Capítulo III

Análisis comparativo de los modelos teóricos en la zona de anclaje del laminado

III.1.INTRODUCCIÓN

En las referencias Brosens (2001), Bizindavyi y Neale (1999), Chen y Teng (2001), Chajes et al. (1996), Ferrier y Hamelin (2002), Maeda et al. (1997), Nakaba et al. (2001), Neubauer(2000), Souza y Appleton (2001), Sato y Vecchio (2003), Tripi (2000) y Ueda et al. (2002) se pueden encontrar modelos teóricos y/o campañas experimentales que permite estudiar la distribución de tensiones tangenciales que se producen en la zona de anclaje. Todos ellos contribuyen en el intento de describir los fenómenos locales que conducen a desprendimientos prematuros del laminado en elementos de hormigón reforzados exteriormente.

Los trabajos experimentales existentes en la bibliografía utilizan dos disposiciones: "*single shear tests*"(Chajes et al. 1995, 1996; Bizindavyi and Neale 1997, 1999; Täljsten 1997), o bien "*double shear tests*" (van Gemert 1980; Swamy et al. 1986; Kasumassa Nadaba et al. 2001; Maeda et al. 1997; E. Ferrier y P. Hamelin 2002; Neubauer y Rostásy 1997; Souza y Appleton 2001; Kris Brosens 2001; Joseph M. Tripi et al. 2000 ; Satto y Vecchio 2003).

La diferencia básica entre "single shear test" y "double shear test" es que en el primero se tracciona un único laminado colocado en una de las caras del especimen. En cambio, en el "double shear test" se traccionan dos laminados situados en las caras opuestas del espécimen (Ver Figura III.1).

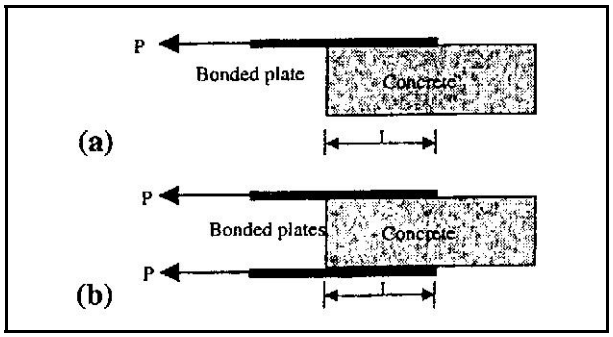

Figura III.1: Ensayos de corte simple y doble:
(a) Single Shear Test; (b) Doble Shear Test (Chen y Teng, 2001)

Con los datos recopilados en la bibliografía sobre ensayos de corte puro, se ha elaborado una base de datos con las características geométricas y de los materiales. En la tabla III.1 se presenta un resumen de estos datos, que se han utilizado para analizar de forma comparativa los diferentes modelos teóricos que se han descrito en el Capítulo II.

Cabe mencionar que han sido excluidos aquellos ensayos en los que no se disponía de información suficiente.

En la mayoría de ensayos realizados en los que se facilita información acerca del modo de rotura, la localización de la rotura está situada en el hormigón a pocos milímetros de la interfase hormigón/adhesivo. Esto es consecuencia de la fiabilidad de los adhesivos que se utilizan actualmente y que ofrecen muy buena adherencia con el acero y con materiales compuestos. El fallo debido al adhesivo es raro, y únicamente aparece en los especimenes C6 y P2. Por otra parte, 5 de los 179 ensayos totales recopilados de especimenes fallan debido a rotura del FRP y otros 5 fallan debido a deslaminado del FRP. Los debidos a deslaminado se producen en la campaña experimental llevada a cabo por Nakaba et al.(2001). El resto de los ensayos fallan por fractura de hormigón o por efectos del peeling.

AUTOR	Especimen	Modo de fallo	Hormigón				Adhesivo	Refuerzo					$P_{exp\ (N)}$
			B_c(mm)	H (mm)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	E_a (MPa)	Tipo de ref	in situ/pref	b_{FRP}	t_{FRP}	L_L (mm)	
Bizindavyi and Neale	BN1	RFRP	150	150	3,18	42,50	3304	GFRP	in situ	25	1,00	180	11410
Bizindavyi and Neale	BN2	RFRP	150	150	3,18	42,50	3304	GFRP	in situ	25	2,00	320	21400
Bizindavyi and Neale	BN3	RFRP	150	150	3,18	42,50	3257	CFRP	in situ	25	0,33	160	8500
Bizindavyi and Neale	BN4	RFRP	150	150	3,18	42,50	3257	CFRP	in situ	25	0,66	320	15100
Chajes et al.	C1	FH	228,6	152,4	2,77	36,10	5172	GFRP	in situ	25	1,02	76	8462
Chajes et al.	C2	FH	228,6	152,4	3,46	47,10	5172	GFRP	in situ	25	1,02	76	9931
Chajes et al.	C3	FH	228,6	152,4	3,46	47,10	5172	GFRP	in situ	25	1,02	76	10638
Chajes et al.	C4	FH	228,6	152,4	3,46	47,10	5172	GFRP	in situ	25	1,02	76	10638
Chajes et al.	C5	FA	228,6	152,4	3,25	43,60	2207	GFRP	in situ	25	1,02	76	10531
Chajes et al.	C6	FH	228,6	152,4	3,25	43,60	234	GFRP	in situ	25	1,02	76	8956
Chajes et al.	C7	FH	228,6	152,4	3,25	43,60	234	GFRP	in situ	25	1,02	76	9610
Chajes et al.	C8	FH	228,6	152,4	3,25	43,60	1584	GFRP	in situ	25	1,02	76	10518
Chajes et al.	C9	FH	228,6	152,4	3,25	43,60	1584	GFRP	in situ	25	1,02	76	11199
Chajes et al.	C10	FH	228,6	152,4	1,90	24,00	1584	GFRP	in situ	25	1,02	76	9869
Chajes et al.	C11	FH	228,6	152,4	2,28	28,90	1584	GFRP	in situ	25	1,02	76	9343
Chajes et al.	C12	FH	228,6	152,4	3,25	43,70	1584	GFRP	in situ	25	1,02	76	11204
Chajes et al.	C13	FH	228,6	152,4	2,79	36,40	1584	GFRP	in situ	25	1,02	51	8094
Chajes et al.	C14	FH	228,6	152,4	2,79	36,40	1584	GFRP	in situ	25	1,02	102	12811
Chajes et al.	C15	FH	152,4	152,4	2,79	36,40	1584	GFRP	in situ	25	1,02	152	11917
Chajes et al.	C16	FH	152,4	152,4	2,79	36,40	1584	GFRP	in situ	25	1,02	203	11570
Swamy et al.	S1	FH	60	30	1,55	19,80	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	19530
Swamy et al.	S2	FH	60	30	2,73	35,50	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	22680
Swamy et al.	S3	FH	60	30	3,49	47,60	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	24930
Swamy et al.	S4	FH	60	30	3,98	56,30	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	29970
Swamy et al.	S5	FH	60	30	2,74	35,60	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	21780
Swamy et al.	S6	FH	60	30	2,74	35,60	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	21420
Swamy et al.	S7	FH	60	30	2,75	35,60	1215	Acero	prefabricado	60	3,00	150	25470
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCFH(1)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	25630
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCFH(2)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	25325
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCFH(3)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	27240
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCF(1)	FH	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	18905
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCF(2)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16960
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCF(3)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16635
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCFL(1)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	12195
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCFL(2)	FAP	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	11795
Kasumassa Nakaba et al.	C5-SCFL(3)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	12225
Kasumassa Nakaba et al.	C5-HCF(1)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	19990
Kasumassa Nakaba et al.	C5-HCF(2)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	19475

Tabla III.1: Descripción de especímenes analizados en la base de datos

AUTOR	Especimen	Modo de fallo	Hormigón				Adhesivo	Refuerzo					$P_{exp\ (N)}$
			B_c(mm)	H (mm)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	E_a (MPa)	Tipo de ref	in situ/pref	b_{FRP}	t_{FRP}	L_L (mm)	
Kasumassa Nakaba et al.	C5-HCF(3)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16245
Kasumassa Nakaba et al.	C5-ARF(1)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	AFRP	in situ	50	0,61	300	12760
Kasumassa Nakaba et al.	C5-ARF(2)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	AFRP	in situ	50	0,61	300	12855
Kasumassa Nakaba et al.	C5-ARF(3)	FA	100	50	4,05	57,60	8500	AFRP	in situ	50	0,61	300	11880
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCFH(1)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	20640
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCFH(2)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	22285
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCFH(3)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	23570
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCF(1)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	15350
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCF(2)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16860
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCF(3)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16290
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCFL(1)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	8755
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCFL(2)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	8730
Kasumassa Nakaba et al.	M5-SCFL(3)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	10020
Kasumassa Nakaba et al.	M5-HCF(1)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16560
Kasumassa Nakaba et al.	M5-HCF(2)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	16250
Kasumassa Nakaba et al.	M5-HCF(3)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	14640
Kasumassa Nakaba et al.	M5-ARF(1)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	AFRP	in situ	50	0,61	300	12855
Kasumassa Nakaba et al.	M5-ARF(2)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	AFRP	in situ	50	0,61	300	12175
Kasumassa Nakaba et al.	M5-ARF(3)	FA	100	50	3,68	50,90	8500	AFRP	in situ	50	0,61	300	12710
Kasumassa Nakaba et al.	C2-SCF(1)	FA	100	50	1,89	23,80	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	14090
Kasumassa Nakaba et al.	C2-SCF(2)	FA	100	50	1,89	23,80	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	13870
Kasumassa Nakaba et al.	C2-SCF(3)	FA	100	50	1,89	23,80	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	15085
Kasumassa Nakaba et al.	C2P-SCF(1)	FA	100	50	1,89	23,80	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	14540
Kasumassa Nakaba et al.	C2P-SCF(2)	FA	100	50	1,89	23,80	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	15140
Kasumassa Nakaba et al.	C2P-SCF(3)	FA	100	50	1,89	23,80	8500	CFRP	in situ	50	0,59	300	15290
Maeda et al.	M1	DCFS	100	50	3,07	40,80	8500	CFRP	in situ	50	0,53	75	11600
Maeda et al.	M2	DCFS	100	50	3,07	40,80	8500	CFRP	in situ	50	0,53	150	18400
Maeda et al.	M3	DCFS	100	50	3,23	43,30	8500	CFRP	in situ	50	0,53	300	23900
Maeda et al.	M4	FH	100	50	3,17	42,40	8500	CFRP	in situ	50	0,53	75	20000
Maeda et al.	M5	RCFS	100	50	3,17	42,40	8500	CFRP	in situ	50	0,53	150	14600
Maeda et al.	M6	FH	100	50	3,19	42,70	8500	CFRP	in situ	50	0,59	65	19100
Maeda et al.	M7	DCFS	100	50	3,19	42,70	8500	CFRP	in situ	50	0,59	150	32500
Maeda et al.	M8	DCFS	100	50	3,31	44,70	8500	CFRP	in situ	50	0,53	700	20000
J. Chajes et al.	C2	FH	152,4	152,4	3,46	47,10	1584	CFRP	in situ	25	1,11	76	9931
J. Chajes et al.	C4	FH	152,4	152,4	3,46	47,10	1584	CFRP	in situ	25	1,11	76	10638
J. Chajes et al.	C6	FH	152,4	152,4	3,25	43,60	1584	CFRP	in situ	25	1,11	76	8956

Tabla III.1: Descripción de especímenes analizados en la base de datos

AUTOR	Especimen	Modo de fallo	Hormigón				Adhesivo	Refuerzo					$P_{exp\ (N)}$
			B_c(mm)	H (mm)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	E_a (MPa)	Tipo de ref	in situ/pref	b_{FRP}	t_{FRP}	L_L (mm)	
J. Chajes et al.	C8	FH	152,4	152,4	3,25	43,60	1584	CFRP	in situ	25	1,11	76	10518
E. Ferrier and P.Hamelin	A	-	140	70	2,90	38,00	8500	CFRP	in situ	50	0,80	190	
E. Ferrier and P.Hamelin	B	-	140	70	2,90	38,00	8500	CFRP	in situ	50	0,80	190	
E. Ferrier and P.Hamelin	C	-	140	70	2,90	38,00	8500	CFRP	in situ	50	0,80	190	
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N1	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	75	508
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N2	-	150	75	3,91	57,60	8500	CFRP	prefabricado	50	0,59	75	11795
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N3	-	150	75	1,98	57,60	8500	CFRP	prefabricado	50	0,59	150	12225
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N4	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	150	748
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N5	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	150	2633
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N6	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,44	150	948
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N7	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,44	150	2208
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N8	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,42	150	1014
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N9	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,42	150	2192
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N10	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	225	1162
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N11	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	0,59	300	992
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N12	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	0,59	300	1238
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N13	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	300	1010
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N14	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	300	2493
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N15	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,44	300	3391
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N16	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,44	300	992
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N17	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,44	300	1081
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N18	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,42	300	2141
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N19	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,42	300	2204
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N20	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,42	300	938
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N21	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	300	2501
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N22	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	1,27	550	1039
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N23	-	150	75	1,98	25,00	4300	CFRP	prefabricado	50	0,59	550	928
Uwe Neubauer and S. Rostásy	N24	-	150	75	3,91	55,00	4300	CFRP	prefabricado	50	0,59	550	2665
R. Helena Souza and J.Appleton	P1	FAH	200	100	2,56	33,00	8500	CFRP	in situ	100	0,43	200	35000
R. Helena Souza and J.Appleton	P2	FA	200	100	2,56	33,00	8500	CFRP	in situ	100	0,43	200	35000
R. Helena Souza and J.Appleton	P3	FAH	200	100	2,56	33,00	8500	CFRP	in situ	100	0,43	150	29000
R. Helena Souza and J.Appleton	P4	FAH	200	100	2,56	33,00	8500	CFRP	in situ	100	0,43	150	29000

Tabla III.1: Descripción de especímenes analizados en la base de datos

AUTOR	espécimen	Modo de fallo	Hormigón				Adhesivo	Refuerzo					$P_{exp\ (N)}$
			B_c(mm)	H (mm)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	E_a (MPa)	Tipo de ref	in situ/pref	b_{FRP}	t_{FRP}	L_L (mm)	
Kris Brosens	L50W80N1	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,37	50	13350
Kris Brosens	L50W80N2	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,73	50	14580
Kris Brosens	L50W120N1	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,37	50	17360
Kris Brosens	L50W120N2	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,73	50	18870
Kris Brosens	L80W80N1	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,37	80	18030
Kris Brosens	L80W80N2	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,73	80	19930
Kris Brosens	L80W120N1	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,37	80	22900
Kris Brosens	L80W120N2	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,73	80	26860
Kris Brosens	L120W80N1	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,37	120	19680
Kris Brosens	L120W80N2	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,73	120	24400
Kris Brosens	L120W120N1	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,37	120	28420
Kris Brosens	L120W120N2	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,73	120	34310
Kris Brosens	L150W80N1	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,37	150	22640
Kris Brosens	L150W80N2	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,73	150	32740
Kris Brosens	L150W80N3	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	1,10	150	35510
Kris Brosens	L150W120N1	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,37	150	31760
Kris Brosens	L150W120N2	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,73	150	41860
Kris Brosens	L150W120N3	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	1,10	150	45320
Kris Brosens	L200W80N1	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,37	200	21500
Kris Brosens	L200W80N2	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	0,73	200	33410
Kris Brosens	L200W80N3	FH	80	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	80	1,10	200	38270
Kris Brosens	L200W120N1	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,37	200	35820
Kris Brosens	L200W120N2	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	0,73	200	47340
Kris Brosens	L200W120N3	FH	120	75	3,33	44,90	3160	CFRP	in situ	120	1,10	200	51160
Täljsten	G100 40	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	40	2,90	100	21700
Täljsten	G200 40	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	40	2,90	200	39500
Täljsten	G400 40	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	40	2,90	400	41100
Täljsten	G50 60	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	60	2,90	50	12700
Täljsten	G100 60	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	60	2,90	100	20000
Täljsten	G150 60	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	60	2,90	150	46300
Täljsten	G200 60	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	60	2,90	200	48800
Täljsten	G400 60	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	60	2,90	400	58400
Täljsten	G400 60	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	60	2,90	400	53000
Täljsten	G100 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	100	39600
Täljsten	G150 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	150	50900
Täljsten	G200 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	200	67300
Täljsten	G300 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	300	68000
Täljsten	G500 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	500	67300
Täljsten	G600 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	600	71400
Täljsten	G800 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	Acero	prefabricado	80	2,90	800	61600
Täljsten	I100 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	GFRP	prefabricado	80	1,00	100	20700
Täljsten	I200 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	GFRP	prefabricado	80	1,00	200	21900

Tabla III.1: Descripción de especímenes analizados en la base de datos

AUTOR	Espécimen	Modo de fallo	Hormigón				Adhesivo	Refuerzo					$P_{exp\ (N)}$
			B_c(mm)	H (mm)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	E_a (MPa)	Tipo de ref	in situ/pref	b_{FRP}	t_{FRP}	L_L (mm)	
Täljsten	I500 80	FH	200	200	3,10	41,20	6700	GFRP	prefabricado	80	1,00	500	24100
Täljsten	J100 50	FH	200	200	3,10	41,20	6700	CFRP	prefabricado	50	1,20	100	17300
Täljsten	J200 50	FH	200	200	3,10	41,20	6700	CFRP	prefabricado	50	1,20	200	27500
Täljsten	J300 50	FH	200	200	3,10	41,20	6700	CFRP	prefabricado	50	1,20	300	35100
Täljsten	J400 50	FH	200	200	3,10	41,20	6700	CFRP	prefabricado	50	1,20	400	26900
Joseph M. Tripi et al.	CL-1	-	27	13,5	2,76	35,90	2500	CFRP	in situ	27	0,30	171	8450
Joseph M. Tripi et al.	CL-2	-	27	13,5	2,76	35,90	2500	CFRP	in situ	27	0,46	171	8450
Joseph M. Tripi et al.	CL-3	-	27	13,5	2,76	35,90	2500	CFRP	in situ	27	0,72	171	8450
Joseph M. Tripi et al.	CH-1	-	27	13,5	2,76	35,90	2500	CFRP	in situ	27	0,30	171	8450
Joseph M. Tripi et al.	CH-2	-	27	13,5	2,76	35,90	2500	CFRP	in situ	27	0,46	171	8450
Joseph M. Tripi et al.	CH-3	-	27	27	2,76	35,90	2500	CFRP	in situ	27	0,72	171	8450
Yuichi Sato and Frank J. Vecchio	T1-1	PEEL	100	50	2,49	31,90	8500	CFRP	in situ	50	0,84	50	15800
Yuichi Sato and Frank J. Vecchio	T1-2	PEEL	100	50	2,49	31,90	8500	CFRP	in situ	50	0,84	50	19400
Yuichi Sato and Frank J. Vecchio	T2-1	PEEL	100	50	2,49	31,90	8500	CFRP	in situ	50	0,84	100	21700
Yuichi Sato and Frank J. Vecchio	T2-2	PEEL	100	50	2,49	31,90	8500	CFRP	in situ	50	0,84	100	26400
Yuichi Sato and Frank J. Vecchio	T4-1	PEEL	100	50	2,49	31,90	8500	CFRP	in situ	50	0,84	200	26300
Yuichi Sato and Frank J. Vecchio	T4-2	PEEL	100	50	2,49	31,90	8500	CFRP	in situ	50	0,84	200	23300
Ueda	AS1-1	-	200	100			8500	CFRP	in situ	120	0,11	600	
Ueda	AS1-2	-	200	100			8500	CFRP	in situ	120	0,11	601	
Ueda	AS1-3	-	200	100			8500	CFRP	in situ	120	0,11	602	
Ueda	AS2-0	-	150	75			8500	CFRP	in situ	120	0,11	603	
Ueda	AS2-3	-	150	75			8500	CFRP	in situ	120	0,11	604	
Ueda	AS3-0	-	150	75			8500	CFRP	in situ	120	0,11	605	
Ueda	AS3-1	-	150	75			8500	CFRP	in situ	120	0,11	606	
Ueda	AS3-2	-	150	75			8500	CFRP	in situ	120	0,11	607	
Ueda	BS4-1	-	150	75			8500	CFRP	in situ	150	0,11	608	
Ueda	BS4-2	-	150	75			8500	CFRP	in situ	150	0,11	609	
Ueda	BS4-3	-	150	75			8500	CFRP	in situ	150	0,11	610	
Ueda	BS2-2	-	150	75			8500	CFRP	in situ	150	0,11	611	
Ueda	BS5-0	-	150	75			8500	CFRP	in situ	150	0,11	612	
Ueda	BS5-2	-	150	75			8500	CFRP	in situ	150	0,11	613	

Modo de rotura: FH= Rotura de hormigón, RFRP= rotura de FRP, FA= fallo de adherencia, FAP= fallo adherencia parcial con rotura de hormigón longitudinal(sólo figura en un espécimen de Kasumassa Nakaba, DCFS= deslaminado del CFS, RCFS= rotura del CFS, FAH= fallo de adherencia entre adhesivo y hormigón (figura en un espécimen de Souza), PEEL= peeling, -= no facilitado

Tabla III.1: Descripción de especímenes analizados en la base de datos

III.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS QUE DESCRIBEN EL COMPORTAMIENTO DE LA INTERFASE

A continuación procederemos a mostrar los resultados obtenidos a partir de los modelos analíticos descritos en el apartado anterior. Para la realización del análisis comparativo se ha realizado una base de datos con ensayos de corte simple y corte doble, se han introducido las expresiones obtenidas por los diferentes investigadores y se han seleccionado los cuatro modelos que más se aproximan a los resultados obtenidos en las campañas experimentales recopiladas de numerosos artículos cuyos datos principales se describen en la tabla del inicio del capítulo. El parámetro que se ha comparado es el máximo esfuerzo de tracción del laminado, $P_{\max}$. Se ha hallado el promedio $P_{\max} / P_{\exp}$, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada una de las formulaciones estudiadas. En particular se han estudiado los comportamientos generales de refuerzos en general, de ensayos con platabandas de acero, de refuerzos con laminados de materiales compuestos prefabricados, y por último, para refuerzos con laminados de materiales compuestos "in situ"

Para el caso general, sin distinción de naturaleza del refuerzo (acero, prefabricado, in situ) el resultado obtenido por los diversos modelos se observa en la Tabla III.2.

	Refuerzos		
	Promedio Pmax/Pexp	Desviación estandard	Coeficiente de variación
Hiroyuki and Wu (1997)	12,76	4,93	37%
Tanaka (1996)	2,64	3,34	127%
Maeda (1997)	1,26	0,45	34%
Holzenkampfer (1994)	1,21	0,42	33%
Täljsten (1994)	0,96	0,34	33%
Neubauer y Rostásy (1997)	0,99	0,31	30%
Van Gemert y Brosens (1997)	1,76	1,12	63%
Chen and Teng (2001)	1,28	0,39	28%
FIB (Rostasy)	0,57	0,36	63%
FIB (Niedermeier)	1,81	0,63	34%
Neubauer (2000)	1,42	0,51	35%
Brosens (2001))	1,04	0,36	33%
Oller (2003)	1,11	0,36	31%

Tabla III.2: Análisis de los modelos estudiados para cualquier tipo de refuerzo

Como se puede observar, los cuatro modelos que más se acercan a los resultados experimentales son Täljsten, Neubauer y Rostásy, Brosens y Oller. Los modelos que más se alejan son los modelos experimentales de Hiroyuchi and Wu y de Tanaka.

Si estudiamos únicamente los especimenes reforzados con platabandas de acero se observan cambios con respecto la tabla anterior:

	Acero		
	Promedio Pmax/Pexp	Desviación estandard	Coeficiente de variación
Hiroyuki and Wu (1997)	17,99	5,51	31%
Tanaka (1996)	3,61	7,60	210%
Maeda (1997)	0,95	0,39	41%
Holzenkampfer (1994)	0,88	0,19	21%
Täljsten (1994)	0,69	0,19	28%
Neubauer y Rostásy (1997)	0,78	0,12	16%
Van Gemert y Brosens (1997)	2,12	0,80	38%
Chen and Teng (2001)	1,00	0,10	10%
FIB (Rostasy)	0,44	0,24	55%
FIB (Niedermeier)	1,41	0,32	23%
Neubauer (2000)	1,44	0,39	27%
Brosens (2001))	1,09	0,30	27%
Oller (2003)	1,12	0,29	26%

Tabla III.3: Análisis estadístico de los modelos estudiados para elementos reforzados con platabandas de acero

El modelo que mejor se aproxima a la carga máxima experimental es el de Chen y Teng, mientras que los otros tres que nos dan buenas aproximaciones son Holzenkämpfer, y de nuevo Brosens y Oller.

En la Figura III.2 se presentan los ensayos de adherencia realizados en elementos de hormigón reforzados con platabandas de acero. Los especimenes S1-S7 corresponden a los ensayos de corte doble realizados por Swamy et al. en 1986 (Chen and Teng (2001)), mientras los especimenes G100 40 a G800 80 son los ensayos de corte simple realizados por Täljsten en 1994 referenciados por Brosens (2001). En ella se compara la carga máxima experimental recogida en los ensayos con los resultados obtenidos analíticamente al encontrar el valor de la carga máxima utilizando aquellos modelos cuyo promedio $P_{\max} / P_{\exp}$ se acerca más a 1, y tienen una desviación estándar y un coeficiente de variación menor. En el Anejo 1 se presenta el análisis comparativo de todos los modelos estudiados para todos los ensayos recopilados.

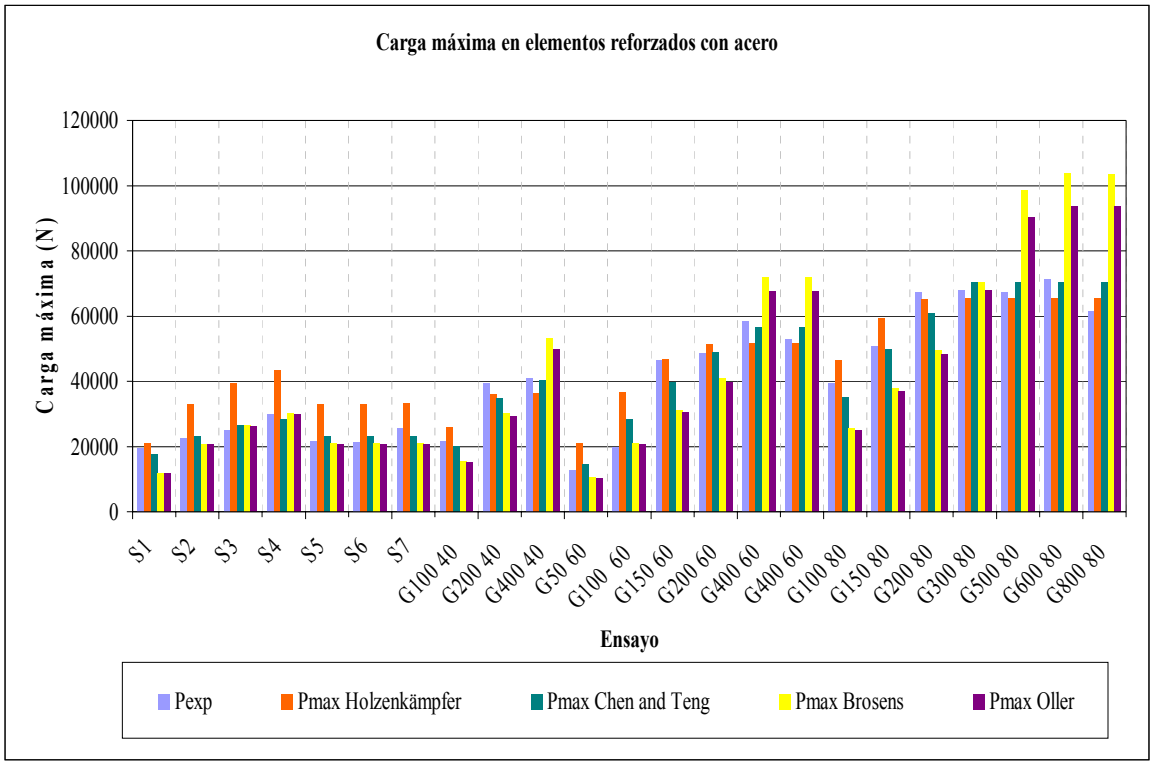

Figura III.2: Carga máxima en elementos reforzados con platabandas de acero

Se puede observar que tanto en la campaña experimental de Swamy como la de Täljsten, el modelo que más se aproxima es el de Chen and Teng. En la campaña experimental de Swamy et al. la longitud de laminado se mantiene constante (150 mm) y lo que varía es la resistencia del hormigón. Mientras, en la campaña de Täljsten, lo que se varía es la longitud del refuerzo de acero (50-800 mm) y su ancho . Se observa que para laminados cortos (50-300 mm) los resultados obtenidos por Brosens y Oller son menores a los obtenidos experimentalmente (en el caso de Brosens un 34% inferiores y en el caso del modelo de Oller en un 35%) mientras que para laminados de más de 300 mm, los resultados que se obtienen son mayores a los obtenidos (en el caso de Brosens un 25% superior y en el ccaso de Oller un 19% superior a los resultados experimentales). También se observa que para los ensayos realizados por Swamy et al., el valor de la carga máxima obtenida al aplicar las expresiones obtenidas por Holzenkämpfer dan resultados bastante más elevados a los experimentales, y en cambio para los ensayos de Täljsten se aproxima muy bien a los resultados obtenidos en la campaña experimental.

En la Tabla III.4 se muestra el análisis de los ensayos de refuerzos con laminados prefabricados con materiales compuestos:

	FRP prefabricado		
	Promedio Pmax/Pexp	**Desviación estandard**	**Coeficiente de variación**
Hiroyuki and Wu (1997)	14,15	3,60	25%
Tanaka (1996)	2,55	3,73	146%
Maeda (1997)	1,24	0,32	26%
Holzenkampfer (1994)	1,14	0,31	27%
Täljsten (1994)	0,92	0,25	28%
Neubauer y Rostásy (1997)	0,92	0,22	24%
Van Gemert y Brosens (1997)	1,74	0,81	46%
Chen and Teng (2001)	1,06	0,26	24%
FIB (Rostasy)	0,34	0,11	34%
FIB (Niedermeier)	1,74	0,39	22%
Neubauer (2000)	1,28	0,30	23%
Brosens (2001)	0,93	0,27	29%
Oller (2003)	0,99	0,27	27%

Tabla III.4: Análisis estadístico de los modelos estudiados para elementos reforzados con laminados prefabricados de elementos compuestos

Los modelos que más se aproximan a los resultados obtenidos experimentalmente son los de Holzenkämpfer, Neubauer y Rostásy, Brosens y Oller, siendo este último el que obtiene una mejor aproximación. De nuevo, el modelo de Tanaka, es el que más se aleja de los resultados experimentales.

Los ensayos de adherencia realizados por Neubauer y Täljsten son los únicos con laminados prefabricados. En las Figuras III.3 y III.4 se presentan, la carga máxima experimental y las diferentes aproximaciones analíticas para refuerzos con materiales compuestos. Se comparan los valores analíticos de Täljsten, Neubauer y Rostásy, Brosens, Oller y Chen and Teng.

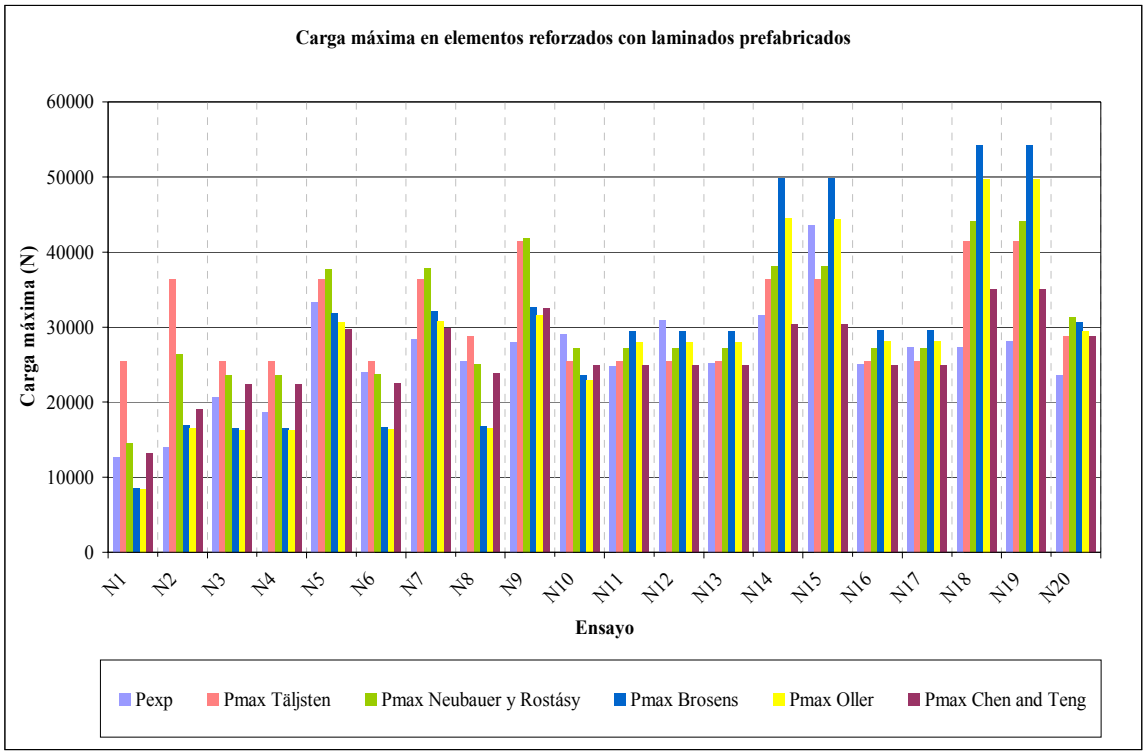

Figura III.3: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos prefabricados

Los especimenes designados N1 a N24 son los realizados por Neubauer (2000) mostrados en la Figura III.3 mientras los ensayos I100 80 al J400 50 correspondientes a Täljsten (Brosens, 2001) que se muestran en la Figura III.4. En el Anejo 1 se presentan las gráficas con todos los modelos comparados.

En su campaña experimental, Neubauer(2000) utiliza diferentes resistencias, y varios espesores y longitudes de laminado. Para los especimenes N2 y N3 varía el módulo de deformación del adhesivo.

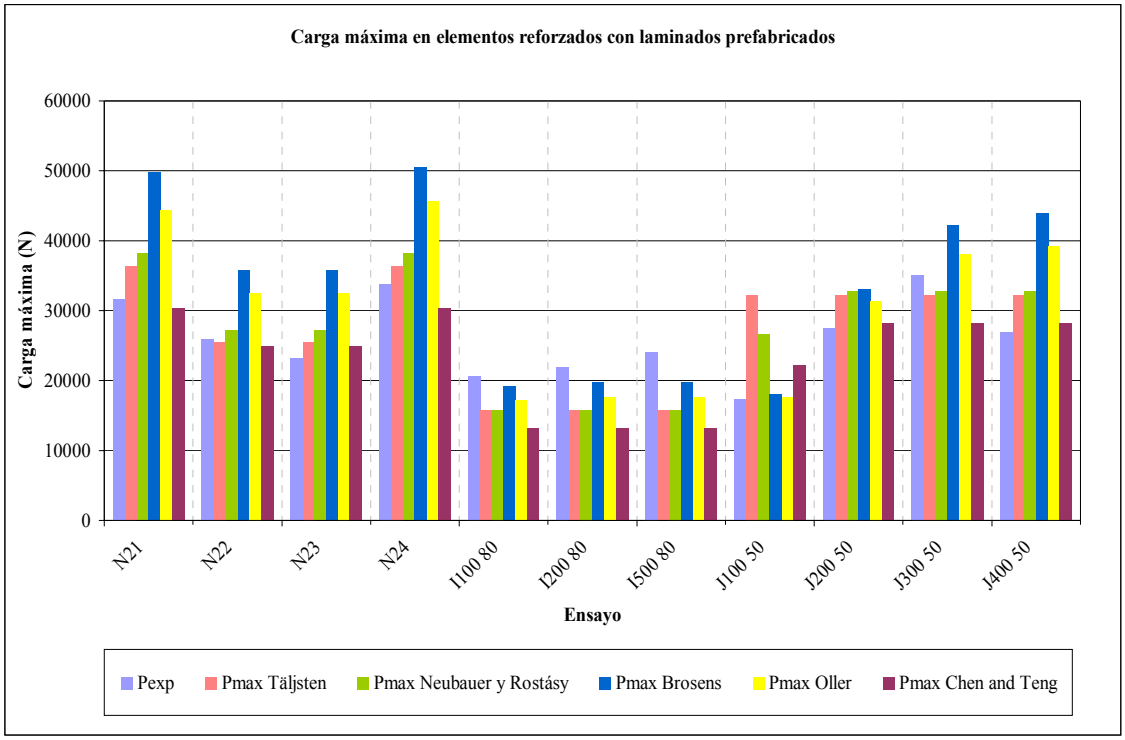

Figura III.4: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos prefabricados

En su campaña experimental, Täljsten utiliza como refuerzo exterior, laminados de fibra de vidrio (GFRP) en dos de los ensayos, y laminados de fibra de carbono (CFRP) en los otros cuatro restantes. Täljsten utiliza longitudes de laminado entre 100 y 400 mm. Para las probetas reforzadas con fibras de vidrio los laminados tenían 80 mm de ancho. Para las reforzadas con fibra de carbono el ancho era de 50 mm.

Finalmente, los resultados obtenidos de los ensayos que hemos estudiado reforzados por laminados "in situ" se presentan en la Tabla III.5:

	FRP in situ		
	Promedio Pmax/Pexp	Desviación estandard	Coeficiente de variación
Hiroyuki and Wu (1997)	10,94	4,31	35%
Tanaka (1996)	2,39	1,01	38%
Maeda (1997)	1,29	0,49	33%
Holzenkampfer (1994)	1,27	0,46	32%
Täljsten (1994)	1,00	0,37	32%
Neubauer y Rostásy (1997)	1,03	0,35	30%
Van Gemert y Brosens (1997)	1,65	1,26	74%
Chen and Teng (2001)	1,37	0,43	26%

FIB (Rostasy)	0,64	0,40	59%
FIB (Niedermeier)	1,86	0,73	35%
Neubauer (2000)	1,41	0,59	38%
Brosens (2001))	1,04	0,41	35%
Oller (2003)	1,11	0,41	33%

Tabla III.5: Análisis estadístico de los modelos estudiados para elementos reforzados con laminados de elementos compuestos "in situ"

De nuevo los modelos de Brosens y Oller se aproximan bastante bien a los resultados experimentales con un 35% y un 33% de coeficiente de variación respectivamente y con un promedio Pmax/Pexp inferior al 10%. Los otros dos que reproducen los resultados de los ensayos de forma bastante fiable son Täljsten y Neubauer y Rostásy con un 32% y un 30% de coeficiente de correlación y un promedio Pmax/Pexp inferior al 3%. Nuevamente son los modelos de Hiroyuchi and Wu y Tanaka los que más se alejan de los resultados experimentales.

En las Figuras III.5 a III.10, se representan todos los ensayos de probetas de hormigón reforzadas con materiales compuestos "in situ" y se compara la carga máxima experimental con una selección de formulaciones de manera análoga a los casos anteriores. En el Anejo 1 se presentan el resto de modelos para los ensayos recopilados.

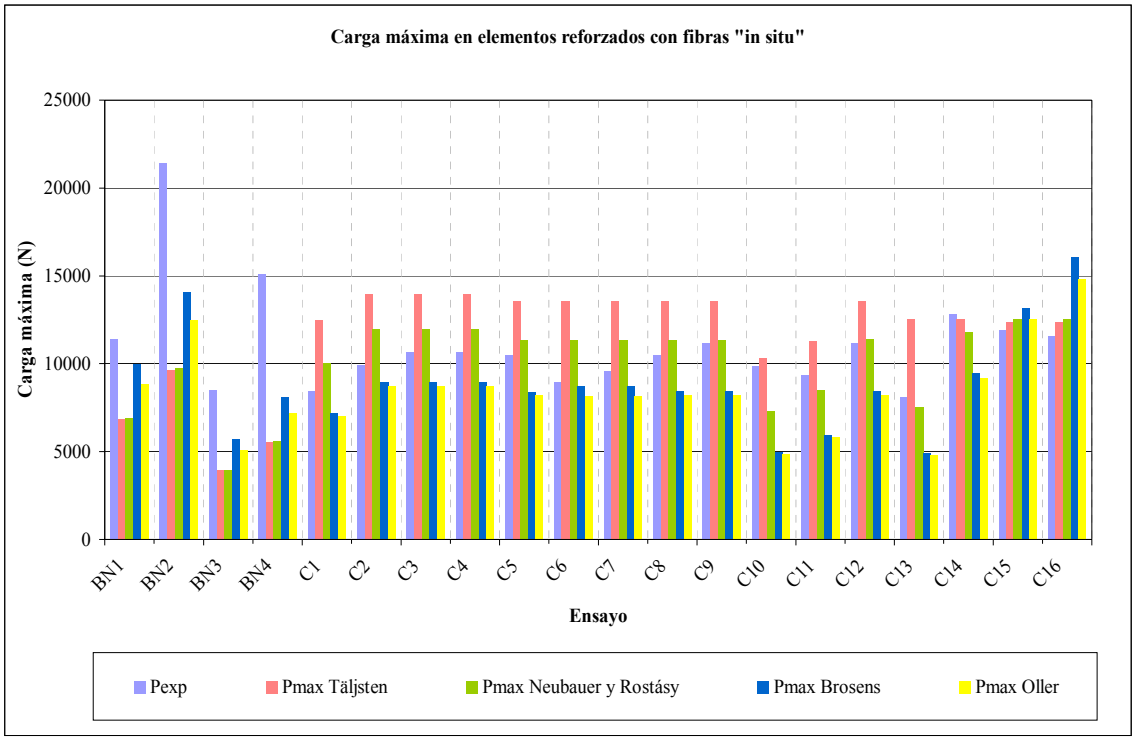

Figura III.5: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos "in situ"

En los ensayos BN1 a BN4 realizados por Bizindavyi y Neale (1999) se observa que la carga máxima de fallo se produce para cargas más elevadas a las que se predicen por los modelos estudiados. Pese a ello, el modelo que mejor se aproxima a esos resultados es el de Brosens. Para los ensayos C1 a C16 realizados por Chajes et al. (1996) se observa que para los trece primeros especimenes con longitudes cortas de laminado (menores de 100 mm), el modelo que mejor se aproxima es el de Neubauer y Rostásy, mientras que para los tres últimos ensayos, con longitudes de laminado mayores (superiores a 100 mm), todos los modelos se aproximan bastante bien siendo las formulaciones de Täljsten son las que mejor se ajustan.

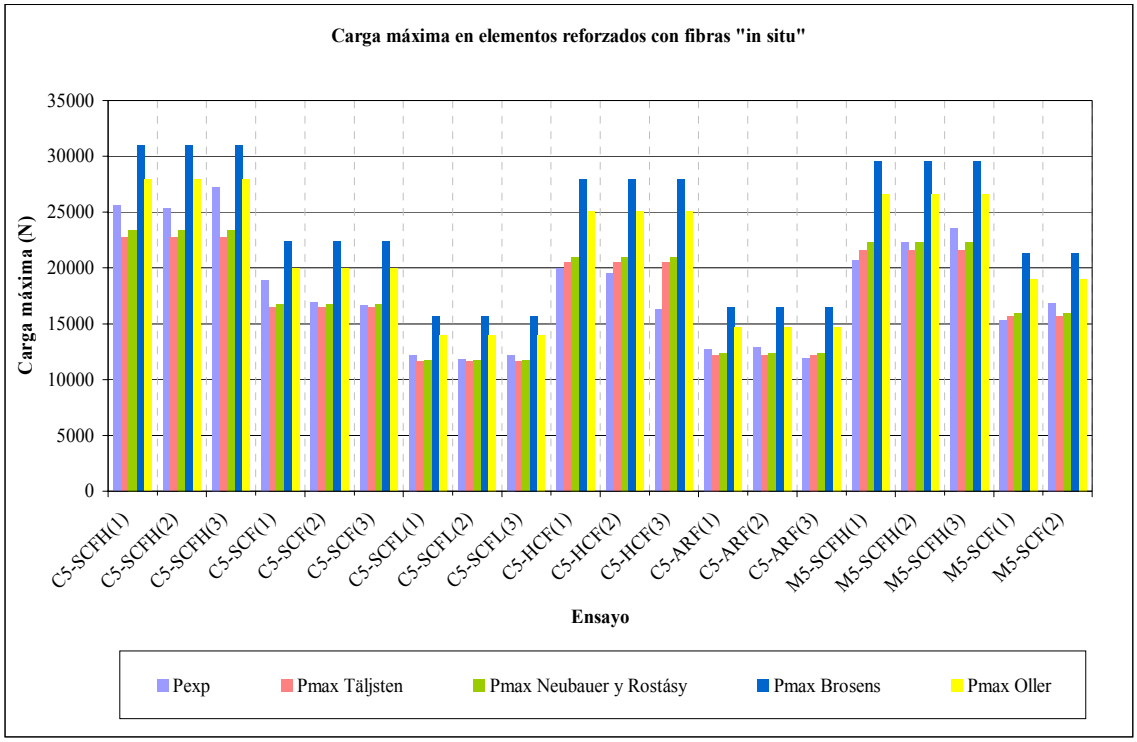

Figura III.6: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos "in situ"

En la Figura III.6 vemos la comparación de cargas máximas experimentales y analíticas para la serie de ensayos (C5-SCFH(1) a C2P-SCF(2)) realizados por Kasumassa Nakaba et al. (2001) en los que la longitud de laminado era la misma para todos los especimenes. Utilizó diferentes materiales de refuerzo (fibra de carbono, aramida) con diferente número de capas. La resistencia del hormigón no era la misma para todos los especímenes. En las Figura III.6 podemos ver que los dos modelos que mejor se ajustan a los datos experimentales son los de Täljsten y el de Neubauer y Rostásy, mientras los de Brosens y Oller, dan una carga superior a la obtenida en todos los casos.

Para el resto de ensayos realizados por Nakaba y que se ilustran en la Figura III.7, se observa de nuevo que son los modelos de Täljsten y de Neubauer y Rostásy, los que mejor se ajustan a los datos experimentales.

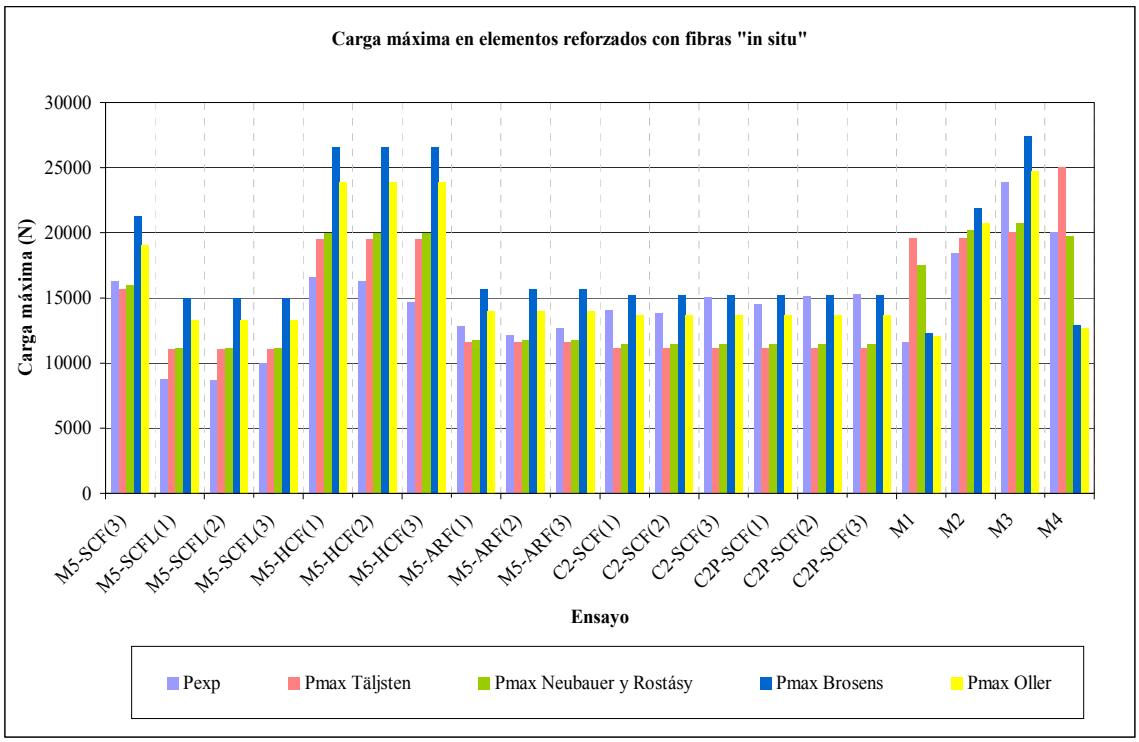

Figura III.7: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos "in situ"

Para los ensayos M1 a M8,realizados por Maeda (1997) e ilustrados en las Figuras III.7 y III.8 los parámetros que se variaron fue la longitud de laminado y la resistencia a compresión del hormigón. En tres de los ensayos el modelo que mejor se aproxima es el de Oller mientras en el resto Täljsten es el que mejor resultados da.

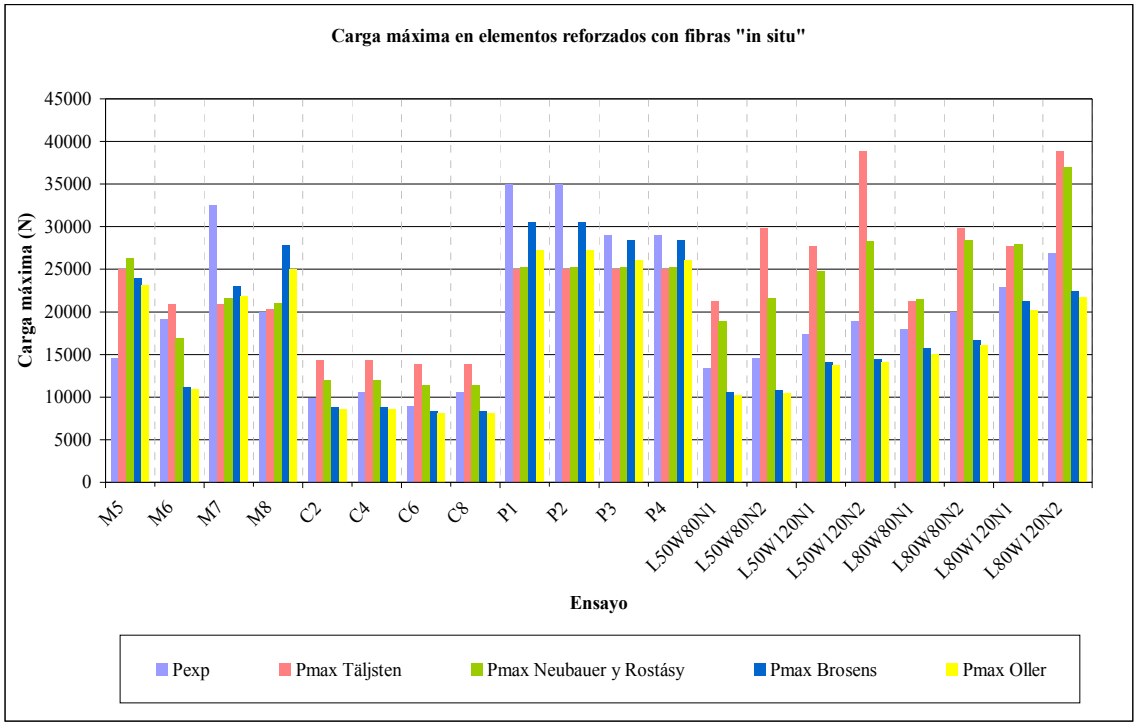

Figura III.8: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos "in situ"

También se puede ver que para los resultados de los cuatro siguientes ensayos (C2 a C8), todos los modelos a excepción del de Täljsten dan valores muy cercanos a los reales donde Neubauer y Rostásy da resultados ligeramente superiores a los reales mientras Brosens y Oller nos dan valores ligeramente inferiores a los obtenidos experimentalmente. Los siguientes cuatro ensayos P1 a P4, realizados por H. Souza y J. Appleton (2001) en los que se varió la longitud de laminado los resultados teóricos obtenidos a partir del modelo de Brosens son los que mejor aproximación da. Para los ensayos realizados por Brosens (2001), L50W80N1 a L200W120N3 se puede ver que los modelos que mejor se aproximan son los de Brosens y Oller.

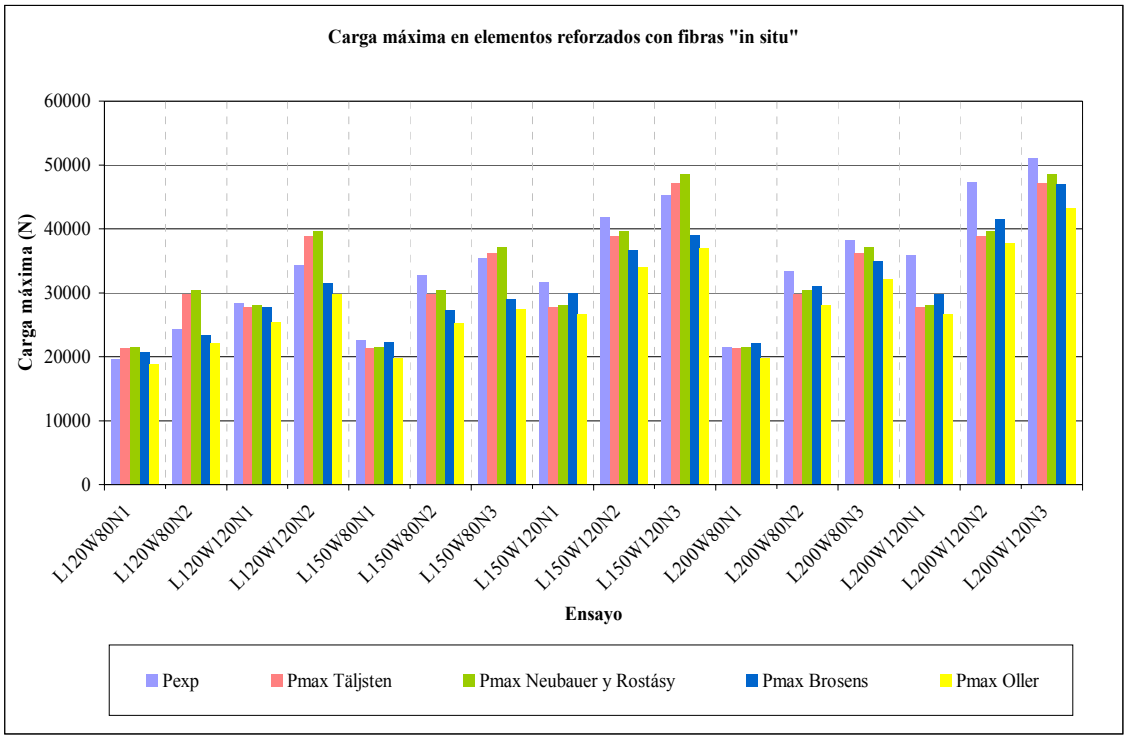

Figura III.9: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos "in situ"

Finalmente, para los ensayos CL-1 a CH-3, realizados por Tripi et al (2000) y Sato y Vecchio (2003) denominados ensayos T1-1 a T4-2, se observa que los modelos analíticos que mejor se aproximan a los resultados experimentales son los modelos de Brosens y Oller.

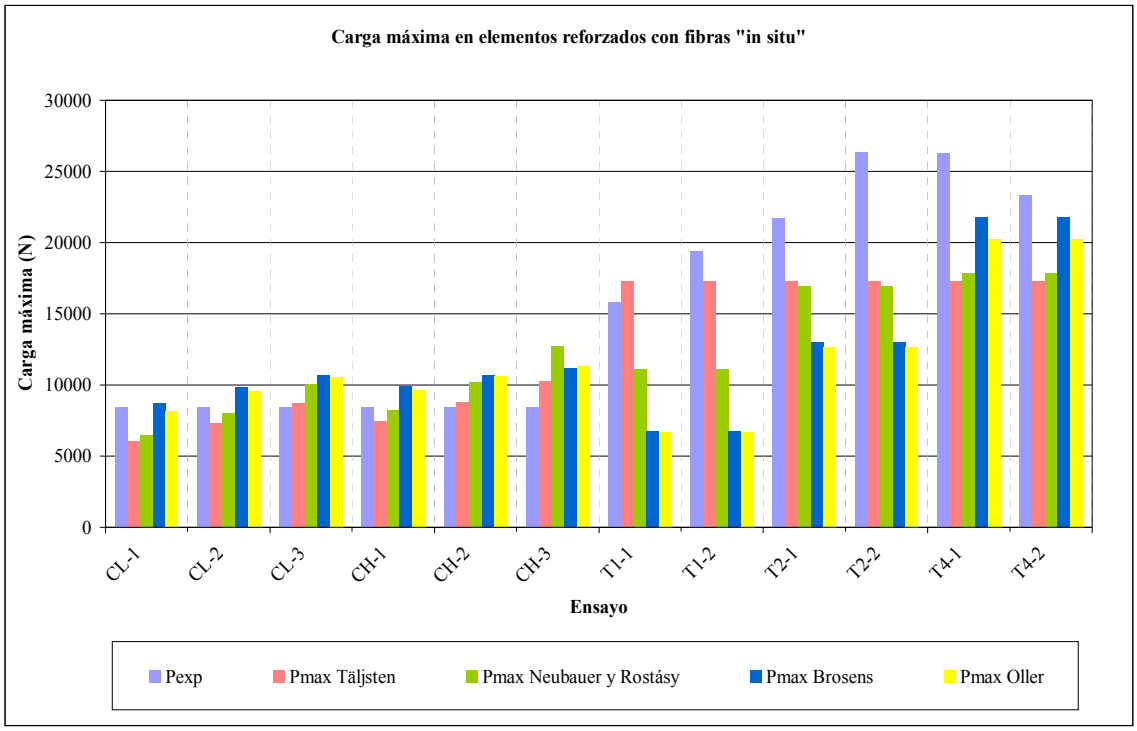

Figura III.10: Carga máxima en elementos reforzados con laminados de materiales compuestos "in situ"

Por tanto, se puede observar después de describir brevemente los resultados obtenidos, que dependiendo de la campaña experimental estudiada, unos modelos se aproximan mejor que otros. Esto se puede deber a no tener suficientemente bien estudiados los fenómenos que se producen en la interfase. Además, no existe un tipo de campaña experimental bien definida y cada serie de ensayos se realiza de manera diferente, lo cual, puede justificar esta variedad de resultados. Por tanto, es necesario definir una serie de instrucciones específicas para la realización de las probetas y de este tipo de ensayos.

III.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE ELEMENTOS REFORZADOS

A continuación se presenta un análisis de los parámetros que influyen en la carga máxima de tracción que se puede transmitir entre laminado y soporte: el ancho del laminado, el espesor del laminado, la resistencia a compresión del hormigón, el módulo de elasticidad del laminado y la longitud del laminado.. Para ello se ha utilizado el modelo de Brosens que es el que mejor describe los fenómenos estudiados.

III.3.1. Influencia del ancho del laminado

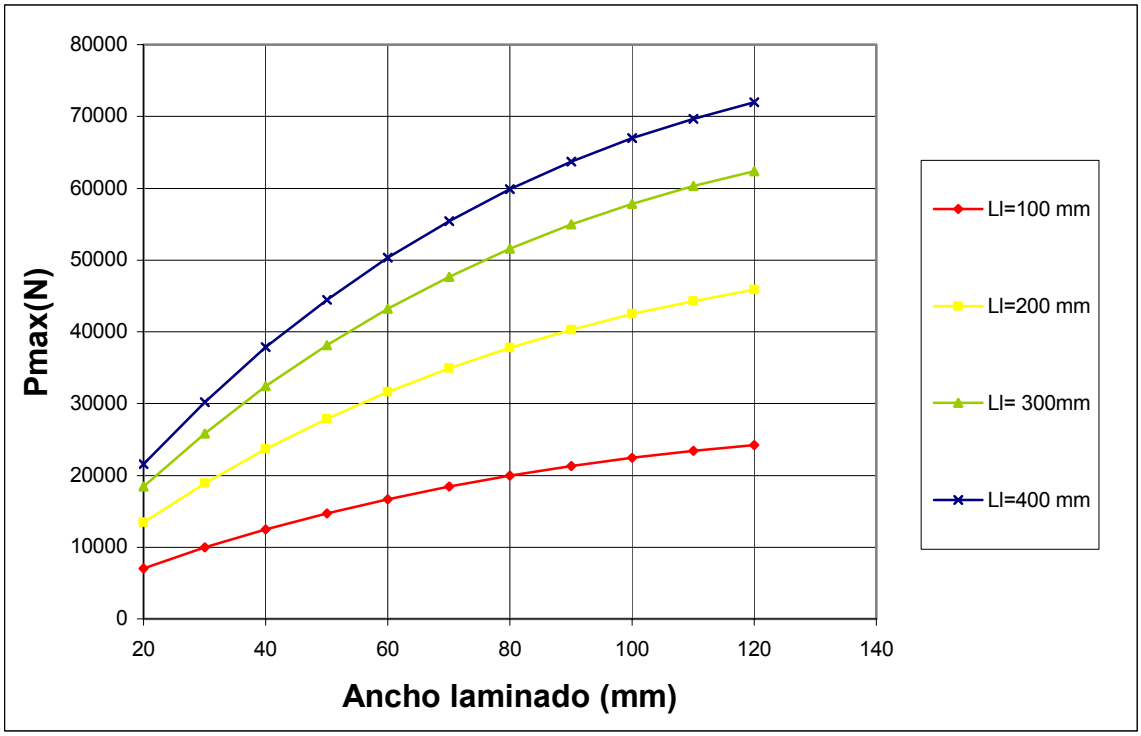

Figura III.11: Carga máxima-ancho del laminado para diferentes longitudes de refuerzo

De la Figura III.11 se puede extraer que a medida que se incrementa el ancho del laminado, aumenta la carga máxima. Sin embargo, cuanto mayor es la longitud del laminado, la carga aumenta con mayor rapidez. Para longitudes de laminado menores, el incremento de la carga máxima es bastante más suave. A pesar de todo, parece que la influencia del ancho es independiente de la longitud de laminado. Tanto para laminados cortos como para laminados largos la influencia del ancho es similar. También se puede observar que para incrementos del ancho del 50%, la fuerza máxima solamente se incrementa el 30% al 40%. Este fenómeno es debido a la dependencia existente entre las tensiones tangenciales y el ancho del laminado.

III.3.2. Influencia del espesor del laminado

Para estudiar la influencia del espesor del laminado se ha escogido el rango de espesores más comúnmente utilizados según la base de datos.

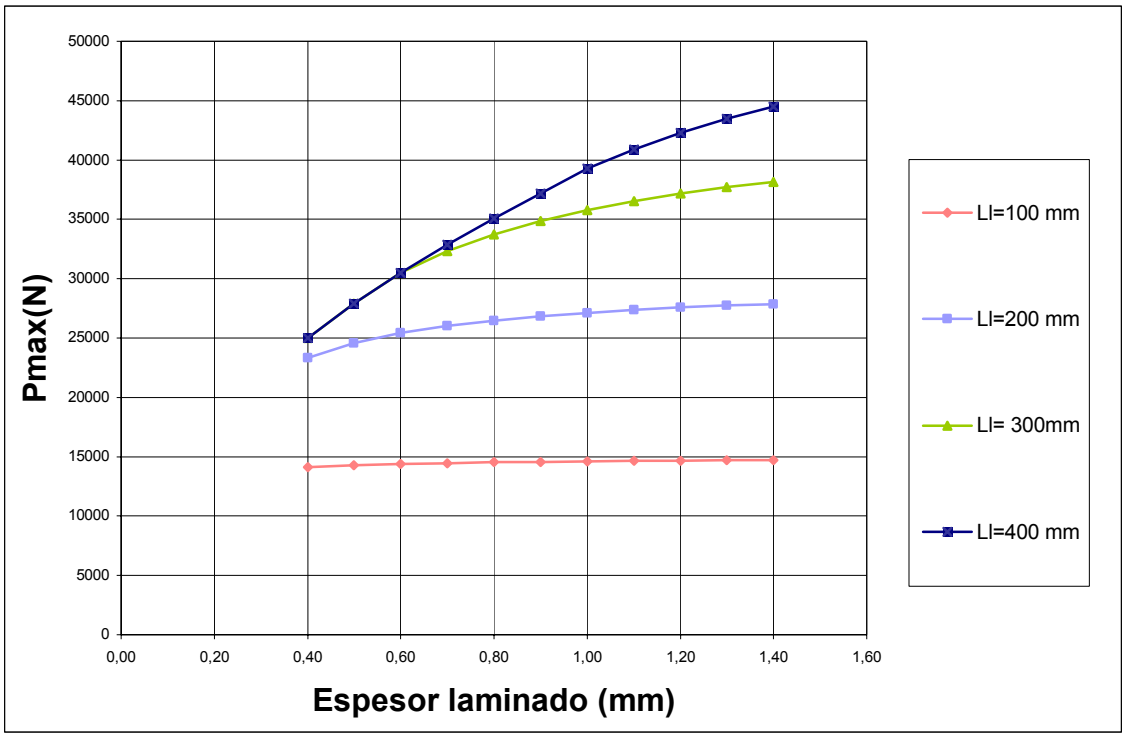

Figura III.12: Carga máxima espesor del laminado para diferentes longitudes de refuerzo

Se puede observar en la Figura III.12 que para laminado cortos la carga máxima apenas varía con el espesor del laminado (es independiente del espesor). A medida que se aumenta la longitud del laminado (longitudes superiores a 200 mm), el incremento de la carga con el espesor se produce con una pendiente suave.

Para laminados con longitudes superiores a 300-400 mm, el aumento de la carga máxima con el espesor se hace mucho más palpable, como se puede observar en la Figura III.12. Para laminados con una longitud de 400 mm si aumentamos un 50% el espesor del laminado, la carga máxima aumenta un 20 %. A pesar de ello, también se observa que para un determinado espesor (1,2 mm), en laminados de 400 mm de longitud, el aumento de la carga máxima no es tan visible y converge a un valor fijo. Esto se debe a que para laminados largos, la carga máxima es proporcional a la raíz cuadrada del espesor del laminado.

III.3.3. Influencia de la resistencia a compresión del hormigón

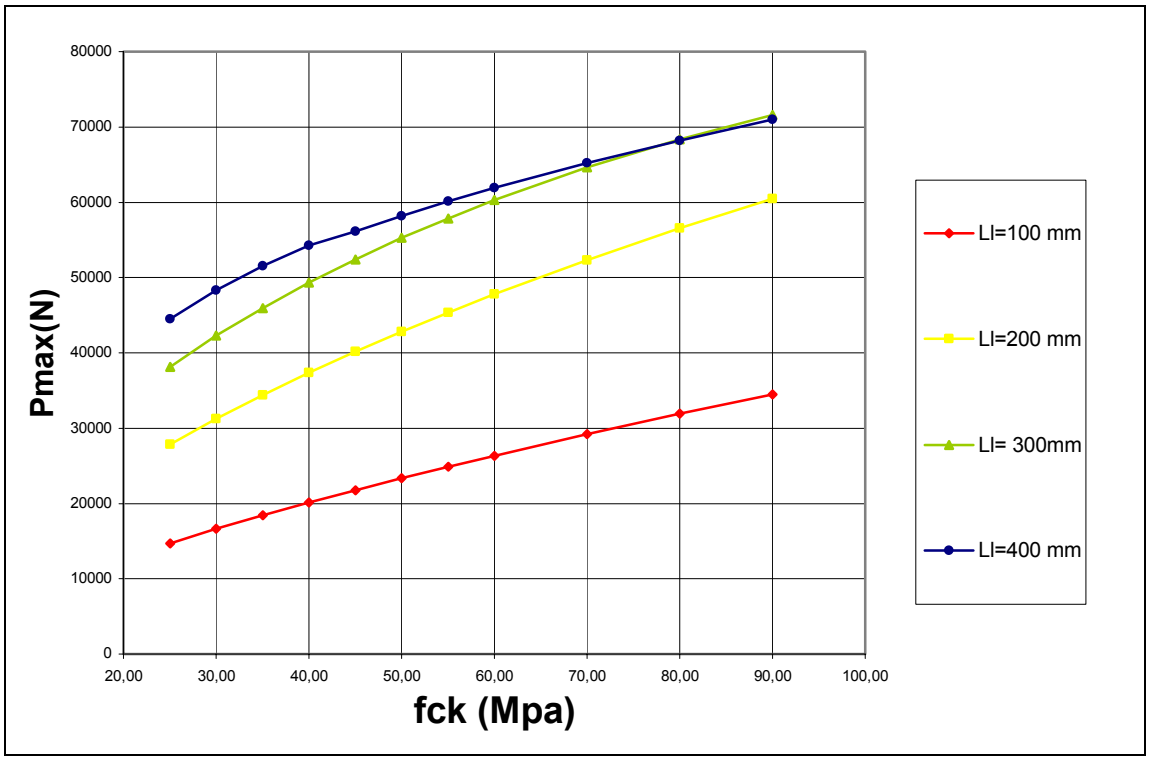

Figura III.13:. Carga máxima resistencia a compresión característica del hormigón para diferentes longitudes de refuerzo

La resistencia del hormigón es un parámetro muy importante a la hora de describir los fenómenos que se producen en la interfase de elementos reforzados con materiales compuestos, ya que entre el hormigón, el adhesivo y el laminado, el elemento que menor resistencia tiene es el hormigón. Al ser éste el elemento débil de la conexión, la rotura se produce en muchas ocasiones por el hormigón, si no existen errores en la colocación del laminado y en la preparación previa. La energía de fractura es directamente proporcional a la resistencia media a tracción, y la tensión tangencial máxima τ_{lm} es un parámetro que depende básicamente de la resistencia media a tracción y de la resistencia media a compresión del hormigón.

En la Figura III.13 se puede observar que para laminados con longitudes menores a 200 mm, la carga máxima aumenta de forma prácticamente lineal con la resistencia del hormigón, aunque con pendientes diferentes. A medida que aumenta la longitud de laminado (a partir de 300 mm), la relación pierde linealidad y a partir de un cierto valor de f_{ck} el valor de carga máxima ya no aumenta.

III.3.4. Influencia del módulo de elasticidad del laminado

Para la realización de la Figura III.14 se han utilizado más longitudes de laminado que en las anteriores para describir mejor los fenómenos que se producen:

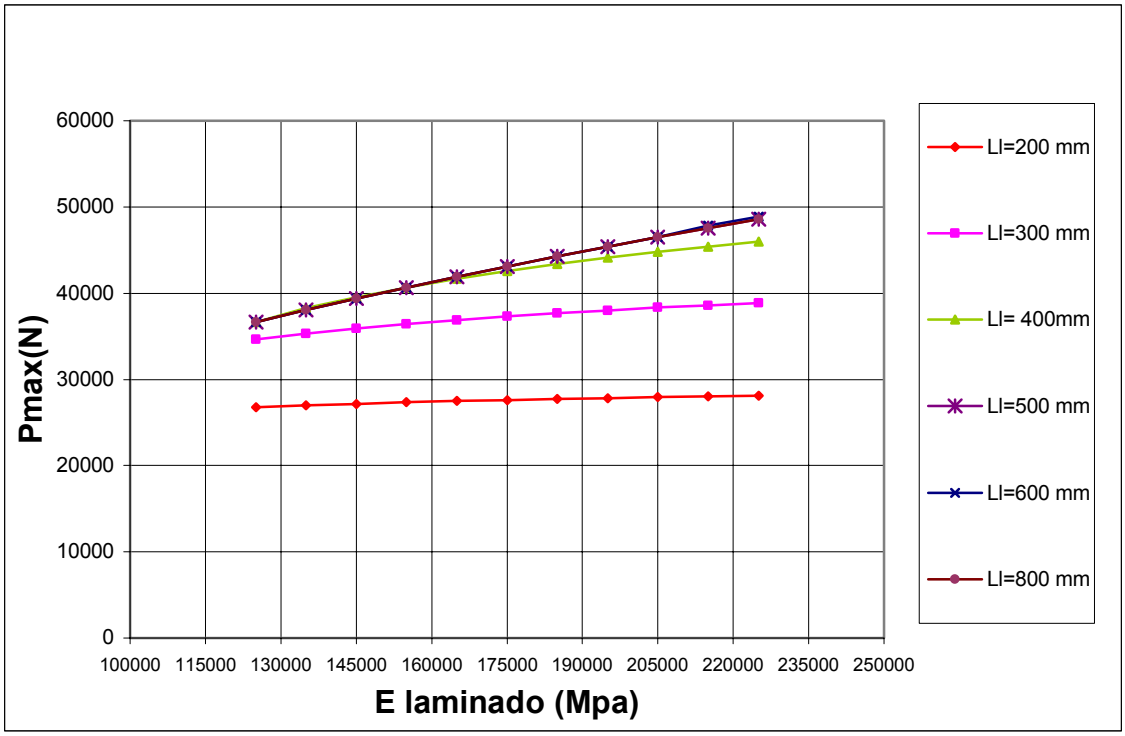

Figura III.14: Carga máxima-módulo elástico de deformación del laminado para diferentes longitudes de refuerzo

En la Figura III.14 se puede observar que para laminados cortos, a medida que se aumenta el módulo de elasticidad, la carga máxima prácticamente no se ve alterada. Ésta depende en poca medida del módulo elástico de deformación del laminado. Con el aumento de la longitud de refuerzo, el incremento de la carga máxima se empieza a notar. Para laminados suficientemente largos (mayores de 400 mm) se observa un fenómeno bastante curioso. La carga aumenta a medida que se aumenta el módulo de elásticidad del laminado independientemente de la longitud del laminado. Se debe a que a partir de una cierta longitud definida en apartados anteriores como longitud de anclaje, la carga máxima no depende de la longitud del laminado y por ello aumenta a medida que aumentamos el módulo de elasticidad de forma proporcional a la raíz cuadrada de dicho módulo.

III.3.5. Influencia de la longitud del laminado

Como se puede observar en la Figura III.15, la influencia de la longitud del laminado se ha estudiado en función de la resistencia característica del hormigón.

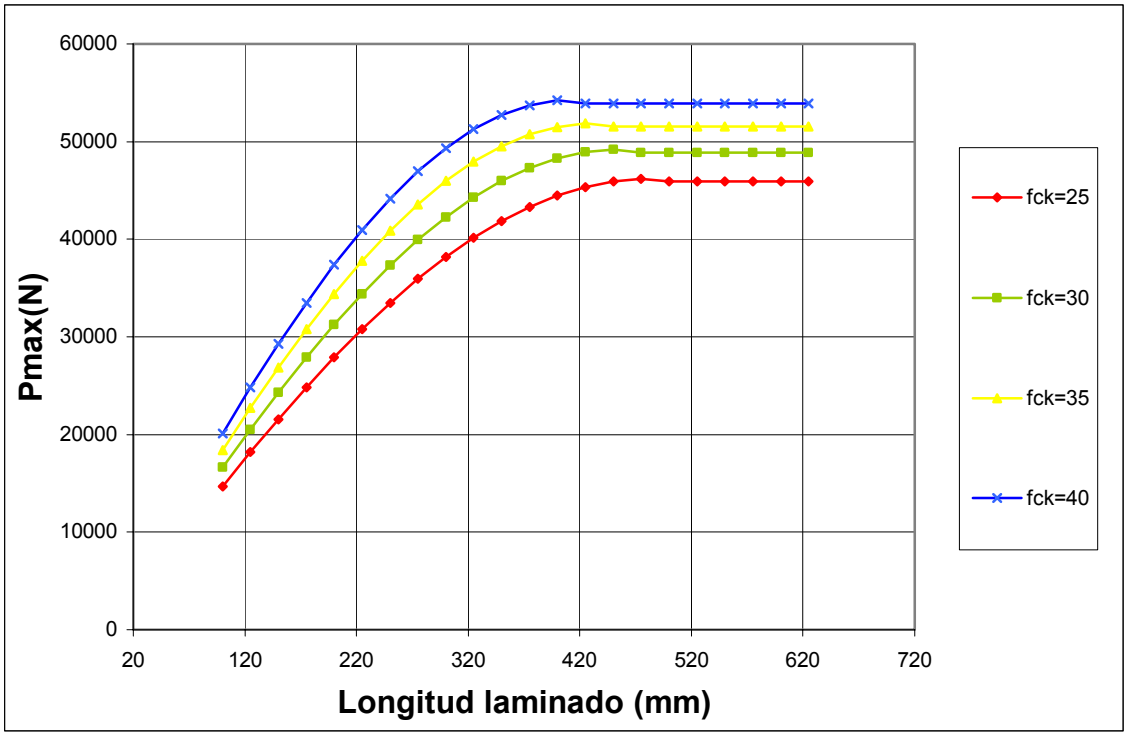

Figura III.15: Carga máxima-longitud de laminado para diferentes resistencias características de proyecto

En la Figura III.15 se observa que la curva tiene una misma forma para las diferentes resistencias características del hormigón a medida que aumenta la longitud del laminado. Lo único destacable de la resistencia del hormigón es que ha medida que aumenta, se alcanza una fuerza máxima para longitudes de laminado más pequeñas. Como se puede observar en la Figura III.15, para un hormigón con una resistencia característica de 25 MPa la carga máxima de rotura se alcanza para una longitud de 485 mm, mientras que para un hormigón de 45 MPa dicha longitud de laminado es de 414 mm. De la curva obtenida para cada resistencia, se observa que a medida que aumentamos la longitud de laminado, aumenta rápidamente la carga. Para laminados cortos, la longitud de laminado es el parámetro más determinante en la carga máxima. Existe un determinado valor a partir del cual al aumentar la longitud de refuerzo, la carga ya no varía.