modelos PED-5 y PED-6 son los que presentan mayor cantidad de casos en la zona correspondiente al factor de seguridad acotado.

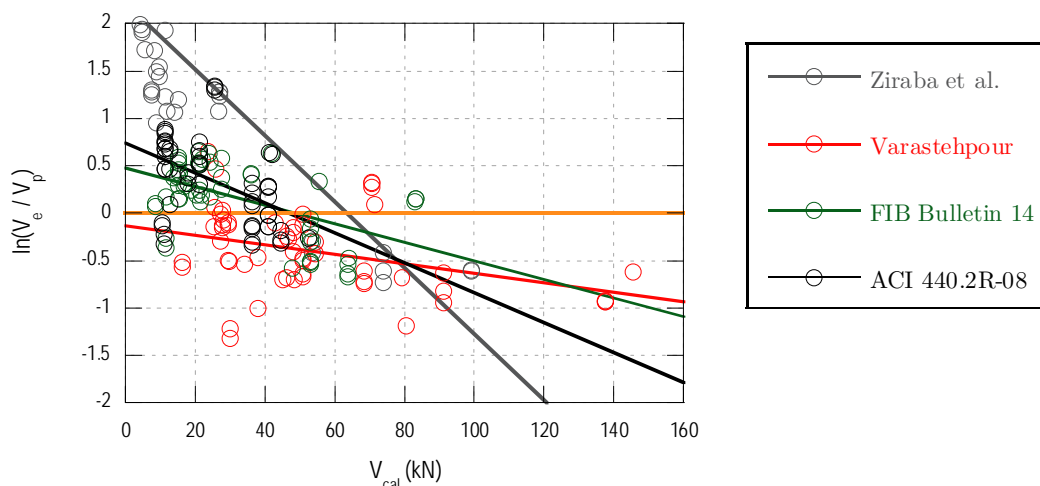


Figura 5-25 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$

En la Figura 5-25 se muestra la regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$ y en la Tabla 5-17 el signo y el valor del factor de neutralidad de escala. Puede observarse que todos los modelos presentan el mismo signo y, también presentan un valor similar excepto el modelo PED-3 el cual presenta un factor de neutralidad de escala menor; es decir, que la variación de la relación η con el valor calculado es menor. Sin embargo, en el análisis anterior el modelo se presentaba del lado de la inseguridad.

Tabla 5-17 Factor de neutralidad de escala. Modelos para el pronóstico del fallo PEID

	SGN(FNE)	FNE
Ziraba et al. (1994) Modelo I	-1	$34,8 \times 10^{-3}$
Varastehpour & Hamelin (1997)	-1	$5,0 \times 10^{-3}$
FIB Bulletin 14 (2001)	-1	$9,7 \times 10^{-3}$
ACI 440.2R-08	-1	$15,8 \times 10^{-3}$

A continuación se realiza el mismo análisis para los modelos para el pronóstico del fallo PECCS. En las Figuras 5-26 a 5-30 se muestran los diagramas $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$.

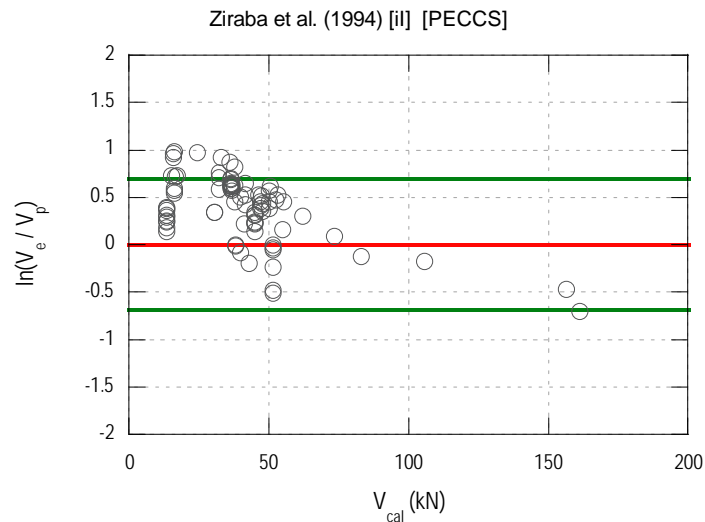


Figura 5-26 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo II de Ziraba et al. (1994)

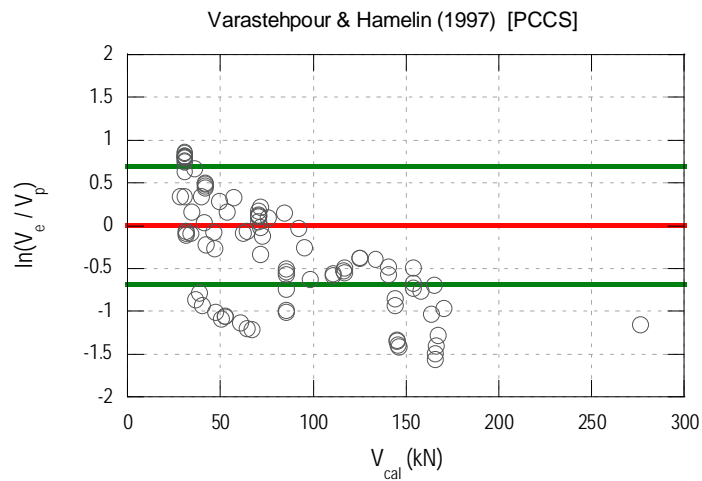


Figura 5-27 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Varastehpour & Hamelin (1997) para el grupo de vigas de fallo PECCS

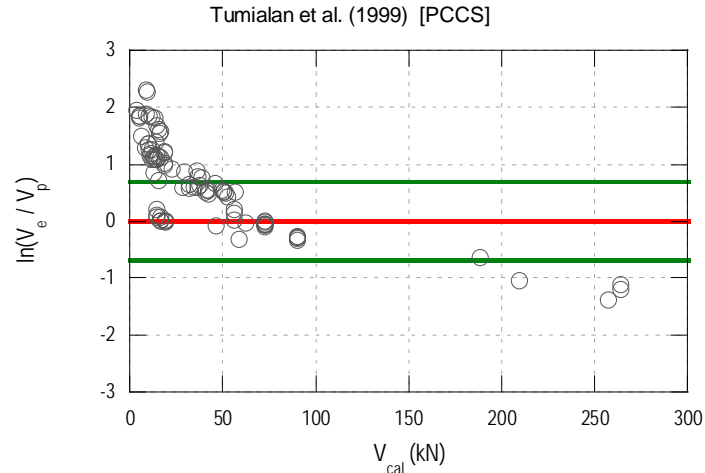


Figura 5-28 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Tumialan et al. (1999)

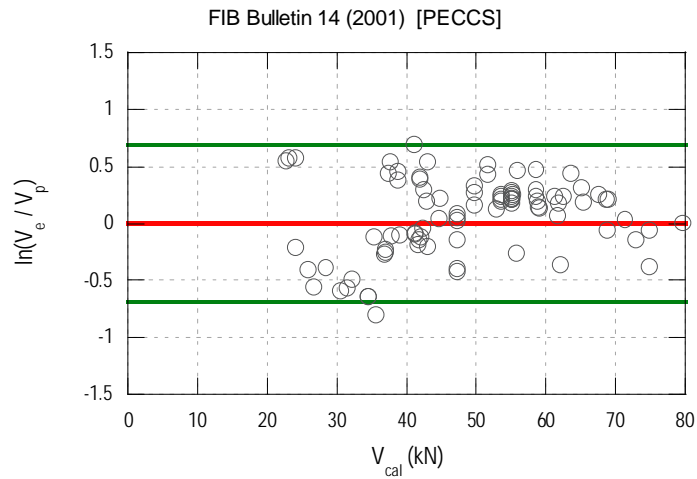


Figura 5-29 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB

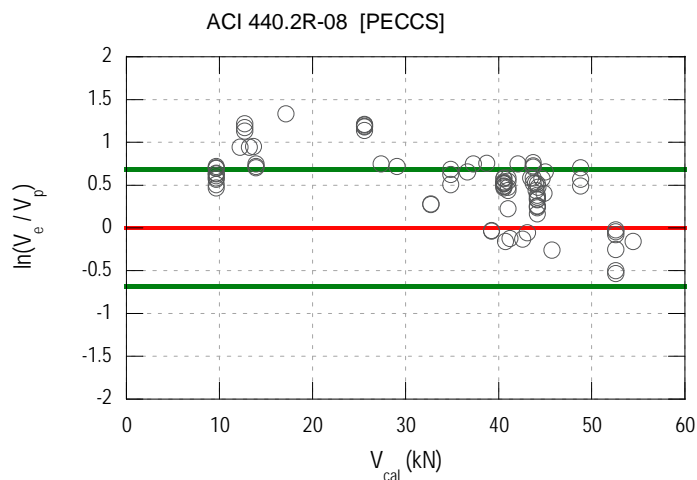


Figura 5-30 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del ACI 440.2R-08

En la Tabla 5-18 se recogen los valores del factor de ajuste, factor de seguridad y factor de seguridad acotado de los modelos para el pronóstico del fallo PECCS. El modelo PED-5, nuevamente es el que ofrece mayor factor de ajuste y el modelo PED-6 el mayor factor de seguridad. Asimismo, los modelos PED-2 y PED-5 son los que presentan mayor factor de seguridad acotado, pero el primero presentó una suma cuadrática residual considerablemente alta debido a que en algunos casos sobreestimó considerablemente el esfuerzo cortante tal como se ha expuesto en el epígrafe §5.4.1.

Tabla 5-18 Módulos de comparación. Modelos para la predicción del modo de fallo PECCS

	FA	FS	FSA
Ziraba et al. (1994) Modelo II [PED-2]	79,12	83,52	71,43
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	56,04	42,86	32,97
Tumialan et al. (1999) [PED-4]	50,55	89,01	43,96
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	97,80	78,02	76,92
ACI 440.2R-08 [PED-6]	69,23	91,21	60,44

En la Figura 5-31 se muestra el histograma de la relación η de los modelos estudiados. En esta figura se observa que el modelo PED-3 presenta casi un 60% de casos en los que el valor experimental es inferior al 90% del pronosticado. Con excepción de este modelo, todos pueden catalogarse de conservadores pues ofrecen un valor del factor de seguridad relativamente alto; sin embargo, sólo los modelos PED-2 y PED-5 presentan un factor de seguridad acotado mayor.

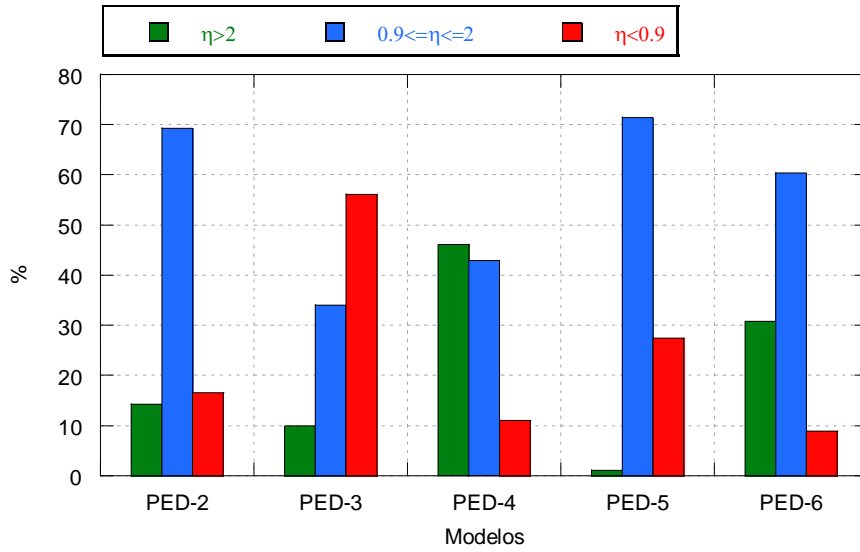


Figura 5-31 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo PECCS

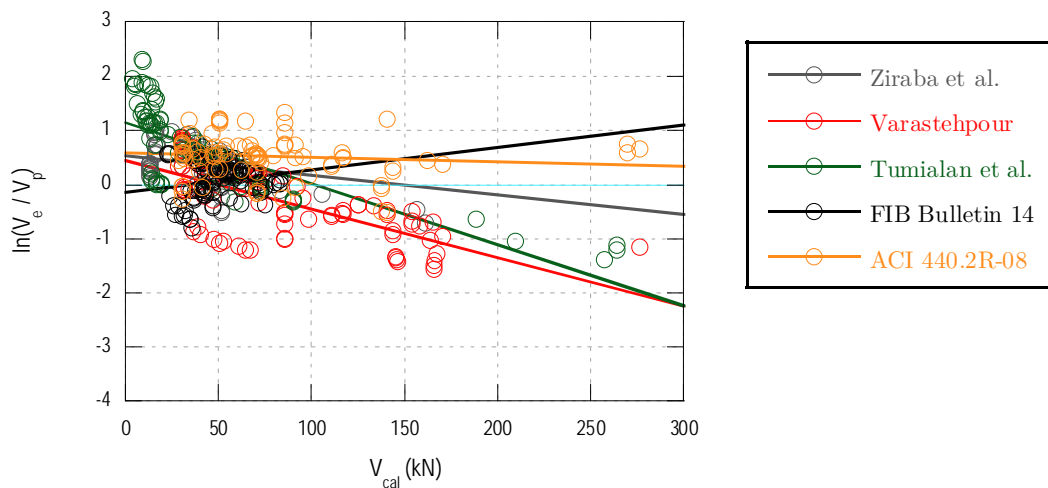


Figura 5-32 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$

En la Figura 5-32 se muestra la regresión de los modelos en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$ y en la Tabla 5-19 el factor de neutralidad de escala. El modelo PED-6 es el que presenta menor variabilidad con el valor calculado lo cual es un comportamiento deseado en cualquier modelo.

Tabla 5-19 Factor de neutralidad de escala. Modelos para el pronóstico del fallo PECCS

	SGN(FNE)	FNE
Ziraba et al. (1994) Modelo II	-1	$3,6 \times 10^{-3}$
Tumialan et al. (1999)	-1	$9,0 \times 10^{-3}$
Varastehpour & Hamelin (1997)	-1	$11,3 \times 10^{-3}$
FIB Bulletin 14 (2001)	+1	$4,1 \times 10^{-3}$
ACI 440.2R-08	-1	$0,9 \times 10^{-3}$

Por último, se analizan los modelos para el pronóstico del despegue en la zona de anclaje a través de la interfaz o a nivel de la armadura de tracción. En las Figuras 5-33 a 5-35 se muestran los diagramas $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$.

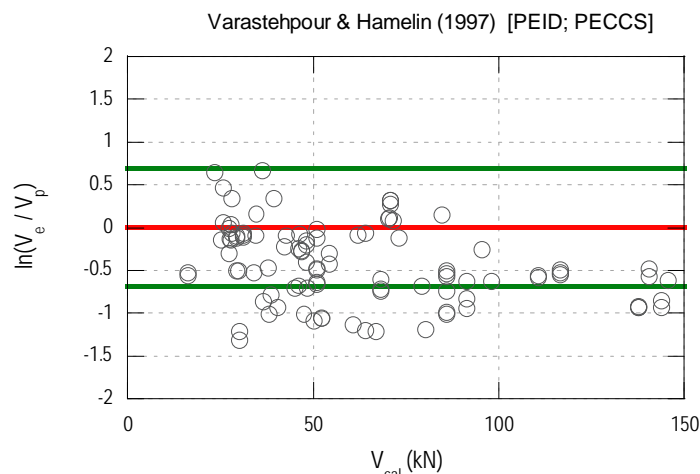


Figura 5-33 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Varastehpour & Hamelin (1997)

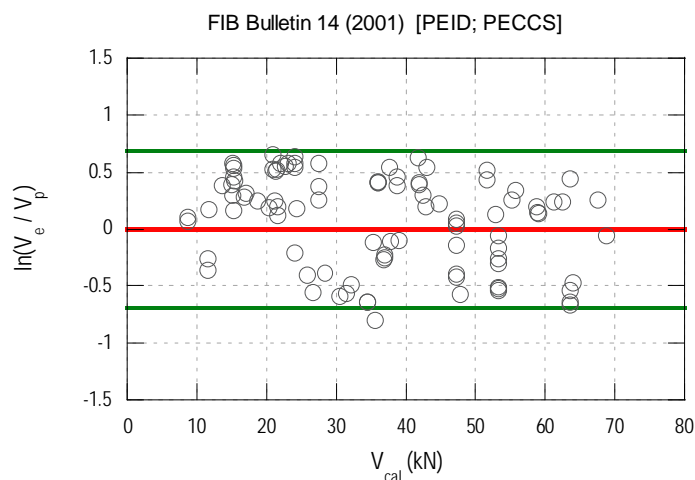


Figura 5-34 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB (2001) para el grupo de vigas de fallo PEID y PECCS

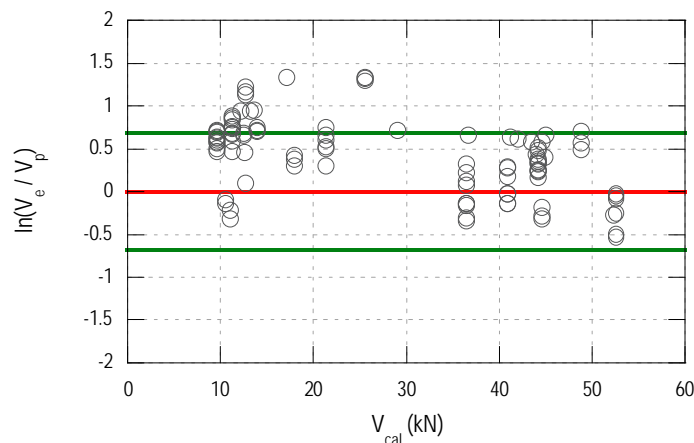


Figura 5-35 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del ACI 440.2R-08 para el grupo de vigas de fallo PEID y PECCS

En la Tabla 5-20 se recogen los factores de ajuste, seguridad y seguridad acotado. Destaca el modelo PED-5 como el modelo con mayor factor de ajuste y el modelo PED-6 como el de mayor factor de seguridad. No obstante, el mayor valor del factor de seguridad acotado lo presenta el primero.

Aunque el modelo PED-5 es el que presenta mayor factor de ajuste, un 22 % se presenta una relación y/\tilde{y} inferior a 0.9 tal como puede apreciarse en el histograma de la Figura 5-36.

Tabla 5-20 Módulos de comparación de los modelos para la predicción de los modos de fallo PEID y PECCS

	FA	FS	FSA
Varastehpour & Hamelin (1997) [PED-3]	64,83	36,55	30,34
FIB Bulletin 14 (2001) [PED-5]	97,93	73,79	72,41
ACI 440.2R-08 [PED-6]	73,79	84,83	58,62

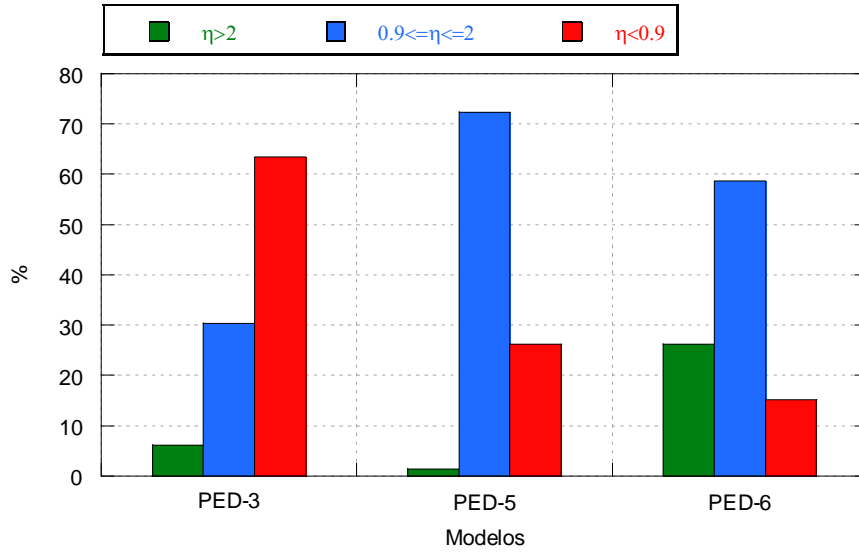


Figura 5-36 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo PEID y PECCS.

En la Figura 5-37 se muestra la recta de regresión de los modelos en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$. Puede apreciarse que todos los modelos presentan una tendencia a sobreestimar el cortante conforme aumenta el valor pronosticado.

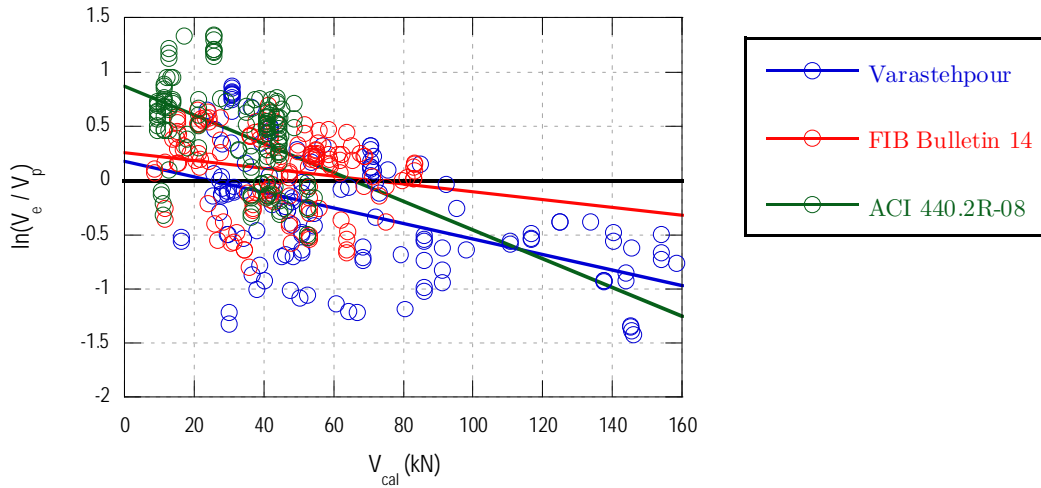


Figura 5-37 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$

Tabla 5-21 Factor de neutralidad de escala. Modelos PEID y PECCS

	SGN(FNE)	FNE
Varastehpour & Hamelin (1997)	-1	$7,1 \times 10^{-3}$
FIB Bulletin 14 (2001)	-1	$3,6 \times 10^{-3}$
ACI 440.2R-08	-1	$13,2 \times 10^{-3}$

5.5.2 Modelos para el despegue en la zona de fisuras de flexión-cortante

En este epígrafe se presenta el análisis de los modelos para el pronóstico del despegue en la región entre fisuras. En las Figuras 5-38 a 5-43 se presentan los diagramas $(\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y}))$.

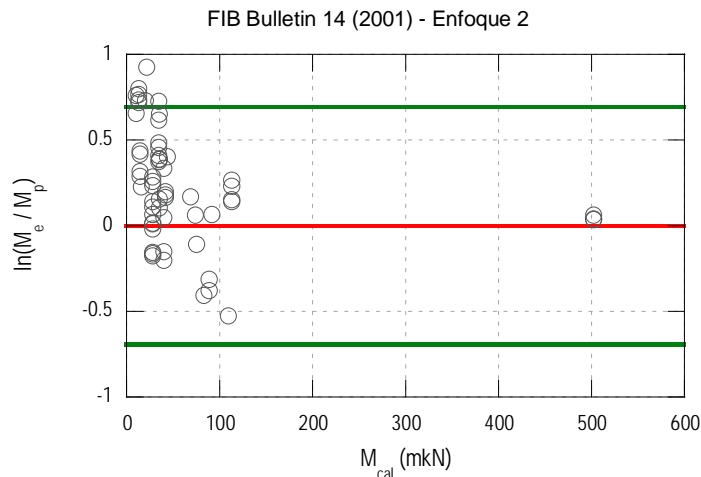


Figura 5-38 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB para el modo de fallo ICD (Enfoque 2)

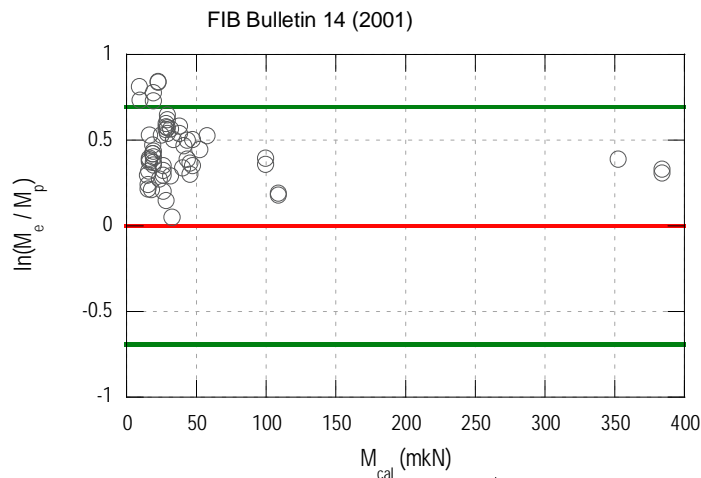


Figura 5-39 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB para el modo de fallo ICD (Enfoque 3)

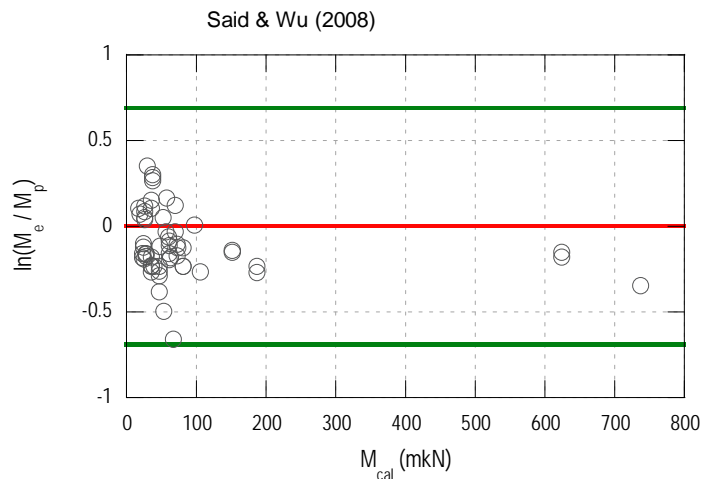


Figura 5-40 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo de Said & Wu (2008).

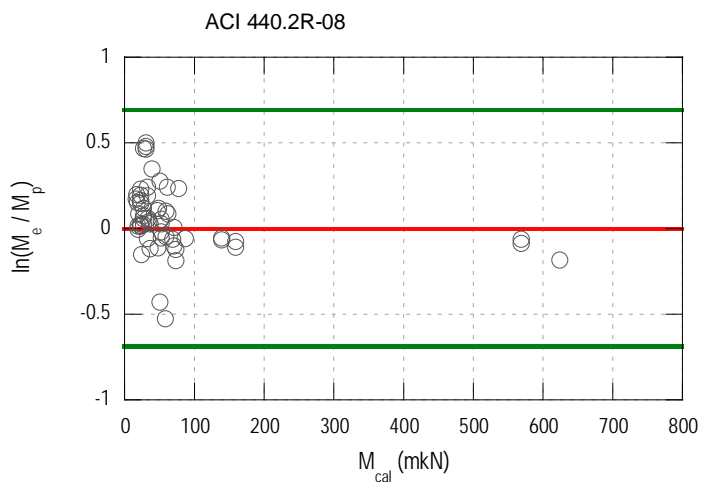


Figura 5-41 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del ACI 440.2R-08 para el modo de fallo ICD

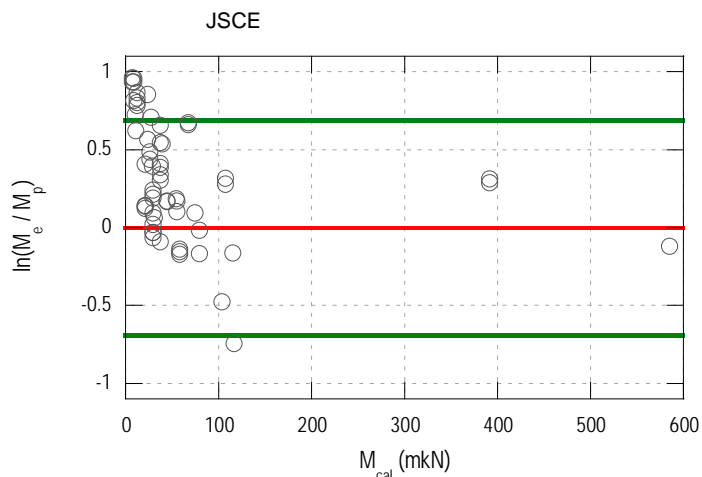


Figura 5-42 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo del boletín 14 de la FIB para el modo de fallo ICD (Enfoque 2)

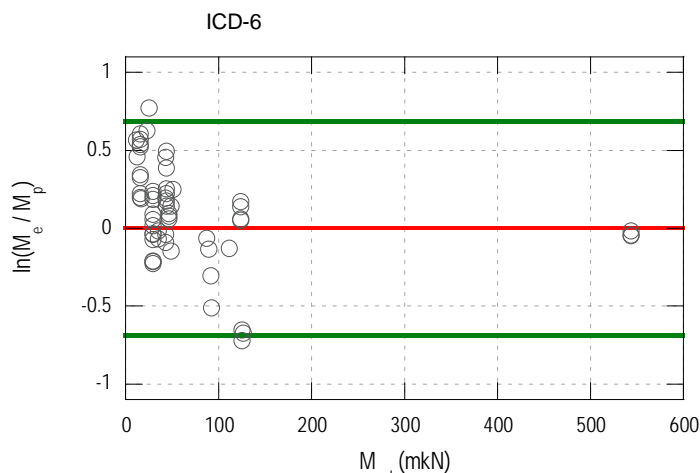


Figura 5-43 Valor pronosticado (\tilde{y}) versus ratio $\ln(y/\tilde{y})$ del modelo ICD-6

En la Tabla 5-22 se recogen los factores de ajuste, seguridad y seguridad acotado. Puede observarse que los modelos ICD-3 e ICD-4 son presentan el 100% de los casos en la zona delimitada por el factor de ajuste, en tanto que el modelo ICD-2 en la zona del factor de seguridad lo cual indica su carácter conservador. El modelo ICD-3 es el que presenta mayor cantidad de casos con relación η inferior a 0,9, es decir, el modelo es optimista para un grupo de vigas. López González, J, (2012) lo atribuye a que la base datos utilizada por los autores del modelo incluyen vigas con anclaje en ambos extremos, lo cual resulta en una calibración que se comporta optimista para las vigas sin anclaje pues los esfuerzos últimos son mayores en vigas con anclaje en ambos extremos.

Tabla 5-22 Módulos de comparación. Modelos para la predicción del modo de fallo PECCS

	FA	FS	FSA
FIB- Enfoque 2 [ICD-1]	86,44	83,05	69,49
FIB- Enfoque 3 [ICD-2]	89,83	100	89,83
Said & Wu [ICD-3]	100	37,29	37,29
ACI 440.2R-08 [ICD-4]	100	84,75	84,75
JSCE [ICD-5]	77,97	86,44	66,10
López G. [ICD-6]	96,61	81,36	79,66

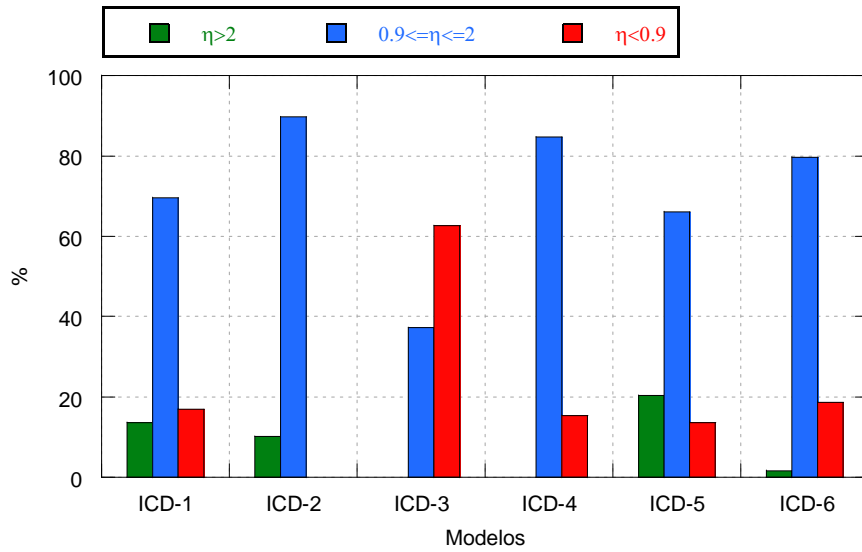


Figura 5-44 Histograma de la relación η para el grupo de vigas con modo de fallo ICD

En la Figura 5-45 se representa la regresión de los modelos ICD en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$ y en la Tabla 5-23 los valores del factor de neutralidad de escala. El modelo con mayor variabilidad de la relación $\ln(y/\tilde{y})$ con el valor predicho es el modelo ICD-5, el resto de los modelos presentan una variabilidad razonable, notablemente inferior a los modelos PED.

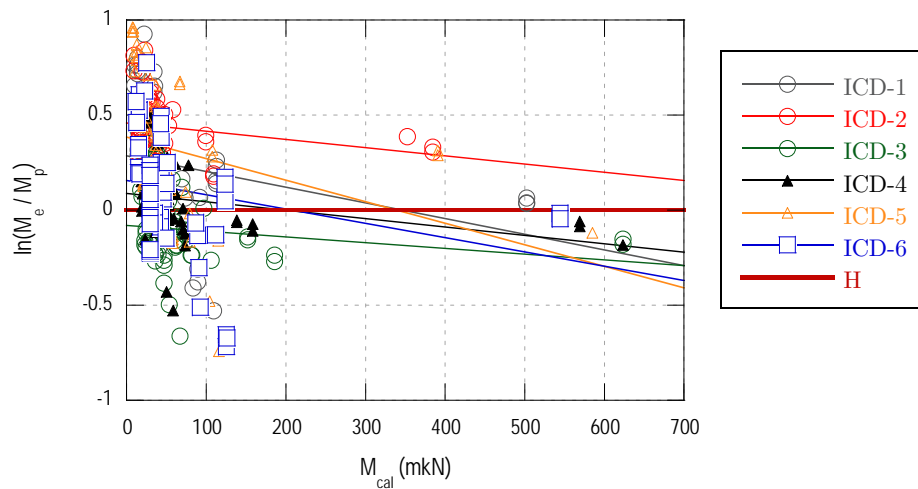


Figura 5-45 Regresión en el diagrama $\tilde{y}, \ln(y/\tilde{y})$

Tabla 5-23 Factor de neutralidad de escala. Modelos para el pronóstico del fallo ICD

	SGN(FNE)	FNE
FIB- Enfoque 2 [ICD-1]	-1	$0,8 \times 10^{-3}$
FIB- Enfoque 3 [ICD-2]	-1	$0,4 \times 10^{-3}$
Said & Wu [ICD-3]	-1	$0,3 \times 10^{-3}$
ACI 440.2R-08 [ICD-4]	-1	$0,4 \times 10^{-3}$
JSCE [ICD-5]	-1	$1,1 \times 10^{-3}$
López G. [ICD-6]	-1	$0,8 \times 10^{-3}$

CAPÍTULO 6

Conclusiones y líneas futuras de investigación

6.1 Introducción

Con base en el desarrollo del presente trabajo, las conclusiones derivadas del mismo se desglosan en 2 partes. En la primera se recogen las conclusiones sobre la metodología para la evaluación de modelos y en la segunda sobre los modos de fallo relacionados con el despegue de vigas reforzadas a flexión.

6.2 Conclusiones sobre la metodología para la evaluación de modelos.

Se ha realizado una evaluación exhaustiva de modelos aplicando medidas complementarias a los estadísticos clásicos en los estudios de comparación de modelos, aplicando dos grupos de medidas: la descomposición en sumandos de la suma cuadrática residual y los módulos de comparación.

La descomposición de la suma cuadrática proporciona información cuantitativa sobre el origen de la variabilidad del modelo. Con esta descomposición han podido identificarse errores sistemáticos de la predicción, patrones de la variabilidad de los valores reales y los predichos y, la dispersión respecto de la recta de regresión ortogonal. Además, se puede identificar el punto de corte de esta recta con la bisectriz del diagrama, permitiendo identificar la transición de una zona a otra en el diagrama predicción-realización.

A este respecto, los modelos para pronóstico de los modos de fallo PEID y PECCS presentan un alto valor del residuo predictivo por correlación imperfecta, mayor que el residuo predictivo medio y el residuo predictivo por varianzas diferentes, lo cual da cuenta de la dispersión en el diagrama predicción-realización. Por otra parte, en los modelos ICD existen dos comportamientos distintos, en los modelos basados en la limitación de la deformación del laminado en la sección de máximo momento flector presentan mayor valor del residuo predictivo por varianzas diferentes, esto se atribuye a que pierden precisión para las vigas con capacidad portante entorno a 500 mkN. En cambio, los modelos basados en el cálculo de la tensión media de adherencia presentan mayor valor del residuo predictivo por correlación imperfecta, pues presentan buen poder predictivo para el citado grupo de vigas y mayor dispersión para el resto en comparación con los modelos basados en la limitación de la deformación en la sección de máximo momento flector.

Los módulos de comparación permiten evaluar el nivel de conservadurismo, el ajuste y la variabilidad de la relación valor experimental/valor predicho, este último mediante el factor de neutralidad de escala. Estos parámetros permiten comparar modelos desde el punto de vista del ajuste, seguridad y variabilidad de la citada relación. El módulo primero es apropiado para modelos predictivos, el segundo para modelos que incluyen la seguridad en sus expresiones —casos frecuentes de este tipo son los modelos recogidos en los códigos—. Sin embargo, la seguridad del modelo debe enmarcarse en el concepto de seguridad del código al que pertenece para poder valorar la idoneidad del modelo. Por último, el factor de neutralidad de escala es una propiedad deseada en cualquier modelo pues significa que el modelo recoge el fenómeno físico de forma razonable para el grupo de ensayos analizados.

6.3 Conclusiones sobre el comportamiento de vigas reforzadas a flexión con materiales compuestos

Con base en el estudio sobre los modos de fallo de vigas reforzadas a flexión y la evaluación de modelos, las conclusiones se dividen en dos partes. En la primera se presentan las conclusiones relativas al modo de fallo por despegue con origen en el extremo del laminado y, en la segunda, sobre el despegue en la región de fisuras de flexión o flexión-cortante.

6.3.1 Conclusiones sobre el despegue con origen en el extremo del laminado

Todos los modelos basados en el cálculo de las tensiones tangenciales y normales en la interfaz presentan gran dispersión y su poder predictivo se reduce considerablemente para valores bajos del módulo de deformación del adhesivo y separaciones entre el soporte y extremo del laminado. El modelo basado en la fuerza máxima que puede ser anclada (FIB Bulletin 14) presenta mejor poder predictivo.

Todos los modelos presentan alta variabilidad de la relación V_{exp}/V_{cal} frente al valor calculado, lo cual no es una propiedad deseable en los modelos. En definitiva, la manera más sencilla y eficaz para evitar el citado modo de fallo consiste en prolongar el refuerzo una longitud mínima más allá del punto del momento de fisuración, siguiendo las recomendaciones del escalonado de las capas en sistemas de capa húmeda de la norma ACI 440.2R-08

6.3.2 Conclusiones sobre el despegue con origen en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante

Los modelos basados en la limitación de la deformación en la sección de máximo momento flector (ACI 440.2R-08, Said & Wu 2008) presentan menor dispersión para las vigas con capacidad portante menor a 200 mkN en comparación con los modelos simplificados basados en tensión media de adherencia (FIB bulletin 2001, López González 2012). Sin embargo, éstos presentan mejor precisión para las vigas analizadas con capacidad portante en torno a 500 mkN.

El modelo del boletín 14 de la FIB basado en el incremento de tensión en el laminado presenta el menor residuo por correlación imperfecta, pero el valor de la suma cuadrática residual es alto exhibiendo un comportamiento conservador ya que en su desarrollo incluye la seguridad al involucrar coeficientes de minoración de resistencia.

6.4 Futuras líneas de investigación

Con base en el trabajo realizado se proponen como futuras líneas de investigación

- Aplicar el concepto de robustez del modelo a un caso real.
- Realizar un estudio más profundo para el establecimiento de los umbrales de los módulos de comparación teniendo en cuenta el formato de seguridad de los códigos.
- Promover la introducción en los códigos estructurales de los criterios experimentales básicos, muy fundamentalmente los de las perspectivas de ajuste prioritario y de seguridad prioritaria. De esta forma las campañas experimentales y los modelos resultantes respecto de una variable cualquiera serían más homogéneos y de comparación mejor fundada.
- Debido a que se han encontrado diferencias en los enfoques del modo de fallo ICD, se considera oportuno aumentar la experimentación en vigas que cubran valores de la capacidad portante entre 200 y 500 mkN. La información experimental deberá contener vigas con diferentes valores de la esbeltez para incluir el efecto de la concomitancia momento flector – cortante.

Bibliografía

- [1]. ACHE. 2012. Monografía M19: Modelos lineales aplicados al hormigón estructural. *Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural*. Grupo de trabajo GT2/4.2. Madrid
- [2]. AHMED, O., GEMERT, D. V., y VADEWALLE, L. (2001): “Improved model for plated-end shear of CFRP strengthened RC beams”. *Cement and Concrete Composites*, 23, 3-19
- [3]. ALAGUSUNDARAMOORTHY, P; HARIK, I.E.; CHOO, C.C. (2003). “Flexural behavior of R/C beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets or fabric”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 7(4), pp. 292-301.
- [4]. ARDUINI, M; NANNI, A (1997). “Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 1(2), pp. 63-70.
- [5]. American Concrete Institute (1995): “Building code requirements for structural concrete” ACI (318-95) and commentary (318R-95). Fifth printing, Michigan, USA 1999.
- [6]. American Concrete Institute (2003): “Design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”. ACI Committee 440, Report 440.2R-03. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [7]. American Concrete Institute (2009): “Design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”. ACI Committee 440, Report 440.2R-08. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

-
- [8]. CALAVERA, J. (2008): “Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón”. 2ª Edición. INTEMAC.
- [9]. CERONI, F.; PECCE, M. (2009). “Design provisions for crack spacing and width in RC elements externally bonded with FRP”. *Composites Part B*, Vol. 40, pp. 17-28.
- [10]. CHEN, J.F.; TENG, J.G. (2001): “Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete”. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(7), 784-791.
- [11]. CHEN, J.F., YUAN, H., TENG, J.G. (2007): “Debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks in concrete members”. *Engineering Structures*, 29, 259-270.
- [12]. CHING, A. (2005). “Moisture degradation in FRP bonded concrete systems: an interface fracture approach”. Thesis (Ph.D.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering. Cambridge, Massachusetts.
- [13]. DAI, J.G.; UEDA, T. (2003): “Local bond stress slip relations for FRP sheets-concrete interfaces”. In: Proc. of 6th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures. Singapore: World Scientific Publications; 143-52
- [14]. DAVID, E.; RAGNEAU, E.; BUYLE-BODIN, F. (2002). “Experimental analysis of flexural behaviour of externally bonded CFRP reinforced concrete structures”. *Materials and Structures*, Vol. 36, pp. 238-241
- [15]. DÍAZ HEREDIA, E. (2007). “Influencia de diferentes variables en el comportamiento a flexión de secciones de hormigón armado reforzadas con materiales compuestos”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Dpto. de Ingeniería Civil-Construcción, Madrid.
- [16]. DONG, Y.; ZHAO, M.; ANSARI, F. (?). “Failure characteristics of reinforced concrete beams repaired with CFRP composites”.

-
- [17]. FANNING, P.J.; KELLY, O. (2001). "Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 5 (2), pp.122-127.
- [18]. FIB Bulletin 14 (2001): "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures". Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures.
- [19]. GAO, B. (2005). "FRP strengthened RC beams: taper design and theoretical analysis". Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- [20]. GARDEN, H.N.; HOLLAWAY, L. C.; THORNE, A.M. (1997). "A preliminary evaluation of carbon fibre reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members". *Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs*, 123, 127–142.
- [21]. GUO, Z.G.; CAO, S.Y.; SUN, W.M.; LIN, X.Y. (2005): "Experimental study on bond stress-slip behaviour between FRP sheets and concrete". *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*. International Institute for FRP in Construction.
- [22]. GÜNEŞ, OĞUZ (2004). "A fracture based approach understanding debonding in FRP bonded structural members". Thesis (Ph.D.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering. Cambridge, Massachusetts.
- [23]. HEARING, B.P. (2000). "Delamination in reinforced concrete retrofitted with fiber reinforced plastics". Thesis (Ph.D.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering. Cambridge, Massachusetts.
- [24]. KIM, D., SEBASTIAN, W. M. (2002). "Parametric study of bond failure in concrete beams externally strengthened with fibre reinforced polymer plates", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54 (1), pp. 47-59.
- [25]. KOTYNIA, R.; ABDEL BAKY, H.; W. NEALE, K.; A. EBEAD, U.(2008): "Flexural strengthening of RC beams with externally bonded CFRP systems: Test results and 3D nonlinear FE analysis" *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 12(2), 190-201

-
- [26]. LAMANNA, A.J.; BANK, L.C.; SCOTT, D.W. (2004). “Flexural strengthening of reinforced concrete beams by mechanically attaching fiber-reinforced polymer strips”. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 8(3).
- [27]. LÓPEZ GONZÁLEZ, J. C. (2009): “Estudio de los modos de fallo de la adherencia FRP-hormigón”. Trabajo tutelado dirigido en la Cátedra de Edificación y Prefabricación de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la UPM.
- [28]. LÓPEZ GONZÁLEZ, J. C. (2012): “Estudio de la redistribución tensional en la interfase FRP-hormigón”. Tesis doctoral dirigida en la Cátedra de Edificación y Prefabricación de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la UPM.
- [29]. MAALEJ, M; BIAN, Y (2001). “Interfacial shear stress concentration in FRP-strengthened beams”, *Composites Structures*, Vol. 54, pp. 417-426.
- [30]. MAALEJ, M; LEONG, K.S. (2005). “Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration and failure mode of FRP-strengthened beams”. *Composites Science and Technology*, Vol. 65 pp. 1148-1158
- [31]. MALEK, A. M., SAADATMANESH, H., EHSANI, M. R. (1998): “Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end”. *ACI Structural Journal*, 95(1), 142-152
- [32]. MATTHYS, S. (2000). “Structural Behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement”. Dept. of Structural Engineering, Ghent Univ., Ghent, Belgium.
- [33]. MOHAMED ALI, M.S., OEHLERS, D.J., GRIFFITH, M.C., SERACINO, R. (2008): “Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints”. *Engineering Structures*, Vol 30, pp. 1861-1868.
- [34]. MOHAMMAD, R. A.; CHRISTOPH, C.; MASOUD, M. (2008). “Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams”. *Composites part B: engineering*, Vol. 39, pp. 826-841.

- [35]. MONTI, M.; RENZELLI, M.; LUCIANI, P. (2003): "FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones. In: Proc. of 6th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures. Singapore: World Scientific Publications; 183-92.
- [36]. NAKABA, K.; TOSHIYUKI, K.; TOMOKI, F.; HIROYUKI, Y. (2001): "Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete". *ACI Structural Journal*, 98(3): 359-67.
- [37]. NIEDERMEIER, R. (2000), Zugkraftdeckung bei klebarmierten bauteilen (Envelope line of tensile forces while using externally bonded reinforcement). Doctoral Dissertation, TU München, (In German).
- [38]. NEUBAUER, U.; ROSTASY, F.S. (1999): "Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks-experiments and fracture mechanics model. In: Proc. of 4th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures. SP-188. Farmington Hills (MI): ACI; 1999; 369-82.
- [39]. NIU, H.; VASQUEZ, A.; KARBHARI, V. M. (2006). "Effect of material configuration on strengthening of concrete slabs by CFRP composites". *Composites part B: engineering*, Vol. 37, pp. 213-226.
- [40]. NGUYEN, DM; CHAN, TK; CHEONG, HK (2001). "Brittle failure and bond development length of CFRP-Concrete beams", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 5 (1), pp. 12-17.
- [41]. OEHLERS, J. (1992). "Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118 (8) pp. 2023-2038
- [42]. OLLER IBARS, E. (2005) "Peeling failure in beams strengthened by plate bonding. A design proposal". Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [43]. PHAM, H.B.; AL-MAHAIDI, R. (2006). "Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 10 (1), pp. 48-59.

-
- [44]. RABINOVICH, O.; FROSTIG, Y. (2000): “Closed-Form High-Order analysis of RC beams strengthened with FRP strips”. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 4 (2), 065-074.
- [45]. RABINOVITCH, O.; FROSTIG, Y. (2003). “Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites”, *Composites part B: engineering*, Vol. 34, pp. 663-677.
- [46]. RAHIMI, H.; HUTCHINSON, A (2001). “Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 5(1), pp. 44-56.
- [47]. RAMANA, V.P.V.; KANT, T.; MORTON, S.E.; DUTTA, P.K.; MUKHERJEE, A.; DESAI, Y.M. (2000). “Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening”, *Composites Part B: engineering*, Vol. 31, pp. 461-470.
- [48]. REED, C.E.; PETERMAN, R.J.; RASHEED, H.A. (2005). “Evaluating FRP repair method for cracked prestressed concrete bridge members subjected to repeated loadings (Phase 1),” KTRAN Report No. K-TRAN: KSU-01-2, Kansas Department of Transportation, Topeka, KS, 106 pp.
- [49]. REZA ARAM, M; CZADERSKI, C; MOTAVALLI, M (2008). “Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams”, *Composites part B: engineering*, Vol. 39, pp. 826–841.
- [50]. RITCHIE, P. A., THOMAS, D. A., LU, L., CONNELLY, G. (1991). “External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics”, *ACI Structural Journal*, Vol. 88 (4), pp. 491-500.
- [51]. ROBERTS, T. M. (1989): “Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams”. *The Struc Engr*, 67(12), 229-233.
- [52]. ROBERTS, T. M., HAJI-KAZEMI, H. (1989): “Theoretical study of the behaviour of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates”. *Proc Instn Civil Engrs* 87(Part 2), 39-55.

-
- [53]. ROSENBOOM, O., RIZKALLA, S. (2008): "Modeling of IC debonding of FRP-strengthened concrete flexural members". *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 12 (2), 168-179.
- [54]. ROSS, A., JEROME, D. M., TEDESCO, J. W., HUGHES, M. L. (1999). "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates", *ACI Structural Journal*, Vol. 96 (2), pp. 212-220.
- [55]. SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. (1991). "RC beams strengthened with GFRP plates". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117(11).
- [56]. SAADATMANESH, H., MALEK, A. M. (1998): "Design guidelines for flexural strengthening of RC beams with FRP plates". *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2 (4), 158-164.
- [57]. SAID, H.; WU, Z. (2008): "Evaluating and proposing models of predicting IC debonding failure". *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 12 (3), 284-299.
- [58]. SAVIOA, M.; FARRACUTI, B.; MAZZOTTI, D. (2003): "Non-linear bond-slip law for FRP-concrete interface. In: Proc. of 6th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures. Singapore: World Scientific Publications; 163-72
- [59]. SHEN, H; TENG, J.G.; YANG, J. (2001): "Interfacial stresses in beams and slabs bonded with thin plate". *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 127 (4), 399-406.
- [60]. SMITH, S.T.; TENG, J.G. (2002a): "FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models". *Engineering Structures*, 24, 385-395.
- [61]. SMITH, S.T.; TENG, J.G. (2002b): "FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models". *Engineering Structures*, 24, 397-417.
- [62]. SPADEA, G.; SWAMY, R.N.; BENCARDINO, F. (2001). "Strength and ductility of RC beams repaired with bonded CFRP laminates". *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6(5) pp. 349-355.

-
- [63]. SO, M.; HARMON, T.G. (2008). "Cover delamination of reinforced concrete members with surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcement", *ACI Structural Journal*, Vol. 105 (2), pp. 196-204.
- [64]. STEPHEN KURTZ, PE; PERUMALSAMY B; JEFFREY HELM (2008). "Experimental study of interfacial shear stresses in FRP-Strengthened RC beams", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 12 (3), pp. 312-322.
- [65]. TENG, J.G.; SMITH, S.T.; YAO, J.; CHEN, J.F. (2003): "Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs". *Construction and Building Materials*, 17, 447-462.
- [66]. TENG, J.G., YUAN, H., CHEN, J.F. (2006): "FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure". *International Journal of Solids and Structures*, 43, 5750-5778.
- [67]. TUMIALAN, G., BELARBI, A., NANNI, A. (1999a): "Reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites: failure due to concrete cover delamination". Department of Civil Engineering, Center for Infrastructure Engineering Studies, Report No. CIES-99/01, University of Missouri-Rolla, USA.
- [68]. TUMIALAN, G; SERRA, P; NANNI, A; BELARBI, A (1999b) "Concrete cover delamination in RC Beams strengthened with FRP sheets" SP-188, American Concrete Institute, Proc., 4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS4), Baltimore, MD, Nov. 1999, pp. 725-735.
- [69]. WANG, J. (2006a): "Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam". *International Journal of Solids and Structures*, 43, 6630-6648.
- [70]. WANG, J. (2006b): "Debonding of FRP-plated reinforced concrete beam, a bond-slip analysis. I. Theoretical formulation". *International Journal of Solids and Structures*, 43, 6649-6664.
- [71]. WANG, W.; LI, G. (2006). "Experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under sustaining loads". *Journal of Wuhan University of Technology*, Vol. 21(3).

-
- [72]. XIONG, G. J.; YANG, J. Z.; JI, Z.B. (2004). "Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid carbon fiber-glass fiber sheets". *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 8(3) pp. 275-278.
- [73]. YANG, J., WU, Y.-F. (2007): "Interfacial stresses of FRP strengthened concrete beams: Effect of shear deformation". *Composites Structures*, 80, 343-351.
- [74]. YUAN, H., TENG, J.G., SERACINO, R., WU, Z.S., YAO, J. (2004): "Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints". *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 553-565.
- [75]. VARASTEHPOUR, H., HAMELIN, P. (1997): "Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics". *Materials and Structures*, 30, 160-166.
- [76]. ZACHARY REEVE, B. (2005). "Effect of adhesive stiffness and CFRP geometry on the behavior of externally bonded CFRP retrofit measures subject to monotonic loads". Thesis (M.S.). School of Engineering, University of Pittsburgh.
- [77]. ZHANG, A.; JIN, W.; LI, G. (2006). "Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates". *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 7(3), pp. 436-444.
- [78]. ZIRABA, Y. N., BALUCH, M. H., BASUNBUL, I. A., AZAD, A. K., AL-SULAIMANI, G. J., SHARIF, A. M. (1995): "Combined experimental-numerical approach to characterization of steel-concrete interface". *Materials and Structures*, 28, 518-525
- [79]. ZIRABA YN, BALUCH MH, BASUNBUL IA, SHARIF AM, AZAD AK, AL-SULAIMANI GJ. (1994) "Guidelines towards the design of reinforced concrete beams with external plates". *ACI Structural Journal* 91(6):639-46.

Anejo A

Base de datos de ensayos a flexión

La base de datos consta de 91 vigas que fallaron por despegue en la zona de anclaje a nivel de la armadura de tracción (PECCS), 54 vigas que fallaron por despegue en el extremo a través de la interfaz FRP-hormigón (PEID) y 59 vigas que fallaron por despegue en la zona de fisuras de flexión o flexión-cortante (ICD).

Geometría de la viga

La altura, ancho y longitud de la viga están definidos por h , b y L respectivamente. Cuando el recubrimiento es un dato desconocido se considera del 10% de la altura de la viga más el diámetro del estribo más el radio de la barra del refuerzo a tracción.

Hormigón

Las propiedades mecánicas del hormigón se han definido por f_c , f_t y E_c para la resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de elasticidad. f_{cm} es la resistencia a compresión del hormigón obtenida de probetas cilíndricas a los 28 días. Cuando dicha resistencia es obtenida por medio de probetas cúbicas se aplica un factor de corrección dado según la normativa EHE-08 por:

$$f_{cm} = \lambda_{cil,cub} f_{cm,cub} \quad ; \quad \lambda_{cil,cub} = \begin{cases} 0,90 & \text{para } f_{cm,cub} < 60\text{MPa} \\ 0,95 & \text{para } 60 \leq f_{cm,cub} < 80\text{MPa} \\ 1,00 & \text{para } f_{cm,cub} \geq 80\text{MPa} \end{cases} \quad [\text{A.1}]$$

Si no se da la resistencia a tracción obtenida de ensayos, se obtiene indirectamente de la resistencia a compresión empleando la resistencia característica de proyecto f_{ck} o la resistencia característica estimada (calculada como $f_{cm} - 8$), según la información proporcionada, mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} f_{ctm} &= 0,30 f_{ck}^{2/3} & \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ f_{ctm} &= 0,58 f_{ck}^{1/2} & \text{para } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad [\text{A.2}]$$

Finalmente, si no se proporciona el valor del módulo de elasticidad del hormigón se obtiene mediante la fórmula dada por la citada norma:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad [\text{A.3}]$$

Acero de refuerzo interior

El acero de refuerzo de la viga está definido por A_s , A'_s y A_w para el armado a tracción, armado a compresión y el armado transversal respectivamente, el cual corresponde al área de acero transversal en la luz de cortante L_c . La separación de los estribos está definida por s_w . Cuando el módulo de elasticidad del acero es desconocido se asume de valor de 200 GPa

Refuerzo exterior

El refuerzo exterior empleado en los ensayos consiste en laminados FRP unidireccionales fabricados por pultrusión (P) con fibra carbono (C), fibra de vidrio (G) o de aramida (A), u hojas de fibras unidireccionales que se aplican por el denominado proceso húmedo *wet layup* (W). Las dimensiones del refuerzo externo están definidas por b_p y t_p para el ancho y espesor respectivamente, la longitud L_p se deduce a partir de la distancia a entre el extremo del refuerzo y el soporte más cercano. E_p , ε_{pu} son respectivamente el módulo de elasticidad longitudinal y la deformación última. Cuando el refuerzo FRP ha sido conformado mediante el proceso húmedo y el autor no presenta las propiedades mecánicas del material compuesto, se han estimado a partir de las siguientes expresiones tomadas del fib bulletin 14 (2001)

$$E_p = E_f V_f + E_m V_m \quad [A.4]$$

$$f_p \approx f_f V_f + f_m V_m \quad [A.5]$$

En el caso que la publicación no proporcione la deformación última del refuerzo se asume de 1,5% según información proporcionada en fichas técnicas de los fabricantes.

La columna con las siglas «AE» indica si el refuerzo ha sido anclado; «X» significa que ha sido anclado en un extremo.

La columna con las siglas «CP» indica si la viga fue sometida a una carga previa al refuerzo. La letra «X» señala que ha sido prefisurada, estas piezas fueron retiradas de la máquina de ensayos para la colocación del refuerzo y una vez concluido el proceso de curado de la resina fueron ensayadas nuevamente hasta la rotura. Cuando la «X» se acompaña de un número entre paréntesis, significa que la viga se reforzó bajo carga sostenida, y el número indica el nivel de carga expresado como el porcentaje de la resistencia nominal de la pieza de control.

Adhesivo

El espesor de la capa de adhesivo está definido por t_a , el ancho se considera el mismo del refuerzo. E_a y G_a son respectivamente el módulo de elasticidad longitudinal y cortante. La información concerniente al adhesivo es una de las principales carencias en la literatura, y para el caso del espesor de la capa de adhesivo se ha asumido el valor de 2 mm cuando el refuerzo consiste en adherir un laminado FRP fabricado por pultrusión y 0.42 mm cuando se adhiere el refuerzo mediante el proceso húmedo, estos valores han sido obtenidos por Smith et al. (2002b) según un estudio realizado por dichos autores en base a una serie de ensayos documentados. Análogamente y por las mismas razones se ha asumido un valor para $E_a = 8500$ MPa. Generalmente los investigadores no proporcionan G_a , para este caso se calcula como $G_a = E_a / (2 \times (1 + \nu_a))$ considerando un coeficiente de poisson de 0,3.

Tabla A.1 Base de datos de ensayos a flexión (PED). Parte 1 de 2

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga						Propiedades mecánicas						
				b	h	A_s	A'_s	d	d'	A_w	s_w	f_{cm}	f_{ctm}	E_c	f_y	E_s
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Ritchie et al. (1991)	C			152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	D			152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	G			152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	H			152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	I			152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	J	2X		152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	K	2X		152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	M			152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
	N	2X		152	305	253	57	251	54	98	102	42,55	3,18	29675 ^j	423	200 ^a
Saadatmanesh y Ehsani (1991)	B			205	455	982	265	400	55	3451	150	35	3,21 ⁱ	27804 ^j	456	200 ^a
Arduini y Nanni (1997)	SM6		X	320	160	226	226	110	50	237	100	36	2,7	27000	550	200
	MM4		X	160	320	402	402	270	50	537	100	36	2,7	27000	550	200
Garden et. al. (1997)	1A _u			100	100	339	226	78	22	565	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	2A _u			100	100	339	226	78	22	679	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	3A _u			100	100	339	226	78	22	792	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	1B _u			100	100	339	226	78	22	565	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	1B _{2u}			100	100	339	226	78	22	565	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
					100	100	339	226	78	22	565	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350

Referencia	Viga	A	E	C	P	Geometría de la viga						Propiedades mecánicas						
						<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
						mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	2B _u					100	100	339	226	78	22	679	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	3B _u					100	100	339	226	78	22	792	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	1C _u					100	100	339	226	78	22	565	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	2C _u					100	100	339	226	78	22	679	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
	3C _u					100	100	339	226	78	22	792	51	47,28 ^k	3,92 ⁱ	33500	350	215
Tumialan et. al. (1999)	A3					150	300	382	382	250	50	1110	125	51,7	4,17 ⁱ	31665 ^j	428	208
	A8					150	300	382	382	250	50	1110	125	51,7	4,17 ⁱ	31665 ^j	428	208
	C2					150	300	382	382	250	50	555	250	51,7	4,17 ⁱ	31665 ^j	428	208
Ross et al. (1999)	1B					200	200	142	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	1C					200	200	142	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	2B					200	200	253	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	2C					200	200	253	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	2D					200	200	253	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	3B					200	200	402	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	3C					200	200	402	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
	3D					200	200	402	142	152	48	1134	102	54,8	3,90 ⁱ	34500	410	200
Ahmed et. al. (2001)	DF.2					125	225	151	57	200	24	283	100	43	3,68 ⁱ	29779 ^j	568	185
Fanning y Kelly (2001)	F5					155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
	F6					155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga								Propiedades mecánicas				
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	F7			155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
	F8			155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
	F9			155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
	F10			155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
Maalej y Bian (2001)	B3			115	150	236	157	119	31	452	60	30,3	2,92 ⁱ	26499 ^j	534	184
	B4			115	150	236	157	119	31	452	60	30,3	2,92 ⁱ	26499 ^j	534	184
	B5			115	150	236	157	119	31	452	60	30,3	2,92 ⁱ	26499 ^j	534	184
Nguyen et. al. (2001)	A950			120	150	236	57	120	34	452	50	32,1	3,03 ⁱ	27014 ^j	384	200 ^a
	A1100			120	150	236	57	120	34	452	50	32,1	3,03 ⁱ	27014 ^j	384	200 ^a
	A1150			120	150	236	57	120	34	452	50	32,1	3,03 ⁱ	27014 ^j	384	200 ^a
	B2			120	150	628	57	120	29	452	50	44,6	3,77 ⁱ	30144 ^j	466	200 ^a
	C5			120	150	236	57	140	14	452	50	25,1	2,57 ⁱ	24887 ^j	384	200 ^a
	C10			120	150	236	57	135	19	452	50	25,1	2,57 ⁱ	24887 ^j	384	200 ^a
	C20			120	150	236	57	125	29	452	50	25,1	2,57 ⁱ	24887 ^j	384	200 ^a
Phillip Hearing, Brian (2001)	A0.6			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A0.8			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A1.0			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A1.2			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A1.4			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga						Propiedades mecánicas						
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	A1.6			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A1.2-SBA			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A1.5-SBA			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	A1.7-SBA			200	220	157	157	180	40	942	100	20,5	2,8	25400	413	210
	B120-0.9		X	200	260	157	157	220	40	785	120	20,5	2,8	25400	413	210
	B150-0.9		X	200	260	157	157	220	40	628	150	20,5	2,8	25400	413	210
	B200-0.9		X	200	260	157	157	220	40	471	200	20,5	2,8	25400	413	210
Rahimi y Hutchinson (2001)	C9			200	150	402	101	120	30	565	75	54	3,4	25000	575	210
	C10			200	150	402	101	120	30	565	75	54	3,4	25000	575	210
Oller (2001, 2002, 2004)	1D		X	300	200	402	101	170	30 ^m	1508	150	35,2	2,7	27857 ⁱ	580	210
David, Ragneau y Buyle-Bodin (2002)	P2			150	300	308	101	267	30	339	150	39,2	3,46 ⁱ	28874 ^j	500	200 ^a
	P3			150	300	308	101	267	30	339	150	39,5	3,48 ⁱ	28948 ^j	500	200 ^a
	P4			150	300	308	101	267	30	339	150	38,4	3,41 ⁱ	28677 ^j	500	200 ^a
	P5			150	300	308	101	267	30	339	150	40,1	3,51 ⁱ	29094 ^j	500	200 ^a
	P6		X	150	300	308	101	267	30	339	150	40,4	3,53 ⁱ	29166 ^j	500	200 ^a
	P7		X	150	300	308	101	267	30	339	150	39,1	3,46 ⁱ	28850 ^j	500	200 ^a
Ravinovitch y Frostig (2003)	A2			200	200	339	101	165	30	1407	50	50	4,07 ⁱ	31314 ^j	390	200
	A3	1X		200	200	339	101	165	30	1407	50	50	4,07 ⁱ	31314 ^j	390	200
Güneş, Oğuz (2004)	S1PF1M		X	150	200	396	142	150	30	364	75	41,4	3,1	25200	440	200

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga							Propiedades mecánicas					
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	S1PF2M		X	150	200	396	142	150	30	364	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S1PF3M		X	150	200	396	142	150	30	364	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S1SF1M		X	150	200	396	142	150	30	364	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S1SF2M		X	150	200	396	142	150	30	364	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S1SF3M		X	150	200	396	142	150	30	364	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S2PF3M		X	150	200	396	142	150	30	634	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S2PF5M		X	150	200	396	142	150	30	814	75	41,4	3,1	25200	440	200
	S2PF7M		X	150	200	396	142	150	30	994	75	41,4	3,1	25200	440	200
Lamanna (2004)	I-8-Y-AL32	3X		305	305	1013	143	255	42	4054	102	32,7	3,07 ⁱ	27181 ^j	500	200 ^a
	H1.5-4-Y-AL32	3X		305	305	1013	143	255	42	4054	102	32,7	3,07 ⁱ	27181 ^j	500	200 ^a
	H1.5-8-Y-AL32	3X		305	305	1013	143	255	42	4054	102	32,7	3,07 ⁱ	27181 ^j	500	200 ^a
Gao (2005)	1N4			150	200	157	101	187	27	704	75	43,1	3,69 ⁱ	29802 ^j	460	200
	1N6			150	200	157	101	187	27	704	75	43,1	3,69 ⁱ	29802 ^j	460	200
	2N6			150	200	157	101	187	27	704	75	47,8	3,95 ⁱ	30848 ^j	460	200
	2T650-1			150	200	157	101	187	27	704	75	47,8	3,95 ⁱ	30848 ^j	460	200
	2T650-2			150	200	157	101	187	27	704	75	47,8	3,95 ⁱ	30848 ^j	460	200
	3N6			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga							Propiedades mecánicas					
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	3T625-1			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T650-1			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T6100-2			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3N6P		X	150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T650-1P		X	150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T6100-2P		X	150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3N4			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T450-1			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3N4P		X	150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T450-1P		X	150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
Pham, H.B. y Al-Mahaidi, R. (2006)	E1	X		140	260	339	226	220	46	785	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
	E2	X		140	260	339	226	220	46	785	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
	E3	X		140	260	226	226	220	46	785	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
	E4	X		140	260	339	226	200	46	785	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
	E5	X		140	260	339	226	220	46	785	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
	S1	X		140	260	339	226	220	46	283	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
So, M; Harmon, TG (2008)	UB1			152	229	253	143	210	30	452	101,8	83	5,28 ⁱ	37078 ^j	485	200
	B3			152	229	253	143	210	30	452	101,8	54	4,26 ⁱ	32128 ^j	485	200
	B7			152	229	253	143	210	30	452	101,8	50	4,07 ⁱ	31314 ^j	485	200

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga							Propiedades mecánicas					
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	UB4			152	229	253	143	210	30	452	101,8	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	485	200
	UB2			152	229	253	143	210	30	452	101,8	47	3,91 ⁱ	30675 ^j	485	200
	B2			152	229	253	143	210	30	452	101,8	47	3,91 ⁱ	30675 ^j	485	200
	B4			152	229	253	143	210	30	452	101,8	51	4,14 ⁱ	31522 ^j	485	200
	UB3			152	229	253	143	210	30	452	101,8	61	4,53 ⁱ	33460 ^j	485	200
	B8			152	229	253	143	210	30	452	101,8	46	3,85 ⁱ	30456 ^j	485	200
	B10			152	229	253	143	210	30	452	101,8	27	2,70 ⁱ	25500 ^j	485	200
	B6			152	229	253	143	210	30	452	101,8	51	4,14 ⁱ	31522 ^j	485	200
Stephen Kurtz, P.E. et al. (2008)	A2		X	89	188	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	B7		X	89	191	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	B8		X	89	223	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	C10		X	89	191	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	D11		X	89	188	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	D12		X	89	191	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	D13		X	89	204	143	16	178	25	145	83	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	E15		X	89	188	143	16	178	25	145	83	41	3,57 ⁱ	29310 ^j	468	200 ^a
	E16		X	89	191	143	16	178	25	145	83	41	3,57 ⁱ	29310 ^j	468	200 ^a
	E17		X	89	204	143	16	178	25	145	83	41	3,57 ⁱ	29310 ^j	468	200 ^a
	F20		X	89	188	143	16	178	25	145	83	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	468	200 ^a

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga							Propiedades mecánicas					
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	F22		X	89	204	143	16	178	25	145	83	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	468	200 ^a
	G24		X	89	191	143	16	178	25	145	83	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	468	200 ^a
	H26		X	89	191	143	16	178	25	145	83	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	468	200 ^a
	I27		X	89	204	143	16	178	25	145	83	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	468	200 ^a
	I28		X	89	223	143	16	178	25	145	83	55	4,30 ⁱ	32325 ^j	468	200 ^a
	10-DIC-1		X	89	191	143	16	178	25	145	50	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	10-DIC-2		X	89	191	143	16	178	25	145	50	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	12-DIC-1		X	89	191	143	16	178	25	145	50	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
	12-DIC-2		X	89	191	143	16	178	25	145	50	21	2,28 ⁱ	23451 ^j	468	200 ^a
Ceroni y Pecce (2009)	2-C3			100	150	101	101	123 ^l	27 ^l	503	150	29	2,83 ⁱ	26115 ^j	530	200 ^a
	2-C4			100	150	101	101	123 ^l	27 ^l	503	150	29	2,83 ⁱ	26115 ^j	530	200 ^a
Dong et. al.	B1		X	152,4	304,8	402	157	265	23,7	509	101,6	38,2	3,40 ⁱ	28627 ^j	410	200 ^a
	B2		X	152,4	304,8	402	157	265	23,7	509	101,6	38,2	3,40 ⁱ	28627 ^j	410	200 ^a
	B4		X	152,4	304,8	402	157	265	23,7	509	101,6	38,2	3,40 ⁱ	28627 ^j	410	200 ^a
	B5		X	152,4	304,8	402	157	265	23,7	509	101,6	38,2	3,40 ⁱ	28627 ^j	410	200 ^a
	B6		X	152,4	304,8	603	157	265	23,7	509	101,6	38,2	3,40 ⁱ	28627 ^j	410	200 ^a

Tabla A.1 Base de datos de ensayos a flexión (PED). Parte 2 de 2

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
Ritchie et al. (1991)	C	G	P	152	4,76	204	11,98	1,37	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	56,86	51,75	PECCS
	D	G	P	151	4,76	204	11,98	1,37	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	61,20	55,70	PECCS
	G	G	P	152	4,19	406	10,57	1,78	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	64,55	58,74	PECCS
	H	G	P	152	9,26	25	21,14	1,17	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	57,21	52,06	PECCS
	I	H	P	150	4,06	204	28,18	1,16	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	51,95	47,28	PECCS
	J	G	P	152	3,2	204	31,00	1,95	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	63,14	57,46	PECCS
	K	G	P	152	3,2	331	31,00	1,95	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	61,66	56,11	PECCS
	M	C	P	152	1,27	331	120,5	1,26	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	73,94	67,29	PECCS
	N	A	P	154	6,35	25	73,98	1,62	1,59	8500 ^d	4308 ^e	2,44	0,91	55,95	50,92	PECCS
Saadatmanesh y Ehsani (1991)	B	G	P	152	6	155	37	1,07	1,5	942,5	362,5	4,575	1,98	125	247,88	PEID
Arduini y Nanni (1997)	SM6	C	W	300	1,426	100	100 ^s	1,49	0,42 ^c	2000	725	1,1	0,42	71,00	29,82	PECCS
	MM4	C	W	150	0,713	200	100 ^s	1,49	0,42 ^c	2000	725	2,1	0,95	87,00	82,65	PECCS
Garden et. al. (1997)	1A _u	C	W	90	0,5	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,30	19,80	5,94	PECCS
	2A _u	C	W	90	0,5	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,34	19,25	6,55	PECCS
	3A _u	C	W	90	0,5	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,40	19,5	7,80	PECCS
	1B _u	C	W	65	0,7	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,30	18,25	5,48	PECCS

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
	1B _{2u}	C	W	65	0,7	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,30	18,15	5,45	PECCS
	2B _u	C	W	65	0,7	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,34	17,00	5,78	PECCS
	3B _u	C	W	65	0,7	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,40	17,25	6,90	PECCS
	1C _u	C	W	45	1	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,30	15,95	4,79	PECCS
	2C _u	C	W	45	1	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,34	17,78	6,04	PECCS
	3C _u	C	W	45	1	25	111	1,15	0,42 ^c	11560	4446 ^e	0,9	0,40	15,35	6,14	PECCS
Tumialan et. al. (1999)	A3	C	W	152	1,76 ^f	10	86 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	2000	735	2,13	1,06	85,62	91,18	PECCS
	A8	C	W	76	3,51 ^f	10	86 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	2000	735	2,13	1,06	122,04	129,36	PECCS
	C2	C	W	152	1,76 ^f	10	86 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	2000	735	2,13	1,06	122,04	129,36	PECCS
Ross et al. (1999)	1B	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	40,05	36,45	PEID
	1C	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	35,6	32,40	PEID
	2B	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	48,95	44,54	PEID
	2C	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	35,6	32,40	PEID
	2D	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	40,05	36,45	PEID
	3B	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	54,65	49,73	PEID
	3C	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	54,07	49,20	PEID
	3D	C	P	200	0,45	25	137,9	1,60	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2,74	0,91	54,29	49,40	PEID
Ahmed et. al. (2001)	DF.2	C	W	75	1,17 ^f	50	101 ^g	1,46	3	7200	2769 ^e	1,5	0,50	60,00	30,00	PECCS
Fanning y Kelly	F5	C	P	120	1,2	385	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	50,00	55,00	PECCS

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
(2001)	F6	C	P	120	1,2	385	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	51,50	56,65	PECCS
	F7	C	P	120	1,2	462	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	48,75	53,63	PECCS
	F8	C	P	120	1,2	462	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	32,00	35,20	PECCS
	F9	C	P	120	1,2	550	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	31,00	34,10	PECCS
	F10	C	P	120	1,2	550	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	41,00	45,10	PECCS
Maalej y Bian (2001)	B3	C	W	115	1,06 ^f	25	97 ^g	1,50	0,64	1470	565	1,35	0,50	43,00	21,50	PECCS
	B4	C	W	115	1,59 ^f	25	97 ^g	1,50	0,64	1470	565	1,35	0,50	41,00	20,50	PECCS
	B5	C	W	115	2,12 ^f	25	97 ^g	1,50	0,64	1470	565	1,35	0,50	39,50	19,75	PECCS
Nguyen et. al. (2001)	A950	C	P	80	1,2	190	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	28,10	12,36	PECCS
	A1100	C	P	80	1,2	115	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	28,65	12,61	PECCS
	A1150	C	P	80	1,2	90	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	29,45	12,96	PECCS
	B2	C	P	80	1,2	115	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	65,05	28,62	PECCS
	C5	C	P	80	1,2	115	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	35,50	15,62	PECCS
	C10	C	P	80	1,2	115	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	34,00	14,96	PECCS
	C20	C	P	80	1,2	115	181	1,73	1,5	12800	4923 ^e	1,33	0,44	31,50	13,86	PECCS
Phillip Hearing, Brian (2001)	A0.6	C	P	50	1	600	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	26,15	15,69	PEID
	A0.8	C	P	50	1	500	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	26,90	16,14	PEID
	A1.0	C	P	50	1	400	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	31,05	18,63	PEID
	A1.2	C	P	50	1	300	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	31,60	18,96	PEID

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
	A1.4	C	P	50	1	200	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	45,30	27,18	PEID
	A1.6	C	P	50	1	100	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	50,20	30,12	PEID
	A1.2-SBA	C	P	50	1	300	155	1,55	2 ^b	11000	4074	1,8	0,60	32,00	19,20	PEID
	A1.5-SBA	C	P	50	1	150	155	1,55	2 ^b	11000	4074	1,8	0,60	39,40	23,64	PEID
	A1.7-SBA	C	P	50	1	50	155	1,55	2 ^b	11000	4074	1,8	0,60	41,20	24,72	PEID
	B120-0.9	C	P	50	1	450	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	32,65	19,59	PEID
	B150-0.9	C	P	50	1	450	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	33,45	20,07	PEID
	B200-0.9	C	P	50	1	450	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	37,05	22,23	PEID
Rahimi y Hutchinson (2001)	C9	S	-	150	3	85	210	20,00	2	7000	2692	2,1	0,75	42,70	32,03	PEID
	C10	S	-	150	3	85	210	20,00	2	7000	2692	2,1	0,75	41,20	30,90	PEID
Oller (2001, 2002, 2004)	1D	C	P	100	1,4	250	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	40,00	40,00	PEID
David, Ragneau y Buyle-Bodin (2002)	P2	C	P	100	1,2	100	150	1,40	1	11200	4308 ^e	2,8	0,95	68,50	65,08	PECCS
	P3	C	P	100	1,2	100	150	1,40	1	11200	4308 ^e	2,8	0,95	71,50	67,93	PECCS
	P4	C	P	100	2,4	200	150	1,40	1	11200	4308 ^e	2,8	0,95	78,00	74,10	PECCS
	P5	C	P	100	2,4	200	150	1,40	1	11200	4308 ^e	2,8	0,95	79,50	75,53	PECCS
	P6	C	P	100	1,2	100	150	1,40	1	11200	4308 ^e	2,8	0,95	67,50	64,13	PECCS
	P7	C	P	100	2,4	200	150	1,40	1	11200	4308 ^e	2,8	0,95	74,00	70,30	PECCS
Ravinovitch y Frostig (2003)	A2	C	P	120	1,2	100	165	1,70	2,5	4700	1807	2,1	0,70	78,30	54,81	PEID
	A3	C	P	121	1,2	100	165	1,70	2,5	4700	1807	2,1	0,70	89,00	62,30	PECCS

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
Güneş, Oğuz (2004)	S1PF1M	C	P	38	1,2	50	165	1,69	2 ^b	4480	1723	1,35	0,45	84,25	37,91	PECCS
	S1PF2M	C	P	64	1,2	50	165	1,69	2 ^b	4480	1723	1,35	0,45	84,25	37,91	PECCS
	S1PF3M	C	P	89	1,2	50	165	1,69	2 ^b	4480	1723	1,35	0,45	80,05	36,02	PECCS
	S1SF1M	C	W	102	0,8 ^g	50	28 ^g	1,09	2 ^b	3165	1217	1,35	0,45	85,65	38,54	PECCS
	S1SF2M	C	W	51	1,6 ^g	50	28 ^g	1,09	2 ^b	3165	1217	1,35	0,45	83,35	37,51	PECCS
	S1SF3M	C	W	51	0,8 ^g	50	28 ^g	1,09	2 ^b	3165	1217	1,35	0,45	85,55	38,50	PECCS
	S2PF3M	C	P	38	1,2	50	165	1,69	2 ^b	4480	1723	1,35	0,45	93,40	42,03	PEID
	S2PF5M	C	P	38	1,2	50	165	1,69	2 ^b	4480	1723	1,35	0,45	97,65	43,94	PEID
	S2PF7M	C	P	38	1,2	50	165	1,69	2 ^b	4480	1723	1,35	0,45	97,00	43,65	PEID
Lamanna (2004)	I-8-Y-AL32	C	P	203,2	3,2	152,4	26,3	2,64	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	3,354	1,12	136,67	152,80	PEID
	H1.5-4-Y-AL32	C	P	101,6	3,2	152,4	57,2	1,45	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	3,354	1,12	130,77	146,20	PEID
	H1.5-8-Y-AL32	C	P	203,2	3,2	152,4	57,2	1,45	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	3,354	1,12	133,01	148,70	PEID
Gao (2005)	1N4	C	W	75	2,12 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	43,20	21,60	PECCS
	1N6	C	W	75	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	43,15	21,58	PECCS
	2N6	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	58,10	29,05	PECCS
	2T650-1	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	69,30	34,65	PECCS
	2T650-2	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	65,10	32,55	PECCS

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
	3N6	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	67,95	33,98	PECCS
	3T625-1	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	68,70	34,35	PECCS
	3T650-1	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	69,80	34,90	PECCS
	3T6100-2	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	73,30	36,65	PECCS
	3N6P	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	66,00	33,00	PECCS
	3T650-1P	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	68,40	34,20	PECCS
	3T6100-2P	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	72,40	36,20	PECCS
	3N4	C	W	150	2,12 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	66,65	33,33	PECCS
	3T450-1	C	W	150	2,12 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	68,85	34,43	PECCS
	3N4P	C	W	150	2,12 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	65,00	32,50	PECCS
	3T450-1P	C	W	150	2,12 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	67,85	33,93	PECCS
Pham, H.B. y	E1	C	W	100	3,58 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	35,35	24,75	PECCS
Al-Mahaidi, R. (2006)	E2	C	W	100	3,58 ^f	350	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	25,70	17,99	PECCS
	E3	C	W	100	3,58 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	33,00	23,10	PECCS
	E4	C	W	100	3,58 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	39,50	27,65	PECCS
	E5	C	W	100	5,36 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	31,65	22,16	PECCS
	S1	C	W	100	1,19 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	36,90	25,83	PECCS
So, M; Harmon, TG	UB1	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	1,2	0,462	1,93	0,86	46,59	40,25	PECCS
(2008)	B3	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	1,2	0,462	1,93	0,86	37,40	32,31	PECCS

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
	B7	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	1,2	0,462	1,93	0,86	34,85	30,11	PECCS
	UB4	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	1,2	0,462	1,93	0,86	40,70	35,16	PECCS
	UB2	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	2482	955	1,93	0,86	37,73	32,60	PECCS
	B2	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	2482	955	1,93	0,86	38,11	32,93	PECCS
	B4	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	2482	955	1,93	0,86	36,36	31,42	PECCS
	UB3	C	P	89	0,635	508	124	1,50 ^h	1,42	2482	955	1,93	0,86	35,30	30,50	PECCS
	B8	C	P	89	0,635	381	124	1,50 ^h	1,42	1,2	0,462	1,829	0,86	82,38	71,18	PECCS
	B10	C	P	89	0,635	381	124	1,50 ^h	1,42	1,2	0,462	1,829	0,86	58,18	50,26	PECCS
	B6	C	P	89	0,635	381	124	1,50 ^h	1,42	2482	955	1,829	0,86	78,34	67,68	PEID
Stephen Kurtz, P.E. et al. (2008)	A2	C	W	76	1,17 ^f	82,5	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	23,38	18,70	PEID
	B7	C	W	76	1,17 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	22,31	17,85	PEID
	B8	C	W	76	1,17 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	23,76	19,01	PEID
	C10	C	W	76	2,34 ^f	82,5	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	27,20	21,76	PEID
	D11	C	W	76	2,34 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	24,12	19,30	PEID
	D12	C	W	76	2,34 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	20,41	16,33	PEID
	D13	C	W	76	2,34 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	22,05	17,64	PEID
	E15	C	W	76	2,34 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	26,29	21,03	PEID
	E16	C	W	76	2,34 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	24,38	19,50	PEID
	E17	C	W	76	2,34 ^f	335	109 ^s	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	27,28	21,82	PEID

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
	F20	C	W	76	1,17 ^f	82,5	109 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	35,58	28,46	PEID
	F22	C	W	76	1,17 ^f	82,5	109 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	39,00	31,20	PEID
	G24	C	W	76	1,17 ^f	335	109 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	36,26	29,01	PEID
	H26	C	W	76	2,34 ^f	590	109 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	28,92	23,14	PEID
	I27	C	W	76	2,34 ^f	82,5	109 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	41,54	33,23	PEID
	I28	C	W	76	2,34 ^f	82,5	109 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	45,30	36,24	PEID
	10-DIC-1	C	W	76	2,34 ^f	82,5	96 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	26,08	20,86	PEID
	10-DIC-2	C	W	76	2,34 ^f	82,5	96 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	26,78	21,42	PEID
	12-DIC-1	C	W	76	2,34 ^f	335	96 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	17,94	14,35	PEID
	12-DIC-2	C	W	76	2,34 ^f	335	96 ^g	1,53	0,5	2960	1035	2,4	0,80	17,98	14,38	PEID
Ceroni y Pecce (2009)	2-C3	C	W	80	0,59 ^f	400	97 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,8	0,75	8,95	6,71	PEID
	2-C4	C	W	80	0,59 ^f	400	97 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,8	0,75	8,05	6,04	PEID
Dong et. al.	B1	C	P	90	2	381	73,1	1,33	0,42 ^c	4500	1731 ^e	2,896	0,99	74,10	73,43	PECCS
	B2	C	P	90	2	305	73,1	1,33	0,42 ^c	4500	1731 ^e	2,896	0,99	78,98	78,26	PECCS
	B4	C	P	90	2	76	73,1	1,33	0,42 ^c	4500	1731 ^e	2,896	0,99	94,03	93,18	PECCS
	B5	C	P	90	4	381	73,1	1,33	0,42 ^c	4500	1731 ^e	2,896	0,99	89,20	88,40	PECCS
	B6	C	P	90	4	381	73,1	1,33	0,42 ^c	4500	1731 ^e	2,896	0,99	90,86	90,04	PECCS

Tabla A.2 Base de datos de ensayos a flexión (ICD). Parte 1 de 2

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga								Propiedades mecánicas				
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Fanning PJ et al. (2001)	F3			155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
	F4			155	240	339	226	203	37	452	125	80	5,19 ⁱ	36625 ^j	532	204
Hearing BP (2000)	B120-1.8		X	200	260	157	157	220	40	785	120	20,5	2,8	25400	413	210
	B150-1.5		X	200	260	157	157	220	40	628	150	20,5	2,8	25400	413	210
	B200-1.5		X	200	260	157	157	220	40	471	200	20,5	2,8	25400	413	210
	B200-1.8		X	200	260	157	157	220	40	471	200	20,5	2,8	25400	413	210
Rahimi y Hutchinson (2001)	B3			200	150	157	101	120	30	565	75	54	3,4	25000	575	210
	B4			200	150	157	101	120	30	565	75	54	3,4	25000	575	210
	B5			200	150	157	101	120	30	565	75	54	3,4	25000	575	210
	B6			200	150	157	101	120	30	565	75	54	3,4	25000	575	210
Spadea G et. al. (2001)	A1.1			140	300	402	402	272 ^l	28 ^l	679	150	34,3	3,17 ⁱ	27617 ^j	435	200 ^a
	A3.1			140	300	402	402	272 ^l	28 ^l	302	150	35,6	3,25 ⁱ	27962 ^j	435	200 ^a
Oller E (2005)	1D2		X	300	200	402	101	170	30 ^l	1508	150	35,2	2,7	27857 ^j	580	210
	1C		X	300	200	402	101	170	30 ^l	1508	150	35,2	2,7	27857 ^j	580	210
	1B		X	300	200	402	101	170	30 ^l	1508	150	35,2	2,7	27857 ^j	580	210
	1A			300	200	402	101	170	30 ^l	1508	150	35,2	2,7	27857 ^j	580	210
	2D		X	300	200	628	101	170	30 ^l	2262	100	35,2	2,7	27857 ^j	580	210

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga							Propiedades mecánicas					
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	2D2		X	300	200	628	101	170	30 ^l	2262	100	35,2	2,7	27857 ⁱ	580	210
	2C		X	300	200	628	101	170	30 ^l	2262	100	35,2	2,7	27857 ⁱ	580	210
Zachary Reeve B (2005)	L2			152	254	253	143	229	25	-	-	23,3	2,45 ⁱ	24278 ^j	429	200 ^a
	H1			152	254	253	143	229	25	-	-	23,3	2,45 ⁱ	24278 ^j	429	200 ^a
	H2			152	254	253	143	229	25	-	-	23,3	2,45 ⁱ	24278 ^j	429	200 ^a
	H2x1			152	254	253	143	229	25	-	-	23,3	2,45 ⁱ	24278 ^j	429	200 ^a
	H4			152	254	253	143	229	25	-	-	23,3	2,45 ⁱ	24278 ^j	429	200 ^a
Maalej M et al. (2005)	A3			115	146	236	157	120	26	452	60	39,8	3,41	27000	547	180
	A4			115	146	236	157	120	26	452	60	39,8	3,41	27000	547	180
	A5			115	146	236	157	120	26	452	60	39,8	3,41	27000	547	180
	A6			115	146	236	157	120	52	1810	120	39,8	3,41	27000	547	180
	B3			230	292	942	628	240	52	1810	120	39,8	3,41	27000	544	183
	B4			230	292	942	628	240	52	1810	120	39,8	3,41	27000	544	183
	B5			230	292	942	628	240	52	1810	120	39,8	3,41	27000	544	183
	B6			230	292	942	628	240	52	1810	120	39,8	3,41	27000	544	183
	C3			368	467,2	2413	1608	384	83	4825	133	41	3,24	25000	552	181
	C4			368	467,2	2413	1608	384	83	4825	133	41	3,24	25000	552	181
C5			368	467,2	2413	1608	384	83	4825	133	41	3,24	25000	552	181	
	1N2			150	200	157	101	187	27	704	75	43,1	3,69 ⁱ	29802 ^j	460	200

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga						Propiedades mecánicas						
				<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A_s</i>	<i>A'_s</i>	<i>d</i>	<i>d'</i>	<i>A_w</i>	<i>s_w</i>	<i>f_{cm}</i>	<i>f_{ctm}</i>	<i>E_c</i>	<i>f_y</i>	<i>E_s</i>
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Gao B (2005)	3T675-1			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
	3T4100-1			150	200	157	101	187	27	704	75	62,1	4,57 ⁱ	33660 ^j	460	200
Pham, H.B. et al. (2006)	S2	X		140	260	339	226	220	46	396	90	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
	S3	X		140	260	226	226	220	46	283	125	53,7	4,25 ⁱ	32068 ^j	551	205
Zhang A et al. (2006)	A10			120	250	226	157	211 ^l	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	A16		X(60)	120	250	226	157	211	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	A18		X(80)	120	250	226	157	211	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	A20			120	250	226	157	211	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	A23		X(30)	120	250	226	157	211	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	A26		X(60)	120	250	226	157	211	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	A28		X(80)	120	250	226	157	211	38 ^l	704	100	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	B10			120	250	402	157	209	41 ^l	1005	70	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	B20			120	250	402	157	209	41 ^l	1005	70	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
	B23		X(30)	120	250	402	157	209	41 ^l	1005	70	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a
B26		X(60)	120	250	402	157	209	41 ^l	1005	70	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a	
B28		X(80)	120	250	402	157	209	41 ^l	1005	70	18,4 ^k	2,09 ⁱ	22440 ^j	335	200 ^a	
Diaz Heredia E. (2007)	E-1		X	150	300	339	101	256	44	603	150	26,3	2,85	28000	509	192
	E-2		X	150	300	339	101	256	44	603	150	26,3	2,85	28000	509	192
Mohammad RA et al.	B3			250	150	151	151	126	30	226	150	44,1 ^k	3,28 ⁱ	30031 ^j	485	200 ^a

Referencia	Viga	A E	C P	Geometría de la viga						Propiedades mecánicas						
				b	h	A_s	A'_s	d	d'	A_w	s_w	f_{cm}	f_{ctm}	E_c	f_y	E_s
				mm	mm	mm ²	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
(2008)	B4			250	150	151	151	126	30	226	150	46,8 ^k	3,44 ⁱ	30631 ^j	485	200 ^a
Kotynia, R et al.	B-08S			150	300	113	79	258 ^l	41	792	100	32,3	2,8	27070 ^j	490	195
(2008)	B-08M			150	300	113	79	258 ^l	41	792	100	37,3	3,5	28400 ^j	490	195
	B-083m			150	300	113	79	258 ^l	41	792	100	34,4	2,9	27644 ^j	436	220

Tabla A.2 Base de datos de ensayos a flexión (ICD). Parte 2 de 2

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
Fanning PJ et al. (2001)	F3	C	P	120	1,2	0	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	55,45	61,00	ICD
	F4	C	P	120	1,2	0	155	1,55	3	8500 ^d	3269 ^e	2,8	1,10	59,25	65,18	ICD
Hearing BP (2000)	B120-1.8	C	P	50	1	0	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	49,05	29,43	ICD
	B150-1.5	C	P	50	1	150	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	45,90	27,54	ICD
	B200-1.5	C	P	50	1	150	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	47,40	28,44	ICD
	B200-1.8	C	P	50	1	0	155	1,55	2 ^b	2700	1000	1,8	0,60	45,25	27,15	ICD
Rahimi y Hutchinson	B3	C	W	150	1,24 ^f	85	127	1,21	2	7000	2692	2,1	0,75	55,20	41,40	ICD
	B4	C	W	150	1,24 ^f	85	127	1,21	2	7000	2692	2,1	0,75	52,50	39,38	ICD

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
(2001)	B5	C	W	150	3,72 ^f	85	127	1,21	2	7000	2692	2,1	0,75	69,70	52,28	ICD
	B6	C	W	150	3,72 ^f	85	127	1,21	2	7000	2692	2,1	0,75	69,60	52,20	ICD
Spadea G et. al. (2001)	A1.1	C	P	80	1,2	50	152	1,50	2	8500 ^d	3269 ^e	4,8	1,80	43,40	78,12	ICD
	A3.1	C	P	80	1,2	50	152	1,50	2	8500 ^d	3269 ^e	4,8	1,80	37,40	67,32	ICD
Oller E (2005)	1D2	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	55,50	55,50	ICD
	1C	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	52,00	52,00	ICD
	1B	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	50,20	50,20	ICD
	1A	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	54,50	54,50	ICD
	2D	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	64,00	64,00	ICD
	2D2	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	81,50	81,50	ICD
	2C	C	P	100	1,4	100	150	1,60	3	9599,2	3692	2	1,00	71,40	71,40	ICD
Zachary Reeve B (2005)	L2	C	P	51	1,4	10	155	1,80	1,6	2227	857	4,537	2,27	22,15	50,26	ICD
	H1	C	P	25	1,4	10	155	1,80	1,6	4482	1723	4,537	2,27	18,84	42,75	ICD
	H2	C	P	51	1,4	10	155	1,80	1,6	4482	1723	4,537	2,27	21,77	49,40	ICD
	H2x1	C	P	51	1,4	10	155	1,80	1,6	4482	1723	4,537	2,27	22,57	51,21	ICD
	H4	C	P	102	1,4	10	155	1,80	1,6	4482	1723	4,537	2,27	24,62	55,86	ICD
	A3	C	W	107,8	0,59 ^f	25	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	1,5	0,50	38,75	19,38	ICD
	A4	C	W	107,8	0,59 ^f	25	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	1,5	0,50	37,75	18,88	ICD
	A5	C	W	107,8	1,17 ^f	25	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	1,5	0,50	43,70	21,85	ICD

Referencia	Viga	T	F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
Maalej M et al. (2005)	A6	C	W	107,8	1,17 ^f	25	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	1,5	0,50	42,90	21,45	ICD
	B3	C	W	215,6	1,17 ^f	50	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	3	1,00	131,75	131,75	ICD
	B4	C	W	215,6	1,17 ^f	50	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	3	1,00	130,15	130,15	ICD
	B5	C	W	215,6	2,34 ^f	50	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	3	1,00	147,35	147,35	ICD
	B6	C	W	215,6	2,34 ^f	50	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	3	1,00	142,15	142,15	ICD
	C3	C	W	368	1,76 ^f	80	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	4,8	1,60	326,45	522,32	ICD
	C4	C	W	368	1,76 ^f	80	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	4,8	1,60	334,65	535,44	ICD
	C5	C	W	368	3,51 ^f	80	99 ^g	1,50 ^h	0,636	1824	622	4,8	1,60	325,05	520,08	ICD
Gao B (2005)	1N2	C	W	75	1,06 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	40,35	20,18	ICD
	3T675-1	C	W	150	3,18 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	68,60	34,30	ICD
	3T4100-1	C	W	150	2,12 ^f	20	99 ^g	1,79	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	1,5	0,50	65,35	32,68	ICD
Pham, H.B. et al. (2006)	S2	C	W	100	1,19 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	40,20	28,14	ICD
	S3	C	W	100	1,19 ^f	150	90 ^g	1,87	2 ^b	3500	1346	2,3	0,70	30,15	21,11	ICD
Zhang A et al. (2006)	A10	C	W	120	0,53 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	31,35	23,51	ICD
	A16	C	W	120	0,53 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	31,70	23,78	ICD
	A18	C	W	120	0,53 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	31,90	23,93	ICD
	A20	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	37,90	28,43	ICD
	A23	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	39,90	29,93	ICD
	A26	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	37,85	28,39	ICD

Referencia	Viga	T F	P F	Refuerzo exterior					Adhesivo			Configuración y resultado de la carga				
				b_p	t_p	a	E_p	ϵ_{pu}	t_a	E_a	G_a	L	L_c	V_u	M_u	MF
				mm	mm	mm	GPa	%	mm	MPa	MPa	m	m	kN	m-kN	
	A28	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	36,60	27,45	ICD
	B10	C	W	120	0,53 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	41,20	30,90	ICD
	B20	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	42,55	31,91	ICD
	B23	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	49,30	36,98	ICD
	B26	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	47,95	35,96	ICD
	B28	C	W	120	1,06 ^f	100	99 ^g	1,50 ^h	0,42 ^c	8500 ^d	3269 ^e	2	0,75	46,75	35,06	ICD
Diaz Heredia E. (2007)	E-1	C	P	50	1,2	50	165	1,7	2 ^b	12800	4923 ^e	3	1,00	55,03	55,03	ICD
	E-2	C	P	100	1,2	50	165	1,7	2 ^b	12800	4923 ^e	3	1,00	65,10	65,10	ICD
Mohammad RA et al. (2008)	B3	C	P	50	1,2	25	214	0,93	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2	0,67	31,40	20,94	ICD
	B4	C	P	50	1,2	25	214	1,74	2 ^b	8500 ^d	3269 ^e	2	0,67	29,20	19,48	ICD
Kotynia, R et al. (2008)	B-08S	C	P	50	1,2	75	172	1,70	2 ^b	11200	4308 ^e	4,2	1,40	48,00	67,20	ICD
	B-08M	C	P	120	1,4	75	220	1,24	2 ^b	11200	4308 ^e	4,2	1,40	70,00	98,00	ICD
	B-083m	C	W	150	0,55 ^f	75	97 ^g	1,50	0,42 ^c	4500	1731 ^e	4,2	1,40	46,00	64,40	ICD

a) Valor asumido del módulo de elasticidad longitudinal del acero: 200 GPa; **b)** Espesor asumido de la capa de adhesivo en base a los estudios realizados por Smith et al. (2002b) para refuerzo tipo P; **c)** Espesor asumido de la capa de adhesivo con base a los estudios realizados por Smith et al. (2002b) para refuerzo tipo W **d)** Valor asumido en 8500 MPa de acuerdo con Smith et al. (2002b); **e)** Valor calculado de la ecuación $G=E/(2*(1+v))$ para un módulo de poisson v de 0.3; **f)** Espesor de cada capa calculado como la suma del espesor de la resina (0.42) y el del tejido; **g)** Módulo de deformación longitudinal del refuerzo aplicado por el método húmedo asumido según la fórmula $E_p = E_f \times V_f + E_r \times V_r$ **h)** Deformación asumida en 1.5%; **i)** Resistencia a tracción calculada según [A.2]; **j)** Módulo de elasticidad del hormigón calculado según [A.3]; **k)** Resistencia calculada según [A.1]; **l)** Recubrimiento asumido como el 10% de la altura más el diámetro del estribo más el radio de la barra longitudinal.