



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona



Departament de Construccions Arquitectòniques I

**REPARACIÓN Y
REFUERZO DE PAREDES
DE OBRA DE
FÁBRICA. ESTUDIO
EXPERIMENTAL DE LA
RESPUESTA ANTE
TENSIONES DE CORTE**

TESIS DOCTORAL DE:
GERARDO ARAIZA GARAYGORDÓBIL

DIRIGIDA POR:
PERE ROCA I FABREGAT

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE BARCELONA

TUTORÍA:
ALBERT CASALS BALAGUE

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA DE BARCELONA

BARCELONA, JUNIO DE 2005



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona



Departament de Construccions Arquitectòniques I

**REPARACIÓN Y
REFUERZO DE PAREDES
DE OBRA DE
FÁBRICA. ESTUDIO
EXPERIMENTAL DE LA
RESPUESTA ANTE
TENSIONES DE CORTE**

TESIS DOCTORAL DE:
GERARDO ARAIZA GARAYGORDÓBIL

DIRIGIDA POR:
PERE ROCA I FABREGAT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE BARCELONA

TUTORÍA:
ALBERT CASALS BALAGUE
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA DE BARCELONA

BARCELONA, JUNIO DE 2005

*A ERIKA
A MIS PADRES JUAN CARLOS Y GRISELDA
A MIS HERMANOS LUCÍA, DIEGO, BLANCA, JUAN CARLOS Y RAMIRO*

A G R A D E C I M I E N T O S

AGRADEZCO EN PRIMER TÉRMINO A PERE ROCA, SU ESPECIAL ATENCIÓN Y APOYO AL DIRIGIR ESTA INVESTIGACIÓN.

HABRÍA SIDO IMPOSIBLE LLEVAR A CABO ESTE TRABAJO SIN EL SOPORTE ECONÓMICO OTORGADO POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA Y POR EL FONDO NACIONAL PARA LA CULTURA Y LAS ARTES DE MÉXICO.

AGRADEZCO EL VALIOSO APOYO TÉCNICO Y LA DONACIÓN DE MATERIALES DE LAS EMPRESAS *SIKA, S.A. ESPAÑA; DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS ESPAÑA, S.A.; FUSTES DEL PIRINEU CATALÀ, S.A. Y CERÁMICAS CALAF, S.A.*

EL MEU AGRAÏMENT I ESTIMACIÓ MÉS SINCERS A LA MEVA GRAN AMIGA EULÀLIA PRESAS, QUI EM VA OFERIR CASA SEVA, ELS SEUS CONSELLS I LA MÉS GRATA COMPANYIA.

MI GRATITUD A MARIA JOSEFA ECHARTE, UNA AMIGA VERDADERAMENTE ESPECIAL A QUIEN ADMIRO POR SU ARROJO, OPTIMISMO Y AMOR A LA VIDA.

A MI HERMANO JUAN CARLOS, QUIEN ME ALENTÓ A SEGUIR ADELANTE A PESAR DE LAS DIFICULTADES.

A CAMILO BERNAD Y A ERNESTO DÍAZ POR SU APOYO TÉCNICO EN LA REALIZACIÓN DE LAS CAMPAÑAS EXPERIMENTALES.

A TODO EL PERSONAL DOCENTE Y ADMINISTRATIVO DE LOS DEPARTAMENTOS DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I, EN ESPECIAL A JOAN MAURI POR SU AMABILIDAD Y DISPOSICIÓN DE SERVICIO.

A MIS COLEGAS Y AMIGOS EN LA UNIVERSIDAD, ESPECIALMENTE A BÁRBARA, LUIS, SARA, GEORGIA, PABLO Y GILBERT.

GRACIAS ERIKA, POR HABERME APOYADO TANTO Y POR COMPARTIR CONMIGO ESTE GRAN RETO.

R E S U M E N

Durante la última década se han desarrollado cuantiosos trabajos de investigación en torno a las estructuras de obra de fábrica, en su mayoría enfocadas al análisis del comportamiento y al desarrollo de técnicas y procesos de intervención para la restitución o incremento de las propiedades resistentes de las mismas. En el ámbito específico de la optimización e innovación de tratamientos para la reparación de paredes, se ha incidido en la implementación de resinas epoxi y cementos mejorados. Los estudios dirigidos a incrementar las propiedades resistentes de las paredes se han volcado hacia la utilización de materiales compuestos FRP.

Esta investigación está especialmente motivada por la vulnerabilidad de los elementos estructurales de obra de fábrica ante las acciones horizontales y las tensiones de tracción y cortante que éstas provocan. Las estructuras se ven afectadas por la alteración de las condiciones de tensión a las que están sujetas, ya sea por los esfuerzos de flexión y cortante ocasionados por actividad sísmica o viento, o por incidencias de vibración. También es un factor de riesgo el decremento de las propiedades resistentes ocasionado por contaminantes atmosféricos o agentes biológicos.

Este es un estudio de tipo experimental, enfocado al análisis de la respuesta mecánica y resistente de las paredes de obra de fábrica sujetas a tensiones de cortante bajo condiciones de carga uniaxial o biaxial. Se investiga la eficiencia de la reparación por medio de inyección de resina líquida epoxi y por rejuntado con morteros epoxico o cementicio, o refuerzos utilizando compuestos CFRP, GFRP y AFRP y aplicaciones de placas de madera micro-laminada o embaldosado cerámico. El trabajo se fundamenta en cuatro campañas experimentales en las que se han llevado a cabo ensayos utilizando paneles y probetas de obra de fábrica de ladrillo macizo.

Se establecen modelos de comportamiento a partir del análisis de los resultados obtenidos en las campañas experimentales. A través de los parámetros observados se ha analizado cualitativamente la influencia en la resistencia y rigidez de los tratamientos de reparación y refuerzo. Se determinan las curvas de comportamiento de las muestras en términos de tensión-deformación de las envolventes de rotura. Estos estudios se realizan tanto para carga monotónica creciente como para carga cíclica. Por último se lleva a cabo un análisis comparativo de la eficacia de los diferentes tratamientos de reparación y refuerzo estudiados.

SUMMARY

During the last decade, a significant effort research has been addressed to the study of the mechanical response and strength techniques for masonry structures. Most of these studies are focused on the development of techniques for the mechanical behavior of improvement. Particularly, the use of epoxy resin and special cements has been explored.

The uses of Fiber Reinforced Polymers (FRP) have also been widely studied with the objective of improve the mechanical properties and the strength of the wall. There are many factors that impulse all this developments. The high vulnerability of masonry structural members, in tension and shear, generates an increment of the risk of structural problems and instability.

The improvement response of masonry subjected to stresses due to changes in use, earthquakes, wind, induced vibration or reduction of the resistance for biological or atmospheric aggression, are some of the needs that new materials and reinforcements must fulfill.

This experimental study is focused on the analysis of the mechanical response of masonry walls, under simultaneous shear forces and in-plane uniaxial and biaxial load conditions. The specimens are retrofitted with liquid epoxy resin injection or special mortars, and reinforced with CFRP, GFRP and AFRP overlays, or wood plates and external applications of thin bricks. Four experimental programs were made on small walls and solid brick masonry specimens. After the analysis of the experimental results, behavior models are established.

A qualitative evaluation of the effectiveness of different reinforcing and retrofitting procedures is also made; and additionally, experimental failure criteria for both, monotonic and cyclic loading for these studies is shown. Finally, in order to measure the effectiveness, a comparative analysis referring to the different treatments studied is reported.

ÍNDICE

PÁGINA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. METODOLOGÍA	7
1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	8

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1. REVISION DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO	13
2.1.1. Contenido del documento.....	13
2.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE OBRA DE FÁBRICA	13
2.2.1. Generalidades.....	13
2.2.2. Comportamiento de las paredes sometidas a estados de tensión uniaxial.....	14
2.2.3. Comportamiento de las paredes sometidas a estados de tensión biaxial.....	17
2.2.4. Respuesta de las juntas de mortero ante las tensiones de corte.....	20
2.3. TÉCNICAS DE ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE OBRA DE FÁBRICA	22
2.3.1. Introducción.....	22
2.3.2. Ensayos de componentes individuales.....	22
2.3.3. Ensayos de pequeños ensamblajes.....	23
2.3.4. Ensayos de prismas.....	27
2.3.5. Ensayos de paneles.....	30
2.3.6. Técnicas de ensayo a cortante.....	32
2.4. REPARACION DE PAREDES POR MEDIO DE INYECCION DE LECHADAS, RESTITUCIÓN Y REJUNTADO DE MORTEROS	49
2.4.1. Introducción.....	49
2.4.2. Inyección de mezclas conglomerantes.....	50
2.4.2.1. Respuesta de los especímenes tratados con inyección de lechadas ante las tensiones de compresión.....	54
2.4.2.2. Comportamiento ante las tensiones de cortante.....	55
2.4.2.3. Incremento de la resistencia lateral de las paredes en su propio plano.....	58

2.4.3. Rejuntado.....	61
2.5. REFUERZO DE PAREDES CON COMPUESTOS LAMINADOS Y TEJIDOS	
FRP.....	62
2.5.1. Introducción.....	62
2.5.2. Refuerzo ante esfuerzos de flexión.....	63
2.5.3. Refuerzo ante esfuerzos de cortante.....	82
 C A P Í T U L O 3 . D I S E Ñ O D E L A S C A M P A Ñ A S E X P E R I M E N T A L E S	
3.1. INTRODUCCIÓN.....	99
3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PANELES REPARADOS CON	
INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE	
MORTERO.....	103
3.2.1. Introducción.....	103
3.2.2. Fabricación y manipulación de los paneles.....	103
3.2.3. Procedimiento de ensayo.....	105
3.2.4. Montaje.....	109
3.2.5. Estado de deterioro de los paneles antes de la reparación.....	112
3.2.6. Programa de ensayos.....	115
3.2.7. Materiales utilizados para reparación de los paneles.....	116
3.2.7.1. Mortero tixotrópico base cemento.....	116
3.2.7.2. Adhesivo tixotrópico rígido epoxi.....	116
3.2.7.3. Resina epoxi líquida para inyección.....	117
3.2.8. Procesos de reparación.....	117
3.3. CAMPAÑA DE ENSAYOS DE ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON	
TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP.....	125
3.3.1. Introducción.....	125
3.3.2. Fabricación de las probetas.....	125
3.3.3. Procedimiento de ensayo.....	126
3.3.4. Montaje.....	126
3.3.5. Sistemas de refuerzo utilizados en las probetas.....	127
3.3.5.1. Laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1.....	127
3.3.5.2. Tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1.....	128
3.3.6. Programa de ensayos.....	129
3.3.7. Procedimientos de aplicación.....	131
3.3.7.1. Refuerzo con compuesto de laminado de fibra de carbono.....	132

3.3.7.2. Refuerzo con compuesto de tejido de fibra de carbono.....	135
3.3.8. Equipos e instrumentación.....	138
3.4. CAMPAÑA DE ENSAYOS DE ROTURA DE PANELES REFORZADOS CON	
TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP.....	139
3.4.1. Introducción.....	139
3.4.2. Fabricación y manipulación de los paneles.....	139
3.4.3. Procedimiento de ensayo.....	139
3.4.4. Montaje.....	140
3.4.5. Sistemas de refuerzo.....	141
3.4.6. Patrones de aplicación de los sistemas de refuerzo.....	141
3.4.7. Programa de ensayos.....	143
3.4.8. Aplicación de los sistemas de refuerzo a los paneles.....	143
3.4.8.1. Aplicaciones de laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1.....	144
3.4.8.2. Aplicaciones de tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1.....	145
3.5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DE ROTURA DE PROBETAS	
REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS MATERIALES.....	147
3.5.1. Introducción.....	147
3.5.2. Probetas.....	147
3.5.3. Procedimiento de ensayo.....	148
3.5.4. Estructura y organización de los ensayos.....	150
3.5.5. Sistemas de refuerzo.....	152
3.5.5.1. Compuesto GFRP.....	152
3.5.5.2. Compuesto AFRP.....	154
3.5.5.3. Enchapado de madera micro-laminada.....	155
3.5.5.4. Embaldosado cerámico.....	156
3.5.6. Procedimientos de aplicación de los sistemas de refuerzo.....	156
3.5.6.1. Refuerzo GFRP.....	156
3.5.6.2. Refuerzo AFRP.....	160
3.5.6.3. Refuerzo con madera micro-laminada.....	162
3.5.6.4. Refuerzo con embaldosado cerámico.....	165
3.5.7. Equipo, instrumentación y montaje de los ensayos.....	165
 C A P Í T U L O 4 . E J E C U C I Ó N D E L O S E N S A Y O S	
4.1. INTRODUCCIÓN.....	171
4.2. ROTURA DE PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA	
LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO.....	173

4.2.1. Introducción.....	173
4.2.2. Ensayo del panel 1.....	173
4.2.3. Ensayo del panel 2.....	174
4.2.4. Ensayo del panel 3.....	175
4.2.5. Ensayo del panel 4.....	176
4.2.6. Ensayo del panel 5.....	177
4.2.7. Ensayo del panel 6.....	179
4.2.8. Ensayo del panel 7.....	180
4.2.9. Resumen de resultados.....	181
4.3. ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON TEJIDOS Y LAMINADOS	
CFRP.....	183
4.3.1. Introducción.....	183
4.3.2. Ensayos del conjunto <i>Sin</i>	183
4.3.3. Ensayos del conjunto <i>Par</i>	184
4.3.4. Ensayos del conjunto <i>Per</i>	186
4.3.5. Ensayos del conjunto <i>D</i>	187
4.3.6. Ensayos del conjunto <i>V</i>	188
4.3.7. Ensayos del conjunto <i>X</i>	189
4.3.8. Ensayos del conjunto <i>Wpar</i>	190
4.3.9. Ensayos del conjunto <i>W45</i>	191
4.3.10. Ensayos del conjunto <i>WZ45</i>	192
4.3.11. Ensayos del conjunto <i>WZ45d</i>	193
4.3.12. Parámetros de medición y resumen de resultados.....	194
4.4. ROTURA DE PANELES REFORZADOS CON TEJIDOS Y LAMINADOS	
CFRP.....	195
4.4.1. Introducción.....	195
4.4.2. Ensayo del panel 8.....	196
4.4.3. Ensayo del panel 9.....	197
4.4.4. Ensayo del panel 10.....	198
4.4.5. Ensayo del panel 11.....	199
4.4.6. Ensayo del panel 12.....	201
4.4.7. Ensayo del panel 13.....	202
4.4.8. Resumen de resultados.....	202
4.5. ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS	
MATERIALES.....	205
4.5.1. Introducción.....	205

4.5.2. Ensayos de los grupos sometidos a procesos monotónicos.....	205
4.5.2.1. Conjuntos del grupo SM.....	205
4.5.2.2. Conjuntos del grupo GM.....	207
4.5.2.3. Conjuntos del grupo GM1.....	209
4.5.2.4. Conjuntos del grupo GM2.....	210
4.5.2.5. Conjuntos del grupo GM3.....	212
4.5.2.6. Conjuntos del grupo AM.....	213
4.5.2.7. Conjuntos del grupo MM1.....	215
4.5.2.8. Conjuntos del grupo CM1.....	217
4.5.3. Ensayos de los grupos sometidos a procesos cíclicos.....	218
4.5.3.1. Conjuntos del grupo SC.....	218
4.5.3.2. Conjuntos del grupo GC1.....	220
4.5.3.3. Conjuntos del grupo GC3.....	221
4.5.3.4. Conjuntos del grupo AC1.....	222
4.5.3.5. Conjuntos del grupo AC2.....	224
4.5.3.6. Conjuntos del grupo MC1.....	226
4.5.3.7. Conjuntos del grupo CC1.....	227
4.5.4. Resumen de resultados.....	229

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN.....	233
5.2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO.....	235
5.2.1. Introducción.....	235
5.2.2. Análisis de resultados.....	235
5.2.3. Comportamiento.....	237
5.2.4. Consideraciones finales.....	248
5.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PROBETAS REFORZADAS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP.....	251
5.3.1. Introducción.....	251
5.3.2. Análisis de resultados.....	251
5.3.3. Consideraciones finales.....	255
5.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PANELES REFORZADOS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP.....	257
5.4.1. Introducción.....	257

5.4.2. Análisis de resultados.....	257
5.4.3. Comportamiento.....	259
5.4.4. Consideraciones finales.....	260
5.5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PROBETAS REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS MATERIALES.....	263
5.5.1. Introducción.....	263
5.5.2. Comportamiento de las probetas no reforzadas.....	264
5.5.3. Comportamiento de las probetas reforzadas con GFRP.....	267
5.5.4. Comportamiento de las probetas reforzadas con AFRP.....	272
5.5.5. Comportamiento de las probetas reforzadas con madera micro-laminada.....	275
5.5.6. Comportamiento de probetas reforzadas con baldosas cerámicas.....	278
5.5.7. Modelos de comportamiento.....	281
5.5.7.1. Modelos propuestos para las curvas tensión-deformación.....	281
5.5.7.2. Modelos propuestos para las envolventes de rotura.....	284
5.5.8. Comparativo de la eficacia de los tratamientos de refuerzo.....	288

C A P Í T U L O 6 . C O N C L U S I O N E S Y P E R S P E C T I V A S D E D E S A R R O L L O

6.1. CONTENIDO.....	293
6.2. CONCLUSIONES REFERENTES AL ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	293
6.3. CONCLUSIONES SOBRE LOS TRATAMIENTOS DE REPARACIÓN.....	294
6.4. CONCLUSIONES REFERENTES A LOS SISTEMAS DE REFUERZO.....	295
6.5. CONCLUSIONES REFERENTES A LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	298
6.6. PERSPECTIVAS DE DESARROLLO.....	298
REFERENCIAS.....	301

A N E J O S

ANEJO I. MATERIALES DE REPARACIÓN Y REFUERZO UTILIZADOS.....	311
ANEJO 2. ENSAYOS AUXILIARES.....	337
ANEJO 3. CURVAS $\sigma - \varepsilon$ OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS DE TRIPLETAS.....	343

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

	<i>PÁGINA</i>
Fig. 2.1 — Estados de tensión de las piezas y el mortero en prismas sujetos a compresión vertical (Anthoine, 1992).....	15
Fig. 2.2 — Puntos de estabilidad en ensayo bajo carga cíclica: (a) proceso completo; (b) detalle de punto de estabilidad (Naraine y Sinha, 1989).....	16
Fig. 2.3 — Proyección en plano de la envolvente de rotura de fábrica de ladrillo, $\sigma_1 - \sigma_2$ considerando variaciones de θ (Page, 1981).....	18
Fig. 2.4 — (a) configuración de los ensayos cíclicos de compresión biaxial; (b) colocación de transductores de desplazamiento en los especímenes (Alshebani y Sinha, 2000).....	19
Fig. 2.5 — Puntos de estabilidad en el ensayo $f_n/f_p = 1.0$, Alshebani y Sinha, (2000).....	19
Fig. 2.6 — Envolventes de rotura resueltas por Alshebani y Sinha, (2000) y las obtenidas por otros investigadores.....	20
Fig. 2.7 — Subdivisión de elementos finitos del modelo propuesto por Smith y Carter (1971).....	21
Fig. 2.8 — Diagrama representativo de la configuración de ensayo (Smith y Carter, 1971).....	21
Fig. 2.9 — Ensayo de piezas de fábrica bajo compresión uniaxial perpendicular (a) y paralela (b) a la cara de unión.....	22
Fig. 2.10 — Ensayo de prismas de mortero sujetas a tensión uniaxial (a), ensayo brasileño (b) y ensayo a flexión (c) (Anthoine, 1992).....	23
Fig. 2.11 — Dispositivo de carga para la determinación de la resistencia a flexión (EN 196-1, 1996).....	23
Fig. 2.12 — Algunos ensamblajes de dos (a) o tres piezas (b) utilizados para la determinación de la resistencia a cortante (Anthoine, 1992).....	24
Fig. 2.13 — Esquema de montaje para ensayo de resistencia de cortante (Anthoine, 1992).....	24
Fig. 2.14 — Dimensiones de la muestra de ensayo a cortante (norma española EN 1052-3, 2002).....	25
Fig. 2.15 — Fase de pre-compresión (Norma española EN 1052-3).....	26
Fig. 2.16 — Fase de cortante (Norma española EN 1052-3).....	26
Fig. 2.17 — (a) Prisma de piezas apiladas y (b) prisma de aparejo común (Anthoine,	

	<i>PÁGINA</i>
1992).....	27
Fig. 2.18 — Probeta de fábrica de albañilería (norma española EN 1052-1, 1999).....	28
Fig. 2.19 — Pequeño panel y prisma típicos, sugeridos por RILEM, (1994-a).....	30
Fig. 2.20 — Ensayo general biaxial (a) y ensayo uniaxial vertical (b) de paneles de fábrica (Anthoine, 1992).....	31
Fig. 2.21 — Ensayos de paneles de fábrica sujetos a estados de tensión uniforme, (Anthoine, 1992).....	31
Fig. 2.22 — Configuraciones de ensayo de cortante (Atkinson et al., 1989).....	33
Fig. 2.23 — Esquema del aparato utilizado para ensayos de cortante directo: (a) vista lateral; (b) vista superior (Atkinson et al., 1989).....	35
Fig. 2.24 — Tipo de probeta utilizada por Atkinson et al, 1999. (a) vista general; (b) esquema de ensayo.....	36
Fig. 2.25 — Bastidor utilizado para la colocación de los especímenes en el aparato de ensayo. (a) Placa y piezas superiores del espécimen (vista superior de sección); (b) placa y piezas inferiores del espécimen (vista superior de sección); (c) vista lateral del espécimen confinado en el bastidor; (d) vista frontal. (Atkinson et al., 1989).....	37
Fig. 2.26 — Comportamiento de las juntas secas en la fábrica. Criterio de fallo para tensiones de compresión bajas y altas (Lourenço y Ramos, 2004).....	39
Fig. 2.27 — Diferentes tipos de ensayos de cortante: (a) Ensayo de probeta de dos piezas; (b) ensayo utilizado por van der Pluijm (1999); y (c) ensayo de tripleta, de Lourenço y Ramos (2004)	40
Fig. 2.28 — Criterio de fallo de las juntas secas (Lourenço y Ramos, 2004).....	41
Fig. 2.29 — Ensayo típico de espécimen de dos piezas. Hofmann y Stockl (1986).....	43
Fig. 2.30 — Ensayo perfeccionado de espécimen de dos piezas. Hofmann y Stockl (1986).....	43
Fig. 2.31 — Configuración de ensayo. Hofmann y Stockl (1986).....	44
Fig. 2.32 — Componentes de desplazamientos medidos. Hofmann y Stockl (1986).....	45
Fig. 2.33 — Ejemplo de la influencia de la medición establecida sobre la relación $\tau \cdot \Delta$. (Hofmann y Stockl, 1986)	46
Fig. 2.34 — Especímenes utilizados por Pluijm (1993) para ensayos de cortante (a); y tracción (b)	47
Fig. 2.35 — Detalle de ensayo: (a) montaje del ensayo y (b) esquema de carga del especímen (van der Pluijm, 1993).....	47

PÁGINA

Fig. 2.36 — Esquema de colocación de unidades LVDT en el espécimen (van der Pluijm, 1993)	48
Fig. 2.37 — Tensión cortante en función del desplazamiento para diferentes niveles de tensión normal (van der Pluijm, 1993).....	48
Fig. 2.38 — Análisis del ensayo de cortante (van der Pluijm, 1993).....	49
Fig. 2.39 — Detalles de las probetas: (a) probeta intacta; (b) probetas tratadas con inyección de lechada en las juntas (Manzouri et al., 1996).....	56
Fig. 2.40 — Curvas fuerza-desplazamiento axial obtenidas en ensayos de compresión de probetas típicos (Manzouri et al., 1996).....	56
Fig. 2.41 — Detalles de diseño de los paneles ciegos utilizados en los ensayos (Manzouri et al., 1996)	58
Fig. 2.42 — Detalles de diseño de los paneles con vanos utilizados en los ensayos (Manzouri et al., 1996)	58
Fig. 2.43 — Montaje de los ensayos de paneles realizados por Manzouri et al. (1996).....	60
Fig. 2.44 — Configuración de ensayo de paneles sujetos a carga de flexión (Tumialan et al., 2002)	63
Fig. 2.45 — Modos de fallo en los paneles ensayados a flexión: (a) desprendimiento; (b) rotura del elemento FRP; (c) cortante a flexión; (d) rotura por deslizamiento, Tumialan et al. (2002)	64
Fig. 2.46 — Geometría y configuración de carga aplicada a los paneles; (b) sección transversal de los paneles 1-2a, 12b; (c) sección transversal de los paneles 1-4a, 1-4b (Triantafillou, 1998).....	66
Fig. 2.47 — Montaje de ensayo (Hamoush et al., 2002)	67
Fig. 2.48 — Modos de fallo: (a) Cortante a través de las piezas de fábrica. (b) Delaminación del laminado FRP y desprendimiento de capas superficiales de la fábrica. (Hamilton y Dolan, 2001)	69
Fig. 2.49 — Paneles de obra de fabrica utilizados para los ensayos de flexión (Gilstrap y Dolan, 1998).....	70
Fig. 2.50 — Patrones de aplicación de FRP sobre los paneles de obra de fábrica (Albert et al., 2001)	71
Fig. 2.51 — Configuración de los ensayos de flexión (Albert et al., 2001).....	72
Fig. 2.52 — Comportamiento carga-desplazamiento de las series 1 (Albert et al., 2001)....	73
Fig. 2.53 — Comportamiento carga-desplazamiento de las series 2 (Albert et al., 2001)....	73

	<i>PÁGINA</i>
Fig. 2.54 — Comportamiento carga-desplazamiento de la fibra de refuerzo (Albert et al. 2001).....	74
Fig. 2.55 — Comparación de las curvas carga-desplazamiento de uno de los paneles reforzados, obtenidas en ensayos monotónico y cíclico (Albert et al., 2001)..	75
Fig. 2.56 — Comportamiento registrado en uno de los ensayos, confrontado al comportamiento idealizado y al comportamiento estimado (Albert et al., 2001).....	75
Fig. 2.57 — Geometría del ensayo a flexión de 4 puntos de apoyo (Kiss et al., 2002).....	76
Fig. 2.58 — Configuración de ensayo (Kusik et al., 2003)	78
Fig. 2.59 — Patrones de aplicación de GFRP (Kusik et al., 2003).....	79
Fig. 2.60 — Modos de fallo (Kiang y Patoary, 2004).....	80
Fig. 2.61 — Montaje de los ensayos (Kiang y Patoary, 2004).....	82
Fig. 2.62 — Tipos de fallo en su propio plano de paneles sujetos a compresión biaxial en su propio plano (a) fallo por cortante; (b) deslizamiento; (c) aplastamiento (Badoux et al., 2002).....	82
Fig. 2.63 — Configuración de los ensayos de paneles en el simulador sísmico del ETHZ, (Badoux et al., 2002).....	83
Fig. 2.64 — Fisuras y fracturas observadas durante la parte final de los ensayos de los paneles de intacto (a), reforzado con fibra de vidrio (b) y reforzado con fibra de carbono (c); (Badoux et al., 2002).....	84
Fig. 2.65 — Detalles de los ensayos de desprendimiento (Hall et al., 2002).....	84
Fig. 2.66 — Esquema del montaje de la configuración de ensayo (Lissel et al. 2000).....	85
Fig. 2.67 — Modo de rotura de un panel no pre-comprimido, sujeto a compresión diagonal respecto a las juntas de mortero, Lissel et al. (2000-b).....	86
Fig. 2.68 — Modo de rotura de un panel pre-comprimido, sujeto a compresión diagonal (Lissel et al., 2000-b)	86
Fig. 2.69 — Modo de rotura de un panel reforzado con GFRP sujeto a compresión diagonal (Lissel et al., 2000-b)	87
Fig. 2.70 — Características geométricas de los paneles reforzados (Valluzzi et al., 2000)..	88
Fig. 2.71 — Características de las muestras y un ensayo preliminar de compresión (Valluzzi et al., 2000)	89
Fig. 2.72 — Comparativo entre resistencias estimadas y experimentales (Valluzzi et al., 2000)	91
Fig. 2.73 — Configuración mecánica de los ensayo de paneles de fabrica utilizada por Li	92

	<i>PÁGINA</i>
et al. (2001)	
Fig. 2.74 — Modos de fallo en muros de fábrica no reforzada sujetos a carga lateral: (a) Rotura por tensión diagonal; (b) Deslizamiento de junta (Ehsani et al., 1997).....	92
Fig. 2.75 — Probetas para ensayos de cortante (Ehsani et al., 1997).....	93
Fig. 2.76 — Comparación de las curvas de comportamiento con diferente orientación y el comportamiento estimado (Ehsani et al., 1997).....	94
Fig. 2.77 — Configuración geométrica de los patrones de refuerzo estudiados (Mosallam et al., 2003).....	95
Fig. 2.78 — Configuración mecánica de los ensayos (Mosallam et al., 2003).....	95

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LAS CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

Fig. 3.1— Pieza de fábrica de ladrillo macizo utilizada en todas las campañas experimentales.....	101
Fig. 3.2 — Panel tipo único.....	104
Fig. 3.3 — Bastidor para manipulación y montaje de los paneles.....	104
Fig. 3.4 — Esquema de las fases del procedimiento de ensayo biaxial de paneles.....	105
Fig. 3.5 — (a) Pórtico de carga (b) servo-actuador vertical (c) controlador servo-hidráulico (d) cilindro hidráulico actuador horizontal.....	106
Fig. 3.6 — (a) contrafuerte base de la carga horizontal (b) bastidores de riostra.....	107
Fig. 3.7 — Manipulación de los paneles: (a) Vehículo montacargas (b) Puente grúa.....	107
Fig. 3.8 — Instrumentación y adquisición de datos: (a) célula de carga del actuador vertical MTS (b) célula de carga acoplada al gato hidráulico (c) unidad LVDT para captar deformación horizontal (d) LVDT medidor de desplazamiento.....	108
Fig. 3.9 — Esquema de instrumentación y adquisición de datos en los paneles ensayados.....	109
Fig. 3.10 — Esquema del montaje de los ensayos.....	110
Fig. 3.11 — Vista general en perspectiva del montaje de los ensayos biaxiales.....	110
Fig. 3.12 — Esquema general de montaje de los ensayos biaxiales: (a) planta (b) alzado....	111
Fig. 3.13 — Esquema de ensayo y zona de mayor vulnerabilidad a la rotura.....	112

Fig. 3.14 — Detalle de fisura en uno de los paneles intactos (Sánchez, 2001).....	113
Fig. 3.15 — Proceso de aplicación del mortero tixotrópico base cemento en las juntas verticales.....	118
Fig. 3.16 — Aplicación del mortero tixotrópico base cemento en las juntas verticales.....	118
Fig. 3.17 — Ilustración descriptiva de la rotura del panel antes y después del proceso de relleno.....	119
Fig. 3.18 — Ilustración descriptiva del proceso de relleno de fisuras.....	119
Fig. 3.19 — (a) Pérdida de sección en el vértice inferior opuesto a la aplicación de la carga horizontal (b) El panel 4 reparado.....	120
Fig. 3.20 — (a) Capa superficial de mortero extraído; (b) Aplicación del adhesivo tixotrópico.....	121
Fig. 3.21 — Proceso de reparación del panel 6: (a) Estado después de la limpieza del panel dañado; (b) Relleno de fisuras mayores con mortero cementicio; (c) Sellado externo con mortero epoxi; (d) Inyección de resina epoxi.....	121
Fig. 3.22 — Reparación del panel 6: (a) Proceso de sellado de juntas con mortero epoxi, utilizando un aplicador de auto-mezclado; (b) fijación de bridas.....	122
Fig. 3.23 — El panel 7 durante la preparación para inyección de resina epoxi.....	122
Fig. 3.24 — Proceso de inyección de resina epoxi.....	123
Fig. 3.25 — Probeta tipo 1, empleada para los ensayos de cortante de la campaña 3.3.....	125
Fig. 3.26 — Esquema de los ensayos de cortante bajo tensión uniaxial.....	126
Fig. 3.27 — Montaje de los ensayos de tripletas bajo carga uniaxial: (a) montaje de una de las probetas antes de iniciar el proceso de carga; (b) esquema del montaje.....	126
Fig. 3.28 — Laminado compuesto de fibra de carbono.....	127
Fig. 3.29 — Componentes a y b de la resina epoxi bi-componente 3:1.....	128
Fig. 3.30 — Tejido de fibra de carbono.....	128
Fig. 3.31 — Resina epoxi bi-componente 4:1.....	129
Fig. 3.32 — Limpieza de las probetas con aire comprimido.....	132
Fig. 3.33 — Corte del laminado de fibra de carbono en sierra circular.....	133
Fig. 3.34 — Utilización de una báscula de precisión para dosificar los componentes.....	133
Fig. 3.35 — Utilización de una báscula de precisión para dosificar los componentes de la mezcla de resina epoxi 3:1.....	134

Fig. 3.36 — Utilización de una báscula de precisión para dosificar los componentes de la mezcla de resina.....	134
Fig. 3.37 — Aplicación del laminado de fibra de carbono sobre la superficie de la probeta	135
Fig. 3.38 — Probeta con aristas redondeadas.....	136
Fig. 3.39 — Aplicación e integración del tejido de fibra de carbono a la resina epoxi 4:1; (a) impregnación de la superficie de la probeta; (b) fijación del tejido; (c) zunchado de la probeta; (d) integración de la resina y el tejido con un rodillo metálico con estrías; (e) regulación de la superficie con una espátula; (f) aspecto del trabajo terminado.....	137
Fig. 3.40 — Máquina de ensayos utilizada en la campaña rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP.....	138
Fig. 3.41 — Esquema de las dos fases del procedimiento de ensayo.....	140
Fig. 3.42 — Esquema del montaje de los ensayos de rotura de paneles reforzados con tejido y laminado CFRP.....	140
Fig. 3.43 — Área de trabajo en laboratorio, proceso de refuerzo de paneles.....	144
Fig. 3.44 — Aplicación del laminado de fibra de carbono sobre uno de los paneles: (a) fijación de los laminados; (b) detalle del trabajo terminado.....	144
Fig. 3.45 — Panel 8 reforzado.....	145
Fig. 3.46 — Refuerzo terminado de los paneles 9 (a) y 10 (b).....	145
Fig. 3.47 — Panel 10 Reforzado.....	146
Fig. 3.48 — Refuerzo terminado de los paneles 12 (a) y 13 (b).....	146
Fig. 3.49 — Tipo de probeta utilizada en los ensayos de la campaña 3.5.....	147
Fig. 3.50 — Esquema del ensayo biaxial: (a) fase 1, en la que se aplica la carga normal de compresión y se mantiene constante durante la ejecución total del ensayo; (b) fase 2, en la que se aplica la carga cortante hasta ocasionar la rotura.....	148
Fig. 3.51 — Bastidor especial para rotura de probetas de la campaña experimental 3.5.....	149
Fig. 3.52 — Esquema de funcionamiento del bastidor especial.....	149
Fig. 3.53 — Tejido de fibra de vidrio.....	152
Fig. 3.54 — Resina epoxi saturante.....	153
Fig. 3.55 — Imprimación de resina epoxi.....	153
Fig. 3.56 — Mortero epoxi tixotrópico.....	154
Fig. 3.57 — Tejido de fibra de aramida.....	154

Fig. 3.58 — Madera micro-laminada.....	155
Fig. 3.59 — Adhesivo de poliuretano.....	155
Fig. 3.60 — Baldosa cerámica.....	156
Fig. 3.61 — Hojas de tejido de fibra de vidrio recortadas a medida.....	157
Fig. 3.62 — Aplicación de la resina de imprimación en la superficie de las probetas: (a) apariencia húmeda (b) aplicación con una brocha.....	158
Fig. 3.63 — Aplicación del mortero de regulación en la superficie: (a) Utilización de una paleta para albañilería (b) apariencia final.....	158
Fig. 3.64 — Aplicación de la resina epoxi saturante: (a) utilización de un rodillo de fibra (b) apariencia de la aplicación terminada.....	159
Fig. 3.65 — Incorporación del tejido GFRP a la resina saturante: (a) colocación manual; (b) integración a la resina con un rodillo metálico de rondanas.....	159
Fig. 3.66 — Apariencia final de la aplicación de refuerzo GFRP.....	160
Fig. 3.67 — Probetas reforzadas con compuesto AFRP.....	160
Fig. 3.68 — Proceso de corte del tejido AFRP: (a) el tejido, adhesivo de metacrilato y tijeras de acero; (b) detalle del corte realizado en el tejido.....	162
Fig. 3.69 — Corte de las placas de madera micro-laminada.....	163
Fig. 3.70 — Refuerzo de probetas de fábrica con placas de madera micro-laminada: (a) aplicación del adhesivo de poliuretano en una probeta; (b) vista del conjunto durante el proceso de aplicación.....	164
Fig. 3.71 — Probetas reforzadas con placas de madera micro-laminada.....	164
Fig. 3.72 — Actuador dinámico	166
Fig. 3.73 — Aplicación de la carga normal: (a) actuador cilíndrico ; (b) bomba manual.....	166
Fig. 3.74 — Célula de carga integrada al actuador dinámico.....	167
Fig. 3.75 — Adquisición de datos: (a) vista general del marco de carga desde la cabina de mando; (b) detalle de la consola virtual durante la calibración automática del actuador dinámico.....	167
Fig. 3.76 — Montaje de los contrafuertes y piezas móviles a la plataforma de carga: (a) anclaje de la base del actuador lateral; (b) anclaje del bastidor especial y reacción de la fuerza horizontal; (c) pieza del bastidor especial que solo permite el desplazamiento horizontal, transmite la fuerza normal a la probeta; (d) y (e) tirantes de fijación de los contrafuertes a y b.....	168
Fig. 3.77 — Montaje completo del bastidor especial y colocación de la probeta: (f) pieza del bastidor especial que transmite la fuerza tangencial a la probeta y solo permite el desplazamiento vertical; (g) posicionamiento del actuador	

dinámico; (h) colocación del actuador horizontal.....	168
---	-----

CAPÍTULO 4. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Fig. 4.1 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 1.....	173
Fig. 4.2 — Panel 1 reparado antes de ser ensayado (a); rotura después del ensayo (b).....	174
Fig. 4.3 — Desplazamiento registrado por los extensómetros f (a) y g (b).....	174
Fig. 4.4 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 2.....	175
Fig. 4.5 — Rotura del panel 2.....	175
Fig. 4.6 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 3.....	176
Fig. 4.7 — Rotura del panel 3.....	176
Fig. 4.8 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 4.....	177
Fig. 4.9 — Rotura del panel 4.....	177
Fig. 4.10 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 5.....	178
Fig. 4.11 — Rotura del panel 5.....	178
Fig. 4.12 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 6.....	179
Fig. 4.13 — Rotura del panel 6.....	179
Fig. 4.14 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 7.....	180
Fig. 4.15 — Rotura del panel 7.....	180
Fig. 4.16 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto SIN.....	184
Fig. 4.17 — Probeta no reforzada situada bajo el actuador dinámico antes de ser ensayada.....	184
Fig. 4.18 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto Par.....	185
Fig. 4.19 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado paralelamente a la dirección de la carga: (a) antes del ensayo; (b) después de la ejecución.....	185
Fig. 4.20 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto Per.....	186
Fig. 4.21 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en sentido perpendicular a la dirección de la carga: (a) antes del ensayo; (b) después de la ejecución.....	186
Fig. 4.22 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto D.....	187
Fig. 4.23 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en sentido diagonal a la	187

	dirección de la carga y a las juntas de mortero.....	
Fig. 4.24	— Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto V.....	188
Fig. 4.25	— Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en dos segmentos contrapuestos en diagonal y apuntados hacia la base en las dos caras	188
Fig. 4.26	— Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto X.....	189
Fig. 4.27	— Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en dos segmentos contrapuestos, formando una cruceta en diagonal.....	189
Fig. 4.28	— Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto Wpar.....	190
Fig. 4.29	— Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en dos segmentos contrapuestos en diagonal, formando una cruceta	190
Fig. 4.30	— Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto W45.....	191
Fig. 4.31	— Probeta reforzada con tejido de fibra de carbono: (a) tejido aplicado en sentido perpendicular a la carga y a las juntas de mortero; (b) pieza de fabrica central desplazada.....	191
Fig. 4.32	— Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto WZ45.....	192
Fig. 4.33	— Probeta reforzada con tejido de fibra de carbono: (a) tejido aplicado en sentido diagonal respecto a la carga y a las juntas de mortero; (b) desplazamiento de la pieza de fabrica central.....	192
Fig. 4.34	— Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto W45d.....	193
Fig. 4.35	— Probeta reforzada con tejido de fibra de carbono: (a) tejido aplicado en dos capas, en sentido diagonal respecto a la carga y a las juntas de mortero; (b) pieza de fabrica central desplazada.....	193
Fig. 4.36	— Ilustración de los parámetros geométricos medidos en las probetas sometidas a carga cortante uniaxial.....	194
Fig. 4.37	— Movimiento del los paneles reforzados debido a la rigidez.....	195
Fig. 4.38	— Ensayo del panel 10: (a) antes del ensayo; (b) detalle del inicio de desprendimiento	196
Fig. 4.39	— Curva carga desplazamiento registrada en el panel 8.....	196
Fig. 4.40	— Ensayo del panel 9: (a) antes del ensayo; (b) detalle del inicio de desprendimiento.....	197
Fig. 4.41	— Curva carga desplazamiento registrada en el panel 9.....	197
Fig. 4.42	— Ensayo del panel 8: (a) el panel poco antes de ser ensayado; (b) detalle del aplastamiento en el vértice opuesto al punto de aplicación de la carga horizontal; (c) vista general después del ensayo; (d) cara posterior no reforzada; (e) desprendimiento de la retícula formada por los laminados; (f)	

detalle de los residuos del sustrato superficial de la fábrica sobre la cara interna de los laminados de refuerzo.....	199
Fig. 4.43 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 10.....	199
Fig. 4.44 — Ensayo del panel 11: (a) antes del ensayo; (b) detalle del aplastamiento en el vértice opuesto a la aplicación de la carga horizontal; (c) vista general después del ensayo; (d) detalle de la zona de aplastamiento	200
Fig. 4.45 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 11.....	200
Fig. 4.46 — Ensayo del panel 12: (a) antes de la ejecución; (b) deslizamiento de la viga de distribución.....	201
Fig. 4.47 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 12.....	201
Fig. 4.48 — Ensayo del panel 12: (a) vista lateral del panel ensayado; (b) detalle del aplastamiento.....	202
Fig. 4.49 — Comportamiento del grupo experimental de probetas no reforzadas S^M	206
Fig. 4.50 — Probeta sin refuerzo del grupo S^M : (a) probeta colocada en el bastidor de ensayo antes de la ejecución; (b) probeta después del ensayo.....	206
Fig. 4.51 — Comportamiento resistente de los conjuntos de ensayos del grupo G^M : (a) conjunto de ensayos G_a ; (b) conjunto de ensayos G_b	208
Fig. 4.52 — Ensayo de probeta del grupo: (a) momento del fallo de la probeta durante el ensayo; (b) detalle de la probeta después del fallo. La adherencia del compuesto de refuerzo desprende la capa superficial de los ladrillos	208
Fig. 4.53 — Comportamiento resistente del conjunto de probetas G_f	209
Fig. 4.54 — Ensayo de una probeta del grupo G^{M1} : (a) Momento de fractura durante el ensayo; (b) detalle del fallo: en donde puede apreciarse el desprendimiento de la capa superficial de la pieza de fábrica por la adherencia del compuesto.....	210
Fig. 4.55 — Comportamiento resistente del conjunto de probetas G_f	211
Fig. 4.56 — Modo de fallo del conjunto G_e : (a) fisura de la capa de tejido (b) detalle de la probeta ensayada en donde se observa el la capa superficial de la probeta adherida al tejido de refuerzo.....	211
Fig. 4.57 — Comportamiento resistente del grupo G^{M3}	212
Fig. 4.58 — Modo de fallo de una probeta del conjunto G_c : (a) la carga cortante ocasiona en el tejido una línea vertical de rotura; (b) detalle del desprendimiento del mortero de regulación adherido al tejido de fibra de vidrio.....	213
Fig. 4.59 — Curvas de comportamiento de los conjuntos de probetas del grupo A^M	214
Fig. 4.60 — Ensayo de una probeta del conjunto A_b : (a) proceso de carga (b) la rotura	

	de la probeta ocurre en la junta de mortero; el refuerzo desprende la capa superficial de l ladrillo.....	215
Fig. 4.61 —	Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo M^{M1}	216
Fig. 4.62 —	Una probeta del conjunto M^{M1} : antes del ensayo (a); detalle del estado posterior a la ejecución (b).....	216
Fig. 4.63 —	Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo C^{M1}	217
Fig. 4.64 —	Modo de fallo de una de las probetas del conjunto Ca perteneciente al grupo C^{M1} : (a) la baldosa cerámica muestra claramente el comportamiento de rotura; (b) detalle de la rotura en donde puede verse la fragmentación superficial de la probeta.....	218
Fig. 4.65 —	Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo S^C	219
Fig. 4.66 —	Modo de fallo del grupo S^C : (a) probeta colocada en el bastidor de carga; (b) probeta después de la ejecución del ensayo	219
Fig. 4.67 —	Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo G^{C1}	220
Fig. 4.68 —	Modo de fallo del conjunto G^{C1} : (a) en el tejido se perciben vagamente algunas líneas diagonales que denotan la rotura de una de las probetas; (b) detalle del espécimen ensayado.....	221
Fig. 4.69 —	Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo G^{C3}	221
Fig. 4.70 —	Modo de fallo de una de las probetas del conjunto Gk: (a) el refuerzo no muestra líneas de fisura; (b) durante el fallo se desprende parte de la superficie y queda adherida al tejido.....	222
Fig. 4.71 —	Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo A^{C1} : (a) curvas de comportamiento por grupo; (b) detalle del comportamiento de los especímenes del conjunto de ensayos Ae.....	223
Fig. 4.72 —	Comportamiento de rotura de las probetas del conjunto Ae: (a) rotura de la probeta colocada en el bastidor de carga; (b) detalle del desprendimiento de la capa superficial de las piezas de fábrica.....	224
Fig. 4.73 —	Comportamiento de los conjuntos del grupo A^{C2} : (a) curvas carga-desplazamiento de los conjuntos; (b) ensayos del conjunto Al.....	225
Fig. 4.74 —	Fallo de una de las probetas del conjunto Ai del grupo A^{C2} : (a) apariencia superficial de la probeta ensayada; (b) detalle del estado de la probeta después del ensayo.....	226
Fig. 4.75 —	Comportamiento de los conjuntos de probetas del grupo M^{C1}	226
Fig. 4.76 —	Modo de fallo de las probetas del grupo M^{C1} : (a) probeta después del ensayo; (b) detalle de la placa de madera micro-laminada adherida a la probeta. Debido a la eficacia del adhesivo no se perciben indicios de fisuras o desprendimiento.....	227

Fig. 4.77 — Comportamiento de los conjuntos de probetas del grupo C^{C1} 228

Fig. 4.78 — Modo de fallo de las probetas reforzadas con baldosas cerámicas: (a) fisuras de la probeta ensayada; (b) rotura de la probeta..... 228

C A P Í T U L O 5 . A N Á L I S I S D E R E S U L T A D O S

Fig. 5.1 — Inserción de los valores de tensión obtenidos en la campaña de rotura de paneles reparados en la envolvente de rotura de paneles intactos obtenida por Sánchez (2001)..... 236

Fig. 5.2 — Cotejo de los valores porcentuales de tensión tangencial de los paneles reparados y de los paneles intactos; y nivel de dificultad práctica de los tratamientos de reparación..... 237

Fig. 5.3 — Parámetros considerados en el análisis del comportamiento de los paneles en las campañas actual y precedente..... 238

Fig. 5.4 — (a) Estado de daño original del panel M25V11H; (b) Mecanismo de fallo del panel 1 reparado..... 239

Fig. 5.5 — Curvas carga-desplazamiento del panel 1 de la campaña actual; en conjunto con la de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a 20kN..... 240

Fig. 5.6 — (a) Estado de daño original del panel M25V12H; (b) Mecanismo de fallo del panel 2 reparado..... 241

Fig. 5.7 — Curvas carga-desplazamiento del panel 2 de la campaña actual; de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a 20kN..... 241

Fig. 5.8 — (a) Estado de daño original del panel M40V14H (b) Mecanismo de fallo del panel 3 reparado..... 242

Fig. 5.9 — Curvas carga-desplazamiento del panel 3 de la campaña actual; de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a 20kN..... 243

Fig. 5.10 — (a) Estado de daño original del panel 4; (b) Mecanismo de fallo del panel reparado..... 243

Fig. 5.11 — Curvas carga-desplazamiento del panel 4 de la campaña actual; en conjunto con las de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a 20kN..... 244

Fig. 5.12 — (a) Estado de daño original del panel 5; (b) Mecanismo de fallo del panel reparado 245

Fig. 5.13 — Curvas carga-desplazamiento del panel 5 de la campaña actual; en conjunto con las de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a

	20kN.....	245
Fig. 5.14 —	(a) Estado de daño original del panel 6; (b) Mecanismo de fallo del panel reparado	246
Fig. 5.15 —	Curvas carga-desplazamiento del panel 6 de la campaña actual; en conjunto con las de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a 20kN.....	246
Fig. 5.16 —	(a) Estado de daño original del panel 7; (b) Mecanismo de fallo del panel reparado	247
Fig. 5.17 —	Curvas carga-desplazamiento del panel 7 de la campaña actual; las de un panel sin refuerzo ensayado por Sánchez (2001) sujeto a una carga normal de 25 kN; y la curva estimada para un panel sujeto a 20kN.....	247
Fig. 5.18 —	Curvas de comportamiento carga-deformación de un espécimen representativo de cada conjunto.....	252
Fig. 5.19 —	Variación porcentual de la resistencia tangencial y del módulo de deformación transversal de los grupos de probetas.....	252
Fig. 5.20 —	Esquema de la transmisión de fuerzas en las probetas sin refuerzo y de la aportación resistente de las aplicaciones de refuerzo del conjunto X.....	253
Fig. 5.21 —	Transmisión óptima de esfuerzos a través del laminado en el conjunto D (a); orientación poco favorable del laminado en los conjuntos Par y Per (b).....	253
Fig. 5.22 —	Descripción gráfica del funcionamiento mecánico del refuerzo aplicado en las probetas del grupo W45d.....	254
Fig. 5.23 —	Desprendimiento superficial y desplazamiento de la pieza central en los conjuntos WZ45 y WZ45d.....	254
Fig. 5.24 —	Situación de los valores de tensión normal y tangencial característicos de los especímenes sin refuerzo, en torno a la envolvente de rotura biaxial de paneles no reforzados, obtenida por Sánchez (2001)	258
Fig. 5.25 —	Incremento porcentual de los valores de tensión tangencial, del panel 8 y de los paneles 9, 10, 11 y 12, referidos a los valores de los ensayos M25V11H y M50V19H realizados por Sánchez (2001)	258
Fig. 5.26 —	Curvas carga-deformación del panel 8 (esta campaña) y panel M25V11H (Sánchez, 2001)	259
Fig. 5.27 —	Curvas carga-deformación de los paneles 9, 10, 11 y 12 (esta campaña) y panel M50V19H (Sánchez, 2001)	260
Fig. 5.28 —	Envolventes de rotura y residual, de probetas sin refuerzo sujetas a proceso monotónico durante la fase carga tangencial.....	264
Fig. 5.29 —	Detalle de la fase de rotura en la curva σ , ϵ de una probeta sin refuerzo sujeta a 2.04 N/mm ² de tensión normal durante el proceso cíclico de carga	265

tangencial.....	
Fig. 5.30 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas sin refuerzo sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	266
Fig. 5.31 — Envoltentes de la resistencia última tangencial de las probetas sin refuerzo, bajo procesos de carga monotónico y cíclico.....	266
Fig. 5.32 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con tejido GFRP perpendicular a las juntas de mortero, sujetas a proceso monotónico durante la fase de carga tangencial	267
Fig. 5.33 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en dos caras, con tejido GFRP perpendicular a las juntas de mortero, sujetas a proceso monotónico durante la fase de carga tangencial	268
Fig. 5.34 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con tejido GFRP con orientación de 45° respecto a juntas de mortero, sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	269
Fig. 5.35 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en dos caras, con tejido GFRP perpendicular a las juntas de mortero, sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	270
Fig. 5.36 — Envoltentes de la resistencia última tangencial de las probetas sin refuerzo y de las probetas reforzadas con GFRP bajo procesos de carga monotónico y cíclico.....	271
Fig. 5.37 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con tejido AFRP perpendicular a las juntas de mortero, sujetas a proceso monotónico durante la fase de carga tangencial.....	272
Fig. 5.38 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con tejido AFRP perpendicular a las juntas de mortero, sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	273
Fig. 5.39 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en dos caras, con tejido AFRP perpendicular a las juntas de mortero, sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	274
Fig. 5.40 — Envoltentes de la resistencia última tangencial de las probetas sin refuerzo y de las probetas reforzadas con AFRP bajo procesos de carga monotónico y cíclico.....	275
Fig. 5.41 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con madera micro-laminada, sujetas a proceso monotónico durante la fase de carga tangencial.....	276
Fig. 5.42 — Envoltentes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con madera micro-laminada, sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	277
Fig. 5.43 — Envoltentes de la resistencia última tangencial de las probetas sin refuerzo y de las probetas reforzadas con madera micro-laminada bajo procesos de	

	carga monotónico y cíclico.....	278
Fig. 5.44	— Envolventes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con baldosas cerámicas, sujetas a proceso monotónico durante la fase de carga tangencial.....	279
Fig. 5.45	— Envolventes de rotura y residual, de probetas reforzadas en una cara, con baldosas cerámicas, sujetas a proceso cíclico durante la fase de carga tangencial.....	280
Fig. 5.46	— Envolventes de la resistencia última tangencial de las probetas sin refuerzo y de las probetas reforzadas con baldosas cerámicas bajo procesos de carga monotónico y cíclico.....	281
Fig. 5.47	— Modelo de comportamiento Mod-1.....	282
Fig. 5.48	— Modelo de comportamiento Mod-2.....	282
Fig. 5.49	— Modelo Env1 de las envolventes de rotura y residual.....	285
Fig. 5.50	— Modelo Env2 de las envolventes de rotura y residual.....	285
Fig. 5.51	— Modelo Env3 de las envolventes de rotura y residual	286
Fig. 5.52	— Modelo Env4 de las envolventes de rotura y residual.....	286
Fig. 5.53	— Situación de lo valores medios arrojados por las probetas sometidas a ensayo uniaxial y reforzadas con tejidos o laminados CFRP, frente a las envolventes de rotura y residual de probetas sujetas a ensayo biaxial, reforzadas con GFRP, AFRP, madera micro-laminada y baldosas cerámicas.....	289

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

	<i>PÁGINA</i>
Tab. 2.1 — Dimensiones y tipo de la muestra de ensayo a cortante (Norma española UNE-EN 1052-3).....	25
Tab. 2.2 — Tamaños de probeta mínimos para ensayar la resistencia a compresión de fábricas de albañilería (Norma española UNE-EN 1052-1, 1999).....	28
Tab. 2.3 — Rangos admisibles de resistencia del mortero dentro de los cuales debe ensayarse la fábrica de albañilería (Norma española UNE-EN 1052-1, 1999).....	29
Tab. 2.4 — Dimensiones de piezas y formato de especímenes (RILEM, 1994a).....	29
Tab. 2.5 — Prescripción para la velocidad de ensayo (RILEM, 1994b).....	32
Tab. 2.6 — Características de los especímenes de fábrica utilizados por Atkinson et al (1999).....	38
Tab. 2.7 — Resistencias de juntas horizontales (Atkinson et al., 1999).....	38
Tab. 2.8 — Tangente del ángulo de rozamiento según la rugosidad de la superficie de contacto de las piezas (Lourenço y Ramos, 2004).....	42
Tab. 2.9 — Mezclas de lechadas utilizadas para inyección de paneles de obra de fábrica por Manzouri et al., (1996).....	52
Tab. 2.10 — Resultados de los ensayos, antes y después de consolidación (da Porto et al., 2003).....	54
Tab. 2.11 — Mezclas de lechadas utilizadas (Manzouri, 1993).....	55
Tab. 2.12 — Resultados de los ensayos de muestras de juntas Intactas (Manzouri, 1996).....	57
Tab. 2.13 — Resultados de los ensayos de muestras con aplicaciones de inyección (Manzouri, 1996).....	57
Tab. 2.14 — Programa de ensayos (Manzouri, 1996).....	59
Tab. 2.15 — Resultados de los ensayos realizados antes y después de la restitución de juntas (da Porto et al., 2003).....	61
Tab. 2.16 — Resultados experimentales (Hamoush et al., 2001).....	68
Tab. 2.17 — Descripción de los paneles, resistencias últimas y modos y deflecciones máximas (Albert et al., 2001).....	72

Tab. 2.18 — Momentos estimados y registrados, longitud de delaminación y deflexión en el punto medio de paneles de control (no reforzados) y paneles reforzados con FRP (Kiss et al., 2002).....	77
Tab. 2.19 — Parámetros de ensayo de los especímenes y resultados obtenidos (Kuzik et al., 2003).....	79
Tab. 2.20 — Características de los especímenes ensayados (Kiang y Patoary, 2004).....	81
Tab. 2.21 — Características físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la investigación (Valluzzi et al., 2000).....	88
Tab. 2.22 — Comparativo de las resistencias a cortante obtenidas (Valluzzi et al., 2000).....	89
Tab. 2.23 — Resistencia última de los especímenes ensayados (Hamoush et al., 2001).....	96

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LAS CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

Tab. 3.1 — Campañas experimentales que conforman la tesis.....	100
Tab. 3.2 — Estado previo de deterioro en los paneles.....	113
Tab. 3.3 — Tipo de reparación y condiciones de ensayo.....	116
Tab. 3.4 — Grupos de probetas de la campaña de rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP.....	131
Tab. 3.5 — Pasos del proceso de refuerzo con laminado de fibra de carbono.....	132
Tab. 3.6 — Pasos del proceso de refuerzo con tejido de fibra de carbono.....	135
Tab. 3.7 — Patrones de refuerzo aplicados a los paneles.....	141
Tab. 3.8 — Síntesis de las características de refuerzo y las condiciones de ensayo.....	143
Tab. 3.9 — Denominación y descripción de los grupos de ensayos, conjuntos y valores de tensión normal.....	150
Tab. 3.10 — Pasos seguidos en el procedimiento de refuerzo de probetas con compuesto GFRP.....	156
Tab. 3.11 — Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con AFRP.....	161
Tab. 3.12 — Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con madera micro-laminada.....	163
Tab. 3.13 — Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con baldosas cerámicas.....	165

CAPÍTULO 4. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Tab. 4.1 — Contenido de los sub-apartados del capítulo 4.....	171
Tab. 4.2 — Valores resistentes obtenidos en esta campaña.....	181
Tab. 4.3 — Parámetros medios registrados grupos de probetas intactas y reforzadas con CFRP en los ensayos uniaxiales.....	194
Tab. 4.4 — Resumen de resultados de la campaña de rotura de paneles reforzados con CFRP y valores de los ensayos M25V11H y M50V19H obtenidos por Sánchez (2001).....	203
Tab. 4.5 — Resumen de resultados de los conjuntos de probetas ensayadas bajo proceso monotónico.....	229
Tab. 4.6 — Resumen de resultados de los conjuntos de probetas ensayadas bajo proceso cíclico.....	230

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tab. 5.1 — Contenido de los sub-apartados que conforman el capítulo 5.....	233
Tab. 5.2 — Parámetros registrados en los ensayos de la campaña actual y los obtenidos por Sánchez (2001).....	238
Tab. 5.3 — Variación porcentual de los valores de tensión tangencial, desplazamiento horizontal y módulo de deformación transversal; de los paneles reparados, respecto a los valores estimados para paneles intactos sujetos a una carga normal de 200 kN.....	248
Tab. 5.4 — Parámetros registrados en los ensayos e identificación de los modelos de comportamiento.....	284
Tab. 5.5 — Parámetros obtenidos de las envolventes de rotura y residual, de las probetas no reforzadas y de las aplicaciones de los sistemas de refuerzo.....	287

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCION

Gran parte del parque de edificios de nuestras ciudades se compone, aun hoy en día, de estructuras de paredes de carga de obra de fábrica. Tales edificios precisan, al igual que los de estructura metálica o de hormigón, de criterios y técnicas de corte científico, bien calibrados mediante la experimentación, para su evaluación resistente y para la definición de posibles intervenciones de estabilización o refuerzo. Con todo, y a pesar del creciente esfuerzo investigador actualmente dedicado a su estudio, la obra de fábrica sigue siendo un material insuficientemente conocido desde el punto de vista mecánico-resistente. El insuficiente conocimiento alcanza asimismo al comportamiento de elementos o estructuras de obra de fábrica reparadas o reforzadas mediante tratamientos de distinto tipo.

Sin embargo, las estructuras de fábrica pueden precisar de intervenciones de reparación o refuerzo por distintos motivos. Las deficiencias en la construcción, las acciones sísmicas o del viento, el mal comportamiento de los cimientos o el deterioro del material por efectos de tipo ambiental son factores que bien pueden poner en riesgo la estabilidad o la durabilidad de este tipo de estructuras. Frente a tales situaciones, o bien para el cumplimiento de las prescripciones y normativas de seguridad actuales en la ocasión de una rehabilitación, las estructuras de obra de fábrica pueden demandar tratamientos de reparación o refuerzo, sea para restituir la capacidad portante original o bien para incrementar las propiedades resistentes.

Respecto a los tratamientos de reparación, usualmente constituidos por la impregnación de la estructura con morteros o lechadas de cemento, no se disponía de estudios publicados ni conocimientos precisos acerca de la eficacia de esos métodos hasta hace muy poco tiempo. Los tratamientos de refuerzo, que normalmente consisten en incrementar la sección estructural para aumentar la capacidad portante, utilizando para ello morteros u hormigones armados adheridos superficialmente a las paredes, pueden aportar mejoras en la rigidez y en la transferencia de tensiones de la estructura, pero también provocan considerables aumentos en la carga estructural debido a su propio peso, afectando también la apariencia y la forma original. Además, el uso indiscriminado del acero o del hormigón como materiales de refuerzo puede presentar problemas de incompatibilidad mecánica, física o química con la obra de fábrica existente; estas formas de incompatibilidad pueden dar lugar a una importante o total pérdida del efecto del refuerzo, además de ocasionar problemas de durabilidad en el conjunto.

Como alternativa a tratamientos de corte convencional (como recrecidos de hormigón o refuerzos metálicos), existe la posibilidad de aplicar tratamientos basados en nuevos materiales, como los compuestos formados por polímeros reforzados mediante fibras (FRP por *Fiber Reinforced Polymer*). Existe asimismo la posibilidad de emplear materiales de carácter más tradicional (como la madera o la misma cerámica) que, a pesar sus menores prestaciones –o precisamente por ello– resultan más afines mecánicamente (también químicamente) a la obra de fábrica. Debido a su mejor compatibilidad, y a su carácter histórico o tradicional, el uso de madera o cerámica como material de refuerzo resulta

especialmente apropiado para la intervención en obras del patrimonio arquitectónico, siendo conveniente reservar el uso de materiales sintéticos para el tratamiento de estructuras no patrimoniales en las que el mantenimiento de la autenticidad y del carácter histórico o tradicional no tenga el mismo significado. Debe tenerse en cuenta, además, que la durabilidad a largo plazo de ciertos nuevos materiales (en particular, de algunos de los compuestos modernamente utilizados) no ha quedado aun adecuadamente probada dado que su utilización ha comenzado en época muy reciente.

En lo tocante a los tratamientos de reparación de las estructuras de obra de fábrica, se ha recurrido a potenciar las ventajas de los sistemas de inyección y de los procesos de restitución parcial de morteros. Esto se ha hecho a través de minuciosos análisis y registros de las propiedades y el comportamiento de las técnicas tradicionales, a la par de la exploración y diseño de algunas variantes. Se ha recurrido así al empleo de resinas líquidas de gran fluidez y resistencia y a la implementación de morteros mejorados con adiciones de partículas finas y materiales con propiedades químicas y mecánicas que favorezcan el funcionamiento integral. En relación a los materiales utilizados para la inyección cabe aplicar comentarios semejantes a los anteriores en lo relativo a la posibilidad de emplear materiales tradicionales (o basados en éstos), como micro-mortero de cal, o bien al uso de materiales sintéticos como resinas epoxi. Poco antes de 1980 se desarrollaron algunas investigaciones con el fin de probar nuevas variantes en las mezclas de inyección aplicadas sobre paredes de ladrillo o piedra (Warner, 1973; Benedetti y Costellani, 1979; Sheppard y Tercej, 1980). En la década de 1990 y en la actualidad, diversos investigadores muestran interés en el estudio, optimización y desarrollo de los materiales y tratamientos de reparación (Roselund, 1991; Borgsmiller et al., 1993; Manzouri et al., 1996; Da Porto et al., 2003).

En relación al refuerzo con FRP, se descubre que éstos materiales han asumido con rapidez una posición relevante entre los sistemas de refuerzo aplicables a las estructuras de hormigón o de obra de fábrica. La técnica se desarrollo inicialmente en Suiza (Meier, 1987) y en Alemania (MPA, 1987) buscando sustituir diversas aplicaciones de acero en las estructuras de hormigón armado, y específicamente para aportar incrementos a la resistencia de vigas. En la actualidad, el uso de los materiales FRP se intensifica con significativa celeridad, siendo asimismo objeto de un creciente esfuerzo investigador. Triantafyllou (1998), Modena et al. (1999), Pascale et al. (2000), Capozzucca et al. (2000) exponen que estos materiales son apropiados para reparar o reforzar estructuras dañadas de obra de fábrica debido a su adaptabilidad a las superficies planas y curvas. Sus principales ventajas son la elevada resistencia combinada con muy bajo peso y moderada rigidez, con alta resistencia a la corrosión y gran facilidad de aplicación y ajuste a las estructuras existentes. Diversos investigadores han llevado a cabo programas experimentales utilizando probetas y paneles representativos de paredes de obra de fábrica, realizando comprobaciones y trazando perfiles de comportamiento ante determinadas condiciones de tensión, reuniendo un importante conjunto de datos que perfilan hacia la conveniencia de la utilización de los refuerzos FRP.

Existe un extenso campo de aplicación para estos tratamientos como refuerzo preventivo sobre estructuras situadas en áreas de alto riesgo sísmico, o bien como previsión ante cambios de uso o como reparación de estructuras dañadas, entre otros.

En esta tesis se busca ampliar el conjunto de conocimientos hasta ahora desarrollado examinando la potencialidad y el desempeño de las aplicaciones de los sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibras de carbón, aramida y vidrio (CFRP, GFRP y AFRP por Carbon, Glass y Aramide Fiber Reinforced Polymers, respectivamente) sobre paredes de obra de fábrica sometidas a tensiones de corte en su propio plano. Asimismo, se investiga el comportamiento de refuerzos basados en materiales de carácter más tradicional, como la cerámica y la madera, al considerarse que pueden presentar ventajas sensibles en términos de compatibilidad mecánica y química.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de ésta tesis consiste en valorar la eficacia y caracterizar el comportamiento resistente de diversos sistemas de reparación y de refuerzo estructural aplicados sobre elementos de obra de fábrica sujetos a estados tensionales biaxiales producidos por la combinación de carga vertical y horizontal. Esta caracterización abarca los casos de carga monotónica y carga cíclica.

El objetivo anterior incluye, como resultado final, la propuesta de modelos o formulaciones simples para la descripción del comportamiento de los elementos reforzados. Tales modelos deben recoger la incidencia del refuerzo en las principales propiedades mecánico-resistentes del elemento (carga última, rigidez, deformación última, resistencia residual, o ductilidad, entre otras).

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general anteriormente formulado se plantean los siguientes objetivos específicos:

- La revisión retrospectiva de las últimas aportaciones y avances de la investigación en relación a técnicas de reparación de estructuras de obra de fábrica.
- El análisis de los estudios realizados hasta ahora, a cerca de los tratamientos de refuerzo con materiales compuestos FRP aplicados a estructuras de obra de fábrica.
- La caracterización experimental del comportamiento mecánico y resistente de paneles reparados, de obra de fábrica de ladrillo, sujetos a condiciones de tensión biaxial. Se consideran los siguientes tratamientos de reparación

- ~ Restitución de mortero y relleno de fisuras con mortero tixotrópico de cemento.
- ~ Restitución de mortero y relleno de fisuras con mortero tixotrópico epoxi.
- ~ Inyección de resina epoxi.
- La identificación del comportamiento exhibido por los paneles reparados ensayados en cuanto a capacidad portante, rigidez y modo de fallo, entre otros aspectos.
- La caracterización experimental del comportamiento mecánico y de la capacidad resistente de elementos de obra de fábrica reforzados mediante (1) polímeros reforzados con fibras y (2) materiales de carácter tradicional. Entre los primeros se incluyen polímeros con fibras de carbono, aramida y vidrio; entre los segundos, se analiza en comportamiento de refuerzos de madera y cerámica, utilizándose para ello madera micro-laminada y cerámica de alta resistencia. La caracterización experimental abarca tanto procesos de carga monotónica como cíclica. Entre los aspectos a considerar, se incluye
 - ~ El efecto de la aplicación del refuerzo sobre sólo una de las caras (aplicación asimétrica) o las dos caras de los elementos reforzados (aplicación simétrica).
 - ~ El efecto de la distribución o disposición geométrica del refuerzo (en particular, refuerzo en bandas paralelas, refuerzo en bandas cruzadas, refuerzo continuo).
 - ~ La orientación de las fibras resistentes respecto a las juntas de mortero y a la dirección de la carga.
 - ~ La influencia del posible confinamiento conseguido al envolver el elemento mediante una membrana o anillo cerrado de refuerzo.
- Realizar análisis comparativos y evaluar los sistemas de reparación y refuerzo estudiados, en términos de eficacia y nivel de dificultad de los procedimientos.
- Proponer modelos simples que describan el comportamiento experimental observado. Proponer, en particular, leyes simples o envolventes de rotura biaxial y establecer modelos de comportamiento para las curvas tensión-deformación.
- Señalar los aspectos técnicos referentes a los procedimientos de ensayo seguidos en ésta investigación.
- Plantear perspectivas de investigación identificadas a partir de éste trabajo, como continuación en la misma línea o en ámbitos alternos.

1.3. METODOLOGÍA

El carácter experimental de la tesis ha determinado claramente los rasgos de la metodología establecida. Se ha seguido el proceso descrito a continuación:

- Se ha realizado una extensa revisión del estado actual del conocimiento, consultando artículos, actas de seminarios y congresos, además de revistas y otras publicaciones periódicas científicas especializadas, identificando los aspectos más importantes concernientes al tema, los alcances de los trabajos teóricos y experimentales realizados por diversos investigadores, iniciando en una breve revisión retrospectiva y profundizando en las aportaciones más recientes. La consulta de reportes y documentos actualizados acompañó la investigación durante la totalidad de su trayectoria.
- A partir de la revisión del estado actual del conocimiento se han establecido las pautas principales para delinear los objetivos específicos y diseñar el programa de trabajo y las campañas experimentales.
- Así mismo, se han identificado importantes referencias sobre el origen y seguimiento de las prescripciones y normativas técnicas de especificaciones consultadas o propuestas por varios autores.
- En base a la revisión del estado del arte, a la definición detallada de los objetivos y lineamientos de la investigación, se han diseñado las campañas experimentales:
 - ~ Primeramente se han definido los objetivos específicos y esbozado un plan global sobre los alcances y fines precisos.
 - ~ Se han estudiado los recursos financieros y la infraestructura tecnológica disponibles para llevar a cabo las campañas, definiendo también los parámetros de trabajo.
 - ~ Se ha establecido el proyecto general, compuesto por cuatro campañas experimentales que se han desarrollado entre 2001 y 2004.
 - ~ La evolución propia del ejercicio experimental ha determinado durante su realización algunos aspectos y ha adecuado algunos objetivos durante la trayectoria. De ésta manera y por citar algunos ejemplos, se han definido los patrones de aplicación de los sistemas de refuerzo estudiados durante la tercera campaña experimental (paneles reforzados con laminados y tejidos CFRP) y se ha diseñado un bastidor especial para llevar a cabo los ensayos de rotura biaxial a nivel probeta, durante la última campaña experimental.

1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Capítulo 1

En el capítulo 1 se presenta la introducción general a la tesis. Se define el tema de estudio y se sitúa en el contexto general de investigación en que se desenvuelve. Enseguida se plantea cuál es el objetivo general de estudio y se definen los objetivos particulares. Por último se describe la metodología de trabajo y la estructura del documento.

Capítulo 2

En el capítulo 2 se muestra un panorama general del estado actual del conocimiento, situando así al lector en el contexto de estudios existentes referentes a las estructuras de obra de fábrica en cuanto a sus características mecánicas y las técnicas de ensayo y experimentación para su determinación, y frente a los tratamientos de reparación y refuerzo con morteros especiales o materiales compuestos FRP, entre otros.

Capítulo 3

En el capítulo 3 se describe el diseño y programa de ejecución de las campañas experimentales que conforman la tesis. Se describen las características de los materiales y la fabricación de los especímenes de ensayo, la cantidad de especímenes, los materiales, tratamientos y procedimientos de reparación y refuerzo aplicados, así como la infraestructura, equipos o elementos auxiliares, y los programas y procesos de ejecución de todas las campañas.

Capítulo 4

En el capítulo 4 se relatan los procesos de ejecución de todas las campañas experimentales. Se muestran las curvas de comportamiento registradas en los ensayos y se identifican los resultados globales o principales de los ensayos individuales. En el caso de las campañas de rotura de paneles y de algunos de los resultados representativos, en lo referente a las campañas de rotura de probetas. Se muestran imágenes captadas durante las ejecuciones, curvas de deformación de los ensayos monotónicos y cíclicos y algunos esquemas descriptivos.

Capítulo 5

En el capítulo 5 se presenta el análisis de los resultados de cada campaña experimental. Se determinan los perfiles de comportamiento, y se muestran gráficas y tablas comparativas realizadas a partir de las características representativas de las campañas realizadas en ésta investigación, o bien referencias de datos externos obtenidos por otros autores. En el

capítulo se muestran gráficas de las curvas de comportamiento o de puntos de dispersión, diagramas de barras, tablas de datos y algunas ilustraciones descriptivas, además de fotografías.

Capítulo 6

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de la tesis y se plantean posibles líneas de investigación futura, determinadas durante la realización de ésta investigación.

Primeramente se hace una breve sinopsis del trabajo y enseguida se exponen las conclusiones referentes al estado actual del conocimiento respecto a los tratamientos de reparación, a los sistemas de refuerzo y a los procedimientos de ensayo, en ese mismo orden.

CAPÍTULO

2

ESTADO ACTUAL DEL
CONOCIMIENTO

2.1. REVISION DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1.1. Contenido del documento

Se presenta un panorama general de los conocimientos existentes relacionados al ámbito de estudio de ésta investigación, conforme a los siguientes conceptos:

- Las características mecánicas de los elementos estructurales de obra de fábrica. Partiendo de la definición del propio concepto se identifica el interés general de los estudios y el perímetro de acción de los mismos. Se puntualiza en los parámetros establecidos por diversos autores en cuanto al comportamiento mecánico de las paredes bajo estados de tensión uniaxial o biaxial. Así mismo, se refieren los estudios realizados acerca de la respuesta de las juntas de mortero ante las tensiones de corte.
- Las técnicas y procedimientos para la caracterización de los elementos estructurales de obra de fábrica, describiendo los ensayos de componentes individuales, pequeños ensamblajes, prismas, paneles y los ensayos de cortante específicamente; refiriendo las prescripciones y normativas vigentes.
- Los tratamientos de reparación de paredes, puntualizando en la inyección de lechadas y en los procedimientos de sustitución o reposición de morteros, desde una perspectiva del comportamiento ante las tensiones de compresión y de cortante.
- Los tratamientos de refuerzo de paredes, centrando la atención en la respuesta de los mismos ante esfuerzos de flexión y de cortante.

2.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE OBRA DE FÁBRICA

2.2.1. Generalidades

La obra de fábrica se identifica como un material compuesto, formado por piezas tales como ladrillos, bloques de hormigón, sillerías, piedras de cantería irregulares o adobes, que se caracteriza por su ejecución manual conforme a ciertas leyes de traba. Las piezas están unidas entre sí mediante un compuesto aglutinante como el mortero de cal, común en edificios históricos, o el cemento Pórtland u otras mezclas con distintas proporciones de arena, cal y cemento en las edificaciones contemporáneas, P.I.E.T. 70 (1970).

Aunque existe una gran variedad de fábricas, todas ellas presentan algunas características comunes, entre las que destaca la prácticamente nula resistencia a tracción. Debido a este factor, los elementos estructurales que mejor se adecuan a las condiciones mecánicas y resistentes son los que por su geometría logran mantener el material principalmente en estados de compresión.

El interés principal de los estudios realizados durante las tres últimas décadas en torno a la obra de fábrica, se ha centrado en lograr una mayor comprensión de su funcionamiento resistente y desarrollar herramientas apropiadas de diseño y comprobación, tanto para

proponer estructuras de nueva planta como para intervenir las existentes, sean éstas contemporáneas o de carácter histórico. Algunos de los resultados que se han obtenido en dichos estudios han sido incluidos en prescripciones y guías de diseño vigentes, tales como la NBE-FL-90 (2001) y en diversas normas aprobadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) para la conformación del Eurocódigo 6 (ENV 1996-1-1; EN 1052-1, 1999; EN772-1, 2002; EN 1052-3, 2003).

En general, la investigación realizada centra su atención en la fábrica de ladrillo y de bloques de hormigón, debido a la vigencia que ambos sistemas constructivos tienen en los edificios de poca altura. El presente trabajo y los estudios a los que se hace referencia giran en torno a las fábricas de bloques hexaédricos unidos mediante mortero, en las que los bloques tienen una mayor resistencia que este último.

Las paredes pueden desempeñar diversas funciones, tales como soportar la carga vertical debida al peso de niveles superiores o de la cubierta, además del peso propio del muro, recibir empujes normales a su plano o resistir empujes contenidos en su propio plano, debidos a las fuerzas transmitidas por otros elementos estructurales o al fallo del terreno en que se asientan. Estos empujes laterales pueden estar generados por el trabajo de arcos o bóvedas bajo la acción gravitatoria o por acciones de viento o sismo.

En los edificios históricos los efectos de pandeo en las paredes normalmente no son críticos, gracias al gran espesor de las mismas, pero sucede lo contrario en edificios más modernos, en los cuales el espesor de sus paredes suele ser muy reducido. Por lo general, los muros interiores soportan cargas poco excéntricas, hallándose fundamentalmente sujetos a estados de tensión normal. Sin embargo, los muros exteriores o perimetrales de un edificio se encuentran también sujetos a cargas excéntricas.

La resistencia de los edificios de obra de fábrica ante acciones importantes como las sísmicas, es aportada por el trabajo de las paredes en su propio plano. El correcto funcionamiento de las mismas exige una adecuada interacción estructural con otros elementos, tales como forjados, cubiertas y otras paredes, los cuales deben ser suficientemente rígidos y arriostrar de forma eficiente. Las fuerzas contenidas en el plano del muro producen esfuerzos de tracción según una diagonal principal; por ello y debido a la baja resistencia de las fábricas ante los esfuerzos de tracción, las tensiones pueden producir fisuras fácilmente.

2.2.2. Comportamiento de las paredes sometidas a estados de tensión uniaxial

Uno de los primeros intentos para establecer una relación racional entre la resistencia a compresión de la fábrica y la resistencia a compresión de sus constituyentes (piezas y mortero) se debe a Hilsdorf (1969) quien fundamenta el estado de tensión local de la fábrica en la combinación del fallo del mortero y el de las piezas, asumiendo que en la fábrica cargada de forma uniaxial las juntas horizontales de mortero se encuentran en compresión triaxial, mientras que las piezas (ladrillos o bloques) se encuentran sometidas a un estado de compresión vertical y de tracción biaxial (figura 2.1).

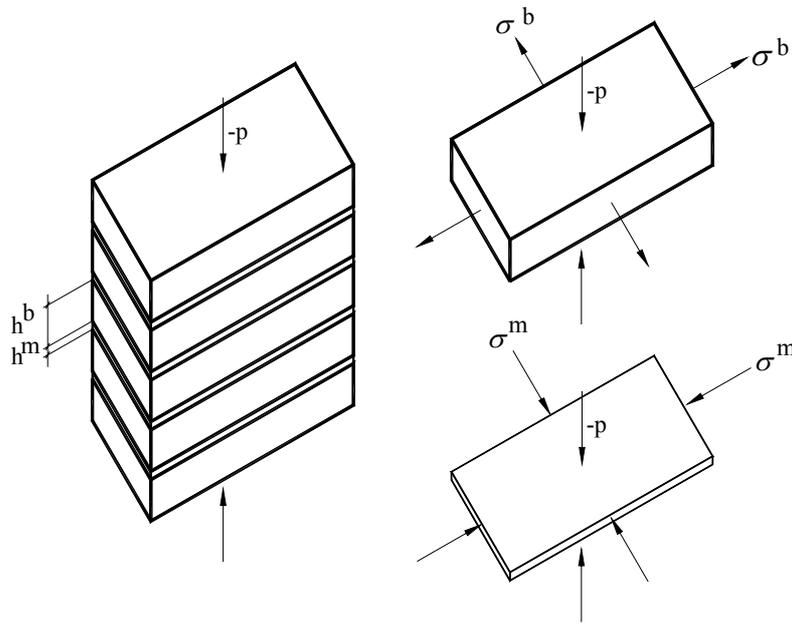


Figura 2.1 — Estados de tensión de las piezas y el mortero en prismas sujetos a compresión vertical (Anthoine, 1992).

De acuerdo con lo anterior, el estado de tensión es inducido por las características de deformación diferida de las piezas, lo que explica dos rasgos conocidos del modo de fallo de la fábrica bajo compresión uniaxial vertical:

- El fallo inicia por fisuras verticales o por segmentación de las piezas.
- En el momento del fallo, el mortero experimenta una tensión de compresión superior a su resistencia máxima a compresión uniaxial.

McNary y Abrams (1985) investigaron la resistencia y la deformación de la obra de fábrica sujeta a compresión uniaxial. Aseveran que en la fábrica se conjuga la relativa fragilidad del mortero y la rigidez de las piezas. Coinciden con la explicación de Hilsdorf, al plantear que cuando las piezas (ladrillos o bloques) se encuentran sujetas a compresión uniaxial, el mortero tiende a expandirse lateralmente en mayor medida y que, debido a la unión entre las piezas y el mortero, éste último es confinado lateralmente.

Las fuerzas cortantes en la interfase entre los dos elementos ocasionan un estado interno de tensiones, de compresión triaxial en el mortero y de tracción bilateral en combinación con compresión uniaxial en las piezas (ladrillos o bloques).

McNary y Abrams estudiaron los efectos en la interacción de diferentes morteros y piezas de fábrica basándose en teorías propuestas por otros autores (Hilsdorf, 1969; Shrive, 1980; Atkinson et al., 1983) quienes precisaron que la mecánica pieza-mortero de la fábrica, bajo compresión uniaxial en su propio plano, podía ser representada a través de una teoría

simplificada, considerando el comportamiento no lineal del mortero confinado y la resistencia a la rotura de las piezas; argumentando que aunque el fallo de un prisma resulte del agrietamiento lateral por tracción de las piezas, será el mortero el que induzca las tensiones de tracción. Dichas tensiones de tracción se incrementarán de forma desproporcionada con las fuerzas de compresión, debido a las propiedades de deformación no lineal del mortero. Por lo anterior, la resistencia de los prismas dependerá de la resistencia de las piezas de fábrica sujetas a tensiones biaxiales de tracción-compresión.

Naraine y Sinha (1989) estudiaron el comportamiento de la obra de fábrica bajo procesos cíclicos de compresión. Definieron la envolvente del comportamiento tensión-deformación durante procesos de carga aplicados en dirección perpendicular o paralela a las juntas de mortero. En principio, la envolvente del comportamiento obtenida de procesos cíclicos de carga coincide con la curva obtenida en procesos de carga monotónicos, lo que demuestra que hasta cierto límite el comportamiento de la fábrica ante incidencias de carga cíclica y monotónica es similar.

En las curvas de comportamiento se identifican los puntos de convergencia o de estabilidad (figura 2.2) en donde coinciden las curvas de descarga de los ciclos con las curvas reiterativas de carga.

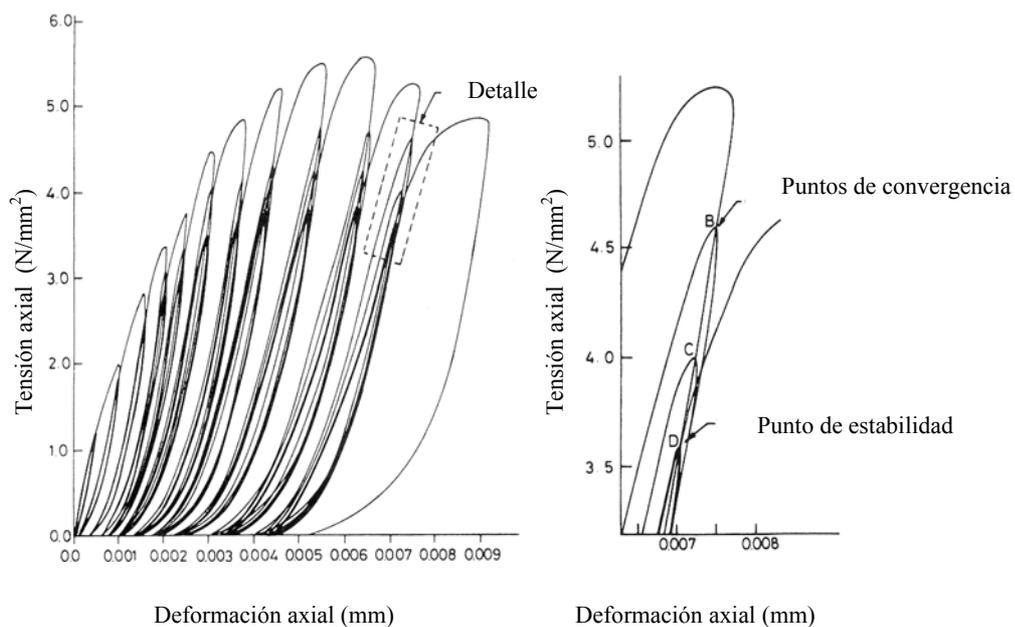


Figura 2.2 — Puntos de estabilidad en ensayo bajo carga cíclica: (a) proceso completo; (b) detalle de punto de estabilidad (Naraine y Sinha, 1989).

Anthoine (1992) observó que debido a la simplicidad con que se pueden llevar a cabo ensayos uniaxiales de paneles y pilares de fábrica, se han efectuado diversos estudios experimentales. Dichos estudios han permitido descifrar la influencia de los parámetros de resistencia y rigidez, o de las características geométricas de los mismos en la compresión de las piezas y los morteros.

El autor mencionó que debido a dichos estudios, se han propuesto varias fórmulas para explicar la resistencia a compresión de la fábrica, las cuales coinciden con los parámetros antes mencionados, y en su trabajo refirió la ecuación incluida en el Eurocódigo 6 (1988) sugerida para la determinación de las características de la resistencia a compresión de la fábrica f_k , cuando éstas no se determinan por un proceso experimental:

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (1)$$

En donde f_b y f_m eran las resistencias a compresión de las piezas y el mortero respectivamente, y K , α , β eran coeficientes aún no fijados de forma definitiva; sugeridos por el Eurocódigo como $\beta = 0.25$, y $K = 0.4\psi$, siendo:

$$\psi = \left(\frac{15}{f_b} \right)^{0.33} \leq 1.5 \quad (2)$$

para piezas de $f_b < 15 \text{ N/mm}^2$ y morteros con resistencia inferior a M10.

2.2.3. Comportamiento de las paredes sometidas a estados de tensión biaxial

Existen diversos trabajos de investigación referentes a la obra de fábrica sometida a estados de tensión biaxial. La mayor parte de estas contribuciones (Dhanasekar et al. 1985a,b; Page, 1980, 1981, 1983 y Samarasinghe y Hendry, 1980), se enfocan hacia la identificación del esquema general de comportamiento.

Page (1980, 1983) y Samarasinghe y Hendry (1980) señalaron que la dirección de las cargas aplicadas, en relación a la orientación de las juntas horizontales, influye directamente en la susceptibilidad al fallo de la fábrica. Confirmaron lo anterior realizando ensayos de rotura de paneles sujetos a estados de tensión biaxial, aplicando cargas en dirección perpendicular o paralela a las juntas horizontales. Así mismo, observaron que la obra de fábrica es más susceptible al fallo cuando está sujeta a ciertas combinaciones de tensión tales como compresión y tracción o tracción biaxial, que ante un estado biaxial de tensiones únicamente de compresión.

Page (1981, 1983) llevó a cabo campañas de ensayos con paneles cuadrados, construidos a escala 0.5, de fábrica de ladrillo con mortero de cemento y cal; sometidos a compresión biaxial y a tracción-compresión. Experimentó con variaciones en la orientación de las juntas respecto a las tensiones principales, e identificó dos tipos de rotura. Precisó que la influencia de la orientación de las juntas con respecto a la tensión dominante (ángulo θ) influía decisivamente en el comportamiento de la fábrica, pero sólo en los casos en que una de las tensiones normales es predominante. Este mismo autor verificó así que la resistencia a compresión uniaxial era inferior a la exhibida por la obra de fábrica ante los estados de compresión biaxial.

En la figura 2.3 se muestra en plano la envolvente de rotura de tensiones principales, de fábrica de ladrillo sujeta a estados de tensión compresión-compresión, obtenida por el autor; en donde σ_1 y σ_2 son las tensiones dominantes y F'_m es la resistencia última.

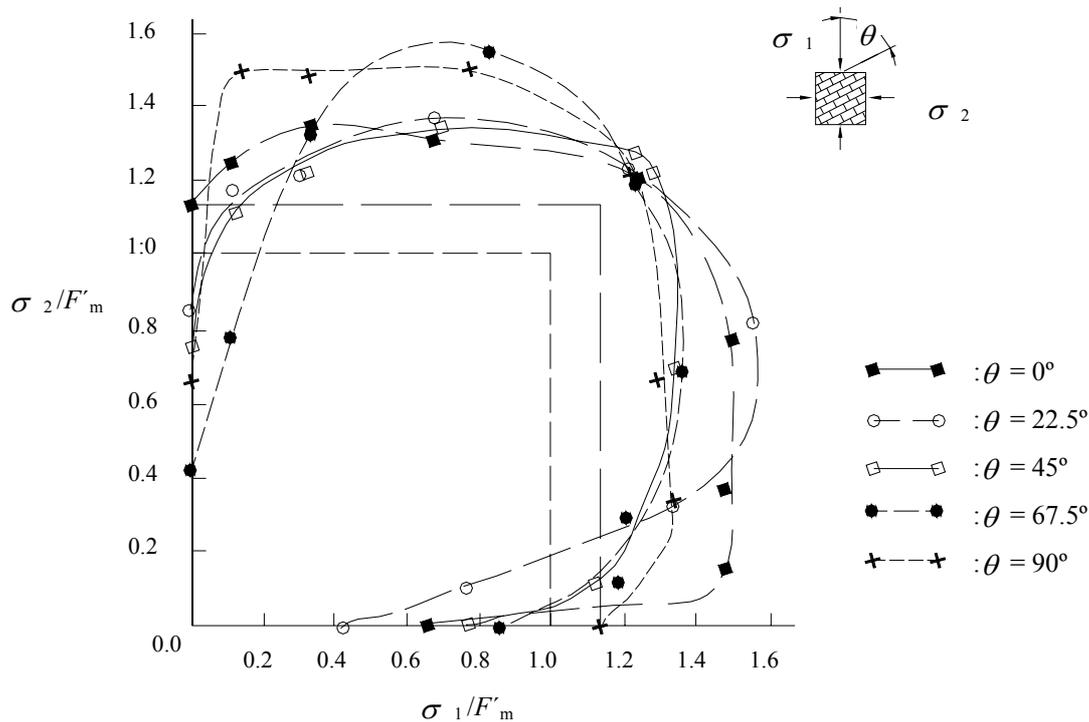


Figura 2.3 — Proyección en plano de la envolvente de rotura de fábrica de ladrillo, $\sigma_1 - \sigma_2$ considerando variaciones de θ (Page, 1981).

Ganz y Thurlimann (1983) coinciden con Page y definen que el modo de fallo de la obra de fábrica de ladrillo varía en función de los estados de tensión, lo cual propicia que las líneas de fractura pueden generarse tanto en las piezas como en las juntas.

Naraine y Sinha (1991) experimentan también en este campo con ensayos de rotura de paneles, variando la dirección de la carga aplicada en ángulos de 0 y 90° respecto a las juntas horizontales. Determinan que ante las relaciones de tensión principales (1.0, 1.67, 5.0 y ∞) el fallo en el espécimen se determina por las tensiones de compresión normales a las juntas horizontales. Para las relaciones principales de tensión de 0, 0.2 y 0.6, el fallo se determina por las tensiones de compresión paralelas a las juntas horizontales. Su trabajo confirma que las curvas de comportamiento tensión-deformación corresponden con gran precisión con las curvas obtenidas en los ensayos uniaxiales.

Alshebani y Sinha (2000) presentan un estudio experimental en el que determinan las condiciones de carga y tensión registradas en paneles construidos con ladrillos de silicato de calcio. El programa experimental incluye 52 ensayos y considera cinco relaciones principales de las tensiones normal (f_n) y paralela (f_p) (figura 2.4 a y b).

Realizan tres tipos de ensayos, determinando en el primero la curva envolvente de tensión-deformación de los esfuerzos paralelos a las juntas horizontales, para después establecer las características de fallo y los puntos de estabilidad en el comportamiento resistente tras un proceso cíclico de carga (figura 2.5).

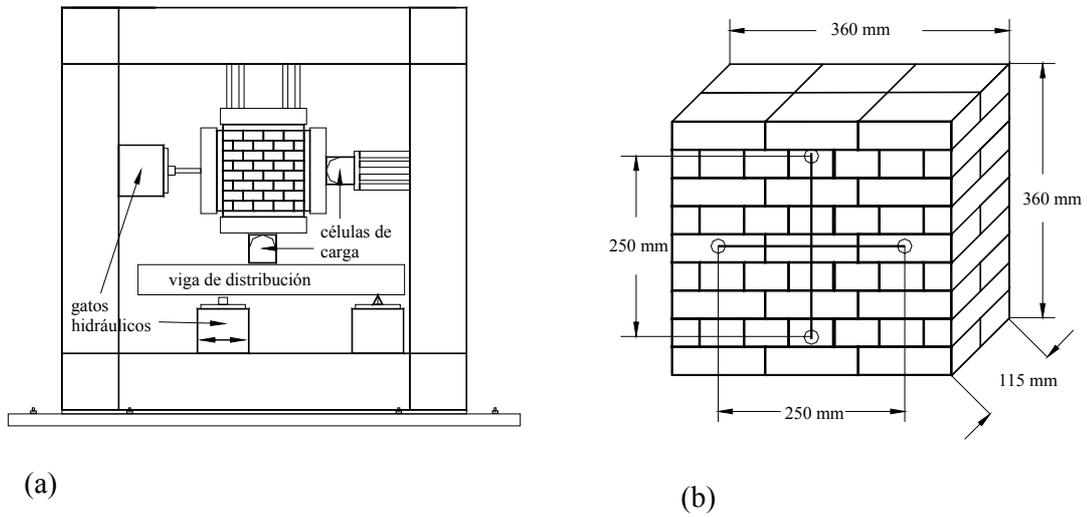


Figura 2.4 — (a) configuración de los ensayos cíclicos de compresión biaxial; (b) colocación de transductores de desplazamiento en los especimenes (Alshebani y Sinha, 2000).

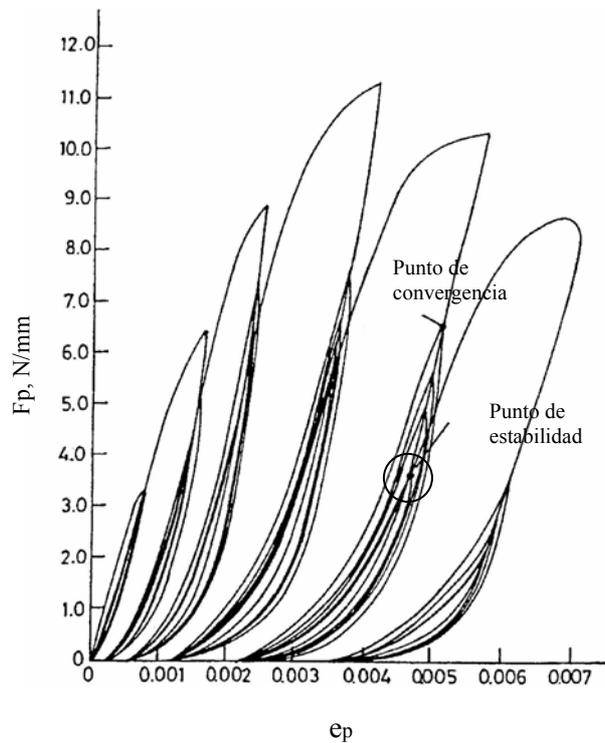


Figura 2.5 — Puntos de estabilidad en el ensayo $f_n/f_p = 1.0$, Alshebani y Sinha (2000).

El fallo de los paneles se caracteriza por una línea de rotura formada en la zona central de aplicación de la carga. Para los niveles bajos de tensión normal, como son las relaciones

f_n/f_p 4,0 y 2,0 se observa un incremento cercano al 25% de la fuerza dominante durante el fallo (figura 2.6).

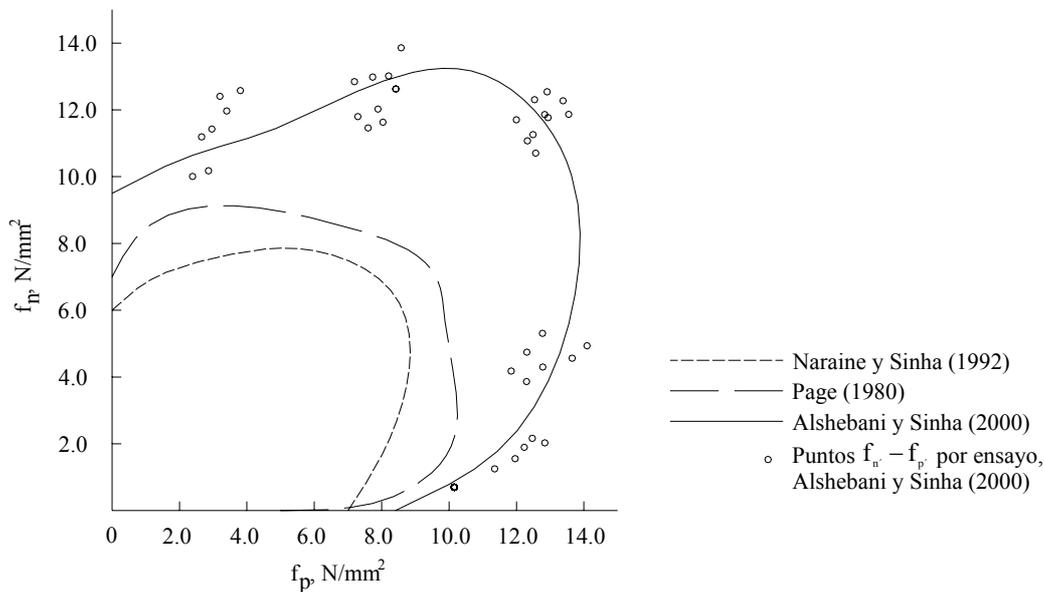


Figura 2.6 — Envolventes de rotura resueltas por Alshebani y Sinha (2000) y las obtenidas por otros investigadores.

2.2.4. Respuesta de las juntas de mortero ante las tensiones de corte

Smith y Carter (1971) investigan el comportamiento y el fallo por cortante de las estructuras de fábrica a través de un estudio numérico y experimental. Llevan a cabo un análisis por medio de elementos finitos en el que simulan la distribución de tensiones en una tripleta de ladrillo (figura 2.7). Determinan la distribución de tensiones en las piezas y en el mortero. Así mismo, ensayan 65 tripletas de ladrillo, generando en ellas una tensión cortante al aplicar una carga de compresión uniaxial en la pieza central de la probeta (figura 2.8).

Demuestran que la teoría propuesta por otros investigadores puede ser válida (dicha teoría indica que la resistencia a cortante en los prismas de obra de fábrica aumenta en relación lineal a medida que se incrementa la tensión normal) pero solo hasta ciertos niveles.

Indican que el fallo por cortante se debe a la tracción ocurrida en las juntas de mortero, lo cual es contrario a la atribución hasta ese momento dada a la resistencia aportada de forma conjunta por la adherencia y la fricción interna. En su campaña experimental corroboran la validez de su teoría y obtienen así un acercamiento a las características verdaderas del fallo por cortante de la fábrica.

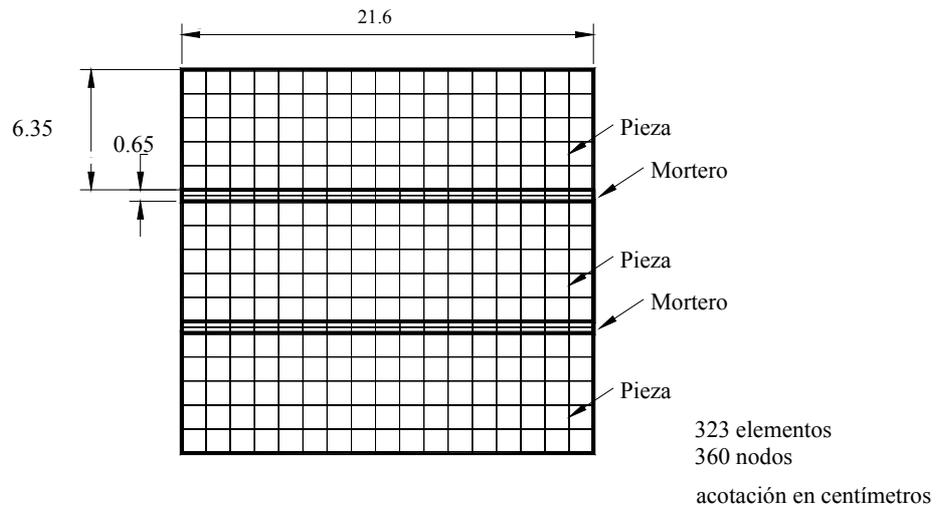


Figura 2.7 — Subdivisión de elementos finitos del modelo propuesto por Smith y Carter (1971).

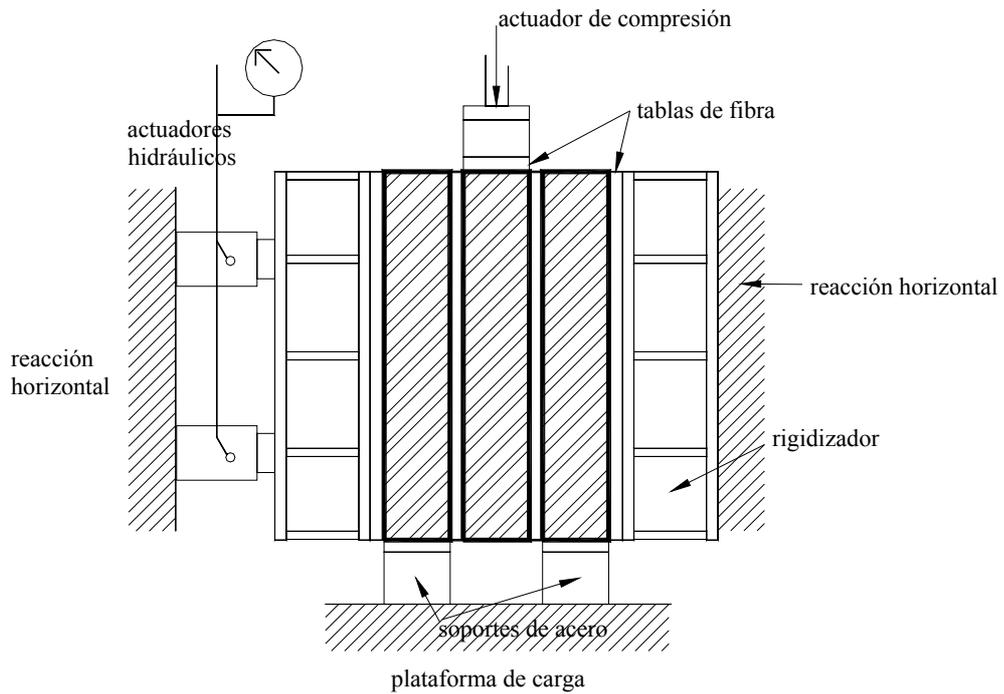


Figura 2.8 — Diagrama representativo de la configuración de ensayo (Smith y Carter, 1971).

2.3. TÉCNICAS DE ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE OBRA DE FÁBRICA

2.3.1. Introducción

Las propiedades de la obra de fábrica pueden ser caracterizadas por medio de ensayos, los cuales se pueden agrupar en ensayos de componentes elementales, como son los prismas, piezas de fábrica o los morteros; los ensayos de pequeños ensamblajes formados por la combinación de dichos componentes, tales como probetas de dos o más piezas unidas por mortero y los ensayos de ensamblajes de mayor complejidad, como son los paneles; los cuales son más representativos de las condiciones mecánicas generales de las paredes. En todos los niveles de ensayo la información a obtener puede ser hasta cierto punto limitada a solo algunas características específicas, tales como la tracción o compresión bajo un estado de tensión determinado, el módulo de elasticidad u otros.

En cualquier caso, por la heterogeneidad de los materiales es necesario generar un extenso número de ensayos. A continuación se presenta una visión de las configuraciones de ensayo más comunes para la caracterización de la obra de fábrica, además de un panorama general basado en las prescripciones y normativas actuales.

2.3.2. Ensayos de componentes individuales

Las piezas son las unidades individuales que constituyen la obra de fábrica (ladrillos, sillares u otros). Por lo general las piezas son ensayadas en compresión uniaxial, en sentido perpendicular a su tabla (figura 2.9 a) para conocer la resistencia a compresión vertical (f_b).

El mismo ensayo puede aplicarse en sentido paralelo a la tabla, para evaluar la resistencia de las piezas a compresión lateral (figura 2.9 b) la cual puede variar de forma significativa respecto a la resistencia a la carga normal a la tabla, especialmente en las piezas de fábrica moldeadas con huecos interiores. Actualmente la norma EN 772-1 (2002) prescribe las condiciones y detalles para los ensayos de compresión de piezas de fábrica. Consiste en colocar las piezas en el centro del plato de una prensa de compresión, para entonces aplicar una carga uniformemente repartida durante un período de tiempo determinado y hasta la rotura.

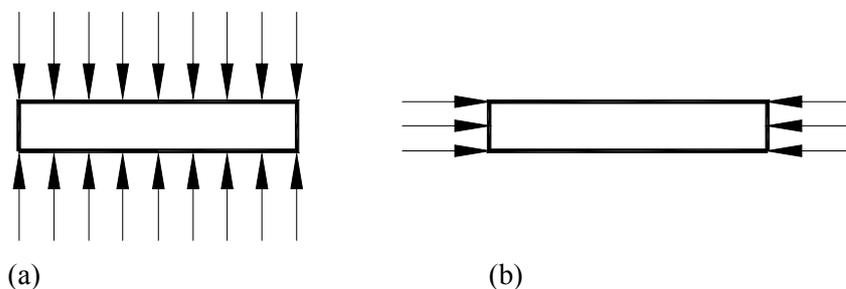


Figura 2.9 — Ensayo de piezas de fábrica bajo compresión uniaxial perpendicular (a) y paralela (b) a la cara de unión.

La resistencia a compresión de los morteros generalmente se determina a través de pequeños prismas sujetos a compresión uniaxial (figura 2.10a).

Actualmente, las resistencias a cortante y flexo-tracción (EN 196-1, 1996) se determinan a través de sencillos mecanismos (figura 2.11).

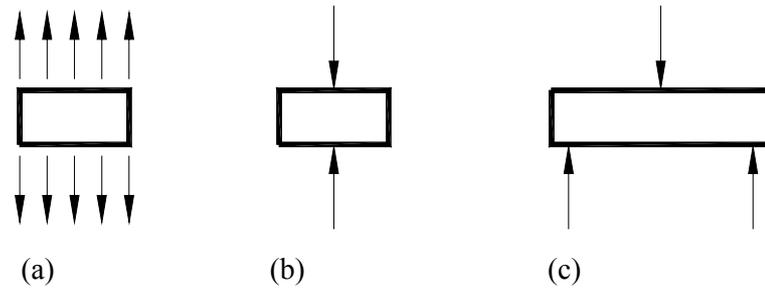
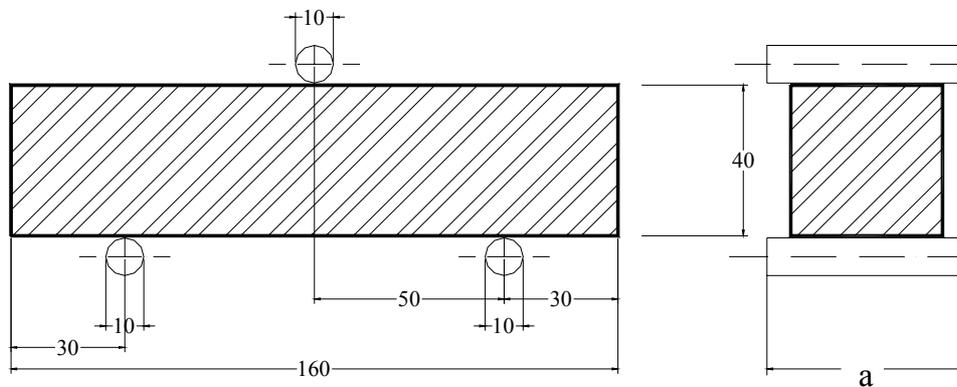


Figura 2.10 — Ensayo de prismas de mortero sujetas a tracción uniaxial (a), ensayo brasileño (b) y ensayo a flexión (c) (Anthoine, 1992).



Acotación: mm

Figura 2.11 — Dispositivo de carga para la determinación de la resistencia a flexión (EN 196-1, 1996).

2.3.3. Ensayos de pequeños ensamblajes

Anthoine (1992) indica que para caracterizar el comportamiento de las juntas de mortero, cuando éstas son consideradas como una interfase pueden emplearse pequeños ensamblajes de dos o tres piezas de fábrica sujetos a diferentes condiciones de carga, ocasionando distintas relaciones entre las tensiones de cortante y normal (figura 2.12).

Sin embargo, los estados de tensión inducidos a las juntas de mortero pueden ser marcadamente dispares, por lo que resulta difícil interpretar los resultados. Anthoine añade que pueden lograrse distribuciones de tensión más uniformes utilizando especímenes de mayor complejidad y que en los mismos pueden aplicarse procesos de carga cíclicos y monotónicos (figura 2.13).

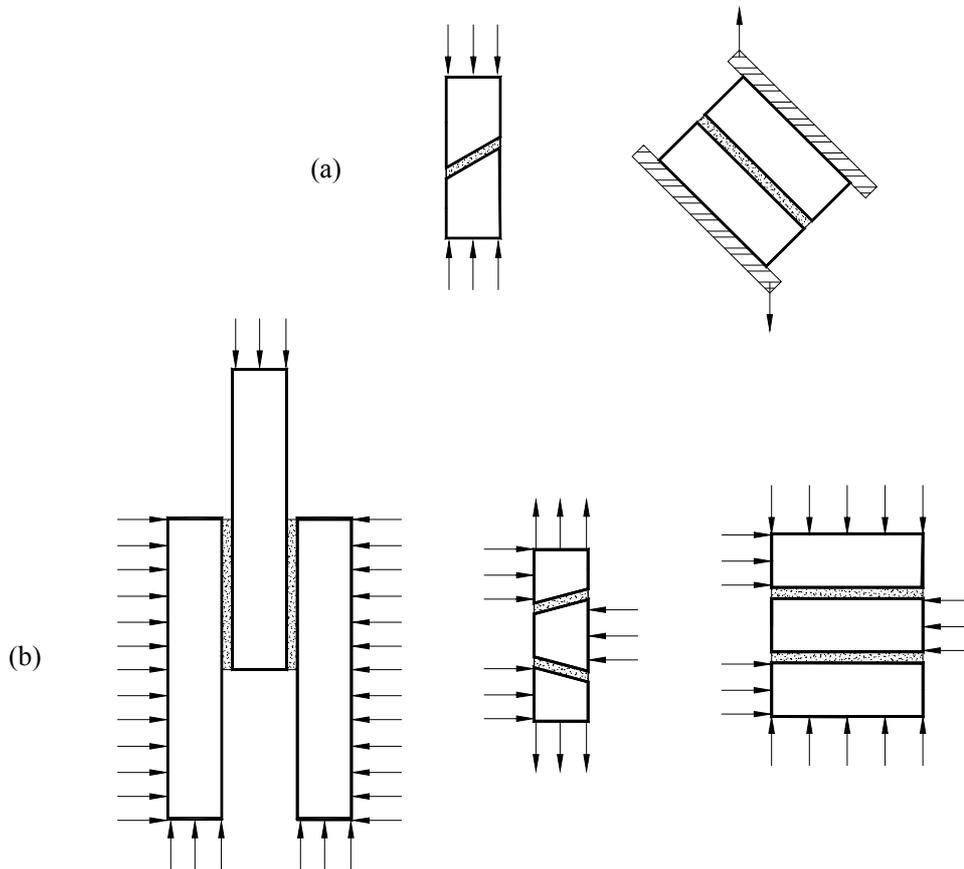


Figura 2.12 — Algunos ensamblajes de dos (a) o tres piezas (b) utilizados para la determinación de la resistencia a cortante (Anthoine, 1992).

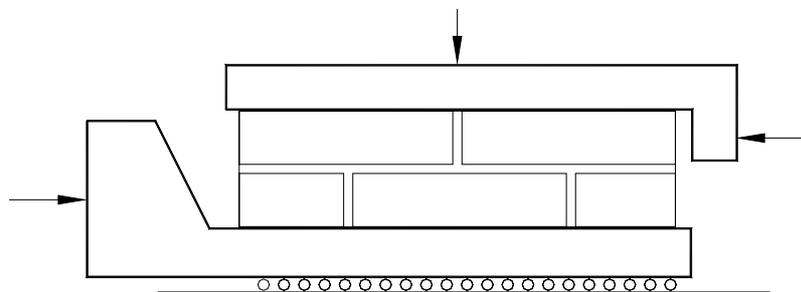


Figura 2.13 — Esquema de montaje para ensayo de resistencia de cortante (Anthoine, 1992).

Actualmente, conforme a los códigos del *Comité Europeo de Normalización* (EN 1052-3, 2003) se utilizan ensamblajes (muestras) formadas por tres piezas unidas con mortero, conforme a la tabla 2.1, del tipo A si el lado menor de las piezas es menor o igual a 200

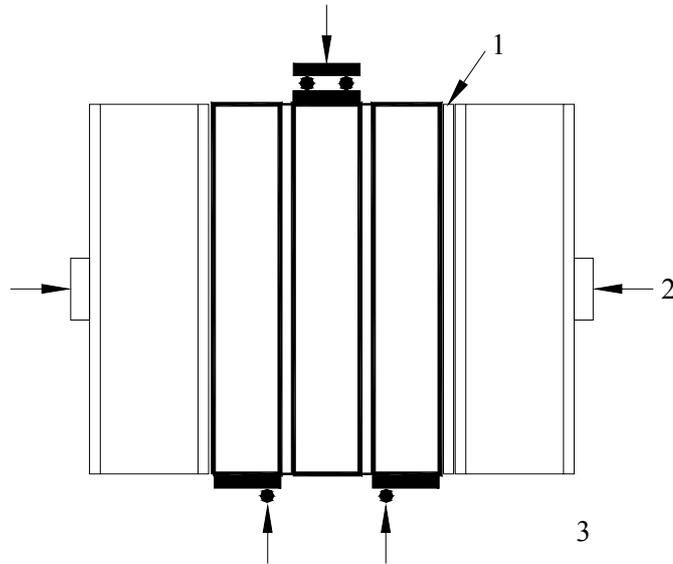
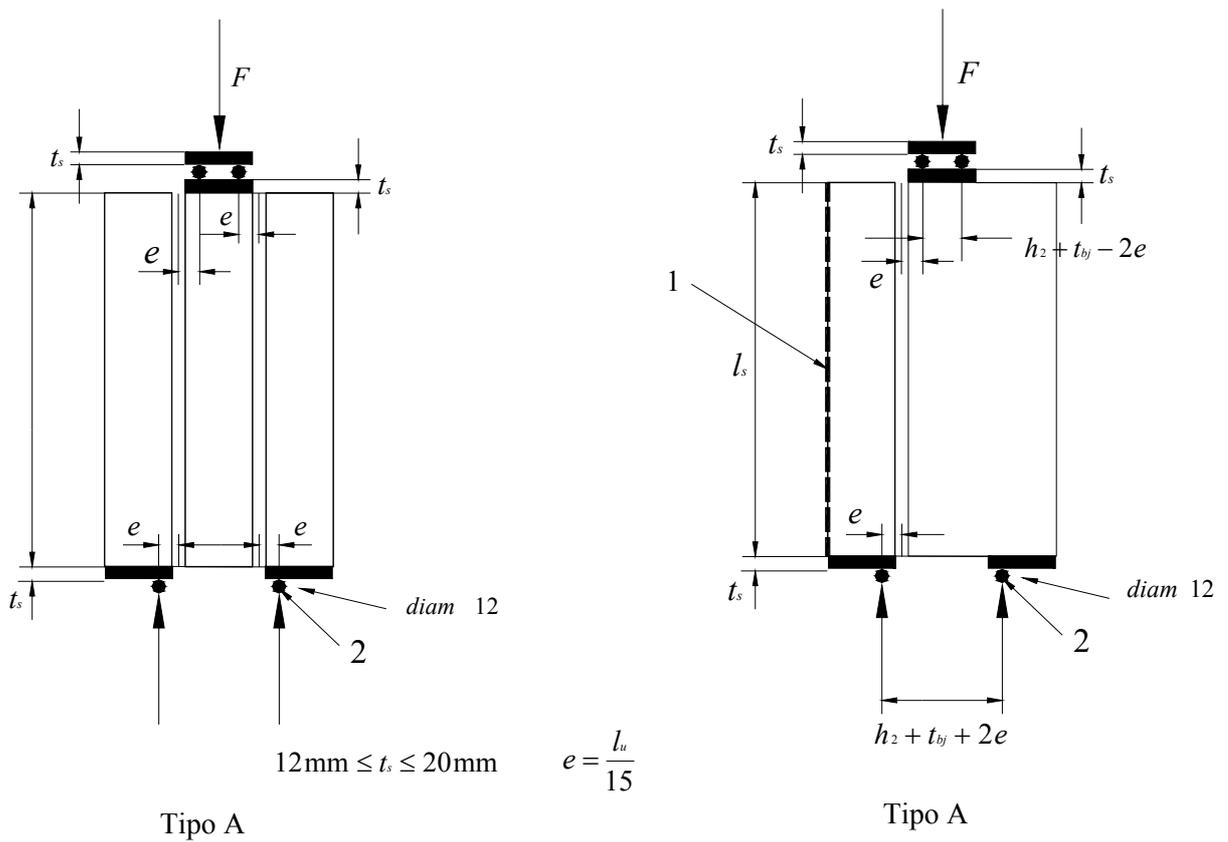


Figura 2.15 — Fase de pre-compresión (EN 1052-3, 2003).



- Leyenda
 1 Corte de sierra
 2 Rodillo, fijo o que no permita desplazamiento

Figura 2.16 — Fase de cortante (EN 1052-3, 2003).

2.3.4. Ensayos de prismas

Para evaluar la resistencia a compresión vertical de la fábrica se utilizan prismas. Los prismas apilados o los prismas de aparejo sencillo son los especímenes más comunes, utilizados en ensayos para la determinación de la resistencia a compresión (figura 2.17), pero debido a sus reducidas dimensiones (longitud de una o dos piezas y altura de tres a cinco piezas) no se consideran ensamblajes totalmente representativos del sistema constructivo.

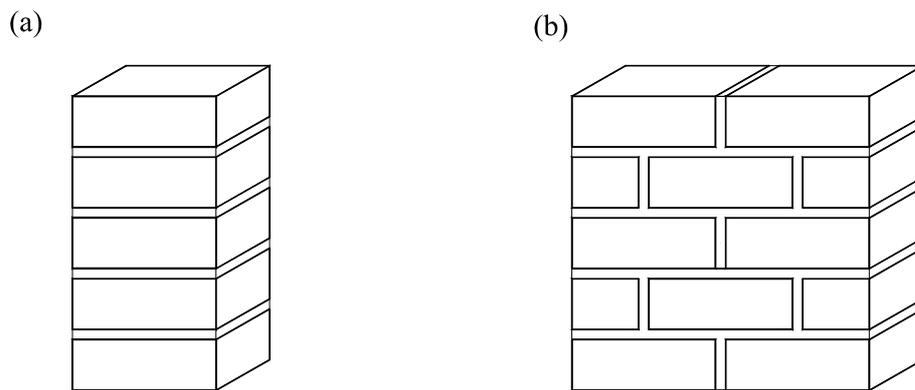
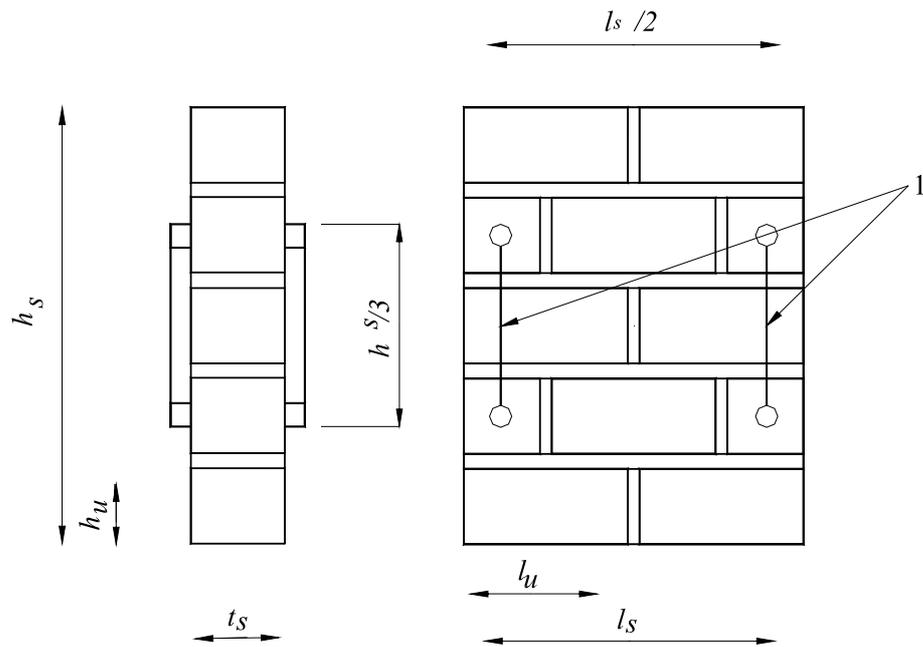


Figura 2.17 — (a) Prisma de piezas apiladas y (b) prisma de aparejo común (Anthoine, 1992).

Conforme a los códigos convenidos por el *Comité Europeo de Normalización* (norma EN 1052-1, 1999), la capacidad de carga a compresión de las fábricas de albañilería, que es medida aplicando una carga perpendicular a las juntas de asiento (juntas horizontales), se deduce de la resistencia de pequeñas probetas de fábrica de albañilería, sometidas a ensayo hasta rotura.

Las probetas (figura 2.18) se cargan uniformemente a compresión y la resistencia característica se obtiene a partir del promedio de resistencias medidas sobre varias probetas. Los tamaños mínimos (prescritos por la normativa antes señalada) para ensayar la resistencia a compresión de las fábricas de albañilería se muestran en la tabla 2.2.

En el procedimiento operatorio estipulado en la normativa se indica aplicar la carga uniformemente a las caras superior e inferior de la probeta, aumentando dicha carga progresivamente de forma que se alcance la rotura tras el período comprendido en un rango de 15 a 30 minutos desde el comienzo del proceso. Los rangos admisibles de resistencia del mortero (conforme a la misma normativa) dentro de los cuales debe ensayarse la fábrica de albañilería se muestran en la tabla 2.3.



Leyenda:

1- puntos de referencia para medir la deformación

Figura 2.18 — Probeta de fábrica de albañilería (EN 1052-1, 1999).

Tamaño de la cara vista de la pieza		Tamaño de la probeta de fábrica de albañilería		
l_u (mm)	h_u (mm)	Longitud l_s	Altura h_s	Espesor t_s
≤ 300	≤ 150	$\geq (2 \cdot l_u)$	$\geq 5 h_u$	$\geq 3 t_s, \leq 15 t_s$ y $\geq l_s$
	> 150		$\geq 3 h_u$	
	≤ 150	$\geq (1.5 \cdot l_u)$	$\geq 5 h_u$	
	> 150		$\geq 3 h_u$	

Tabla 2.2 — Tamaños de probeta mínimos para ensayar la resistencia a compresión de fábricas de albañilería (EN 1052-1, 1999).

Clase de mortero	Resistencia a compresión específica (f_{md}) N/mm ²	Resistencia media a compresión en el momento del ensayo (f_m) N/mm ²
M1	1.0	$1.0 \leq f_m < 2.5$
M2.5	2.5	$2.5 \leq f_m < 5$
M5	5	$5 \leq f_m < 7.5$
M7.5	7.5	$7.5 \leq f_m < 10$
M10	10	$10 \leq f_m < 12.5$
M12.5	12.5	$12.5 \leq f_m < 15$
M15	15	$15 \leq f_m < 20$
M20	20	$20 \leq f_m < 30$
M30	30	$30 \leq f_m < 40$

Tabla 2.3 — Rangos admisibles de resistencia del mortero dentro de los cuales debe ensayarse la fábrica de albañilería (EN 1052-1, 1999).

Las recomendaciones técnicas de RILEM (1994a) para la determinación de la resistencia de compresión de la fábrica (pequeños paneles o probetas) establecen las dimensiones y formato descritos en la tabla 2.4.

Dimensión de la cara mayor de la pieza (mm)	Ancho del espécimen b	Espesor d	Altura h	piezas apiladas N
$\leq 300 \times 75$	dos veces la longitud de la pieza o mayor	espesor de la pieza	$h \geq b$ y $h = 3d$ a $5d$	5 o más
$> 300 \times 75$	1.5 veces la longitud de la pieza o mayor	espesor de la pieza	$h \geq b$ y $h = 3d$ a $12d$	3 o más

Tabla 2.4 — Dimensiones de piezas y formato de las muestras (RILEM, 1994).

Las muestras típicas sugeridas en las mismas recomendaciones se describen en la figura 2.19. La velocidad de ensayo sugerida (en relación a la estimación de la resistencia última) se establece en un rango de duración que va de dos a tres minutos la totalidad del ensayo.

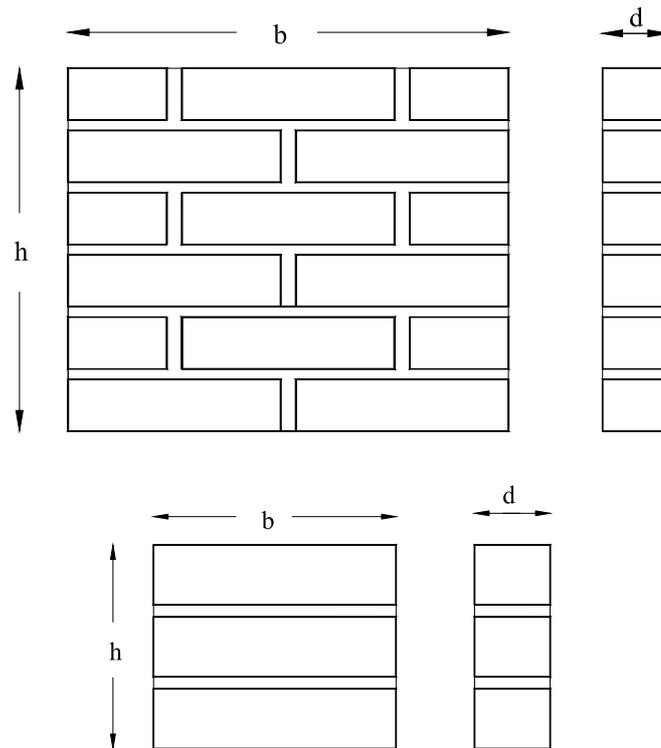


Figura 2.19 — Pequeño panel y prisma típicos, sugeridos por RILEM (1994-a).

2.3.5. Ensayos de paneles

Los paneles son ensamblajes de dimensiones comparables a las de una pequeña pared, que representan las características globales del funcionamiento de la fábrica.

Los paneles (figura 2.20) son el único formato que permite determinar fielmente las particularidades de la fábrica bajo estados de tensión biaxial. Las cargas normales de tracción o compresión pueden aplicarse sobre los bordes del panel, resultando así uniforme la distribución de tensiones.

En los paneles pueden medirse tensiones aplicadas paralelamente a las juntas horizontales, o bien variar el ángulo de aplicación (ángulo θ) permitiendo así conocer incluso el comportamiento anisótropo de la fábrica.

Los ensayos de paneles en estados de tensión uniforme (figura 2.21), generalmente se emplean para simular el comportamiento de paredes sujetas a carga vertical gravitatoria, en combinación con fuerzas horizontales similares a las producidas por sismo o viento. Este tipo de ensayos es por tanto más apropiado para obtener información de la respuesta estructural general de un mecanismo que para conocer las propiedades básicas de los materiales.

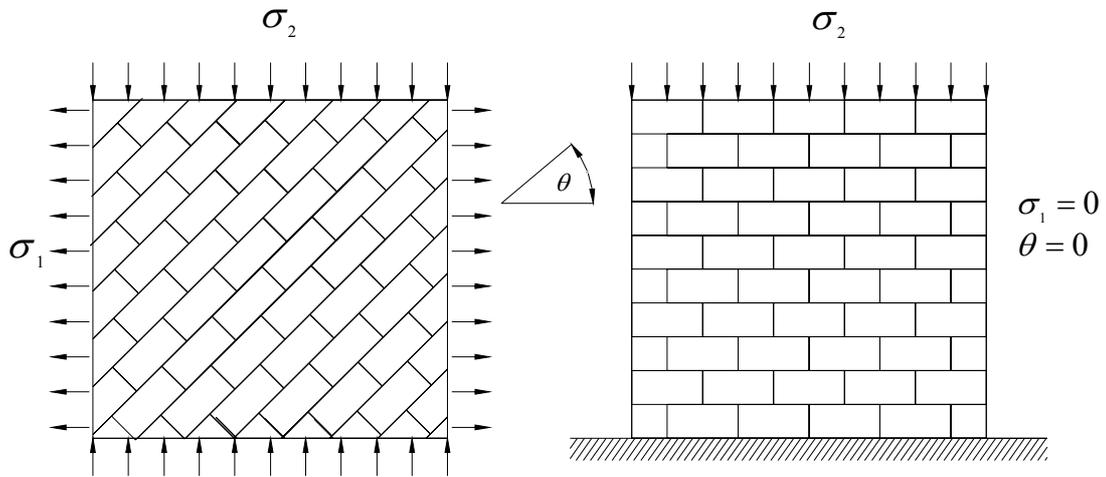


Figura 2.20 — Ensayo general biaxial (a) y ensayo uniaxial vertical (b) de paneles de fábrica (Anthoine, 1992).

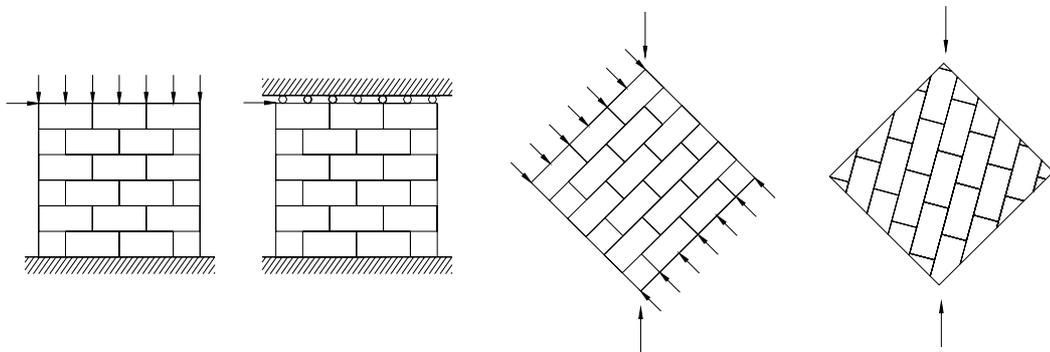


Figura 2.21 — Ensayos de paneles de fábrica sujetos a estados de tensión uniforme (Anthoine, 1992).

Las recomendaciones de RILEM (1994) especifican un método para la determinación de la resistencia a compresión de paredes estructurales de fábrica. El método incluye la descripción del procedimiento de preparación de los especímenes y equipamiento, así como del proceso de ejecución de los ensayos. Se sugiere que las dimensiones de los paneles se encuentren dentro de un rango de 2 a 4 m de altura, 1.2 a 1.8 m de largo y el espesor correspondiente a las piezas o al aparejo de las paredes de fábrica sujetas al análisis.

El proceso consiste en la aplicación de una carga vertical constante hasta la rotura, a una velocidad en correspondencia con los valores mostrados en la tabla 2.5, que se distribuye uniformemente al panel a través de una viga colocada sobre el mismo.

Resistencia de compresión estimada N/mm ²	Velocidad aproximada N/ mm ² /min
≤2.5	0.60
2.6 a 5	1.20
5.1 a 10	2.40
> 10	3.60

Tabla 2.5 — Prescripción para la velocidad de ensayo (RILEM, 1994).

2.3.6. Técnicas de ensayo a cortante

Un factor determinante en el fallo estructural de la fábrica es la limitada resistencia de las juntas, puesto que, además de la función que éstas desempeñan como conector o ligante del sistema constructivo, su resistencia ante cualquier tipo de esfuerzo de tracción puede considerarse prácticamente nula. Así mismo, la resistencia de compresión de los morteros o mezclas es comúnmente inferior a la de las piezas.

A principios de los años noventa, la mayor parte de la investigación desarrollada para obtener información y definir criterios del comportamiento ante esfuerzos de cortante de la fábrica, se enfocaba a determinar la resistencia límite.

Nuss et al. (1978) y Hamid y Drysdale (1980) utilizan un tipo de ensayo muy difundido, el cual consiste en la compresión uniaxial de piezas prismáticas de fábrica con una junta diagonal intermedia (figura 2.22-a). La naturaleza de este tipo de ensayo, cuando se controla a través de la carga, hace imposible obtener datos del comportamiento posterior a la carga última, así como del proceso de descarga y del desplazamiento, ya que el espécimen colapsa de forma inestable al alcanzar la resistencia máxima.

Sin embargo, los estudios experimentales que utilizan este proceso arrojan importante información concerniente a factores tales como la influencia de la dosificación del mortero (relación agua-cemento), la estructura superficial de las piezas, medida por la relación de absorción inicial y aparejos utilizados.

Diversos investigadores (Yokel y Fattal, 1976; Calvi et al 1985; Meli, 1973) utilizan la configuración de ensayo que se muestra en la figura 2.22-b para estudiar la tensión diagonal y la resistencia a cortante de la fábrica.

La concentración diagonal de la carga genera un complejo estado de tensiones en el espécimen. La distribución de las tensiones normales y de cortante es irregular a lo largo del panel por ello se determina que las resistencias últimas obtenidas en estos ensayos, reflejan únicamente el perfil general de comportamiento de los paneles durante el proceso de carga y el fallo. Con este tipo de ensayo no pueden obtenerse datos exactos de la fase posterior a la resistencia última y a la deformación.

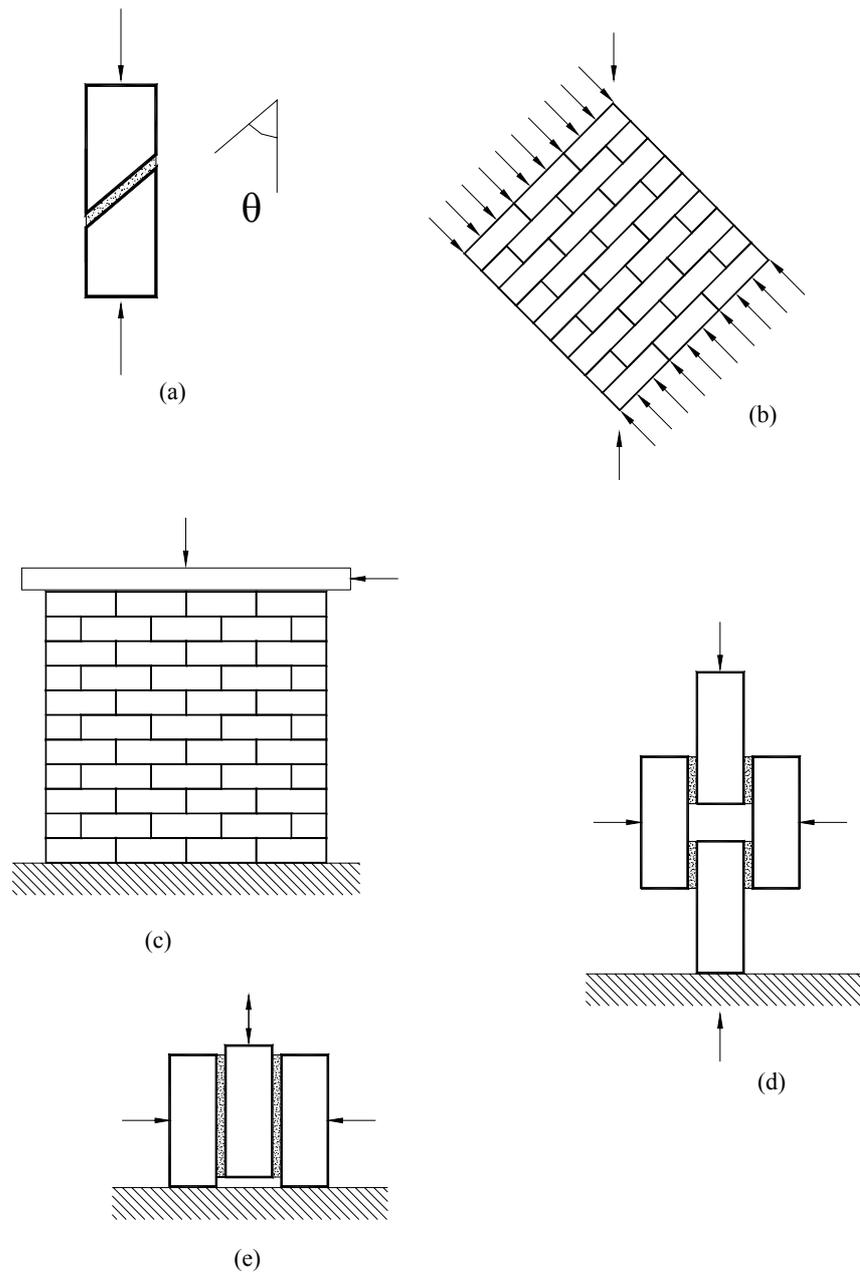


Figura 2.22 — Configuraciones de ensayo de cortante (Atkinson et al., 1989).

El ensayo biaxial (figura 2.22-c) implica la compresión de un panel o un pilar representativo de la obra de fábrica a través de una carga vertical, seguido por la aplicación de una carga horizontal concentrada en la parte superior del espécimen. Este tipo de ensayo simula el comportamiento de las paredes que en una estructura soportan esfuerzos de cortante en su propio plano (Meli, 1973; Sinha y Hendry, 1969).

Debido a las condiciones de carga específicas, este tipo de ensayo es más adecuado para revelar información acerca de la respuesta global de un componente estructural que para aportar datos de las propiedades básicas de un material.

Meli (1973) empleó la configuración del ensayo mostrado en la figura 2.22-d para investigar la adherencia y la fricción de las juntas de algunos tipos de piezas de fábrica. Observó una variación lineal de la resistencia a cortante al aplicar una compresión previa perpendicular a las juntas de mortero. Observó que la resistencia adherente también varía según las características del mortero y de las piezas utilizadas.

Hamid (1978) utilizó la misma configuración (figura 2.22-d) para estudiar la respuesta de cortante de fábricas de ladrillo hueco con o sin inyección de hormigón. En sus resultados señala que el coeficiente de fricción disminuye con el incremento de la carga de pre-compresión. Respecto al desplazamiento en dirección de la carga de cortante observa que la fábrica hueca presenta mayor rigidez de cortante inicial, en comparación a la fábrica saturada con hormigón inyectado. El incremento de la tensión normal aumenta los niveles de resistencia de cortante y de rigidez. La fricción residual posterior a la rotura también se determina conforme a la carga de compresión inicial aplicada.

Hegemeier (1978) realizó un estudio detallado del comportamiento de las juntas de fábrica sujetas a cargas de cortante, utilizando para ello tripletas conformadas por bloques de hormigón (figura 2.22-e) que guardan similitud a las mostradas en la figura 2.22-d. En su investigación definió las curvas del comportamiento inicial y posterior a la rotura, así como el desplazamiento ocasionado por la carga de cortante en procesos de carga cíclicos.

Atkinson et al. (1989) estudiaron el modo de fallo por cortante de las juntas horizontales y la relación carga-desplazamiento de la obra de fábrica sujeta a procesos de carga monotónicos y cíclicos. Evaluaron el efecto que ocasiona el empleo de diferentes tipos de piezas y mortero en el comportamiento de la fábrica. Para ello llevaron a cabo tres series de ensayos de laboratorio y para la ejecución de los mismos utilizaron un aparato de cortante directo (figura 2.23-a). El aparato es un equipo servo-controlado, integrado básicamente por dos actuadores independientes acoplados a un marco estructural, los cuales generan cargas normal y de cortante de hasta 736 y 156 kN, respectivamente (figura 2.23-b).

Las muestras que utilizaron para los ensayos eran pequeños ensamblajes de fábrica maciza, unidos con mortero en un aparejo común (figura 2.24). Estos se colocan en un bastidor de acero adaptado a las dimensiones de los mismos y de la máquina de ensayo (figura 2.25).

En la figura puede verse que la placa superior del bastidor retiene al espécimen mientras que la placa inferior tiende a desplazarse por la fuerza transmitida por el actuador horizontal. La disposición de las piezas induce a que la rotura ocurra a través de la junta horizontal.

Para medir los desplazamientos horizontales y verticales se utilizan unidades LVDT (de Linear Variable Differential Transformer). Las fuerzas transmitidas se miden a través de células de carga integradas a los transductores.

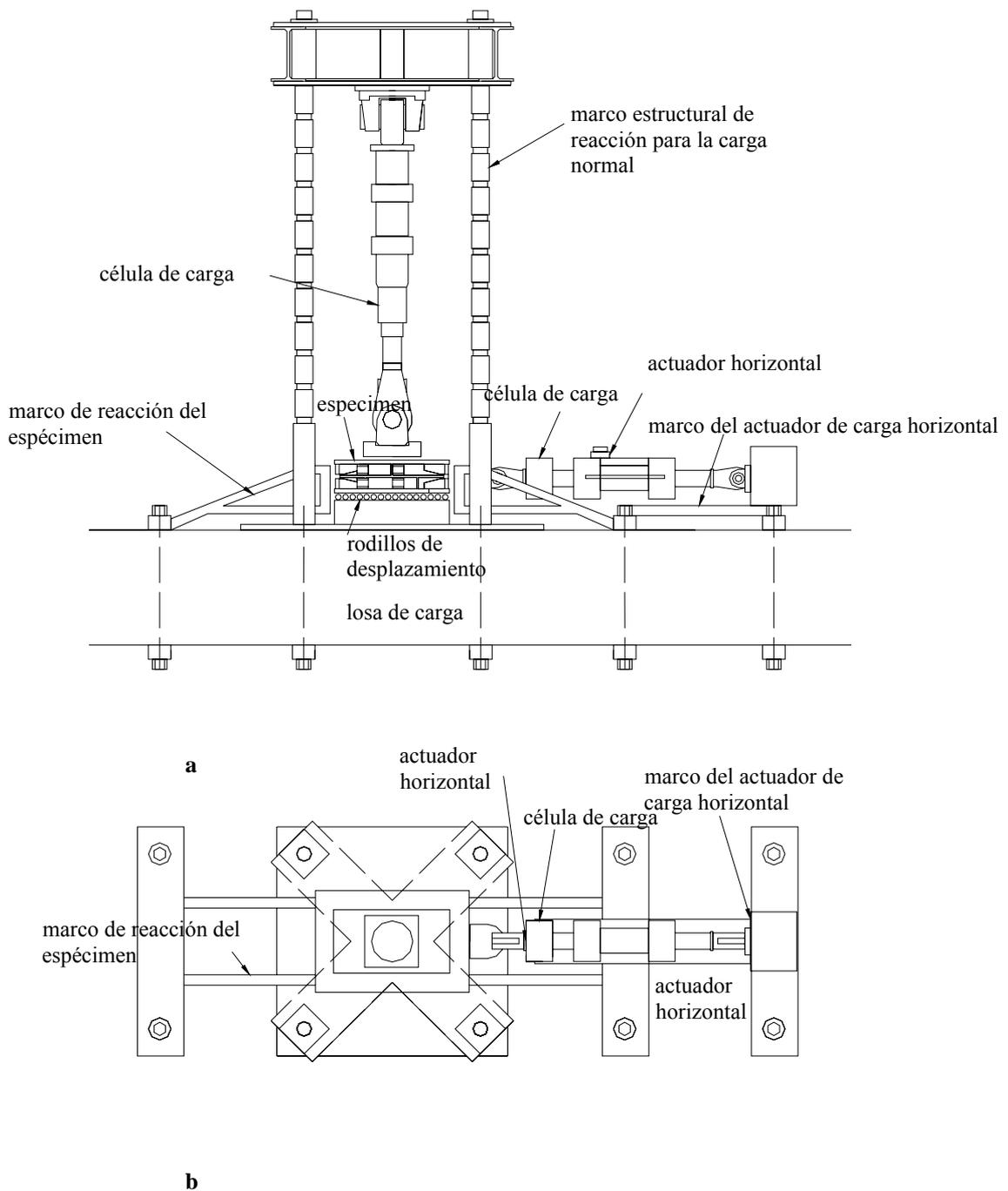


Figura 2.23 — Esquema del aparato utilizado para ensayos de cortante directo: (a) vista lateral; (b) vista superior. (Atkinson et al, 1989).

Antes de la fabricación de las muestras, las piezas de ladrillo son sumergidas en agua 24 horas y cepilladas para eliminar las partículas contaminantes. Posteriormente se mantienen durante un período similar en un proceso de secado. Entonces las piezas se adhieren a las superficies de las placas del bastidor de ensayo por medio de un adhesivo epoxi estructural, conformando así las hiladas superior e inferior del espécimen.

Una vez llevado a cabo el proceso descrito se unen con mortero las dos hiladas de piezas para conformar las probetas. Se mantienen 13 días en una cámara húmeda y un período más en el exterior.

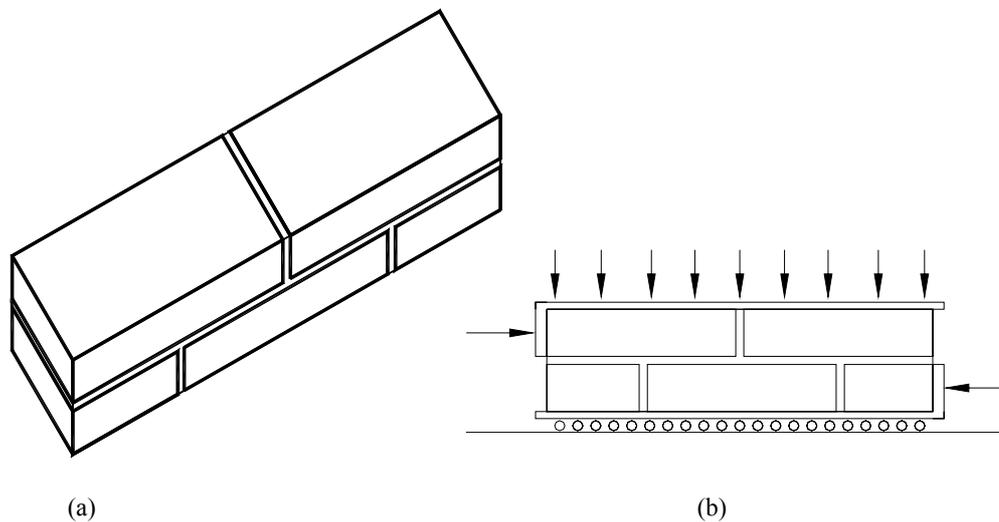


Figura 2.24 — Tipo de probeta utilizada por Atkinson et al., 1999: (a) vista general; (b) esquema de ensayo.

El proceso inicial de los ensayos, consiste en aplicar una pequeña carga de compresión para ajustar los especímenes y el equipo, una vez colocadas las unidades de adquisición de datos LVDT. Los valores de carga normal aplicada a los especímenes varía entre 15 y 155 kN, en correspondencia a un rango de tensiones entre 0.36 y 3.7 N/mm², en el caso de los especímenes de fábrica antigua y entre 0.4 y 4.2 N/mm² para los especímenes de fábrica de manufactura reciente.

Los especímenes extraídos de muros antiguos fueron ensayados bajo cargas normales en un rango entre 21 y 63 kN. Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de los materiales individuales muestran resistencias de compresión de 38.60 N/mm² en el caso de piezas antiguas y de 67.80 N/mm² en el caso de piezas nuevas.

Los valores arrojados en los ensayos de caracterización del módulo de elasticidad son también superiores en el caso de las piezas de fábrica nuevas. En los ensayos de cortante, la curva de comportamiento carga-deformación muestra un rápido incremento de la fuerza hasta un nivel máximo, seguido por el descenso hasta un valor residual.

Llevaron a cabo un total de 44 ensayos utilizando especímenes formados por piezas de fábrica antiguas, extraídas de edificios construidos a finales del siglo XIX en Colorado, E.U.A.; 9 ensayos de especímenes fabricados con piezas de manufactura reciente y 3 ensayos de probetas extraídas de viejos muros dañados, de edificios afectados por el sismo Whittier, ocurrido en California, E.U.A. en 1990.

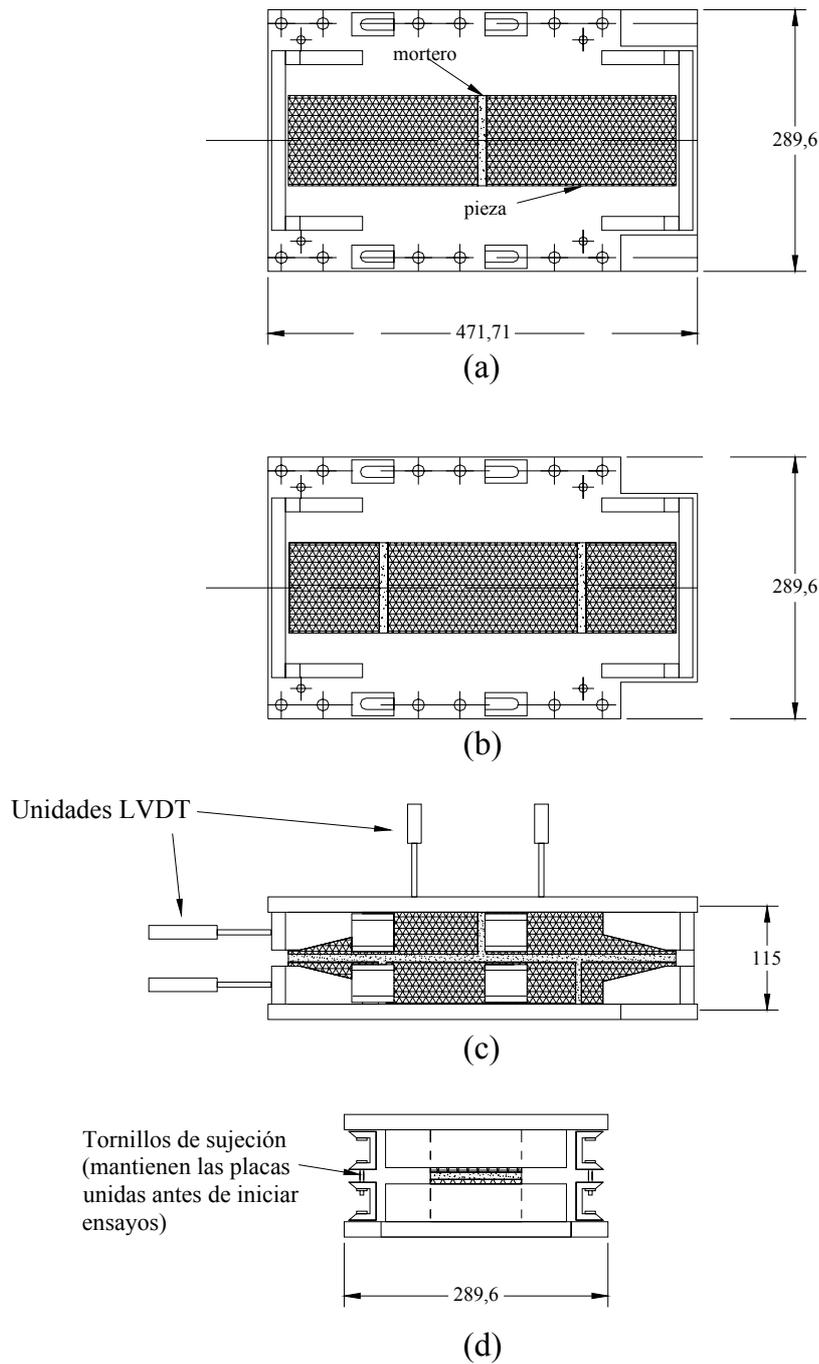


Figura 2.25 — Bastidor utilizado para la colocación de los especímenes en el aparato de ensayo. (a) Placa y piezas superiores del espécimen (vista superior de sección); (b) placa y piezas inferiores del espécimen (vista superior de sección); (c) vista lateral del espécimen confinado en el bastidor; (d) vista frontal (Atkinson et al., 1989).

En la tabla 2.6 se describen las características de los tres tipos de especímenes utilizados.

Tipo de ensayo (Especímenes ensayados)	Dimensiones de la piezas de fábrica (mm)	Tipo de mortero (dosificación)	Área de la junta horizontal de mortero (mm ²), espesores (mm)
Piezas de fábrica antigua (44)	208 x 100 x 64	ceemento, cal, arena 1:2:9	42000, 7 y 13
Piezas de manufactura reciente (9)	193 x 92 x 55	ceemento, cal, arena 1:1.5:4.5	36616, 7
Especímenes extraídos de fábrica antigua dañada (3)	aprox. 220 x 100 x 60	(cal:ceemento estimada: 1:3)	22000, entre 6 y 9

Tabla 2.6 — Características de los especímenes de fábrica utilizados por Atkinson et al (1999).

La respuesta de máxima resistencia inicial de las juntas de fábrica puede representarse con una curva hiperbólica, y la rigidez depende tanto del desplazamiento permisible como de la intensidad de la carga normal. En la tabla 2.7 se presenta un comparativo de las resistencias obtenidas en ensayos de algunos autores, incluyendo el trabajo de Atkinson.

Investigación (1)	Unidad (2)	Mortero ^a (3)	C (N/mm ²) (4)	$\tan \phi$ (5)	Rango Normal de Tensión (N/mm ²) (6)
Atkinson	Piezas de Fábrica antigua (13 mm.)	1:2:9	0.127 0.023 (R)	0.695 0.678 (R)	0-4
Atkinson	Piezas de Fábrica antigua (7 mm.)	1:2:9	0.213 0.038 (R)	0.640 0.6931 (R)	0-4
Atkinson	Piezas de Fábrica nueva	1:1.5:4.5	0.811 0.037 (R)	0.745 0.747 (R)	0-4
Hegemier et al. (1978)	Bloque de Concreto	Tipo S	0.25	0.89	0-2.75
Stöckl y Hoffmann (1986)	Ladrillos de Fábrica (MZ 20)	1:0.68:15 1:0:9.7	0.95 1.45	0.7 0.56	0-2.4
Pook et al. (1986)	Bloque de Concreto	Tipo S	0.76	0.7	0-1.6
Nuss et al. (1978)	Piezas de Fábrica nueva	1:2:9 1:0.5:4.5 1:0.25:3	1.10 4.73 4.86	0.77 0.75 0.76	0.7-6.3 3.1-18.3 1.4-22.0
Pieper (en Mayes y Clough, 1975)	Piezas de Fábrica	1:2:8	0.20	0.84	0-1.2
Drysdale et al.	Ladrillos de	1:0.5:4	0.57	0.90	0-14

Investigación (1)	Unidad (2)	Mortero ^a (3)	C (N/mm ²) (4)	$\tan \phi$ (5)	Rango Normal de Tensión (N/mm ²) (6)
(1979)	Fábrica				
Kariotis et al. (1979)	Ladrillos de Fábrica antigua (ensayos en sitio)	Arena-cal	0.330	1.15	0-0-150

Tabla 2.7 — Resistencias de juntas horizontales (Atkinson et al., 1999).

Lourenço y Ramos (2004) comprobaron que cuando la fábrica está sometida a niveles moderados de tensión normal, el comportamiento de fallo por cortante de las juntas puede representarse a través de la ley de fricción de Coulomb, que establece una relación lineal entre la tensión de cortante y la tensión normal:

$$\tau = c + \tan \phi \cdot \sigma \tag{3}$$

En donde τ y σ son las tensiones de cortante y normal respectivamente, c representa la cohesión y $\tan \phi$ es la tangente del ángulo de rozamiento.

La representación gráfica de dicho criterio puede verse en el segmento a de la figura 2.26, sin embargo, para niveles altos de tensión normal se pierde la validez del criterio de Coulomb y la fábrica presenta la formación de grietas y roturas por compresión (segmento b de la figura 2.26). Para esos casos se adopta un modelo modificado propuesto por Lourenço y Rots (1997).

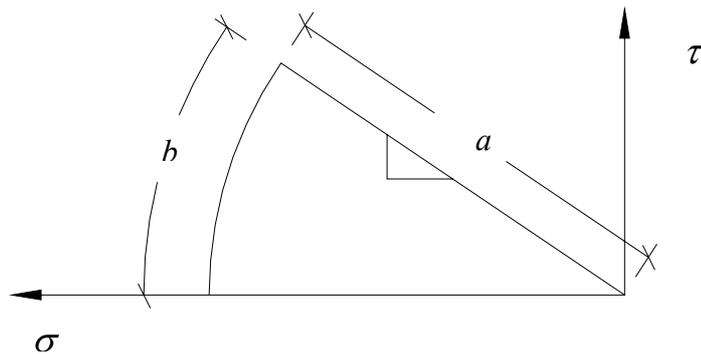


Figura 2.26 — Comportamiento de las juntas secas en la fábrica. Criterio de fallo para tensiones de compresión bajas y altas (Lourenço y Ramos, 2004).

Para caracterizar el criterio de Coulomb se proponen métodos de ensayo que determinan los parámetros de resistencia c y $\tan \phi$ (figura 2.27).

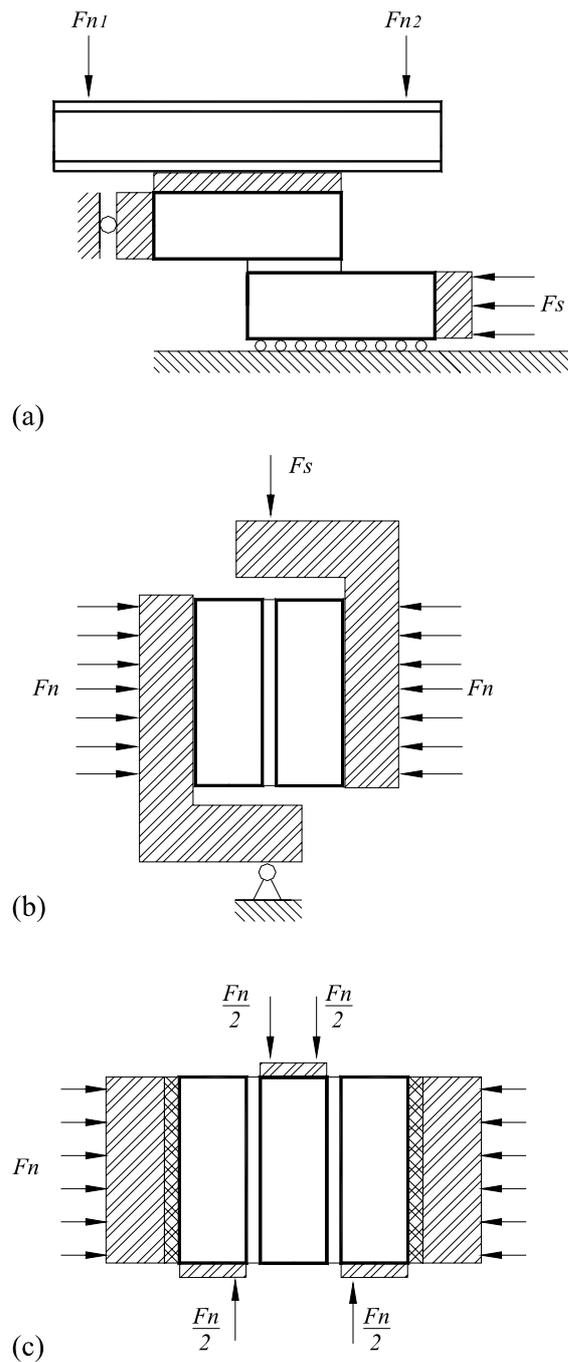


Figura 2.27 — Diferentes tipos de ensayos de cortante: (a) Ensayo de probeta de dos piezas; (b) ensayo utilizado por van der Pluijm (1999); y (c) ensayo de tripleta, de Lourenço y Ramos (2004).

Lourenço y Ramos llevaron a cabo un estudio para la caracterización del comportamiento de las juntas, empleando piezas de fábrica de piedra sin mortero (sistema llamado de junta seca), unidas por contacto directo entre las superficies y sujetas a procesos cíclicos de carga. Observan que después de un determinado número de ciclos repetitivos se presentan significativas diferencias entre el ángulo de fricción inicial y el final (figura 28).

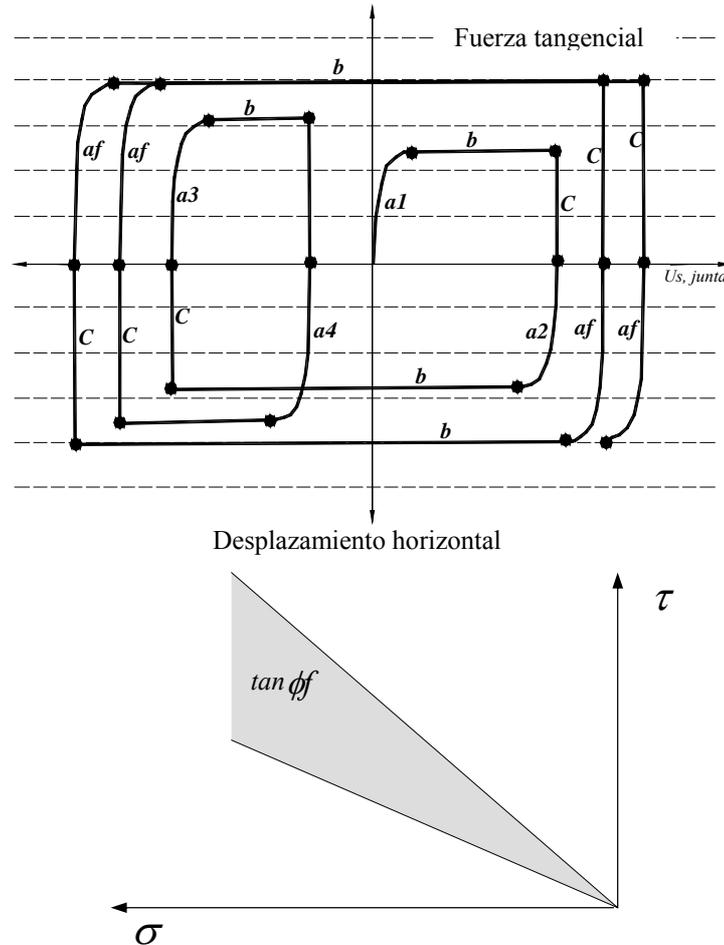


Figura 2. 28 — Criterio de fallo de las juntas secas (Lourenço y Ramos, 2004).

En el ángulo de fricción tiene gran influencia la rugosidad de la superficie de contacto entre las piezas: a mayor rugosidad de la superficie aumenta el ángulo final de fricción. Los autores experimentan con tres tipos de series, denominadas (P), (S) y (R), cuyos nombres denotan los tratamientos aplicados a las superficies de contacto entre las piezas: pulido, corte aserrado mecánicamente y rugosa, respectivamente. Controlan los ciclos de carga por medio de transductores de desplazamiento colocados en paralelo a las juntas horizontales.

La ley de fricción de Coulomb concuerda con los resultados obtenidos por los autores mencionados, que determinados por regresión lineal arrojan un factor r^2 igual a 0,96 una cohesión igual a cero. Los resultados, en términos de la $\tan \phi$ varían significativamente en correspondencia al tratamiento de la superficie de contacto entre las piezas (tabla 2.8).

Las series (P) referidas en la tabla 2.8 muestran un ángulo de fricción extremadamente bajo inicialmente ($\tan \phi = 0,18$) debido a la baja rugosidad superficial, con una marcada diferencia entre los ángulos de rozamiento al inicio y al final del proceso de carga cíclico ($\tan \phi_f / \tan \phi_i = 2,4$).

Series	$\tan \phi_i$	$\tan \phi_f$	$\tan \phi_f / \tan \phi_i$
P	0,18	0,43	2,4
S	0,62	0,63	1,0
R	0,56	0,74	1,3

Tabla 2.8 — Tangente del ángulo de rozamiento según la rugosidad de la superficie de contacto de las piezas (Lourenço y Ramos, 2004).

Las series (S) prácticamente no presentan variación entre los ángulos de rozamiento inicial y final, lo cual parece ser casual, puesto que el tratamiento superficial es tan rugoso como el aplicado en las series (R) y las mismas presentan un ángulo de fricción ligeramente inferior, que se incrementa de la forma esperada en todas las series; por lo tanto, se determina que la rugosidad en la superficie de contacto de las piezas incrementa el ángulo final de rozamiento.

Hofmann y Stockl (1986) desarrollan un método de ensayo de especímenes formados por dos piezas, el cual genera una tensión normal constante y uniformemente distribuida en las juntas horizontales.

Prestan especial interés a las teorías analíticas de la deformación por cortante de las juntas de fábrica; la relación entre la tensión cortante τ de dichas juntas y el desplazamiento relativo Δ de las piezas. Por lo general, en los trabajos afines desarrollados por otros autores hasta ese momento, la relación entre τ y Δ no se toma en cuenta, y los escasos resultados publicados presentan gran dispersión.

En los ensayos convencionales (figura 2.29) la tensión cortante en una probeta de dos piezas se genera de manera forzada con la relación P-P, dando lugar a un momento externo P·a. La rotación del espécimen se evita por medio de un momento de reacción R·b, en el que R participa como una fuerza de fricción debida a la aplicación de la carga P y el momento aplicado es una incógnita.

Además R actúa en la junta como una fuerza normal indefinida. La carga normal externa N a menudo no se aplica y la influencia de la carga vertical no se analiza. De esta manera, para generar la tensión normal solo se considera una fuerza dispuesta al centro, sobre la junta.

En el proceso de ensayo propuesto por Hofmann y Stockl (figura 2.30) se utilizan dos prensas (N_1 y N_2) para generar la fuerza normal N; de manera tal que la carga vertical se distribuye a N_1 y N_2 , y el momento N·b se compensa por el momento P·a generado por P.

En el ensayo, el incremento constante de la carga cortante P ocasiona el incremento del momento P·a. Mientras tanto, debido a la fuerza normal resultante N, la tensión normal en la junta debe mantenerse constante durante la ejecución total del ensayo, el valor b podría

cambiarse por $P \cdot a = N \cdot b$ con el incremento de P . Esto es lo que puede ocurrir durante la transferencia de carga de N_2 a N_1 .

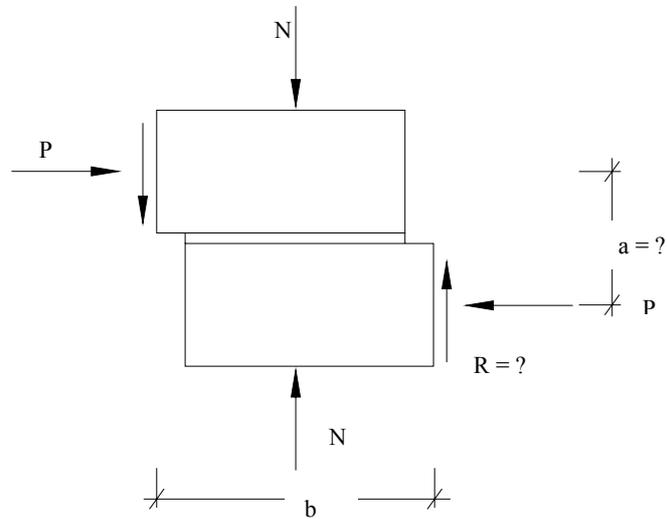


Figura 2. 29 — Ensayo típico de espécimen de dos piezas. Hofmann y Stockl (1986).

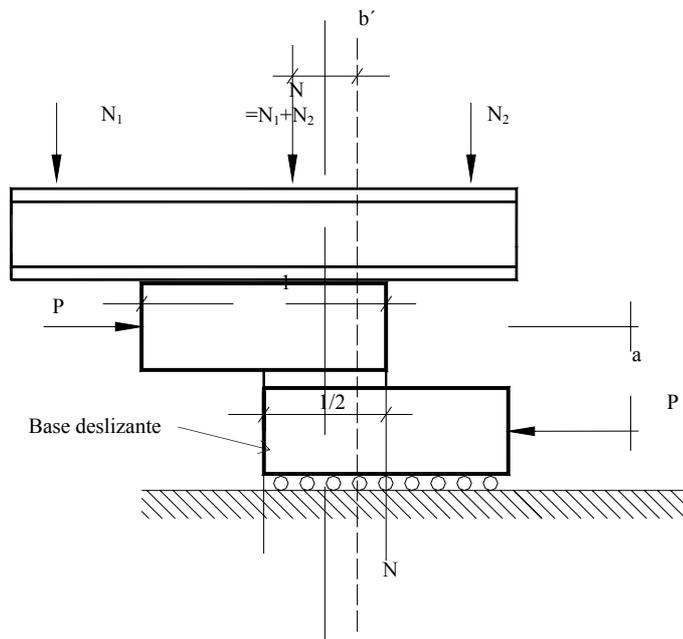


Figura 2. 30 — Ensayo perfeccionado de espécimen de dos piezas. Hofmann y Stockl (1986).

Sin embargo, como puede observarse en la figura 2.31, la resultante de N_1 y N_2 no puede moverse demasiado hacia la izquierda, más allá del extremo de la pieza superior. Debido a esta limitación del brazo de palanca, es necesaria una mínima carga vertical para contrarrestar el momento, la carga vertical mínima decrece, y se incrementa el brazo de palanca de la carga resultante N con respecto al centro de la junta de mortero.

Por lo anterior, el brazo de palanca podría alcanzar una longitud máxima de 180 mm hasta que el soporte se vuelva inestable, en comparación a la longitud de 12 mm en el caso de las piezas colocadas en su completa longitud. Además, la colocación de las piezas hasta la mitad de su longitud corresponde con la condición usual de las juntas de fábrica.

La fig 2.30 muestra el dispositivo de ensayo diseñado por Daschner (1982) fabricado con el mismo propósito y que han adaptado Hofmann y Stockl (1986) para su estudio. Las fuerzas vertical y horizontal son generadas por medio de gatos hidráulicos, controlados por sendos circuitos de mando.

Las fuerzas se registran por medio de células de carga. En la dirección horizontal se sitúa un pieza móvil que puede desplazarse lateralmente, para permitir la colocación y extracción del espécimen de ensayo. El movimiento de esta pieza se facilita por medio de una placa deslizante.

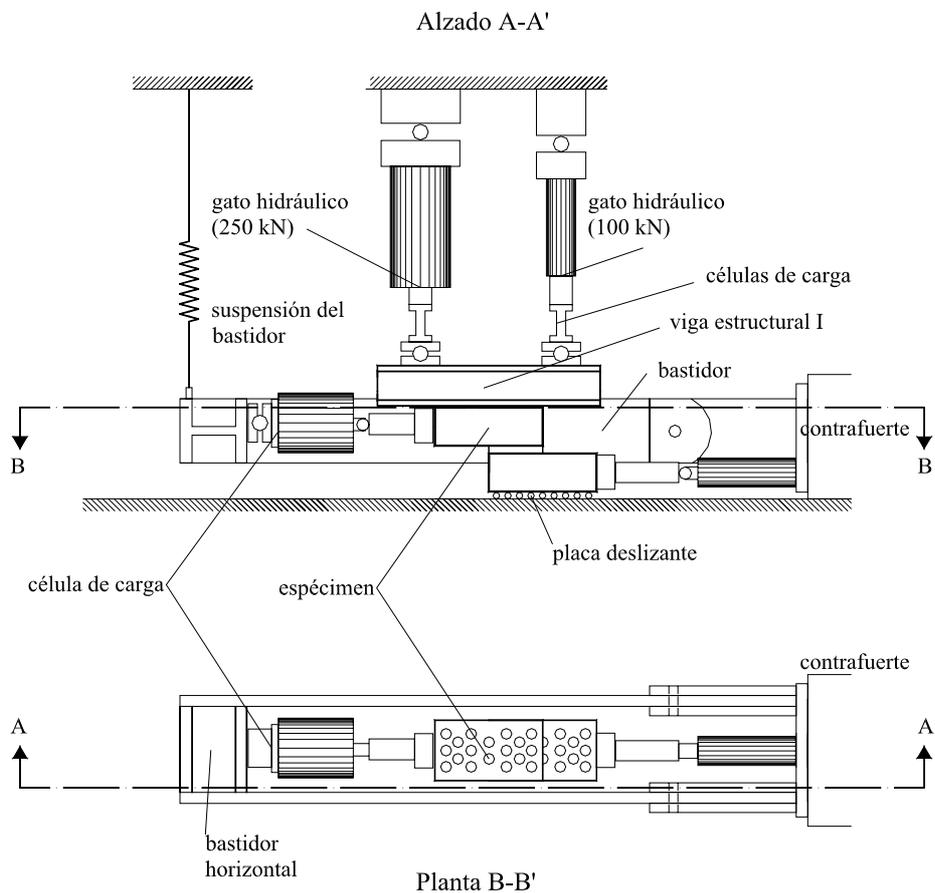


Figura 2. 31 — Configuración de ensayo. Hofmann y Stockl (1986).

Hofmann y Stockl utilizan cinco tipos de piezas de fábrica para la fabricación de los especímenes, tratándose de ladrillos de arcilla en tres de los casos y de ladrillos arena-cal los dos restantes. Así mismo, emplean morteros húmedos y secos. El programa de ensayos incluye cinco probetas para cada combinación pieza-mortero.

Durante la ejecución de los ensayos se registra la deformación de las piezas debido a las tensiones de compresión y cortante en dirección de la fuerza de cortante, los movimientos de desplazamiento en las interfases entre las piezas y el mortero; y las deformaciones por compresión y cortante del mortero en dirección de la fuerza de cortante.

La deformación total en el área de la junta horizontal se analiza midiendo el desplazamiento entre dos puntos W_5 respecto a dos puntos W_6 y por la distancia entre dos puntos W_7 (figura 2.32) Existen tres componentes que influyen en esas distancias de diferente manera: la deformación por cortante alarga la distancia W_5 respecto a W_6 y acorta la distancia W_7 (figura 2.32-a); sucede lo mismo con las interfases entre el mortero y las piezas (figura 2.32-b); la compresión de las juntas de mortero en dirección longitudinal acorta ambas distancias (figura 2.32-c).

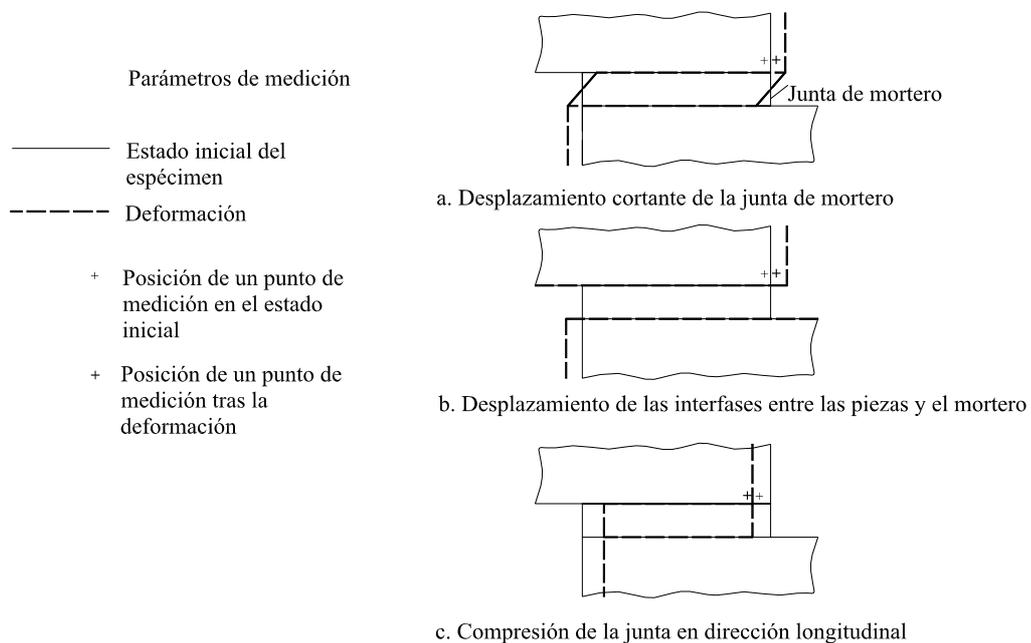


Figura 2. 32 — Componentes de desplazamientos medidos. Hofmann y Stockl (1986).

A manera de ejemplo, en la Fig. 2.33 se presenta el gráfico del valor principal de la medida que hay de W_5 a W_6 y el valor aumentado de W_7 en su dirección positiva, en relación con las tensiones de cortante $\tau \cdot \Delta$.

La envolvente elimina la deformación longitudinal de la junta. La diferencia entre las otras curvas es igual a dos veces el valor de la compresión longitudinal de la junta. Por lo general, en las tensiones de cortante las fuerzas se transmiten a través de los forjados, pero también, en la mayoría de los casos solo actúan pequeñas fuerzas en la dirección horizontal; lo cual significa que en la dirección longitudinal de las piezas en la fábrica solo ocurrirán tensiones mínimas.

Por lo anterior, las aplicaciones comunes difieren respecto al mecanismo de Hoffman y Stockl, cuyas ventajas pueden sintetizarse en las siguientes: el ensayo de las juntas horizontales, evitando momentos de flexión por compensación a través de un control

electrónico; el control de la variación de las tensiones verticales en las juntas de los especímenes y; el registro de los desplazamientos (Δ) de las piezas durante toda la ejecución.

Los resultados más relevantes pueden condensarse: el coeficiente de adherencia τ_0 se determina en un rango entre 0.21N/mm^2 y 1.44N/mm^2 para todos los tipos de piezas y formatos geométricos ensayados; la utilización de morteros de mejor calidad refleja un marcado incremento en los valores de τ_0 obtenidos; y no se determina una clara relación entre el coeficiente de fricción μ y los parámetros de ensayo (calidad del mortero, tipo de piezas de fábrica, proceso de fabricación); y el coeficiente de fricción registrado se sitúa entre 0.52 y 0.80.

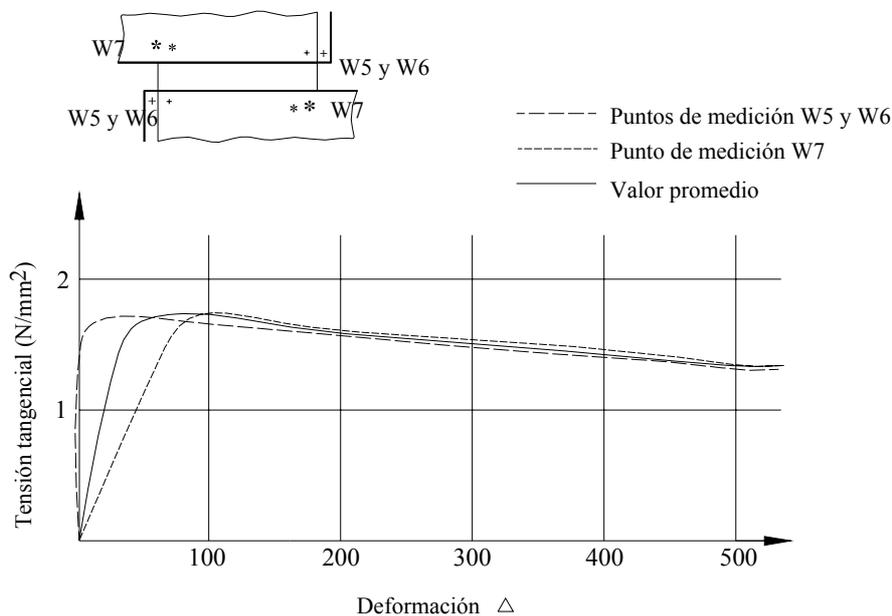


Figura 2. 33 — Ejemplo de la influencia de la medición establecida sobre la relación $\tau \cdot \Delta$. (Hofmann y Stockl, 1986).

Pluijm et al. (1993) analizan el comportamiento y la resistencia de las juntas de mortero horizontales, a través de ensayos de desplazamiento controlado. El autor presenta un trabajo de análisis fundamentado en los resultados obtenidos de una serie de ensayos experimentales, que envuelve valiosa información sobre la resistencia a cortante de la fábrica y el vínculo de los valores de cohesión, ángulo de rozamiento interno, modulo cortante y del comportamiento posterior al límite resistente.

En su investigación, Pluijm realiza 54 ensayos de pequeños ensamblajes de ladrillo (figura 2.34). Utiliza tres tipos de piezas de fábrica y emplea para la fabricación dos tipos de mortero.

La idea principal del método de ensayo es que los momentos y las fuerzas de cortante pueden inducir hacia un fallo por cortante puro (figura 2.35 a y b), a través de la línea central del espécimen, si $M = V \cdot d/2$. En la línea central de la junta el momento se

considera igual a cero, formando un mecanismo en el que la fuerza axial se transforma en los momentos M y las fuerzas de cortante V . Esta es la diferencia principal con ensayos similares, en los que la carga es aplicada directamente sobre el espécimen.

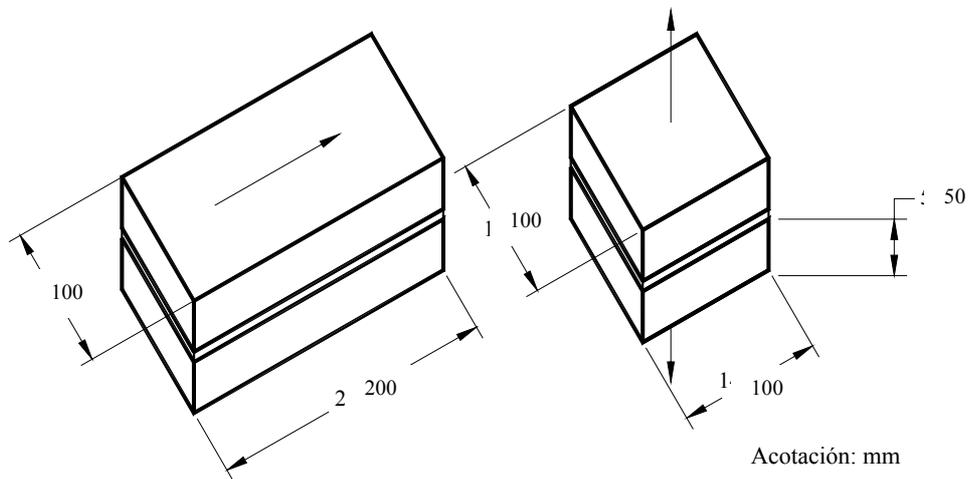


Figura 2. 34 — Especímenes utilizados por Pluijm (1993) para ensayos de cortante (a); y tracción (b).

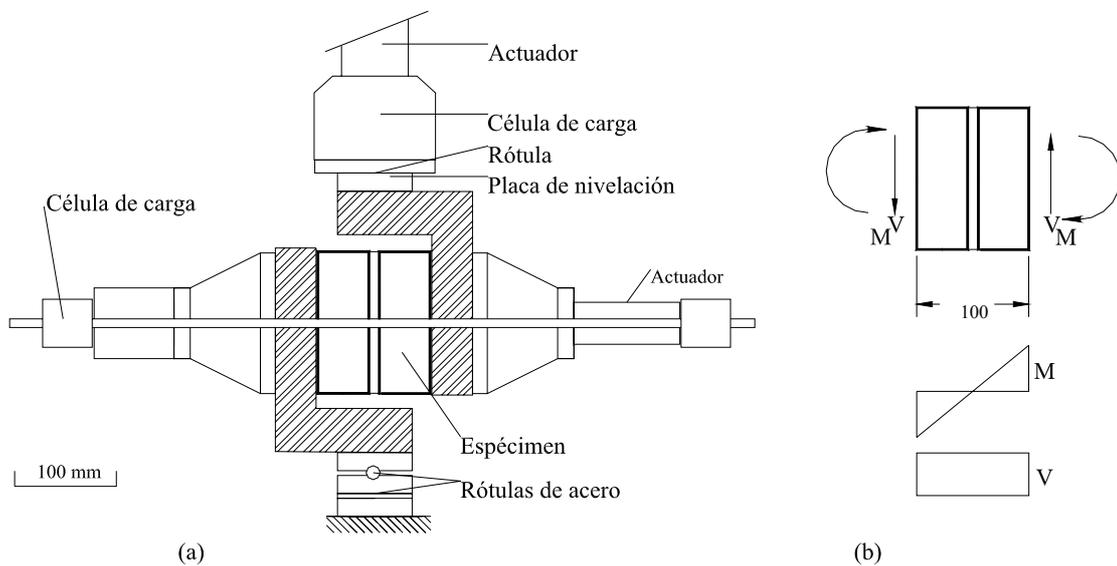


Figura 2. 35 — Detalle de ensayo: (a) montaje del ensayo y (b) esquema de carga del espécimen (van der Pluijm, 1993).

Para las seis combinaciones de mortero y piezas, los investigadores emplean tres niveles de tensión perpendicular a la junta de mortero. El nivel de tensión en la compresión normal es variable, entre -0.1 y -1.0 N/mm^2 . Algunos ejemplos de curvas fuerza-desplazamiento se muestran en la figura 2.37. En los ensayos se registran 8 líneas de desplazamiento, por

medio de la aplicación de unidades LVDT en las caras frontal y posterior de las probetas (figura 2.36). La figura 2.38 representa el modulo de cortante.

Por último, en el análisis se asume que en la junta se presenta una distribución de tensiones uniforme; y concluyen que: el criterio de fallo de Coulomb puede utilizarse para las juntas horizontales cuando la tensión normal es de compresión.

Los valores de cohesión c dependen de las características de las piezas y morteros utilizadas. La relación entre la cohesión y la resistencia de la liga c/f_{bt} nunca es menor que 1.3. Se han encontrado relaciones mayores cuando la resistencia adherente es más baja.

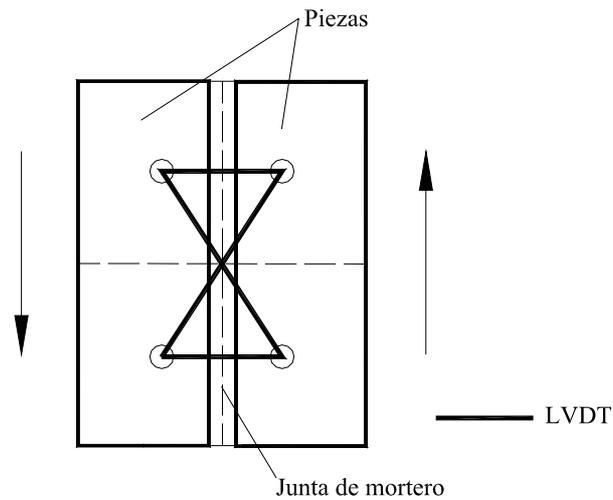


Figura 2. 36 — Esquema de colocación de unidades LVDT en el espécimen (van der Pluijm, 1993).

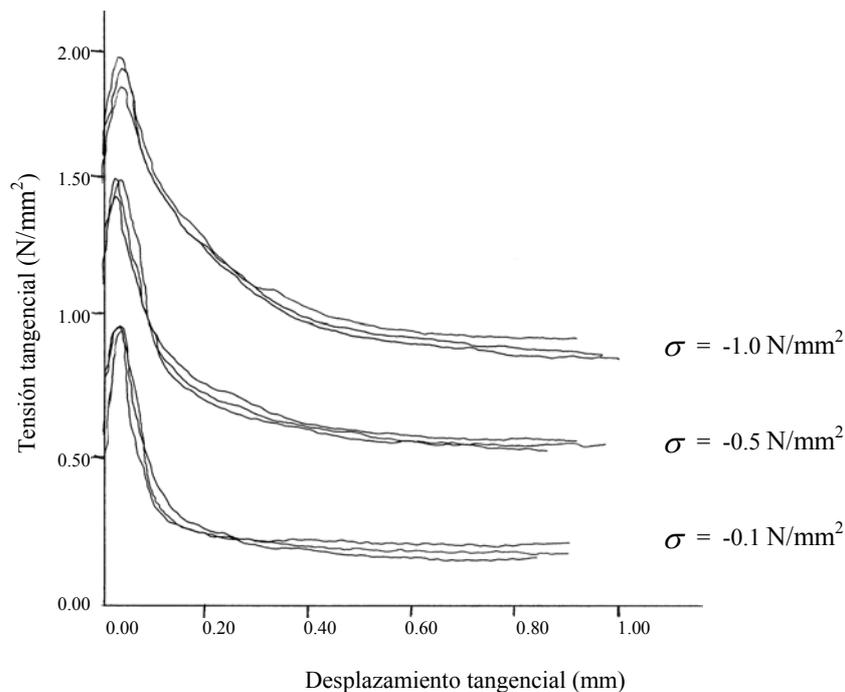


Figura 2. 37 — Tensión cortante en función del desplazamiento para diferentes niveles de tensión normal (van der Pluijm, 1993).

El ángulo de fricción interna (ϕ) es por lo menos de 36° ($\tan \phi = 0.72$) y el coeficiente de fricción posterior a la carga última es 0.75, independientemente a las pequeñas variaciones de los materiales utilizados.

El ángulo de dilatación disminuye cuando la tensión normal perpendicular a la junta incrementa hasta cierto nivel. Esto probablemente es ocasionado por la rotura de la superficie durante el desplazamiento de cortante (figura 2.38).

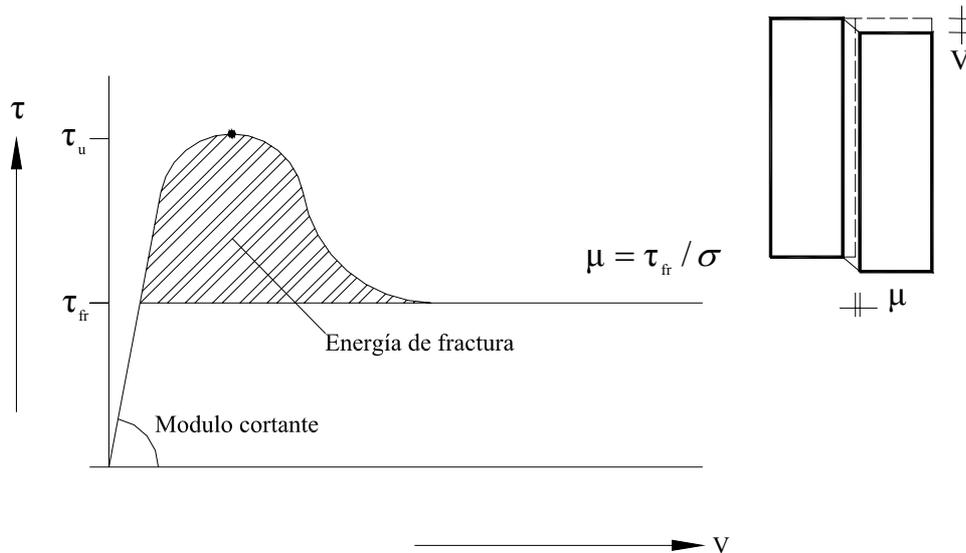


Figura 2. 38 — Análisis del ensayo de cortante (van der Pluijm, 1993).

- La resistencia de la adhesión a cortante τ_u
- El módulo de cortante G
- Coeficiente de fricción μ
- Ángulo de dilatación ψ ($\tan \psi = u/v$).

Por último en la publicación de Van Der Pluijm se menciona que en el Eurocódigo 6, (1988) el coeficiente de fricción prescrito es de 0.4, y aunque en el trabajo de Van Der Pluijm solamente se analizó el comportamiento con pequeñas muestras de dos piezas, y por consiguiente los criterios podrían tener una distribución menos favorable de la tensión, dicho código parece ser muy conservador en el criterio de fallo por cortante.

2.4. REPARACION DE PAREDES POR MEDIO DE INYECCION DE LECHADAS, RESTITUCIÓN Y REJUNTADO DE MORTEROS

2.4.1. Introducción

La técnicas de reparación de la obra de fábrica buscan incrementar la capacidad resistente interna de las paredes, cuando éstas han perdido parte de ella o son insuficientes para soportar con seguridad los esfuerzos a que están sometidas. La introducción de materiales conglomerantes al interior de las paredes para llenar los vacíos existentes y desplazar otros

materiales de baja calidad, comporta una mejora cualitativa en la resistencia, siempre que la acción se lleve a cabo en condiciones óptimas.

Tradicionalmente estos trabajos se hacían aplicando presión solo por la gravedad y utilizando morteros fluidos de cal o de cemento. Conceptualmente la técnica sigue siendo la misma hoy día, pero se están incorporando mejoras técnicas de inyección a presión y el uso de resinas sintéticas, bentonita y otros materiales de calidad superior para la consolidación. La idoneidad de éste sistema depende del tipo de pared en que se va a realizar la actuación.

Una de las técnicas actuales más usuales de reparación de paredes de obra de fábrica, consiste en rellenar las fisuras con una lechada de cemento convencional o de cemento epóxy. Las lechadas de cemento convencional combinan cemento Pórtland, cal y agua en una mezcla de consistencia muy líquida. La aplicación de ese tipo de lechada es más apropiada cuando las fisuras son mayores de 3 mm.

Las fisuras se sellan con un gel epóxico o un mortero seco y es muy importante la fluidez de las mezclas para conseguir una correcta impregnación y llenado de los vacíos internos. Además, es indispensable conservar un nivel de humedad adecuado para la correcta hidratación del cemento en la mezcla, y tenerse en cuenta la elevada capacidad de absorción de la fábrica. Se utilizan inyecciones de mezclas epoxy de muy baja viscosidad en fisuras de 0.12 mm logrando muy buenos resultados, pero el sistema de reparación suele ser muy costoso debido a que la alta capacidad de impregnación llena todos los vacíos internos de la fábrica y no solo las fisuras.

Warner (1973 y 1974) desarrollan una espuma estructural cerámico-epóxica que aporta muy buena adherencia y gran resistencia a la compresión, útil para rellenar pequeñas fisuras. Sin embargo, debido a su consistencia espumosa y la necesidad de una aplicación muy rápida, presenta gran dificultad de control y ocasiona serias pérdidas cuando la superficie no puede ser sellada previamente.

Por medio de la reparación de una estructura de fábrica dañada, se busca recuperar la resistencia original de la misma. Benedetti y Costellani (1979) demuestran que los métodos de inyección de obra de fábrica pueden incluso doblar la capacidad resistente original. Las técnicas de inyección de lechadas también pueden ser apropiadas para proveer una mayor resistencia, ya que éstas aumentan la adherencia entre las piezas y mejoran la solidez global del sistema. Sheppard y Tercelj (1980) logran incrementar la resistencia de elementos de obra de fábrica de piedra, utilizando un sistema de reparación similar al empleado en elementos de obra de fábrica de ladrillo, en los que solo logra recuperar sus propiedades resistentes originales.

2.4.2. Inyección de mezclas conglomerantes

En estructuras de hormigón es común la reparación de fisuras y grietas utilizando inyecciones de resinas epoxy, con una presión dentro de un rango entre 0.2 y 1.38 N/mm².

Los materiales epoxy ofrecen excelente impregnación y características adhesivas, pero ésta tecnología no es recomendada usualmente para la reparación de obras de fábrica.

El interior de las fábricas tradicionales puede contener vacíos de considerables dimensiones, por lo que el gasto de material y los costos de la intervención pueden elevarse drásticamente. Además, se cree que la alta capacidad resistente de los materiales epoxy no es compatible con la baja resistencia de la fábrica; y que la inclusión de grandes cantidades de resina podría cambiar drásticamente la distribución de tensiones de carga. En base a esas consideraciones, se ha recurrido a la inyección de lechadas de base cemento como una de las alternativas de reparación de estructuras de fábrica.

En 1996, Manzouri et al. publicaron un extenso estudio relativo a las técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de obra de fábrica. En su trabajo advertían que, a pesar de que se habían desarrollado diversas técnicas para dicho cometido por profesionales de la ingeniería, desafortunadamente existían pocas publicaciones y difusión de las mismas en forma de guías técnicas o manuales de los procesos. Debido a ello, había también una carencia de herramientas analíticas que permitieran evaluar la resistencia de las estructuras de fábrica antes y después de su intervención.

Los investigadores desarrollaron un estudio experimental enfocado a caracterizar las propiedades físicas de los materiales de inyección, por medio de las herramientas convencionales disponibles. La primera fase de su estudio se enfocó a la evaluación de las propiedades de los materiales de inyección y al diseño de mezclas. En la segunda fase del estudio caracterizaron los efectos de las reparaciones efectuadas a través de dichas técnicas, utilizando paneles de fábrica y la técnica de inyección de morteros fluidos u otras mezclas.

Ensayaron un grupo de paneles, primeramente en su condición original y después de haber sido reparados con diferentes métodos. Las técnicas de refuerzo empleadas incluyeron la inyección de morteros fluidos y la introducción de barras metálicas. Además desarrollaron modelos de elementos finitos para evaluar el comportamiento de la fábrica reforzada y no reforzada. Ensayaron las juntas de mortero por cortante directo, sometiénolas previamente a una carga constante de compresión.

Estudiaron la técnica de inyección empleando para ello muestras de fábrica altamente absorbentes, que podían contener pequeñas fisuras, además de huecos interiores relativamente amplios. La mezcla que utilizaron debía ser muy fluida y contar con finas partículas, para irrigar adecuadamente y saturar las pequeñas oquedades. Al mismo tiempo la mezcla debía ser estable para evitar la segregación y la contracción. Por otra parte, para lograr la saturación de los vacíos amplios consideraron la conveniencia de utilizar una lechada gruesa con contenido de agregados con un tamaño máximo de partículas de 0.2 mm.

Utilizaron arena fina de sílice, en proporciones del 55 al 70% del volumen total de la mezcla. Para simular una fábrica antigua, todos los especímenes se manufacturan con piezas de fábrica extraídas de un edificio construido en 1915 de la ciudad de Colorado, E.U.A. unidas con mortero con proporción 1:2:9 (cemento: cal: arena). Se evaluaron las propiedades de 36 mezclas de morteros fluidos (tabla 2.9).

Tipo de Mortero Fluido Conglomerante	Tipo de Cemento	W/C ³ Relación	Aridos (% en peso) ⁴				Aditivos (% en peso) ⁵	
			Cemento	Cal Tipo S	Ceniza clase F	Arena # 70	SP ⁶	Aditivo a Mortero Fluido Conglomerante
Fino (<i>fine</i>)	I/II ¹ , III ¹ , MC ²	0.5-1.7	100	-	-	-	1-2.33	0-1.0
Grueso (<i>coarse</i>)	I/II, III	0.28-1.2	32.1	5-33	8-25	55-70	1-2.33	0-1.0

1. ASTM C150 Cemento Portland
2. MC= Cemento hecho en obra según ASTM C91
3. Relación del peso del agua con el peso del cemento
4. Porcentaje del peso total de los sólidos
5. Porcentaje del peso del cemento
6. SP = Superplastificante (base de naftaleno sulfato formaldeído modificado).

Tabla 2. 9 – Mezclas de lechadas utilizadas para inyección de paneles de obra de fábrica por Manzouri et al., (1996).

Respecto al desempeño de las mezclas en términos de fluidez, estabilidad, resistencia y adhesión destacan las siguientes conclusiones: la penetrabilidad del conglomerante puede incrementarse aumentando la fluidez con una mayor cantidad de agua o con la ayuda de un aditivo especial, sin embargo, debe haber un límite de fluidez para mantener la estabilidad de la mezcla. Por otro lado, dicha estabilidad puede incrementarse al añadir partículas ultra-finas o agentes de retención del contenido de agua, tales como cal, ceniza o un mortero auxiliar (una mezcla expansiva que incluye partículas ultra-finas) ya que estos materiales pueden ayudar en el control de derrame de las mezclas y en la segregación.

Los morteros fluidos o mezclas para inyección, normalmente incluyen ligantes, saturantes y aditivos; el éxito de la inyección de grietas está ligado tanto a la selección apropiada de las proporciones de esos componentes; como a la viscosidad, el tiempo abierto de utilización, la presión de inyectado y la distribución de los orificios para el bombeo.

Roselund (1991) patentó una de las técnicas de inyección de lechadas de base cemento para reparaciones de obra de fábrica no reforzada. Esta tecnología previene la segregación del fluido de lechada por medio de un sistema de re-circulación de la mezcla a través de la estructura. Para validar la técnica se comprobaron resultados de muestras y se revisaron físicamente; sin embargo, no existe la publicación de algún tipo de información cuantitativa acerca de la resistencia o el comportamiento estructural.

El proceso seguido por Roselund para la inyección de los paneles está basado en la metodología descrita en *Los Angeles Rule of General Applications* (1991), con algunas modificaciones: el diámetro de los orificios para inyección, efectuado en las juntas de

mortero se reduce ($\leq 12\text{mm}$) y después de la aplicación, los orificios son cerrados con un mortero similar, manteniendo la apariencia original de la fábrica. Las perforaciones se realizan con una broca tubular que permite succionar el polvo y las partículas sueltas para evitar obstrucciones. Las lechadas se formulan procurando mantener una baja viscosidad, pero a la vez evitando la segregación o la posterior retracción. Se utiliza un inyector compresor de baja presión. La presión de inyección utilizada es $\leq 68.95\text{ kPa}$ para evitar daños a la fábrica.

Da Porto et al. (2003) llevaron a cabo una serie de ensayos experimentales con paneles de obra de fábrica de piedra de tres hojas. Estudiaron varios procesos de consolidación, entre los que se incluyeron dos tipos de lechadas de cal. Con ello buscaban rellenar los vacíos internos, incrementar la resistencia de la hoja central de los paneles, que es la más débil; y aumentar la adherencia entre esta y las capas exteriores. Las dos mezclas de fluido se fabricaron con una base de cal natural, seleccionada tras un programa de ensayos físicos, químicos, mecánicos y de fluidez. La resistencia de compresión obtenida a los 28 días era de 5.10 y 3.20 N/mm^2 .

Se evitó utilizar fluidos cementicios, para prevenir problemas de compatibilidad. Los procesos de inyección se aplicaron a través de una de las caras de los paneles, partiendo desde la base. Para reproducir la absorción interna normal de la fábrica antigua no se aplicó previamente una inyección de agua. Se perforaron 11 o 12 orificios por cada metro cuadrado; de ellos solo el 70% se utilizó para tal fin y los restantes se aprovecharon para medir los niveles de impregnación y fluidez de las mezclas durante su aplicación.

El proceso de inyección utilizado fue rápido y fácil de ejecutar. La cantidad promedio de lechada inyectada a cada panel rondaba los 80 l, que corresponden a un porcentaje de vacíos del 14.4%, mismos que se tomaron en cuenta en las características de diseño empleadas en los paneles. Después de la rotura de los paneles una inspección visual confirmó que los vacíos y cavidades internas de los paneles se habían llenado correctamente. Además se consiguió un incremento aceptable de la adherencia entre la capa interior y las hojas externas de los paneles.

Antes de aplicar los procesos de consolidación, la resistencia máxima de los paneles ($f_{wc,0}$) variaba entre 0.99 y 1.97 N/mm^2 . El valor promedio del modulo secante (calculado entre el 30% y el 60% de la resistencia máxima) era cercano a los 1700 N/mm^2 . Para las tensiones últimas, los transductores de desplazamiento detectaban valores absolutos similares entre 0.2 y 6.5% en los desplazamientos vertical (positivo) y horizontal (negativo) respectivamente.

En la sección transversal, a diferentes niveles en el panel, se detectaron tensiones mucho más altas, desde un 1.3 hasta un 19.6%. Las fisuras mostraban una tendencia vertical o sub-vertical. En su mayoría se localizaban en las secciones transversales. De hecho el colapso ocurrió por la concentración de la dilatación del muro, que ocasionó la separación de las distintas capas y desprendimientos hacia fuera del plano propio. En la tabla 2.10 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de paneles inyectados, antes y después del proceso de consolidación.

Los paneles consolidados a través de inyección, después de 28 días de la aplicación del tratamiento presentaron un valor promedio de resistencia máxima ($f_{wc,s}$) cercano a 2.5 N/mm², que frente a los paneles no intervenidos representaba un 40%. Algunos especímenes alcanzaron un porcentaje de incremento del 70%.

Panel	Resistencia de compresión (N/mm ²)		Módulo elástico (N/mm ²)		Desplazamiento vertical (valor absoluto) ‰			Desplazamiento horizontal (valor absoluto) ‰		
	Antes de $f_{wc,0}$	Después de $f_{wc,s}$	Antes de $E_{wc,0}$	Después de $E_{wc,s}$	Antes de $f_{wc,0}$	Después de $f_{wc,0}$	Después de $f_{wc,s}$	Antes de $f_{wc,0}$	Después de $f_{wc,0}$	Después de $f_{wc,s}$
511	1.45	2.49	2390	2273	.63	0.49	.26	.49	0.004	.17
611	1.95	2.49	2029	3093	4.57	0.36	5.71	18.4	0.003	17.1
1311	--	2.54	--	3992	--	0.55	9.91	--	0.12	27.7
112	1.97	2.57	1450	3449	6.21	0.58	6.25	7.93	0.32	7.34
812	1.91	1.82	1559	2367	6.22	0.73	7.20	11.8	0.08	9.90
1612	--	2.48	--	1223	--	1.07	10.7	--	0.22	18.9

Tabla 2.10 – Resultados de los ensayos, antes y después de consolidación (Da Porto et al., 2003).

2.4.2.1. Respuesta de los especímenes tratados con inyección de lechadas ante las tensiones de compresión

Para caracterizar el efecto de la inyección de paneles con mezclas conglomerantes, Borgsmiller et al. (1993) llevan a cabo un programa experimental utilizando una serie de paneles de obra de fábrica.

El proceso experimental consiste en generar cargas de compresión en los especímenes hasta provocar daño. Los paneles dañados son reparados utilizando diferentes mezclas y proporciones de morteros fluidos, incluyendo la restitución de piezas y secciones seriamente dañadas.

Una vez reparados, los paneles se someten nuevamente a un proceso de ensayo de compresión. Utilizan mezclas gruesas para saturar los vacíos más amplios y mezclas finas para la impregnación de grietas de menor dimensión. Emplean dos tipos de mezclas en los morteros (tabla 2.11).

Tipo de lechada	Tipo de cemento	Proporción Agua/cemento	Áridos (% en peso)				Aditivos (% en peso)	
			Cemento	Cal Tipo S	Ceniza clase F	Arena #	SP	Aditivo a para lechada
Fino	III	0.50	100	-	-	-	2.0	0.5
Grueso	I/II	1.00	32.1	4.8	7.9	55.2	2.0	0.5

Tabla 2.11 — Mezclas de lechadas utilizadas (Manzouri, 1993).

Los conductos de inyección para las mezclas gruesas se instalan en perforaciones con un diámetro de 14 mm, en las dos caras de los paneles, al centro de sendas juntas de mortero y de forma alternada. Para la inyección de las mezclas finas es necesario colocar placas de impregnación circulares en torno al orificio de bombeo, con diámetros que van de 76 a 152 mm. Las placas generalmente se utilizan para inyectar mezclas fluidas en zonas en donde las fisuras tienen espesores de 0.5 mm.

Los paneles se ensayan después de transcurridos 28 días desde su reparación. Los autores marcan tres conclusiones obtenidas en su investigación: El sistema de reparación puede restituir la rigidez de compresión de la fábrica; puede incrementar la resistencia de los especímenes reparados y: el tratamiento no puede recuperar totalmente las propiedades resistentes de la fábrica. Esto sugiere que las mezclas no penetran totalmente en las pequeñas fisuras.

2.4.2.2. Comportamiento de los especímenes ante las tensiones de cortante.

La rotura de las juntas de mortero ocasionada por las tensiones de cortante, es el modo de fallo más frecuente en las paredes de fábrica, debido a la incidencia de cargas laterales. Por ello el comportamiento de las juntas de mortero sujetas a tensiones de compresión normal y de cortante puede determinarse a través de ensayos de cortante directo.

Manzouri et al (1996) realizaron una campaña experimental para determinar las características mecánicas de las juntas intactas y reforzadas, empleando pequeños ensamblajes de fábrica de ladrillo (figura 2.39 a y b).

Primeramente realizaron una serie de ensayos de compresión típicos, para determinar las características resistentes de la fábrica y las alteraciones provocadas por la reparación. En la figura 2.40 se muestran las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en ensayos de compresión, de las probetas intactas, dañadas y reparadas con inyección de lechada de cemento.

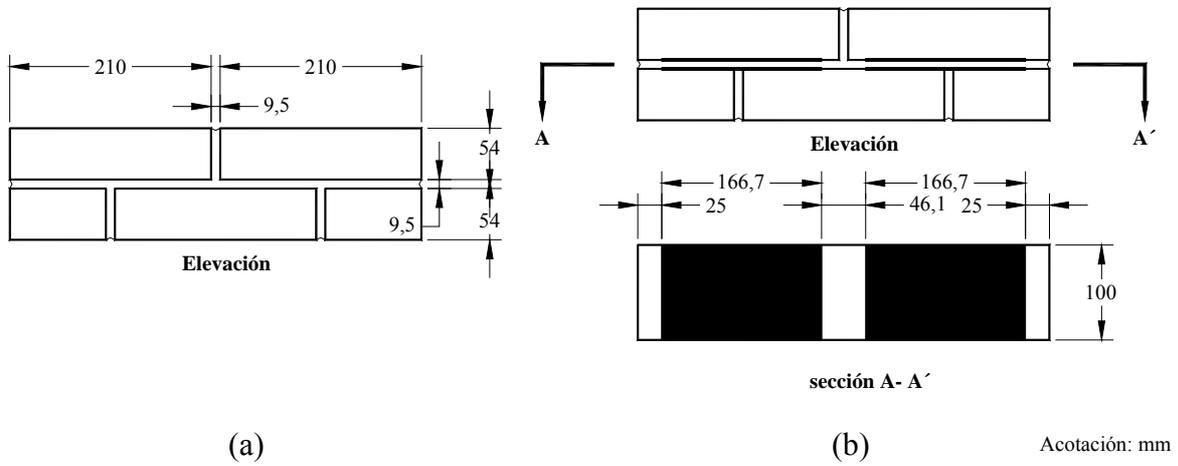


Figura 2.39 — Detalles de las probetas: (a) probeta intacta; (b) probetas tratadas con inyección de lechada en las juntas (Manzouri et al., 1996).

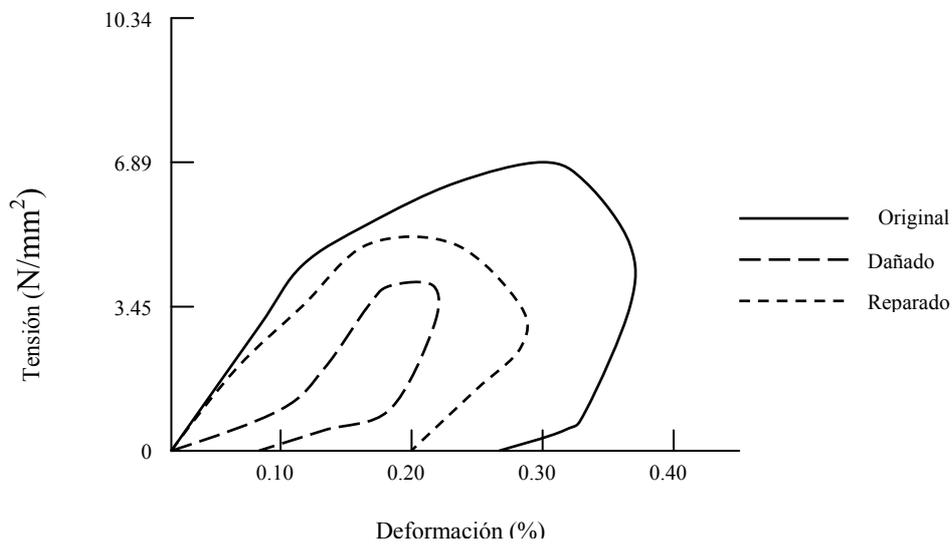


Figura 2.40 — Curvas fuerza-desplazamiento axial obtenidas en ensayos de compresión de probetas típicos (Manzouri et al., 1996).

En los ensayos de cortante se aplican tensiones de compresión constante de 0.35, 0.69 y 1.04 N/mm². En la tabla 2.12 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las probetas con juntas intactas.

Tensión normal (psi)*	Cantidad de muestras	cortante máximo (psi)	C.O.V.	Cortante residual principal (psi)	C.O.V.	Cortante mínimo principal (ksi/in)**	C.O.V.
50	3	116	3 %	49	2 %	59	51 %
100	3	198	10 %	105	7 %	54	30 %
150	3	237	14 %	140	2 %	51	40 %

*1 psi = 6.895 kPa

**1 ksi = 6.895 N/mm²

Tabla 2.12 — Resultados de los ensayos de muestras de juntas Intactas, (Manzouri, 1996).

En la tabla 2.12, la rigidez de cortante se calcula dividiendo el valor de la tensión cortante que es igual al 45% de la resistencia a cortante obtenida en un primer proceso de carga, entre el desplazamiento correspondiente de la junta.

El cortante residual se obtiene como la resistencia a cortante medida al final del proceso de carga. La rigidez de cortante muestra gran dispersión en el grupo de ensayos.

Para obtener resultados de especímenes tratados con inyección de morteros fluidos se fabrican algunas probetas con fisuras y roturas artificiales, en la interfase entre las piezas y el mortero. Dichas fisuras son inyectadas con lechadas conglomerantes finas, a una presión aproximada de 68.95 kPa.

Las probetas son ensayadas transcurridos 28 días desde la aplicación del tratamiento y la geometría de los especímenes es idéntica a la de las probetas intactas. La dispersión de los resultados en las probetas tratadas es mayor que en el caso de probetas intactas, pero se observa claramente la eficacia del proceso de reparación en términos de restitución de las propiedades mecánicas iniciales (tabla 2.13).

Tensión Normal (psi)	Muestras	Cortante Máximo (psi)	C.O.V.	Cortante Residual (psi)	C.O.V.	Cortante Mínimo Principal (ksi/in)	C.O.V.
50	3	156	28 %	59	9 %	49	55 %
100	3	187	20 %	103	5 %	46	85 %
150	4	220	13 %	142	4 %	66	48 %

Tabla 2.13 – Resultados de los ensayos de muestras con aplicaciones de inyección (Manzouri, 1996).

2.4.2.3. Incremento de la resistencia lateral de las paredes en su propio plano

Los efectos ocasionados por la inyección de conglomerantes en paredes sujetas a cargas laterales, son estudiado también por Manzouri et al. (1996) quienes combinan la inyección de lechadas y el acoplamiento de barras metálicas en la fábrica, empleando para ello cuatro paneles de fábrica de tres hojas, construidos con viejas piezas de ladrillo, de los cuales tres presentan características geométricas similares (con una proporción altura/longitud de 0.6) y uno incluía un vano al centro (figuras 2.41 y 2.42).

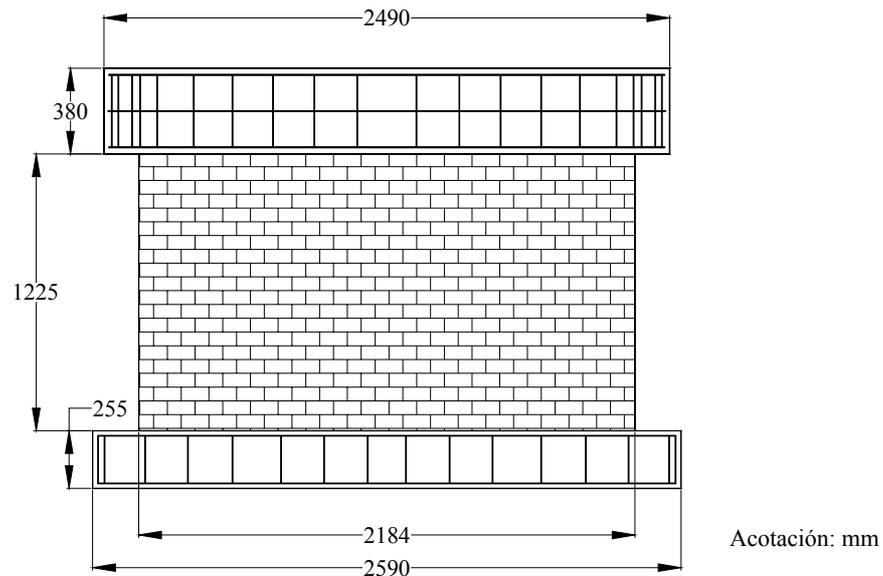


Figura 2. 41 — Detalles de diseño de los paneles utilizados en los ensayos (Manzouri et al., 1996).

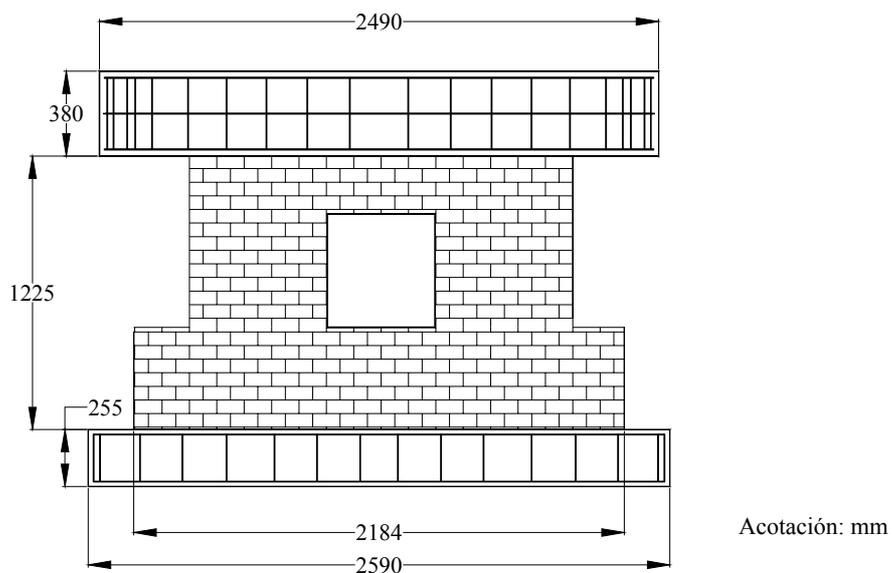


Figura 2. 42 — Detalles de diseño de los paneles con vanos utilizados en los ensayos (Manzouri et al., 1996).

Los paneles son ensayados bajo tensiones de compresión de 0.38, 0.59 y 1.04 N/mm². El panel con la abertura se somete a una tensión de 0.48 N/mm².

Aprovechan los cuatro paneles para efectuar once ensayos, mismos que se describen en la tabla 2.14.

Ensayo	Tipo de Panel	Técnica de Reparación ¹	Relación geométrica del panel ² (altura/longitud)	Tensión de compresión vertical ³ (N/mm ²)
W1	Macizo	-	0.6	1.03
W1RA	Macizo	Inyección de mortero fluido Conglomerante	0.6	0.38
W1RB	Macizo	Inyección de resina epóxi ⁴	0.6	0.38
W2	Macizo	-	0.6	0.38
W2R	Macizo	Inyección de mortero fluido conglomerante	0.6	0.38
W3	Macizo	-	0.6	0.59
W3RA	Macizo	Inyección de mortero fluido conglomerante	0.6	0.59
W3RB	Macizo	V.H., Pin	0.6	0.59
W4	Con vano	-	0.79	0.36
W4RA	Con vano	B. H., B.V.	52 (0.36)	0.36
W4RB	Con vano	B. H., B.V.	0.79	0.36

1. V.H. = Varillas Helicoidales de acero inoxidable
Pin = Sujeción con barras helicoidales de acero inoxidable
B.H. = barras horizontales
B.V. = barras verticales
2. Para los paneles con vano, este es el mínimo-de-espesor de radio de cada panel
3. Para los paneles con vano, la tensión está evaluada según el seccionamiento del área incluyendo paneles y soportes.
4. La resina Epóxica inyectada solo a la base de la junta.

Tabla 2.14 – Programa de ensayos (Manzouri, 1996).

Los paneles se someten a un procedimiento de carga dividido en dos fases. En la primera se aplica la carga normal, y en la segunda fase se genera la carga lateral hasta provocar daño. Posteriormente son reparados y ensayados nuevamente. En la nomenclatura, el primer número identifica específicamente a un panel, la letra R expresa que ha sido reparado y la letra final indica cuántas veces ha sido reparado. Todos los paneles son sido inyectados con morteros conglomerantes fluidos.

Inicialmente, el proceso de reparación consiste en inyectar conglomerante en las zonas dañadas y reemplazar con piezas similares a las originales las secciones de fábrica muy deterioradas. La inyección se aplica en dos fases, empleando para ello dos tipos de mortero: en la primera fase se ha utiliza una solución conglomerante gruesa, para las

fisuras mayores a 1.5 mm, y en la segunda fase se utiliza un compuesto mucho más fino, para tratar las fisuras de entre 0.2 y 1.5 mm. En los paneles numerados 2 y 3 se incluyen barras metálicas helicoidales de acero inoxidable.

El proceso de ensayo se muestra en la figura 2.43 y consiste en aplicar a los paneles intactos una carga vertical constante y una carga cíclica lateral, por medio de dos actuadores hidráulicos servo-controlados. La amplitud de desplazamiento permitida es de 15 mm para el primer ciclo de carga. Durante el segundo ciclo se mantiene una amplitud moderada para observar el mecanismo de degradación de la rigidez lateral de la pared. A partir del tercer ciclo de carga, se incrementa gradualmente la amplitud hasta ocasionar daños severos que puedan ser reparados.

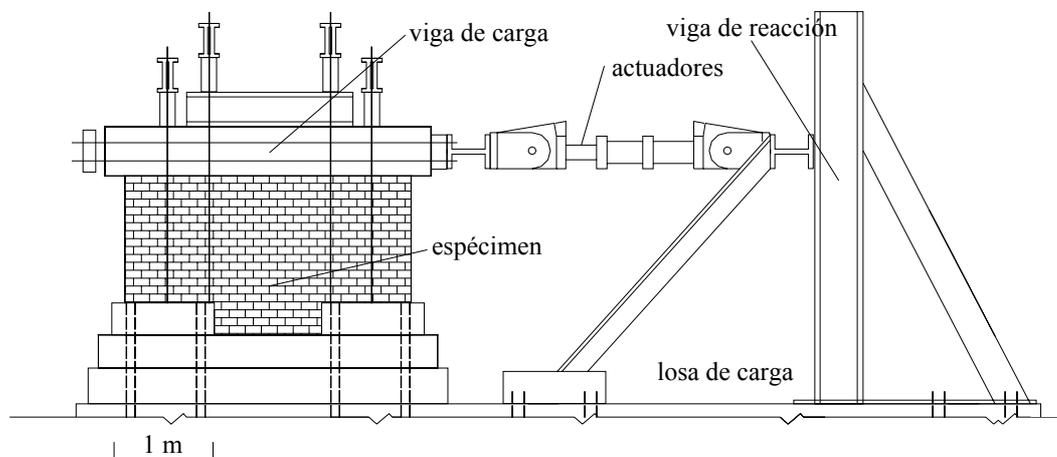


Figura 2. 43 — Montaje de los ensayos de paneles realizados por Manzouri et al. (1996).

El comportamiento de las paredes puede ser descrito como una secuencia de eventos, gobernada por el límite permisible del incremento de cargas. El primer evento normalmente ocurre la rotura de las juntas horizontales por flexión, en la zona inferior de la pared. Enseguida se presenta un aplastamiento en la base del panel, en el vértice opuesto a la zona de transmisión de la carga horizontal. En varias ocasiones aparecen fisuras diagonales después del aplastamiento de la base. Puede también haber un desplazamiento a través de las fisuras de cortante y, en algunos casos los paneles presentan deslizamiento en las zonas de fractura horizontales. La propagación de la rotura es normalmente rápida.

En las conclusiones del estudio, con fundamento en los resultados obtenidos, se menciona que la inyección de lechadas conglomerantes, en combinación con la reparación y restitución de las zonas más dañadas y utilizando materiales similares a los originales, puede recuperar la resistencia y rigidez inicial de los paneles. Sin embargo, el proceso de reparación no es recomendable para intervenciones cuyo cometido sea incrementar las propiedades resistentes de la fábrica; máxime en situaciones en las que la estructura no presenta agrietamiento ni amplios vacíos internos.

Se demuestra que las fisuras de espesores entre 0.18 mm y 19 mm pueden considerarse reparables. En general, el sistema de inyección de conglomerantes muestra gran eficacia, no obstante que se experimenta en conjunto con la utilización de barras metálicas.

2.4.3. Rejuntado

La restitución de las juntas de mortero es una de las técnicas de consolidación estudiadas por DaPorto et al (2003) y consiste en remover de la fábrica parte de la capa superficial de las juntas de mortero (de 5 a 10 mm) y rellenar con mortero nuevo.

A través de ésta intervención se busca restituir parcialmente las juntas de mortero de la fábrica, para reestablecer e incrementar la adhesión y resistencia entre los mampuestos de piedra. La técnica se aplica en los dos frentes de los paneles. Se utiliza un mortero de cal hidráulica premezclado con arena, cuya resistencia a los 28 días de fabricación es igual a 1.72 N/mm².

Las juntas originales son eliminadas previamente con ayuda de un martillo cortante eléctrico y cincel. Las zonas de extracción son saturadas previamente con agua y la aplicación de mortero nuevo se realiza en una o dos capas, dependiendo del espesor requerido en la ejecución.

Se presentan algunos problemas de estabilidad en los mampuestos durante la sustracción de mortero. Además, debido a la precisión exigida por la intervención, el proceso es lento. Se extraen entre 18 y 27 kg de mortero por cada m² de panel. En la tabla 2.15 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos.

Panel	Resistencia de compresión N/mm ²		Módulo elástico N/mm ²		Desplazamiento vertical (valor absoluto) ‰			Desplazamiento horizontal (valor absoluto) ‰			
	Antes	Después	Antes	Después	Antes de	Después de	Después de	Antes de	Después de	Después de	
	e f _{wc,0}	f _{wc,s}	e E _{wc,0}	E _{wc,s}	f _{wc,0}	f _{wc,0}	de f _{wc,s}	f _{wc,0}	f _{wc,0}	de f _{wc,s}	
Restitución de juntas	3R	0.99	1.34	--	538	3.19	2.78	10.45	.84	0.24	13.45
	7R	1.50	1.17	1863	1781	4.39	2.23	5.10	5.81	2.32	10.35
	15R	--	1.32	--	395	--	2.36	7.90	--	0.50	14.01

Tabla 2.15 – Resultados de los ensayos realizados antes y después de la restitución de juntas (Da Porto et al., 2003).

Los paneles intervenidos, tras 28 días de la aplicación del tratamiento presentan un valor promedio de resistencia máxima f_{wc,s} aproximado a 1.28 N/mm². Sin embargo, no se han obtenido datos suficientes para valorar una tendencia. En el caso del panel 3R, después de la aplicación del tratamiento se ha obtenido una resistencia superior a la original en un 35%.

2.5. REFUERZO DE PAREDES CON COMPUESTOS LAMINADOS Y TEJIDOS FRP

2.5.1. Introducción

Uno de los estudios precursores en el uso de refuerzos no metálicos para incrementar la resistencia de muros de obra de fábrica, es el realizado por Croci et al. (1987) quienes experimentan en muros con aplicaciones de refuerzo vertical o inclinado con elementos de polipropileno¹ (no pertenecientes al ámbito de materiales FRP).

Algunos años después, Sweidan (1991) demuestra por medio de un estudio analítico la eficacia del postesado utilizando FRP en paredes de fábrica. Triantafyllou y Fardis (1993, 1997) aportan nuevos conceptos detallados y resultados analíticos sobre la aplicabilidad y eficacia de los tendones FRP utilizados como pretensado de estructuras históricas de obra de fábrica. Schwegler (1994a,b) es el primero en proponer un estudio acerca de la aplicación de laminados de fibra de carbono (CFRP) como refuerzo antisísmico de elementos estructurales utilizando la misma técnica.

Los laminados adheridos a la superficie de la estructura, por medio de un compuesto epóxico desempeñan un buen papel como refuerzo ante las incidencias de carga. Schwegler demuestra la efectividad de la técnica, por medio del ensayo de una serie de muros sometidos a procesos de cargas concéntricas y excéntricas; y desarrolla un modelo analítico relativo al comportamiento en el plano del muro de algunas aplicaciones de refuerzo de CFRP, basándose en las teorías de las armaduras sometidas a tracción.

En 1996, Schwegler y Kelterborn llevan a cabo un trabajo en Zurich, directamente relacionado con uno de los principales campos de aplicación de ésta técnica, aprovechando la oportunidad de intervenir los muros de seis edificios habitacionales construidos con estructura portante de obra de fábrica.

Saadatmanesh (1994), Ehsani (1995) y Ehsani et al. (1997) realizan estudios experimentales relacionados al comportamiento de la fábrica reforzada con bandas de fibra de vidrio, sujeta a cargas estáticas monotónicas. Para ello utilizan paneles de fábrica y se basan en las recomendaciones y requerimientos específicos vigentes para la intervención real de un edificio comercial.

Laursen et al. (1995) realizan un trabajo análogo, aplicando bandas de fibra de carbono unidireccionales sobre paneles, entendiendo dichos elementos como representativos de paredes de obra de fábrica, que construidos a una escala reducida, son sometidos a dichos procesos cíclicos de carga.

Seible (1995) emplea el mismo criterio de refuerzo sobre paneles en escala real, buscando proveer mayor resistencia. Utiliza procesos cíclicos de carga en los ensayos y comprueba la eficacia de la técnica de refuerzo FRP en ese ámbito, logrando así mismo incrementar considerablemente la capacidad portante, reduciendo las deformaciones y aumentando la ductilidad del elemento reforzado.

¹ Estructuralmente el polipropileno es un polímero vinílico, similar al polietileno, sólo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo. El polipropileno se puede hacer a partir del monómero propileno, por polimerización Ziegler-Natta y por polimerización catalizada por metalocenos.

Una de las conclusiones en común de los autores mencionados, es que los refuerzos unidireccionales son preferibles, en forma de laminados o tejidos, tanto por economía como por la respuesta mecánica, en comparación a los elementos bi-direccionales, en las aplicaciones de refuerzo en la superficie de paredes.

2.5.2. Refuerzo ante esfuerzos de flexión

Tumialan et al. (2002) presentan los resultados de un programa experimental, realizado en torno al comportamiento de paredes de fábrica reforzadas con laminados FRP y sujetas a flexión. Los parámetros que consideran son principalmente la cantidad de refuerzo aplicado y la influencia que tiene dicho factor en el modo de fallo. Utilizan dos tipos de compuesto: vidrio (GFRP) y aramida (AFRP). Analizan también la eficacia y adherencia de las resinas o macillas de fijación.

La configuración de los ensayos puede observarse en la figura 2.44. Consiste en la colocación del panel sobre dos rodillos que se sitúan en sus extremos y la aplicación de una carga uniformemente distribuida sobre dos apoyos articulados.

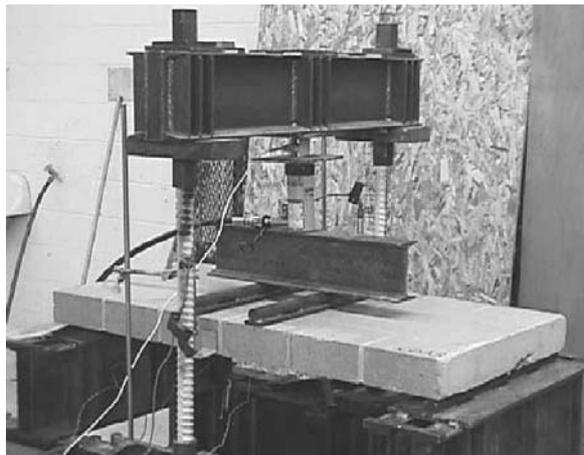


Figura 2. 44 — Configuración de ensayo de paneles sujetos a carga de flexión (Tumialan et al., 2002).

Observan que pueden lograrse considerables incrementos de la resistencia y ductilidad de los paneles e identifican básicamente tres modos de fallo, que se muestran en la figura 2.45.

El desprendimiento del refuerzo (figura 2.45-a) sucede por efecto de un mecanismo de transferencia de las tensiones de cortante a través de la interfase de unión refuerzo-superficie. El desprendimiento inicia con algunas fisuras en la zona de mayor tensión de la fábrica y se desarrolla hacia los soportes. Debido a que la resistencia de tracción es más baja en la fábrica que en las fibras, la línea de fallo surge en la fábrica misma. En el caso de paredes de bloques de hormigón, parte del substrato superficial de estos permanece adherida a las fibras una vez ocurrido el desprendimiento. Después de que se desarrollan las fisuras iniciales en la juntas de mortero, el panel falla por la rotura del refuerzo o por la rotura de las piezas de fábrica.

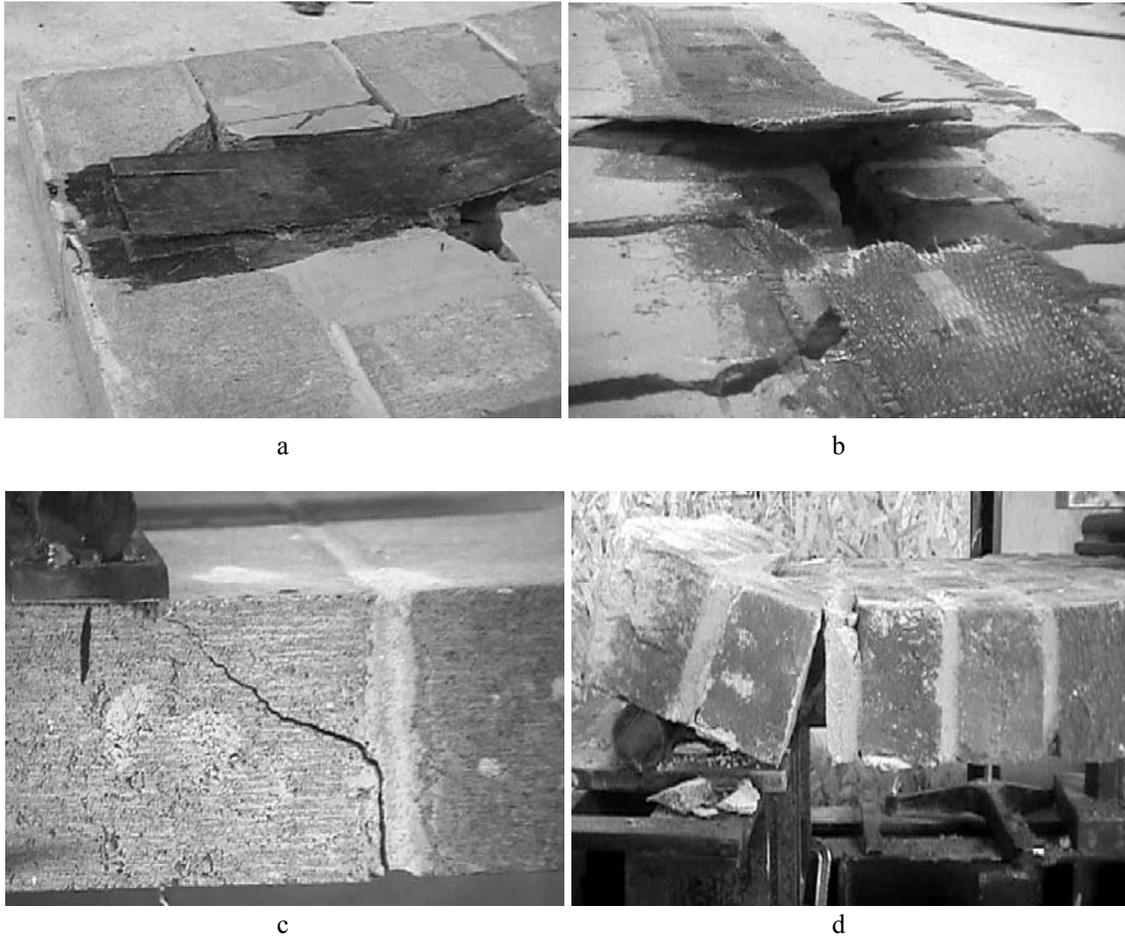


Figura 2. 45 — Modos de fallo en los paneles ensayados a flexión: (a) desprendimiento; (b) rotura del elemento FRP; (c) cortante a flexión; (d) rotura por deslizamiento, Tumialan et al. (2002).

La rotura del refuerzo FRP sucede al centro del panel (figura 2.45-b). El fallo por compresión de la fábrica se manifiesta por la rotura de las juntas de mortero. El fallo por cortante inicia con la aparición de pequeñas fisuras verticales en la zona de mayor deflexión, sin embargo, se observan dos formas de fallo a partir de ésta fase: la rotura de cortante (figura 2.45-c) que se forma aproximadamente en un ángulo de 45° y la rotura por deslizamiento (figura 2.45-d) que se localiza en una de las juntas y produce el fallo local. En el caso de rotura de cortante, las tensiones transmitidas causan un desplazamiento diferencial en el plano de corte que ocasiona el desprendimiento del FRP.

Tumialan et al. (2000) realizan un estudio de campo que muestra algunas de las ventajas del empleo de materiales compuestos FRP, como una técnica válida en el refuerzo de estructuras de fábrica. Llevan a cabo una serie de ensayos en un edificio habitacional. Con la aplicación de refuerzos FRP es posible comprobar que la resistencia y la ductilidad de la estructura aumentan.

Aunque la investigación acerca de las aplicaciones de FRP en las estructuras de obra de fábrica es muy reciente, existe la publicación de gran parte de los estudios llevados a cabo desde entonces. En 2003, Lissel y Gayevoy presentan una revisión general de las disertaciones publicadas, con interés de ofrecer una guía práctica para el futuro campo de

investigación acerca de los FRP aplicados a estructuras de obra de fábrica. Identifican y agrupan las tendencias de investigación y sitúan la aportación de cada investigador en ellas. En la presente tesis doctoral se hace un escrutinio de los trabajos de investigación por ellos citados, desde un enfoque conducente hacia el tema global de estudio de la presente tesis: el refuerzo de paredes de obra de fábrica.

La vulnerabilidad de las paredes de obra de fábrica ante los esfuerzos de flexión y de cortante, acentúa la exigencia de una adherencia eficaz en la configuración del sistema de refuerzo. En las paredes se generan puntos críticos por la concentración de tensiones, y dichos puntos pueden propiciar el fallo prematuro de las mismas. Esto es uno de los principales focos de atención en el campo experimental.

Los laminados FRP se comportan de forma adecuada ante este cometido, ya que no requieren que la superficie de contacto sea perfectamente lisa. Mingo et al. (2001) determinan su eficacia utilizando muestras originales de obra de fábrica antigua con gran deterioro en la superficie. Por medio de una serie de ensayos de rotura determinan, sin embargo, que las fisuras y las irregularidades en las capas deterioradas pueden acelerar el desprendimiento de los laminados, por lo que recomiendan la utilización de sistemas de anclaje en las zonas críticas de transferencia de tensiones, pero concluyen que, en general, los FRP pueden emplearse de forma satisfactoria para cometidos de refuerzo estructural.

La forma de aplicación que se describe en el párrafo anterior (la adhesión de laminados o tejidos FRP a la superficie) es sin duda la más utilizada para el refuerzo de paredes y, en general, la que podría proveer de mayor rigidez y resistencia a estructuras de obra de fábrica.

Trintafillou (1998) examina la investigación precedente y detecta que para optimizar soluciones ante el comportamiento de la fábrica, por razones económicas y estructurales son más convenientes los laminados unidireccionales aplicados a lo largo de toda la superficie. Demuestra que para determinar la resistencia a cortante de las fábricas reforzadas con materiales FRP, si la contribución de estos ha sido determinada basándose en una correcta analogía de una armadura convencional de acero, pueden utilizarse las prescripciones para estructuras mixtas del Eurocódigo 6 (1988), para determinar su capacidad resistente.

Así mismo, recomienda enfocar a este tema la modelación y la validación experimental en los futuros trabajos de investigación. Propone como línea de trabajo la validación a través de un modelo bajo efectos de cargas cíclicas.

El mismo autor demuestra que la aplicación de CFRP provee un significativo incremento de la resistencia a flexión, cuando ésta es excéntrica y dominante, como en el caso de paredes en los niveles altos de una edificación, en los que las cargas axiales son bajas. Para el caso de cargas concéntricas a flexión, tanto el área de FRP aplicado, como el patrón geométrico utilizado, son factores muy importantes para obtener mayor eficacia del refuerzo (figura 2.46).

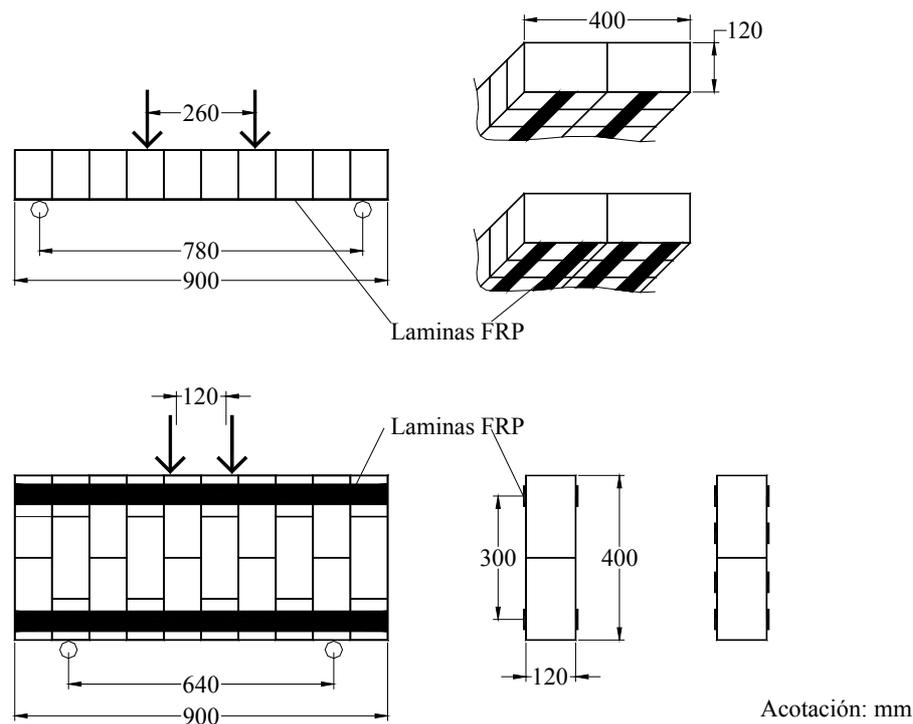


Figura 2. 46 — (a) Geometría y configuración de carga aplicada a los paneles; (b) sección transversal de los paneles 1-2a, 12b; (c) sección transversal de los paneles 1-4a, 1-4b (Triantafillou, 1998b).

Si se aplica el refuerzo en grandes extensiones de la superficie, sobre todo en las zonas críticas de concentración de tensiones, se obtienen considerables incrementos resistentes.

El aumento de la resistencia a flexión depende, en gran parte, del anclaje o fijación adecuados de los elementos de refuerzo.

La flexión perpendicular al plano del muro se estudia de forma específica; Hamoush et al. (2001) utilizan paneles de bloques de hormigón sin refuerzo interno, aplicando dos tipos de FRP como refuerzo en la superficie. Para generar las cargas excéntricas emplearon una bolsa de aire a presión que ejerce una fuerza en una de las caras del muro, pero en la mayoría de los casos no se logra la resistencia última, debido al fallo prematuro por cortante del soporte de los paneles (figura 2.47).

Observaron un ligero incremento de la resistencia en los paneles reforzados con una capa de tejido FRP multi-direccional aplicado en la totalidad de la superficie, en contraste con las aplicaciones de laminados unidireccionales.

El grupo de investigadores señala que los tejidos FRP adheridos a la superficie de los muros de mampostería, optimizan el desempeño favorable ante los esfuerzos de flexión; y aplicando más de una capa de tejido se incrementa la integridad estructural del sistema, lo que se manifiesta en la disminución de la dispersión de resultados en los muros reforzados ensayados. Los incrementos de resistencia obtenidos por la aplicación de FRP se expresan en la tabla 2.16.

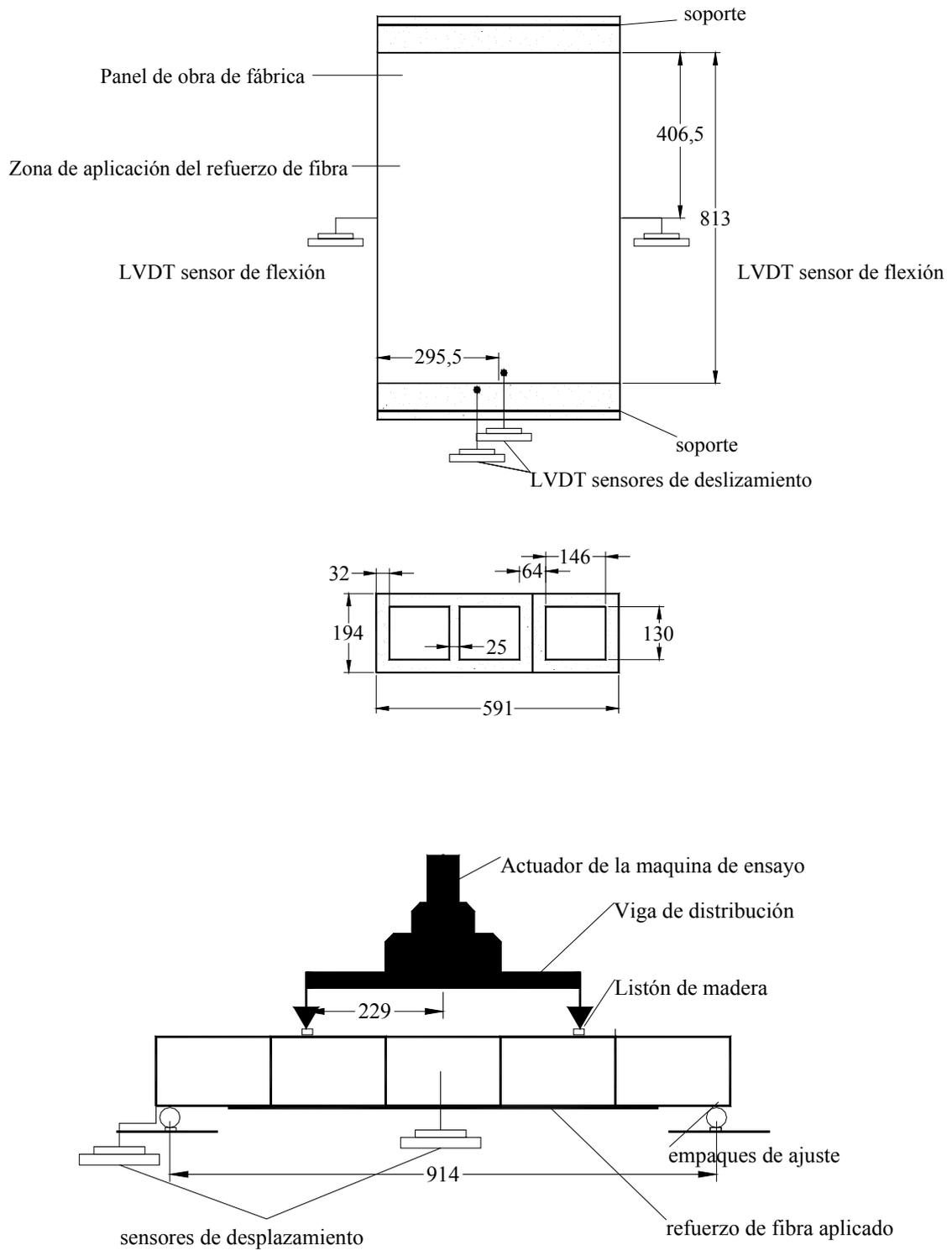


Figura 2. 47 — Montaje de ensayo (Hamoush et al., 2001).

Cantidad de especímenes	Tipo de ensayo	Preparación de la superficie	Patrón de refuerzo	Carga última (kPa)	Rigidez del cuerpo (mm)	Ajuste promedio de la deflexión al centro del panel (mm)	Resistencia de cortante (kPa)	Modo de fallo
1	1	Cepillado metálico	Unidireccional	15.40	2.80	7.39	533.6	Cortante
2	2	Cepillado metálico	Multi-direccional	24.27	2.80	9.63	841.2	Cortante
3	5	No	No	-	-	-	-	-*
4	5	No	No	0.68	0.25	6.5	23.6	Deflexión
5	5	No	No	1.43	0.0	7.67	49.6	Deflexión
6	1	Cepillado metálico	Unidireccional	29.72	2.80	12.19	1,030.1	-*
7	2	Cepillado metálico	Multi-direccional	22.40	2.50	11.15	776.8	Cortante
8	1	Cepillado metálico	Unidireccional	17.10	4.06	7.54	593.0	Cortante
9	2	Chorro de arena	Multi-direccional	14.47	2.03	6.58	501.3	Deflexión
10	3	Chorro de arena	Unidireccional	16.30	4.06	7.04	565.4	Cortante
11	4	Chorro de arena	Multi-direccional	19.71	0.00	8.33	683.3	Cortante
12	3	Chorro de arena	Unidireccional	22.06	0.81	10.46	765.3	Cortante
13	4	Chorro de arena	Multi-direccional	27.71	3.56	8.69	960.4	Cortante
14	3	Chorro de arena	Unidireccional	16.11	0.76	3.50	558.5	Cortante
15	4	Chorro de arena	Multi-direccional	23.69	1.02	6.30	817.7	Cortante

*Fallo debido a problemas técnicos

Tabla 2.16 – Resultados experimentales (Hamoush et al., 2001).

Pueden observarse los importantes incrementos de la carga última, ductilidad y resistencia a cortante, contrastados con los paneles no reforzados (paneles numerados 3, 4 y 5). La tabla muestra también la preparación de la superficie del panel.

Hamilton y Dolan (2001) llevaron a cabo un programa experimental similar al descrito en el párrafo anterior, con paneles de bloques de hormigón, utilizando una bolsa de aire para generar las incidencias de cargas de flexión. Determinaron que el uso de GFRP provee el mismo refuerzo que uno convencional de acero, si dicho refuerzo fuese aplicado con separaciones de 600 mm.

Identificaron dos formas de fallo: por rotura del laminado y por la combinación de fractura y delaminación (figura 2.48 a y b). En correspondencia a lo anterior propusieron algunas ecuaciones comunes para la obra de fabrica reforzada y para predicción de la resistencia del sistema de refuerzo. Aportaron recomendaciones para el desarrollo de la investigación, acerca del modo de fallo concéntrico, la adherencia del refuerzo, cargas cíclicas, cargas permanentes y pruebas de aplicación de cargas de flexión adicional.

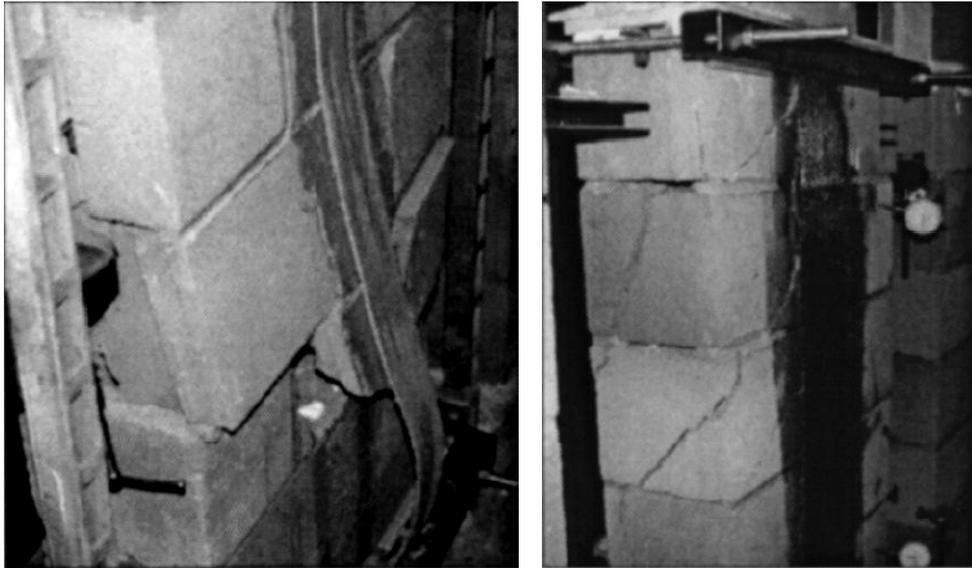


Figura 2. 48 — Modos de fallo: (a) Cortante a través de las piezas de fábrica. (b) Delaminación del laminado FRP y desprendimiento de capas superficiales de la fábrica (Hamilton y Dolan, 2001).

En correspondencia con su trabajo, Hamilton y Dolan sugieren algunas líneas temáticas que consideran apropiadas para dar continuidad a la investigación. Una de ellas es el desempeño de los sistemas de refuerzo FRP en el ámbito de comportamiento del muro en su propio plano y ante incidencias de carga lateral. También consideran muy importante la eficacia adherente del sistema, especialmente en términos de largo plazo, remarcando la conveniencia del control de calidad llevado a cabo durante la aplicación para asegurar mejores resultados.

Así mismo, discuten sobre los riesgos de degradación de la eficacia del sistema por efecto de cargas cíclicas, y del desempeño del refuerzo sujeto a largos períodos de tensión. Por último subrayan la conveniencia de llevar a cabo más experimentación ante la capacidad del sistema ante cargas de flexión, con interés de validar las fórmulas para calculo de refuerzo propuestas.

Mosallam et al (2001), utilizando GFRP y CFRP obtienen considerables incrementos en la resistencia y rigidez ante esfuerzos de flexión. Los fallos que detectan se deben a la compresión de la fábrica (falta desarrollar este apartado).

Para la evaluación de la flexión excéntrica en muros, Gilstrap y Dolan (1998) utilizan varios tipos de FRP y adhesivos. Inicialmente emplean pequeños paneles para la caracterización de la adherencia (figura 2.49) y después hacen un comparativo entre paneles reforzados y paneles de control no reforzados. El número de ensayos realizados es relativamente pequeño, pero aplican un amplio número de variables, mismas que permiten comprobar que el refuerzo con FRP provee significativos incrementos a la resistencia excéntrica y capacidad de carga.

Los autores prescriben que los compuestos FRP son utilizados exitosamente en el refuerzo de paredes. La aplicación de fibras adheridas en la superficie, provee significativos

incrementos en la resistencia de la fábrica ante incidencias de carga lateral o perpendicular al plano propio del muro, al igual que la capacidad resistente.

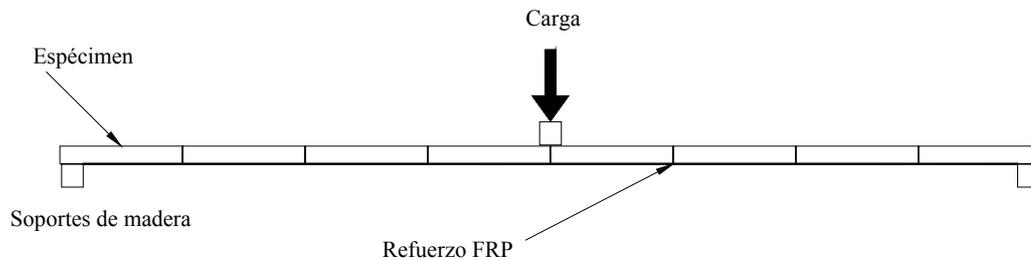


Figura 2. 49 – Paneles de obra de fábrica utilizados para los ensayos de flexión (Gilstrap y Dolan, 1998).

Capozucca (2001) realiza ensayos de cortante a muros pre-fisurados, bajo cargas concéntricas. Refuerza los paneles con CFRP, aplicando cargas axiales convencionales y cargas laterales inducidas. Utiliza dos criterios de refuerzo y consigue reducir el fallo frágil, además de incrementar significativamente la rigidez y la resistencia última.

Gergely y Young (2001) experimentan con el refuerzo de paneles previamente fisurados, empleando en ambas caras laminados de FRP en distintas orientaciones. Los laminados incrementan significativamente la capacidad resistente de los paneles ante cargas cíclicas uniformemente distribuidas y asimétricas. Encuentran que la aplicación de múltiples capas de refuerzo reduce las tensiones y limita la delaminación; pero no extraen conclusiones de los efectos que causan las diferentes orientaciones del refuerzo.

Kuzik et al (1999) y (2001) experimentan con paneles reforzados para flexión excéntrica, aplicando en la superficie compuestos GFRP y en el interior barras metálicas, sometiendo los paneles a una carga axial de compresión constante y una carga cíclica excéntrica lateral. Los parámetros investigados son el número de capas de refuerzo, la cantidad de refuerzo interno y la fuerza de la carga axial. En las conclusiones los autores señalan que el único parámetro que afecta significativamente, es la cantidad de refuerzo aplicado, que incrementa la resistencia última y la rigidez de los muros; y es significativo que los paneles se mantienen íntegros durante su ensayo. Así mismo, Kusik et al (2003) dedarrollaron un modelo numérico para predecir el comportamiento a flexión de muros.

Albert et al. (2001) llevaron a cabo un programa experimental consistente en el ensayo de 10 paneles de fábrica de ladrillo, reforzados con compuestos de fibra aplicados en la superficie, sujetos a procesos monotónicos de carga lateral excéntrica. Uno de los paneles fue ensayado bajo carga cíclica y algunos paneles fueron incluso sujetos de forma iterativa a cargas axiales moderadas. Los parámetros que investigaron fueron: el tipo de refuerzo; la cantidad de refuerzo aplicado; el patrón geométrico de aplicación (figura 2.50).

Los efectos en los paneles sujetos a una carga moderada y el comportamiento de los paneles reforzados sujetos a cargas cíclicas. Como refuerzo utilizan laminados y tejidos de fibra de carbono y tejidos de fibra de vidrio.

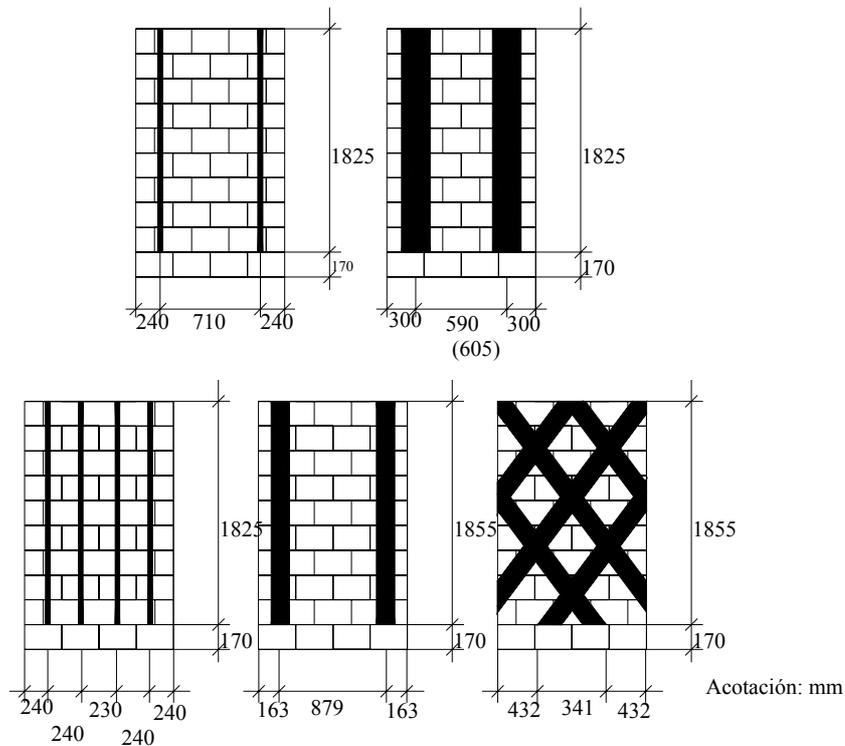


Figura 2.50 — Patrones de aplicación de FRP sobre los paneles de obra de fábrica (Albert et al., 2001).

El tipo de ensayos que realizaron se describe en la fig. 2.51: incluyó dos series de paneles, contruidos con piezas de fábrica de diferentes dimensiones: bloques de dimensiones en unidades métricas para la serie 1 y dimensiones en unidades imperiales para la serie 2.

Todos los especímenes fueron ensayados bajo las mismas condiciones. Cada proceso de carga se aplica transfiriendo al panel la fuerza generada por un actuador hidráulico por medio de un mecanismo de distribución, y solo para los ensayos que implicaban procesos axiales de carga se hacen algunos ajustes al mecanismo original.

Utilizaron transductores de desplazamiento para captar las deformaciones de los paneles, y galgas extensométricas para medir las tensiones en los refuerzos y en las piezas de fábrica. Para calcular la carga transmitida a través del actuador hidráulico, emplearon una célula de carga con capacidad máxima de 100 kN.

En cuanto a los resultados, las áreas de mayor interés fueron el comportamiento de tensión-deformación, las tensiones de tracción y compresión y los modos de fallo. Las últimas cuatro columnas de la tabla 2.17 describen la carga de fallo y la deflexión máxima de los paneles, en conjunto con el modo de fallo de cada espécimen.

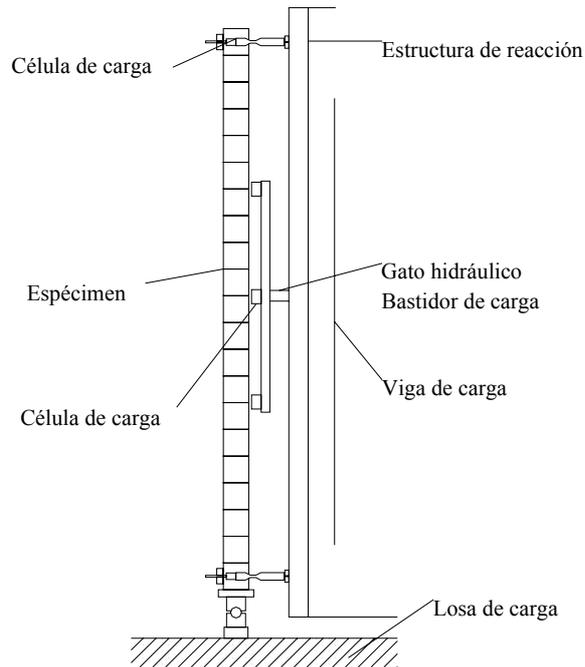


Figura 2. 51 — Configuración de los ensayos de flexión (Albert et al., 2001).

Panel	Capas de refuerzo aplicado	Ancho de laminado	Patrón geométrico	Notas	Carga máxima (kN)	Deflexión máxima (mm)	Modo de fallo	Origen de fallo
MU1	N/A	N/A	N/A	--	1.0	0.7	Separación mortero	13ª junta
MCS2-1	2	50	A	SE UTILIZA MU1	12.0	14	N/A	N/A
MCS3-2	2	50	A	SE UTILIZA MCS2-1	21.8	31	Desliz. mortero	1ª junta
MCST4	2	250	B	--	28.9	58	N/A	N/A
MGST5	2	250	B	--	36.0	70	Flexión cortante	5ª hilada
MCS6	4	50	C	--	46.4	42	Flexión cortante	6ª hilada
MCST7-4	2	250	B	ENSAYO CÍCLICO	32.7	78	Flexión cortante	6ª hilada
ICST8	2	250	B	DOS CAPAS/ LAMINADO	50.2	63	Flexión cortante	7ª hilada
ICST9	2	250	B	CARGA AXIAL 10 kN	33.0	71	N/A	N/A
ICST10	2	125	D	--	20.9	82	Rotura fibras	11ª y 12ª juntas
ICST11	2	250	B	--	41.7	91	Flexión cortante	7ª hilada
ICST12	10	125	E	ANGULO 37°	22.7	62	Rotura fibras	12ª junta

ICST13 2 250 B CARGA AXIAL 30 kN 37.7 88 Flexión cortante 6ª hilada

Tabla 2.17 – Descripción de los paneles, resistencias últimas y modos y deflexiones máximas (Albert et al., 2001).

En la figura 2.52 pueden verse los resultados de la serie de ensayos 1. Es evidente que la resistencia y rigidez aumentan drásticamente al aplicar refuerzos de fibra a los paneles previamente fracturados. En el comparativo de la serie 2, que se muestra en la figura 2.53 parece que la rigidez al inicio y al final pueden alterarse directamente por la cantidad de refuerzo aplicado.

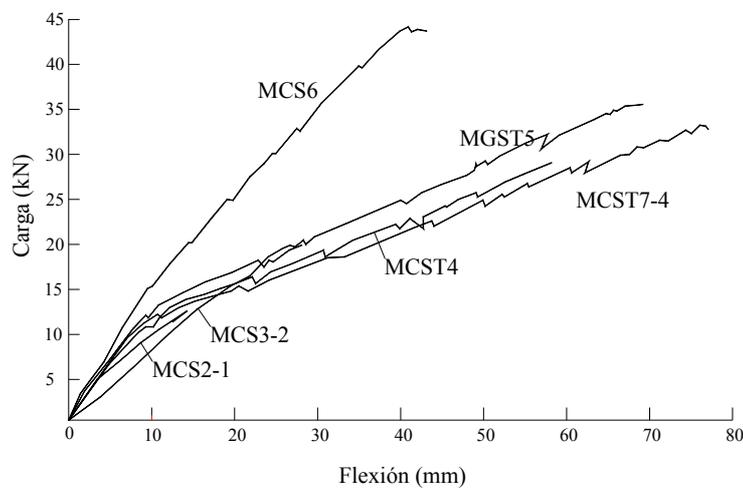


Figura 2.52 — Comportamiento carga-desplazamiento de las series 1 (Albert et al., 2001).

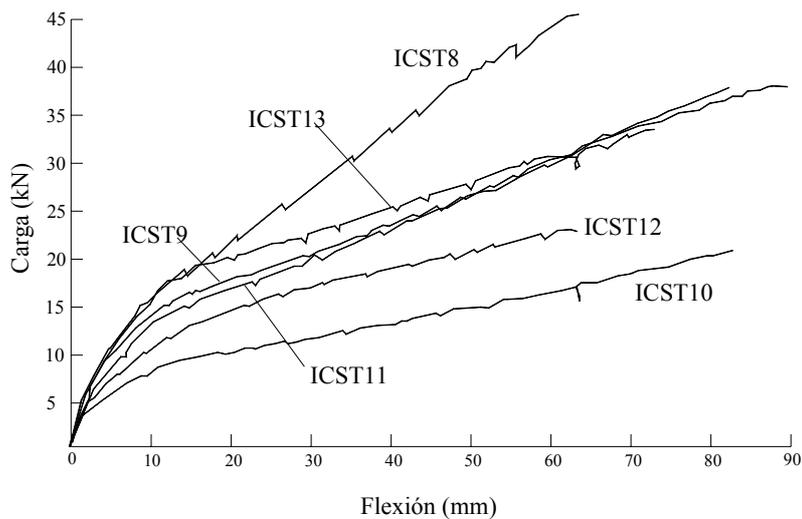


Figura 2.53 – Comportamiento carga-desplazamiento de las series 2 (Albert et al., 2001).

En general, la deflexión de los paneles puede dividirse en dos fases. La primera fase de la respuesta es un arco gradual que termina cuando la deflexión avanza entre diez y veinte milímetros. Ésta primer fase se desarrolla mientras el mortero de las juntas horizontales alcanza el máximo de su resistencia y falla. La segunda fase de la curva de comportamiento es una línea casi recta, que representa la contribución del refuerzo cuando éste absorbe la transmisión de esfuerzos del panel.

Después de esto todas las juntas horizontales del panel continúan separándose y el panel incrementa su flexión. Aún con la clara heterogeneidad de la fábrica, los resultados obtenidos de los grupos de ensayos, sugieren que puede ser útil realizar comparativos de su comportamiento general. En la figura 2.54 se muestra el comportamiento de los refuerzos ante las tensiones.

Puede apreciarse la correspondencia de las dos fases con las características de la fábrica. En las zonas de contacto del refuerzo con las piezas, cuando ésta asume la resistencia se observa mínima deformación, pero en las zonas de contacto entre las piezas y el mortero, la deformación inicia casi inmediatamente.

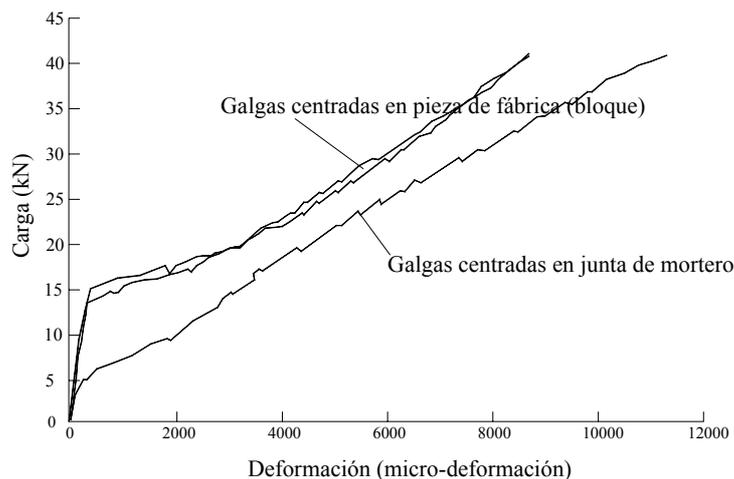


Figura 2. 54 — Comportamiento carga-desplazamiento de la fibra de refuerzo (Albert et al., 2001).

En cuanto a los modos de fallo se registran tres casos: la separación o deslizamiento del mortero; la combinación de fractura por flexión y cortante y; la rotura del refuerzo.

El mismo grupo de investigadores lleva a cabo un ensayo bajo un proceso de carga cíclico, en el que observaron que después de cada fase de descarga, la curva carga-desplazamiento vuelve a la línea original con un comportamiento común al mostrado por los ensayos con procesos monotónicos (figura 2.55).

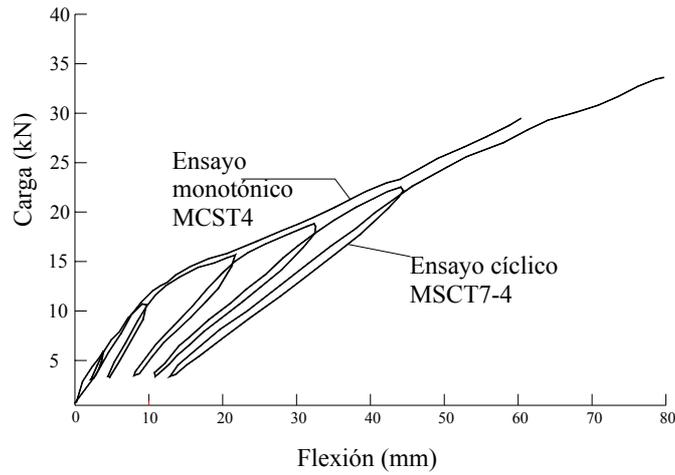


Figura 2. 55 — Comparación de las curvas carga-desplazamiento de uno de los paneles reforzados, obtenidas en ensayos monotónico y cíclico (Albert et al., 2001).

Todos los resultados obtenidos de los ensayos se aprovechan para confrontar los valores calculados con un modelo analítico. En la figura 2.56 puede verse un comparativo entre el comportamiento real de uno de los paneles y el comportamiento calculado. Conforme a las ecuaciones propuestas, la deflexión final podría determinarse por:

$$\Delta_u^{pr} = \Delta_{tr}^{pr} + \left(\frac{W_u^{pr} - W_{tr}^{pr}}{S_2^{pr}} \right) \tag{4}$$

En donde Δ es la deflexión en la zona media del panel, $()^{pr}$ es una cantidad estimada, $()_u$ es el valor último, $()_{tr}$ es un valor de transición, W es la carga lateral total aplicada, y S_2 es la declinación hacia la segunda fase de la envolvente.

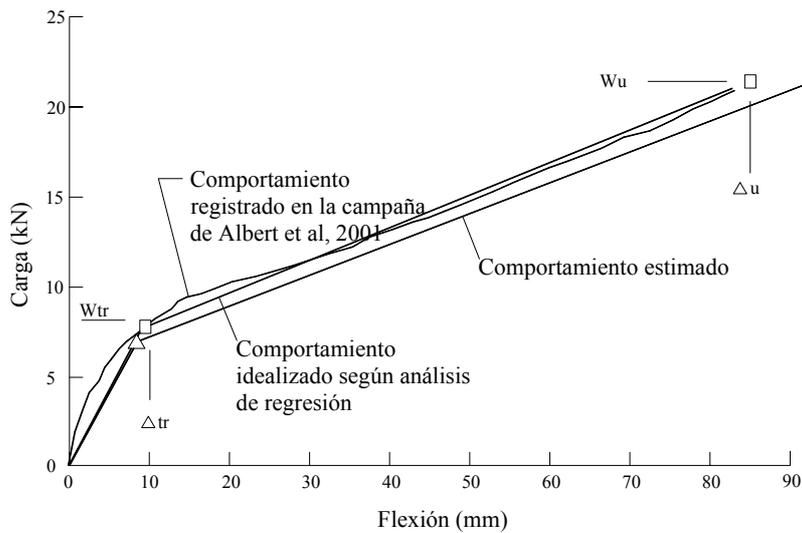


Figura 2. 56 — Comportamiento registrado en uno de los ensayos, confrontado al comportamiento idealizado y al comportamiento estimado (Albert et al., 2001).

En el trabajo de dichos investigadores, todos los resultados experimentales muestran que, la resistencia y ductilidad de los especímenes se incrementa significativamente con la aplicación del refuerzo FRP.

El tipo y la cantidad de refuerzo aplicado afectan directamente la rigidez de cada espécimen. Esto determina que hay una relación directa entre la declinación de la segunda fase de la envolvente carga-desplazamiento y el ajuste de la rigidez. El incremento de la carga axial aumenta la rigidez en la primera fase y disminuye en la segunda. Por último, el panel sujeto a carga cíclica experimenta una disminución en la primera fase de rigidez después del primer ciclo, pero se mantiene dentro de la envolvente obtenida previamente.

Se desarrolló un trabajo experimental acerca del refuerzo con FRP de paneles de obra de fábrica, sujetos a flexión y cortante. Dicho trabajo, realizado por Kiss et al (2002) muestra que la marcada falta de linealidad que existe entre la fábrica y el refuerzo FRP puede incrementarse debido al desprendimiento del refuerzo. Dicha falta de linealidad da al refuerzo FRP cierto nivel de ductilidad, a pesar de la rigidez de la fábrica y el refuerzo mismo.

Por lo anterior, los materiales compuestos pueden emplearse como un mecanismo apropiado para la deformación inelástica (vital en la ingeniería sísmica), así como para incrementar la resistencia de las estructuras de fábrica. Además, la información obtenida de forma experimental ratifica la validez de los cálculos hechos a través de un sencillo modelo numérico propuesto por los investigadores.

Estudiaron diversos parámetros que afectan directamente el desempeño de los paneles de fábrica reforzados con compuestos FRP (el tipo de refuerzo y su espesor, las tensiones de fallo y la capacidad resistente de la interfase de unión) y observaron que un mayor espesor en el refuerzo utilizado puede retrasar su desprendimiento y aumentar la ductilidad del panel (figura 2.57).

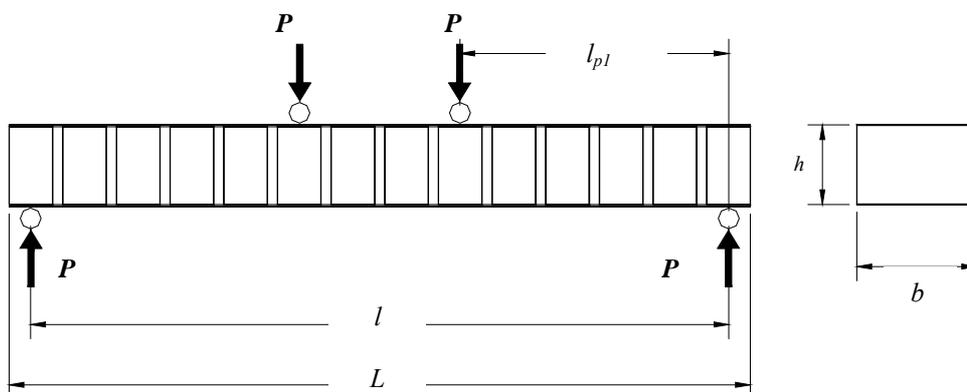


Figura 2. 57 — Geometría del ensayo a flexión de 4 puntos de apoyo (Kiss et al., 2002).

En la tabla 2.18 se muestra un comparativo entre los resultados experimentales y numéricos, en el que puede notarse el aumento de la ductilidad de los paneles reforzados, en la marcada diferencia entre los momentos de inicio de rotura y el fallo, y en la deflexión permitida al centro del panel. Así mismo, puede comprobarse la correspondencia entre los valores experimentales y estimados.

Tipo de refuerzo	Panel	Resultados experimentales				Resultados estimados a través del modelo					
		M_1 (kN/m)	M_f (kN/m)	d (mm)	W_f (mm)	M_1 (kN/m)	M_f (kN/m)	d (mm)	W_f (mm)	R_I (N)	R_{II} (N)
No reforzado	1	0.149	0.149	-	0.51	0.144	0.144	-	0.54	-	-
No reforzado	2	0.140	0.140	-	0.58	0.144	0.144	-	0.54	-	-
No reforzado	3	0.126	0.126	-	0.49	0.144	0.144	-	0.54	-	-
Aglomerado de fibra de vidrio-resina epoxi	1	0.357	1.656	45.2	6.07	0.332	1.606	47.2	6.02	200.05	111.68
Tejido de fibra de vidrio-resina epoxi	1	0.411	0.855	15.4	2.19	0.423	0.825	16.2	2.78	150.16	58.60
Tejido de fibra de vidrio-resina epoxi	2	0.414	0.869	22.7	2.77	0.434	0.875	22.7	3.07	150.16	58.60
Tejido de fibra de vidrio-resina epoxi	3	0.419	0.774	35.8	3.56	0.386	0.812	30.2	3.33	150.16	58.60
Tejido de fibra de vidrio-resina epoxi	4	-	1.058	25.4	1.17	0.232	1.022	32.9	1.50	150.16	58.60
Aglomerado de fibra de vidrio-resina poliéster	1	0.329	1.382	29.9	3.94	0.395	1.267	25.2	3.42	175.84	95.56
Aglomerado de fibra de vidrio-resina poliéster	2	0.318	1.182	35.7	5.18	0.216	1.147	30.5	4.61	175.84	95.56
Aglomerado de fibra de vidrio-resina poliéster	3	0.200	1.175	45.9	8.23	0.193	1.130	40.3	7.46	175.84	95.56
Aglomerado de fibra de vidrio-resina poliéster	4	-	0.859	24.5	1.41	0.201	0.850	22.9	1.58	175.84	95.56
Tejido de fibra de vidrio-resina poliéster	1	0.201	0.660	44.0	5.26	0.186	0.602	40.0	4.83	56.16	50.60
Tejido de fibra de vidrio-resina poliéster	2	0.299	0.807	40.5	3.12	0.185	0.813	35.5	2.86	56.16	50.60
Tejido de fibra de vidrio-resina poliéster	3	0.203	0.718	60.6	5.41	0.188	0.736	56.6	5.11	56.16	50.60
Tejido de fibra de vidrio-resina poliéster	4	0.183	0.737	45.9	4.50	0.182	0.699	37.1	4.28	56.16	50.60
Tejido de fibra de vidrio-resina poliéster	5	-	0.560	25.4	0.96	0.162	0.593	21.5	1.15	56.16	50.60

Tabla 2.18 – Momentos estimados y registrados, longitud de delaminación y deflexión en el punto medio de paneles de control (no reforzados) y paneles reforzados con FRP (Kiss et al., 2002).

M_1 denota el momento al inicio de la rotura, M_f denota el momento al fallo, d indica la longitud del desprendimiento del refuerzo, W_f indica la deflexión central del panel en el

momento del fallo, R_I señala la resistencia del panel durante el proceso de rotura y R_{IL} señala la resistencia del panel durante el fenómeno de deslizamiento.

Kuzik et al (2003) realizaron un trabajo de investigación relacionado con el comportamiento de la fábrica reforzada con compuestos de tejido de fibra de vidrio, sujeta a esfuerzos perpendiculares a su propio plano y a procesos de carga cíclica (figura 2.58).

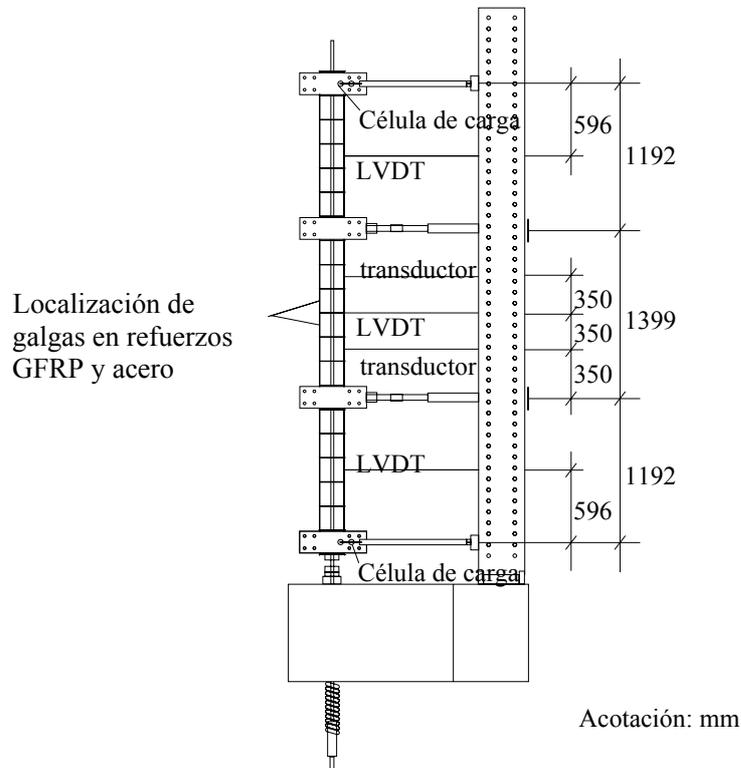


Figura 2. 58 — Configuración de ensayo (Kusik et al., 2003).

El trabajo se basó en ensayos realizados sobre paneles construidos a escala real, en los que se estudiaron principalmente tres parámetros: la intensidad de carga axial aplicada; la cantidad de refuerzo metálico interno y; la cantidad de tejido de fibra de vidrio aplicado como refuerzo (figura 2.59).

De los tres parámetros estudiados la variación en la cantidad de tejido de fibra aplicado fue el único que afectó significativamente el comportamiento de los paneles. Aumentando o disminuyendo la cantidad de refuerzo GFRP aplicado, se regula la rigidez y la resistencia última. Excepto por algunas fisuras visibles, las paredes mantienen su integridad estructural incluso ante la acción de cargas cíclicas.

El desempeño general de los paneles es previsible. Los autores sugieren que el sistema de refuerzo con compuestos de fibra, puede ser muy conveniente para la rehabilitación de estructuras de fábrica antiguas, que presenten deterioro o alteraciones de diferente índole.

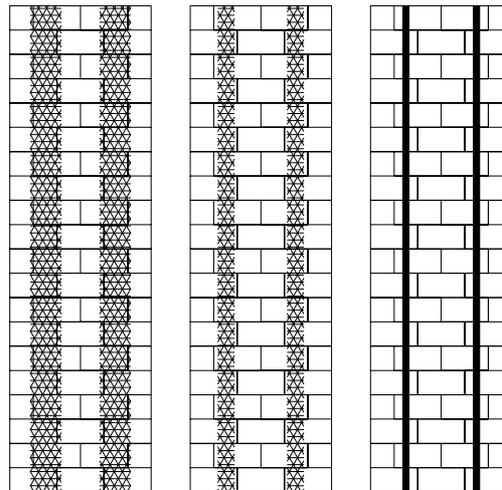


Figura 2. 59 — Patrones de aplicación de GFRP (Kusik et al., 2003).

Propusieron un sencillo modelo numérico del comportamiento, útil para la evaluación de las características resistentes y de la deformación de las paredes reforzadas. En la tabla 2.19 puede verse claramente que todas las paredes reforzadas incrementaron su resistencia última a flexión desde un 87 (pared 4) hasta un 453% (pared 8) y que permiten una deflexión mayor entre el 39,7 (pared 2) y el 132% (pared 4).

Espécimen	Refuerzo metálico interno (Tipo de barra)	GFRP (espesor/caras reforzadas) (mm)	Carga axial (kN)	Cantidad de ciclos de carga	Carga última total (kN)	Deflexión última (mm)	Modo de fallo
Pared 1	2-10M	500 (2 x 250)	28.61	12.5	57.1	98.9	Rotura por flexión
Pared 2	No	500 (2 x 250)	31.75	15.5	38.1	82.3	Rotura por flexión
Pared 3	2-10M	260 (2 x 130)	30.13	13.5	39.0	122.2	Rotura por flexión
Pared 4	2-10M	130 (2 x 65)	30.16	13.5	28.4	137.0	Límite útil
Pared 5a	2-10M	No	32.07	15	15.2	58.9	Rotura por flexión
Pared 5b	2-10M	500 (2 x 250)	30.81	10.5	53.2	88.6	Rotura por flexión
Pared 6	2-10M	500 (2 x 250)	15.45	12.5	65.3	113.5	Rotura por flexión
Pared 7	2-10M	500 (2 x 250)	46.54	13.5	69.1	118.0	Rotura por flexión
Pared 8	2-15M	500 (2 x 250)	29.36	13.5	84.1	132.0	Rotura por flexión

Tabla 2.19 – Parámetros de ensayo de los especímenes y resultados obtenidos (Kuzik et al., 2003).

Kiang y Patoary (2004) llevaron a cabo una investigación experimental en la cual cotejaron los resultados obtenidos con cálculos analíticos. Ensayaron 30 paneles de obra de fábrica reforzados con tres tipos de compuestos FRP y tres sistemas de anclaje, aplicando una carga concentrada sobre áreas de 100 x 100 ó de 500 x 500 mm (figura 2.61).

Registraron varios modos de fallo (figura 2.60) y los resultados muestran significativos incrementos en la resistencia de la fábrica ante incidencias de carga perpendiculares al propio plano.

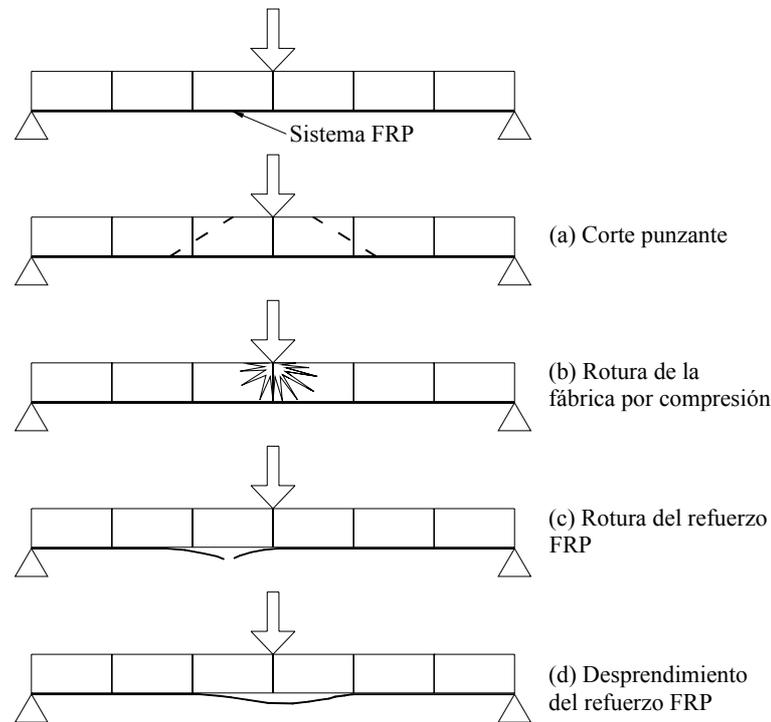


Figura 2. 60 — Modos de fallo (Kiang y Patoary, 2004).

La respuesta carga-deformación de las series ostenta claramente la influencia de los procesos de refuerzo en el comportamiento de los especímenes (tabla 2.20).

Por ejemplo, en la gráfica de las series IV (CFRP) el espécimen *CUGU* no tiene preparación en la superficie, y la muestra *CBOU* se refuerza con anclajes.

Revelan cuatro formas de fallo: rotura punzo-cortante en las piezas; desprendimiento del refuerzo FRP del sustrato superficial de las piezas y mortero; rotura de las piezas por compresión; y rotura por tracción de los laminados.

Determinan que por medio de una adecuada preparación de la superficie y con los sistemas de anclaje, puede prevenirse el fallo por desprendimiento del refuerzo. Por último tomando como base los principios de compatibilidad de la tracción y el equilibrio de fuerzas, presentan modelos analíticos simples para predecir la resistencia última de los paneles reforzados. Los resultados de los ensayos pueden compararse en la tabla con los obtenidos por cálculo analítico.

Serie	Refuerzo Tipo de material compuesto	Capas de refuerzo aplicado	Especimen	Espesor de pared	Orientación del refuerzo (°)	Notas
I	No Compuesto de fibra de vidrio	0	REF	110	No	Control
		2	GL2	110	90	Superficie sin prep.
		4	GL4	120	90, 90	
		4	GL4a	110	45, 90, 135	
II	Compuesto de fibra de vidrio	2	GL2B	120	90	
		4	GL4P	120	90, 0, 90	
	Compuesto de fibra de carbono	2	CL2	110	90	Superficie sin prep. Ref. 2 caras
		4	CL4	110	90, 0, 90	
		4	CL4a	110	45, 90, 135	
		2	CL2B	120	90	
III	Compuesto de fibra de vidrio	2	GUG	110	90	Superficie sin prep. Anclaje FRP Anclaje metálico
		2	GG	110	90	
		2	GBO	110	90	
		2	GBA	110	90	
	Compuesto de fibra de carbono	2	CUG	110	90	Superficie sin prep. Anclaje FRP Anclaje metálico
		2	CG	110	90	
		2	CBO	110	90	
		2	CBA	110	90	
IV	Compuesto de fibra de vidrio	2	GUG U	110	90	Superficie sin prep. Anclaje FRP Anclaje metálico
		2	GGU	110	90	
		2	CBOU	110	90	
		2	CBAU	110	90	
	Compuesto de fibra de carbono	2	CUGU	110	90	Superficie sin prep. Anclaje FRP Anclaje metálico
		2	CGU	110	90	
		2	CBOU	110	90	
		2	CBAU	110	90	
V	Compuesto de tejido de fibra de vidrio	1	WRP1	110	Bidireccional	Resina de poliéster Saturante MBrace
		2	WRP2	110	Bidireccional	
		1	VRM1	110	Bidireccional	
		2	VRM2	120	Bidireccional	

Tabla 2.20 – Características de los especimenes ensayados (Kiang y Patoary, 2004).

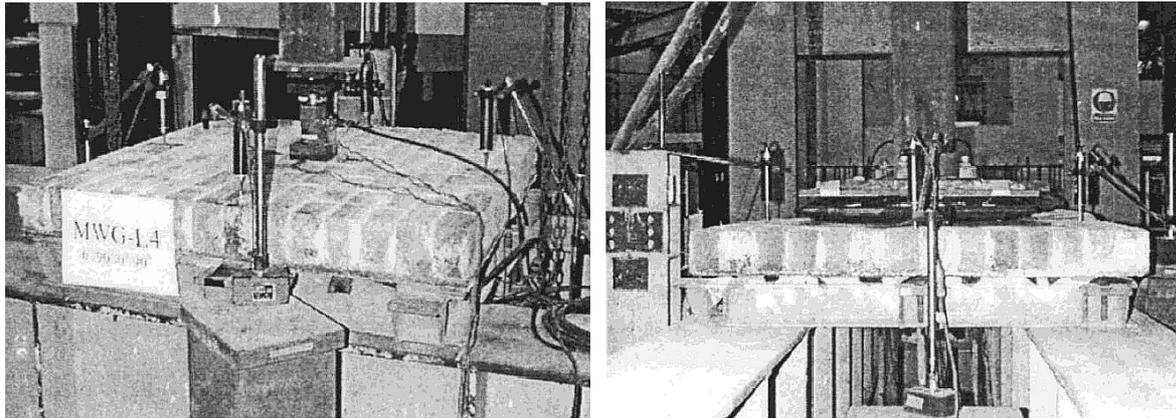


Figura 2. 61 — Montaje de los ensayos (Kiang y Patoary, 2004).

2.5.3. Refuerzo ante esfuerzos de cortante

Badoux et al (2002) emplearon paneles fabricados a escala 0:5, sometidos a varios estados de carga sísmica simulada, antes y después de ser reforzados con laminados de fibra de vidrio y carbono. Los investigadores verificaron que la oscilación puede ser una respuesta estable no lineal en muros esbeltos no armados, y que el refuerzo provee una importante capacidad de deformación lateral. La resistencia a cortante de los muros es más alta de la esperada a pesar de que se utiliza un mortero pobre.

La aplicación de laminado de fibra en solo una cara del muro fue suficiente para duplicar la resistencia lateral. El objetivo ha sido realizar ensayos dinámicos para conocer mejor el comportamiento de las paredes de fábrica sujetas a incidencias de carga sísmica en su propio plano, y valorar la eficacia de algunas aplicaciones de refuerzo FRP en la superficie. Los tipos de fallo de la fábrica no reforzada sometida a cargas en su plano pueden verse en la figura 2.62.

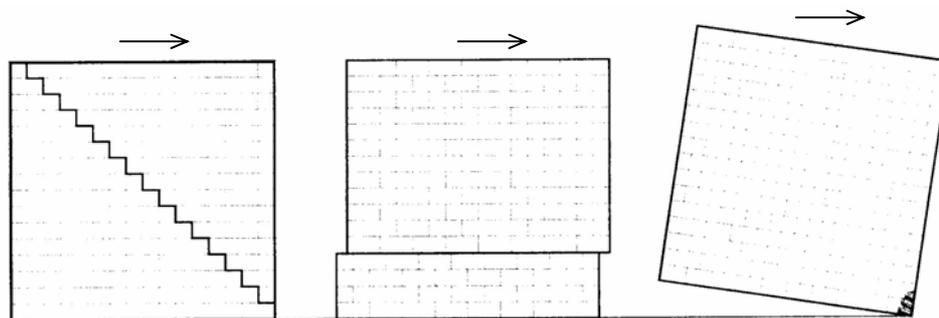


Figura 2. 62 — Tipos de fallo en su propio plano de paneles sujetos a compresión biaxial en su propio plano (a) fallo por cortante; (b) deslizamiento; (c) aplastamiento (Badoux et al., 2002).

En el programa experimental ensayaron cinco paneles reforzados con FRP. El dispositivo para ensayos utilizado (figura 2.63) es un simulador sísmico uniaxial, perteneciente al ETHZ (por *Swiss Federal Institute of Technology in Zurich*). Utilizaron paneles de 1600 x

1600 mm consolidados por vigas de hormigón en la base y en el extremo superior. Los compuestos FRP utilizados fueron tejidos de fibra de vidrio y laminados de fibra de carbono.

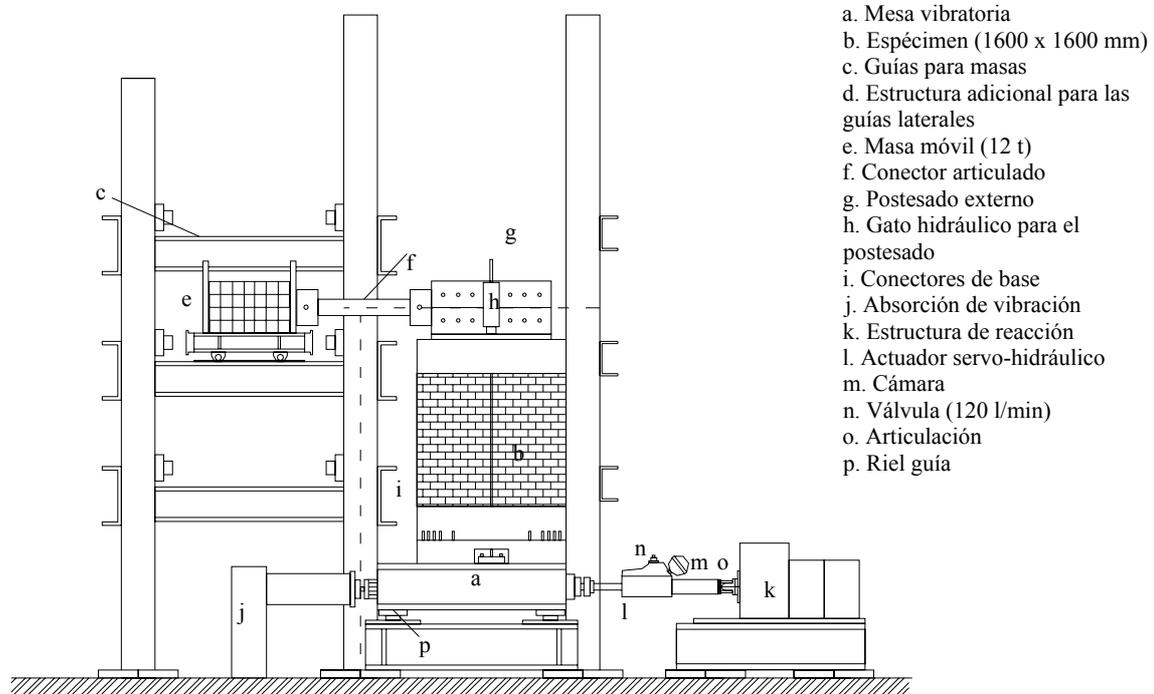


Figura 2. 63 — Configuración de los ensayos de paneles en el simulador sísmico del ETHZ, (Badoux et al., 2002).

En los resultados obtenidos se observa que, la fractura del panel reforzado con fibra de vidrio inicia bajo una carga dos veces superior a la que presenta el panel no reforzado. Así mismo reduce las deformaciones de daño en el panel entre el 70 y el 220%. (figura 2.64) puede verse esquemáticamente la fisuración ocurrida en el panel de referencia no reforzado, el panel reforzado con fibra de vidrio y el panel reforzado con fibra de carbono, respectivamente.

Otro tipo de tratamiento de refuerzo investigado ha sido uno de los llamados “refuerzos híbridos”, que incorporan materiales compuestos y acero para permitir una mayor ductilidad en los muros. Holberg y Hamilton (2002) y Hall et al (2002) lograron a través de ésta técnica, que la conexión metálica actúe antes del inicio de la fractura del FRP. Su estudio se fundamentó en campañas experimentales en las que se emplearon muros de fabrica de bloques de hormigón, con varias disposiciones de laminados o tejidos FRP como refuerzo, así como dos tipos de conexiones de acero (figura 2.65).

Para evitar el desprendimiento del refuerzo en la base, emplearon una barra exterior unida a las barras metálicas internas. Con ello consiguieron incrementar la resistencia en comparación a lo muros sin refuerzo interno. Ahora bien, la conexión externa no evita el deslizamiento, y el refuerzo FRP falla prematuramente debido a las tensiones concentradas en el punto de contacto, ya que no se toman precauciones ante éste riesgo.

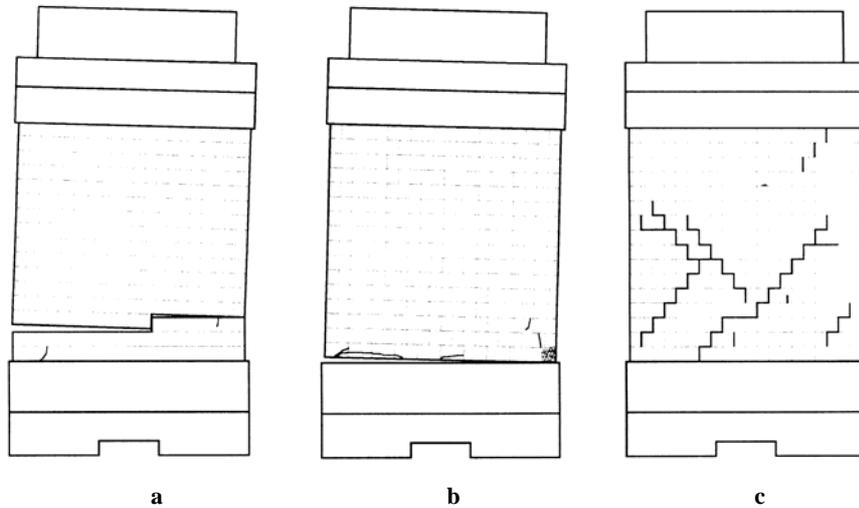


Figura 2. 64 — Fisuras y fracturas observadas durante la parte final de los ensayos de los paneles de intacto (a), reforzado con fibra de vidrio (b) y reforzado con fibra de carbono (c); (Badoux et al., 2002).

La excentricidad del empalme de unión, entre el refuerzo metálico y los elementos FRP, ocasiona también un comportamiento impredecible en la sección crítica. Ésta excentricidad debe ser reducida. Los investigadores observan también formas de fallo inesperadas en otro estudio realizado con muros, con aplicaciones de refuerzo híbrido como sistema de conexión a la base; que muestran también rotura del FRP o delaminación.

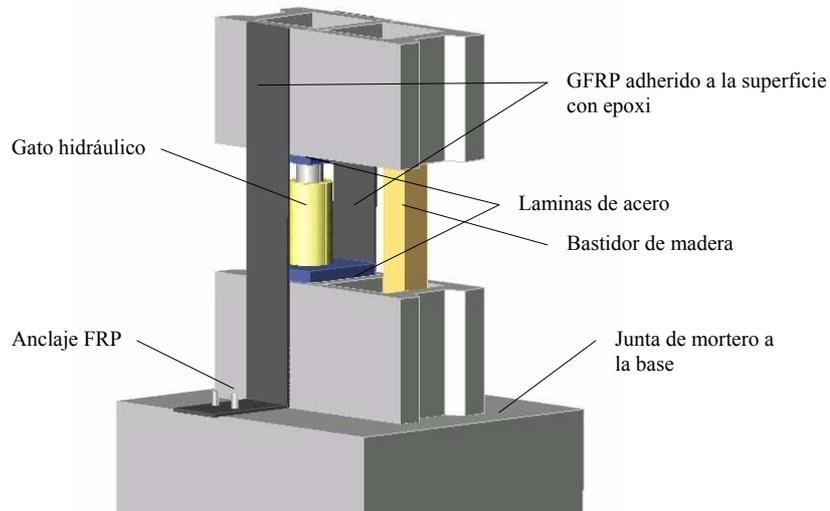


Figura 2. 65 — Detalles de los ensayos de desprendimiento (Hall et al., 2002).

Lissel et al (2000-a) y (2000-b) experimentaron también con aplicaciones de compuestos FRP en muros. Realizaron un estudio comparativo de refuerzo de las juntas horizontales para incrementar la resistencia a cortante, utilizando fibra de vidrio y geo-textil de nailon.

Su trabajo experimental se fundamentó en los resultados obtenidos tras la realización de varios ensayos con paneles de obra de fábrica, llevados a cabo para determinar los efectos en la resistencia a cortante con la aplicación de cuatro diferentes tipos de refuerzo y varios niveles de carga de pre-compresión.

Los ensayos se realizaron siguiendo las prescripciones de las norma ASTM E519 relativas a ensayos de tensión diagonal de paneles de obra de fábrica (figura 2.66).

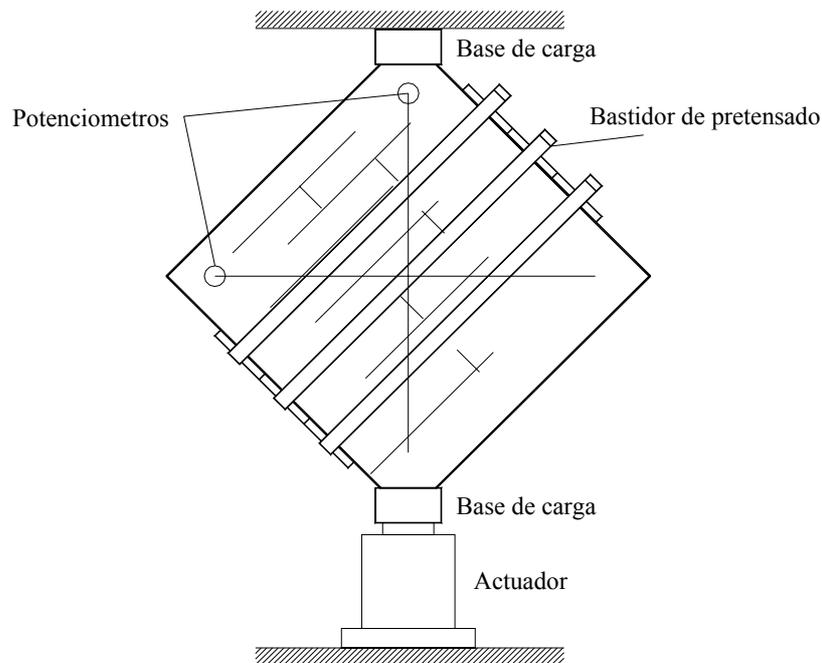


Figura 2. 66 — Esquema del montaje de la configuración de ensayo (Lissel et al., 2000).

La mayor parte de los paneles presentaron al fallo una fractura entre los vértices de apoyo y aplicación de la carga de compresión. Los paneles a los que no se aplicó compresión previa presentaron un fallo más frágil, ocasionando un desprendimiento de la mitad del panel (figura 2.67) a diferencia de los paneles reforzados con compuestos de fibra, en los que se previene el fallo frágil (figura 2.68).

Algunos valores podrían considerarse muy bajos, por ejemplo los paneles reforzados a los cuales no se ha aplicado compresión previa fallan por deslizamiento a través de la 4ª junta horizontal (figura 2.69) que es en donde se coloca el primer tejido de refuerzo. Probablemente esto sucede debido al incremento de la rigidez en la sección media del panel, induciendo el fallo del panel hacia la zona más débil.

También se observa que existe un bajo nivel de adherencia y una mínima interacción entre los tejidos GFRP y el mortero, a comparación de lo que sucede con el geo-textil y el refuerzo metálico. Cuando los paneles se someten a una previa compresión aumenta la tensión normal, evitando las zonas débiles y concentrando las tensiones normal y diagonal al centro del panel, propiciando así el fallo en esa zona. En niveles muy altos de tensión normal ocasionados por la previa compresión, el fallo puede ocurrir antes o después del debilitamiento por cortante.

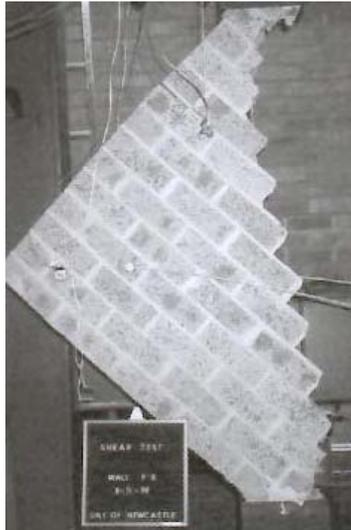


Figura 2. 67 — Modo de rotura de un panel no pre-comprimido, sujeto a compresión diagonal respecto a las juntas de mortero, Lissel et al. (2000-b).

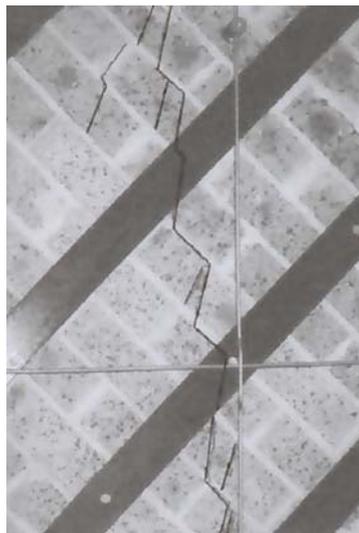


Figura 2. 68 — Modo de rotura de un panel pre-comprimido, sujeto a compresión diagonal (Lissel et al., 2000-b).

A medida que aumenta el nivel de pre-compresión, el patrón de fractura en el fallo por cortante tiende a ser más vertical, tanto en las piezas como en el mortero. Los ensayos de paneles comprimidos previamente, produce resultados más estables que los obtenidos de paneles no pre-comprimidos. La resistencia última de los paneles no comprimidos previamente, es más dispersa.

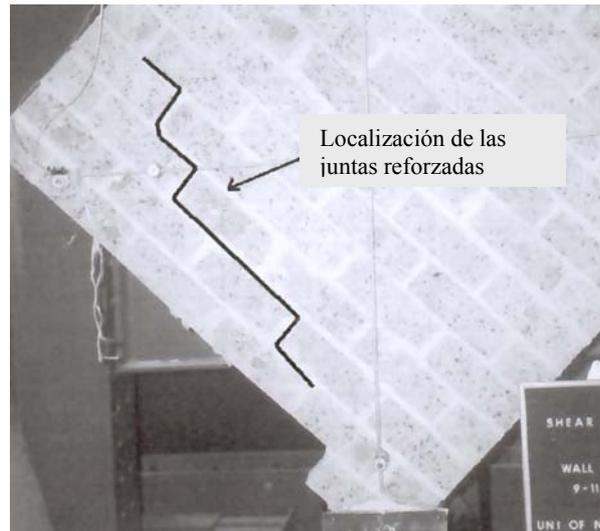


Figura 2.69 — Modo de rotura de un panel reforzado con GFRP sujeto a compresión diagonal (Lissel et al., 2000-b).

El grupo de investigadores proponen una sencilla ecuación para la influencia de la compresión previa de la fábrica en la resistencia a cortante:

$$v_m = 0.5f_p + v_{mo} \quad (5)$$

En donde v_m es la resistencia última a cortante de la fábrica, f_p es la pre-compresión transmitida a las juntas (N/mm^2), y v_{mo} es la resistencia de cortante en el propio plano de la fábrica no comprimida, señalada por los códigos de diseño (0.8 N/mm^2 en este caso).

Es importante señalar que entre las conclusiones de los investigadores, se manifiesta la insuficiencia del ensayo de tensión diagonal de paneles de obra de fábrica incluido por la norma ASTM E519, para niveles de tensión elevados, debido a la alta concentración de tensiones en las zonas de contacto entre el aparato de ensayo y las muestras.

Valluzi et al (2000) realizaron ensayos de compresión diagonal en paneles reforzados. Emplearon tres tipos de material compuesto con variables en la geometría y cantidad de refuerzo aplicados. En este caso, sin embargo, los laminados son empleados en una o ambas caras de los paneles. Observan que independientemente al tipo de refuerzo, la aplicación en las dos caras del panel provoca un mejor comportamiento y una mayor resistencia.

Su trabajo consistió en revisar el mecanismo de fallo de un conjunto de paneles representativos de paredes, de dimensiones: $505 \times 515 \times 120 \text{ mm}$ reforzados con compuestos FRP de vidrio, carbono y PVA (por Polyvinyl-alcohol, figura 2.70).

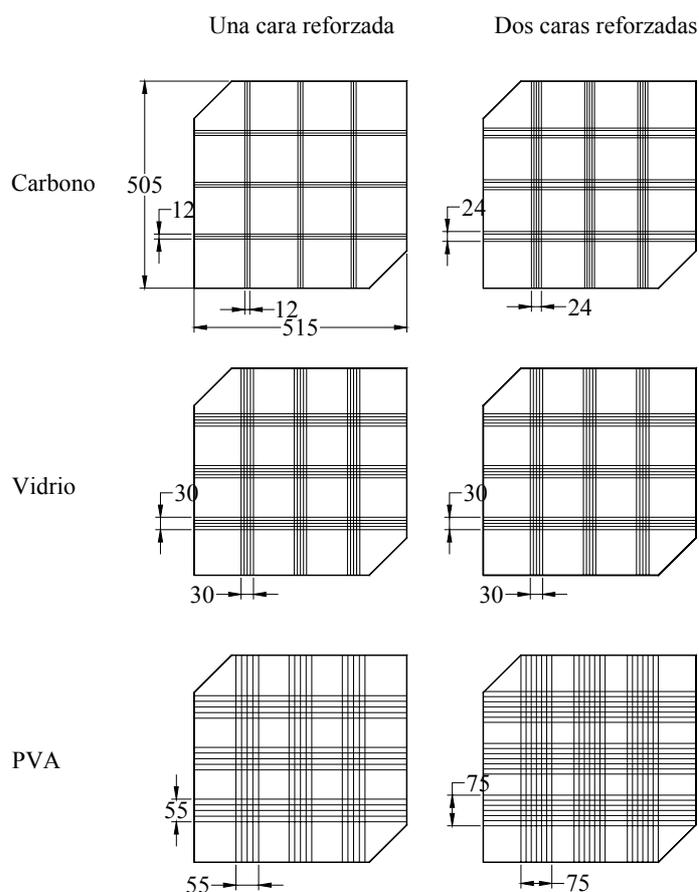


Figura 2. 70 — Características geométricas de los paneles reforzados (Valluzzi et al., 2000).

A través de dichos paneles estudiaron la influencia de las aplicaciones de diferentes materiales FRP, bajo diversos patrones geométricos y cuantitativos, y analizaron la contribución del refuerzo al cotejarla con las fórmulas de diseño disponibles para elementos estructurales (tabla 2.21).

Tipo de FRP	Densidad (Kg/m ³)	Modulo de elasticidad (GPa)	Resistencia última a la tensión (N/mm ²)	Deformación última (%)
Carbono (C1-30)	1820	230	3430	1.5
Vidrio (EG-30)	2600	65	1700	2.8
Polyvinil-alcohol (PVA)	1300	29	1400	6.0

Tabla 2.21 – Características físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la investigación (Valluzzi et al., 2000).

Los paneles fueron sometidos a cargas de compresión diagonal, y en ellos se midieron las deformaciones horizontal y vertical por medio de transductores de desplazamiento. Los resultados obtenidos corresponden con los esperados, puesto que los paneles presentan un fallo de tipo frágil, con roturas por desplazamiento a lo largo de la zona de compresión diagonal (figura 2.71).

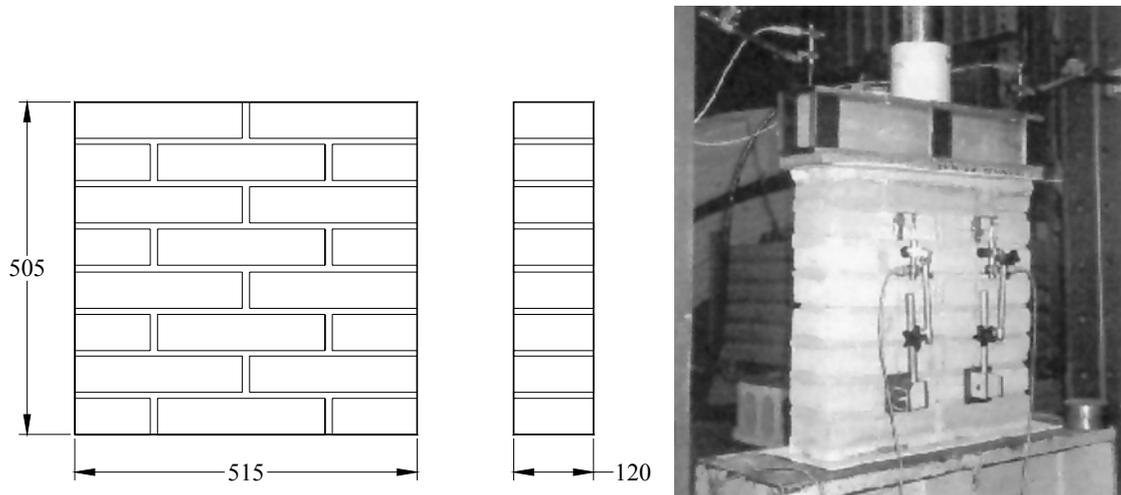


Figura 2. 71 — Características de las muestras y un ensayo preliminar de compresión (Valluzzi et al., 2000).

Los modos de fallo y las características de rotura detectadas en los paneles reforzados se presentan en la tabla 2.22.

Panel	Carga última (kN)	Tensión cortante (N/mm ²)	Incremento resistente (%)
No reforzado	86.0	1.19	-
Carbono (2 caras)	98.5	1.37	15.1
Carbono (1 cara)	90.0	1.25	5.0
Vidrio (2 caras)	103.0	1.43	20.2
Vidrio (1 cara)	94.0	1.30	9.2
PVA (2 caras)	146.0	2.00	68.1
PVA (1 cara)	100.0	1.39	16.8

Tabla 2.22 – Comparativo de las resistencias a cortante obtenidas (Valluzzi et al., 2000).

El refuerzo con fibra de vidrio, aplicado en las dos caras del panel, demuestra que contribuye a reducir la propagación de fisuras a lo largo de la diagonal del espécimen. El refuerzo con fibra de carbono, aplicado en las dos caras del panel, presenta un menor

incremento de la resistencia que la aplicación de fibra de vidrio, pero con un patrón similar de rotura; y esto se debe probablemente a que es menor el área de superficie reforzada.

La aplicación de tejidos de polyvinyl-alcohol (PVA) en las dos caras de los paneles, muestran el más alto incremento resistente, así como un daño relativamente menor en la rotura del mismo. Parece que el espesor de los tejidos de refuerzo es un factor relevante en la contribución a la resistencia y en el comportamiento global de los paneles. Por el contrario, en el caso de refuerzo de PVA en una sola cara del panel, no se obtiene un incremento tan importante de la resistencia a cortante, como en el caso del refuerzo aplicado en ambas caras, pero aún así, el lado no reforzado revela un reducido nivel de daño.

Los resultados más altos corresponden a los paneles reforzados con PVA, pero los resultados más bajos, invariablemente se obtienen de las aplicaciones de refuerzo en una sola cara. Además de los resultados experimentales, calculan la resistencia máxima de cortante (V_{Rd}) considerando criterios alusivos, antes presentados en algunas de las publicaciones de otros investigadores. La ecuación (6) se determina en el estudio de Valluzzi et al. Las ecuaciones 7 (ENV 1996) y 9 (Tomazevic et al, 1993) se proponen para casos de refuerzo de la obra de fábrica con barras de acero, mientras que la fórmula 10 (Triantafillou, 1998a) se plantea específicamente para los FRP.

$$f_v = f_{v0} + \mu \sigma_0 = 0.66 + 1.36 \sigma_0 \quad (6)$$

$$V_{Rd} = f_{vk} \cdot t \cdot d + 0.9 d \rho_{frp} f_{yk} \cdot t \quad (7)$$

En donde: $f_{vk} = f_{vk0} + \mu \sigma_0 \quad (8)$

$$V_{Rd} = (0.9 \cdot t \cdot l \cdot f_{vk0} / 1.5 + \sqrt{1 + \sigma_0 / f_{vk0}}) + 0.4 \cdot A_r \cdot f_{yk} \quad (9)$$

$$V_{Rd} = f_{vk} \cdot t \cdot d + 0.9 d \cdot \rho_{frp} \cdot E_{frp} \cdot r \cdot \varepsilon_{frp, u} \cdot t \quad (10)$$

$$r \cdot \varepsilon_{frp, u} = \varepsilon_{frp, u} = 0.0119 - 0.0205(\rho_{frp} E_{frp}) + 0.0104(\rho_{frp} E_{frp})^2 \quad (11)$$

En las ecuaciones, V_{Rd} es la resistencia a cortante, f_{vk} las características resistentes de la fábrica, t es el espesor de la pared, d es el 0,8 del largo total del panel, ρ_{frp} la relación entre las secciones del FRP y del panel, f_{yk} La resistencia a tracción característica del FRP, A_r El área de refuerzo, $\varepsilon_{frp, u}$ Es la resistencia última del FRP, l es el largo del muro, σ_0 tensión normal, f_{v0} la tensión cortante cuando el valor de la tensión normal es igual a cero, μ es el coeficiente de fricción y r es la expresión utilizada por Triantafillou (1998a) para elementos de hormigón (factor de eficacia).

La aplicación de refuerzos FRP aporta una mejor distribución de esfuerzos, e incrementa tanto la resistencia última como la tensión permisible, especialmente con la utilización de laminados de mayor extensión.

Se presentan casos en que el incremento de la resistencia a cortante es muy bajo. Esto es atribuible al fenómeno de desprendimiento del refuerzo, localizado en las zonas próximas a la aplicación de la carga de compresión, así como a la resistencia peculiarmente baja de las piezas de fábrica, que ocasiona fallos por deslizamiento. La investigación, independientemente de las fibras y los compuestos a utilizar, apunta a que el incremento resistente y la mejoría en el comportamiento mecánico de la fábrica, depende en gran

medida de la aplicación del refuerzo en ambas caras del muro. Un aspecto crucial es el anclaje de los laminados en los extremos o puntos de concentración de tensiones de los paneles, los cuales requieren de un sistema de adherencia más eficiente.

Comparando los valores teóricos y los resultados experimentales, puede observarse claramente que el modelo propuesto por Tomasevic es muy preciso; y que el modelo de Triantafillou es coherente con el Eurocódigo-6 (1988). Debe remarcarse que el coeficiente de eficacia (r) propuesto por Triantafillou parece ser la dirección correcta para el desarrollo de fórmulas más precisas (figura 2.72).

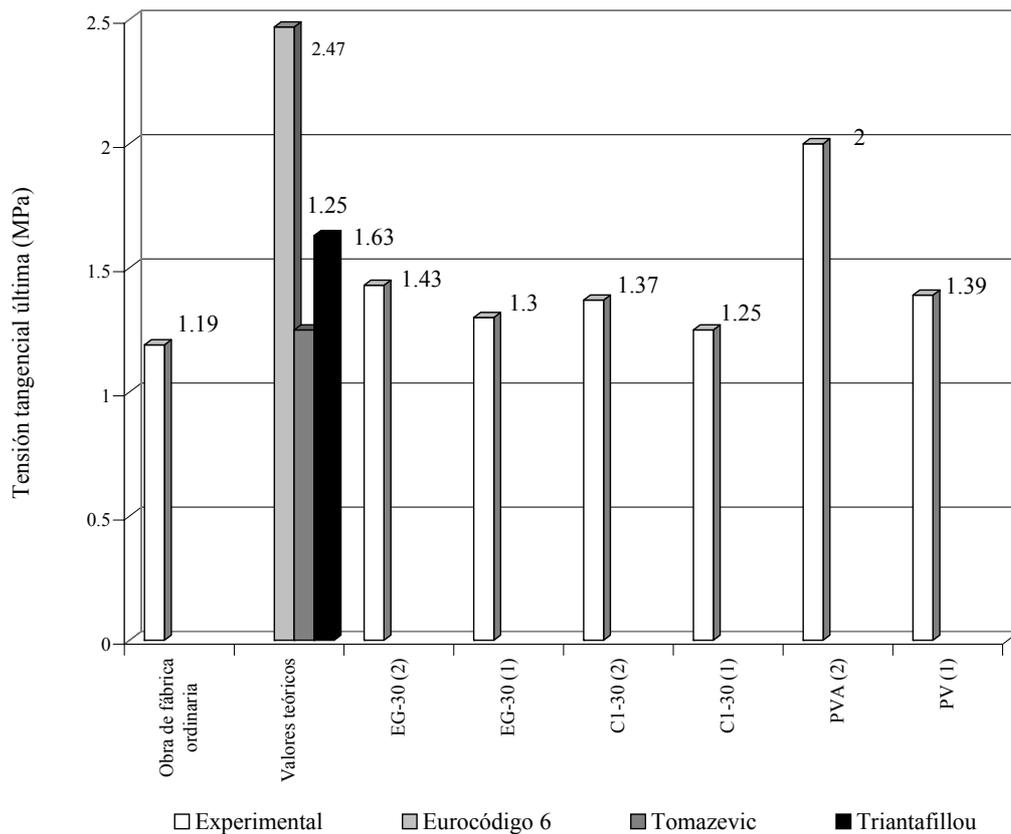


Figura 2.72 — Comparativo entre resistencias estimadas y experimentales (Valluzzi et al., 2000).

Li et al (2001) llevaron a cabo campañas experimentales de refuerzo de cortante, aplicando varillas o tejidos FRP a paneles. El trabajo demuestra que se producen cambios significativos en el modo de fallo y en la rigidez. Específicamente ensayaron tres paneles de piezas de fábrica de hormigón, de dimensiones: 2235 x 1219 x 100 mm. El primer panel se aprovechó para caracterizar el fallo. Los dos paneles restantes se reforzaron con barras FRP interiores, verticales u horizontales.

El panel de control presentó un fallo por deslizamiento en la segunda junta horizontal, así como la rotura por compresión en el vértice inferior opuesto a la aplicación de la carga. El primer panel reforzado presentó deslizamiento vertical en la zona central, rotura por compresión en la base y el desprendimiento de los refuerzos verticales internos en las conexiones a las vigas de distribución (figura 2.73).

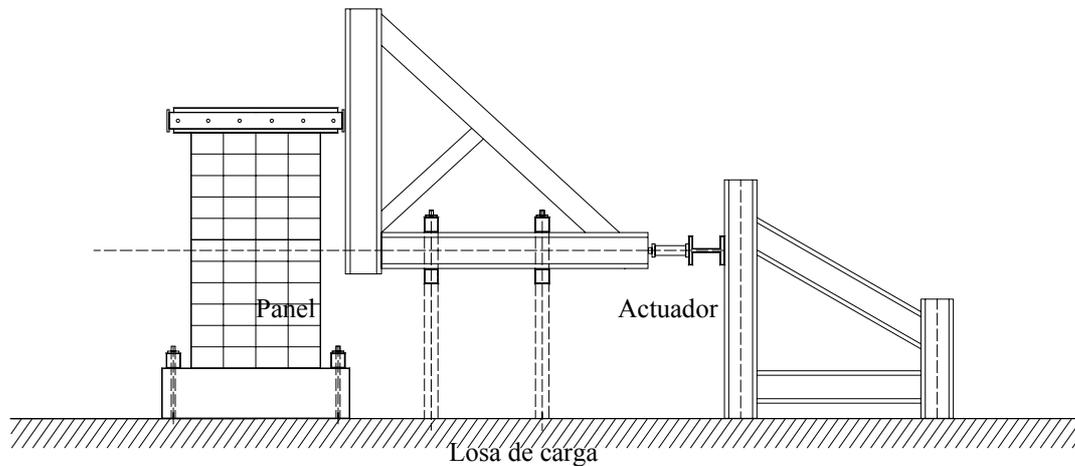


Figura 2. 73 — Configuración mecánica de los ensayo de paneles de fabrica utilizada por Li et al. (2001).

Finalmente, el segundo panel reforzado presentó desprendimiento en las juntas de mortero de las barras de refuerzo horizontales, con una rápida caída de su capacidad resistente. Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron un significativo incremento en la resistencia de la fábrica ante acciones horizontales y en la rigidez. En general, los beneficios se concentran en el incremento resistente y la provisión de ductilidad a la estructura.

También se realizan estudios de la resistencia de los laminados y otros elementos compuestos. Ehsani et al. (1997) consideraron la orientación de la fábrica, la longitud de los anclajes y algunas otras variables para determinar el comportamiento de la fábrica con refuerzos adheridos a la superficie. Las probetas se fabricaron a manera de excluir la resistencia a cortante del mortero, observando dos modos de fallo: por cortante a lo largo de las juntas horizontales y por delaminación en la zona central de la fábrica o en los extremos de las probetas, dependiendo de la resistencia de la fabrica y de la dirección de las fibras (figura 2.74). Los resultados arrojados por lo ensayos podrían ser de gran utilidad para el refuerzo de juntas en la obra de fábrica no reforzada.

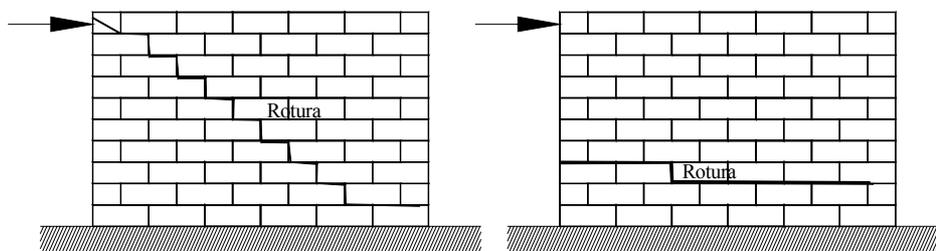


Figura 2. 74 — Modos de fallo en muros de fábrica no reforzada sujetos a carga lateral: (a) Rotura por tensión diagonal; (b) Deslizamiento de junta (Ehsani et al., 1997).

En su experimentación, el equipo de investigación de Ehsani utiliza treinta y siete probetas fabricadas con ladrillos de arcilla (figura 2.75) y las ensaya bajo cargas estáticas.

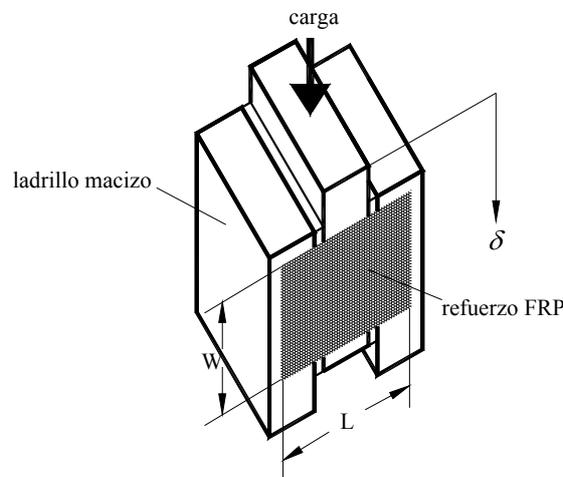


Figura 2. 75 — Probetas para ensayos de cortante (Ehsani et al., 1997).

$\tau_b = v_{b0} + \mu\sigma_y + \tau_{FRP}$, en donde τ_{FRP} = contribución del laminado FRP en la resistencia de cortante. En el estudio de Ehsani et al., la junta horizontal se asume como $v_{b0} = 0$ y la tensión normal se considera igualmente como 0 (σ_y).

Utilizaron tres densidades de FRP y variaron también la orientación del refuerzo aplicado a las probetas, para observar las alteraciones que producen en el desempeño de la fábrica dichos aspectos.

Observaron dos modos de fallo: (1) fallo por cortante a través de las juntas horizontales; y (2) delaminación del refuerzo en la pieza central de la probeta en zonas cercanas a las juntas. El tipo de fallo es influenciado por la resistencia de la fábrica. La resistencia y rigidez de la los especímenes es muy influenciada también por la orientación de las fibras, lo que ocasiona un ligero incremento en la carga última (figura 2.76).

Almusallam et al (2001) investigaron lo referente a la eficacia que tienen los laminados de fibra de vidrio como refuerzo de muros de obra de fábrica armada, sujetos a flexiones excéntricas o concéntricas y cortante.

En general observaron fallos por compresión de la fábrica o por daño en el área de anclaje, especialmente en los especímenes sujetos a carga cortante. Los laminados GFRP² reflejan que proveen a las probetas de un significativo incremento resistente, tanto para cortante como para flexión, así como una alta contribución a la integridad del muro y la disminución del peligro de pérdida de fracciones.

En un estudio más reciente, Hamoush et al (2001) evaluaron la resistencia a cortante de paneles construidos con bloques de hormigón. Con su estudio demostraron una vez más que la adhesión de materiales compuestos en la superficie de la obra de fábrica beneficia el

comportamiento a flexión de los muros (figura 2.76) e indica que con la aplicación de más de una hoja de laminado GFRP se incrementa la integridad estructural del sistema, además de reducir la dispersión de resultados.

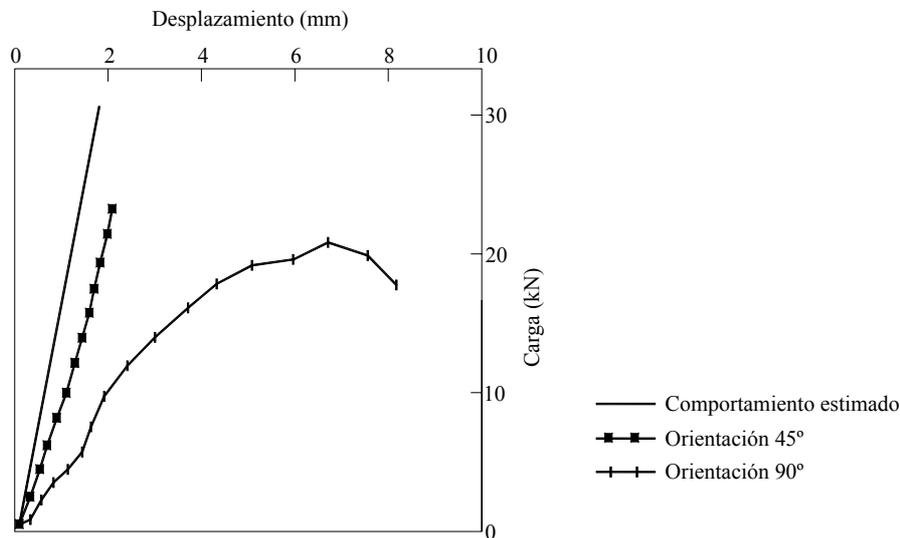


Figura 2. 76 — Comparación de las curvas de comportamiento con diferente orientación y el comportamiento estimado (Ehsani et al., 1997).

En cuanto a la resistencia a cortante, no se han observado efectos significativos en correspondencia con la cantidad de superficie reforzada. Los autores sugieren que para el comportamiento de la fábrica, que normalmente es variable, podría dificultarse la detección de pequeños indicios físicos de alteración.

Mosallam et al. (2003) realizaron un estudio experimental con paneles de obra de fábrica de bloques huecos de hormigón, a escala 1:1, sujetos a una pre-compresión vertical y a cargas laterales en su propio plano (figura 2.78).

Los paneles utilizados tenían una dimensión de 1830 x 1830mm y estaban reforzados con barras metálicas internas, en sentido vertical. Además se aplica una pre-compresión vertical por medio de cuatro barras roscadas exteriores. En los procesos de refuerzo utilizan compuestos de fibra de carbono y de vidrio (2.77).

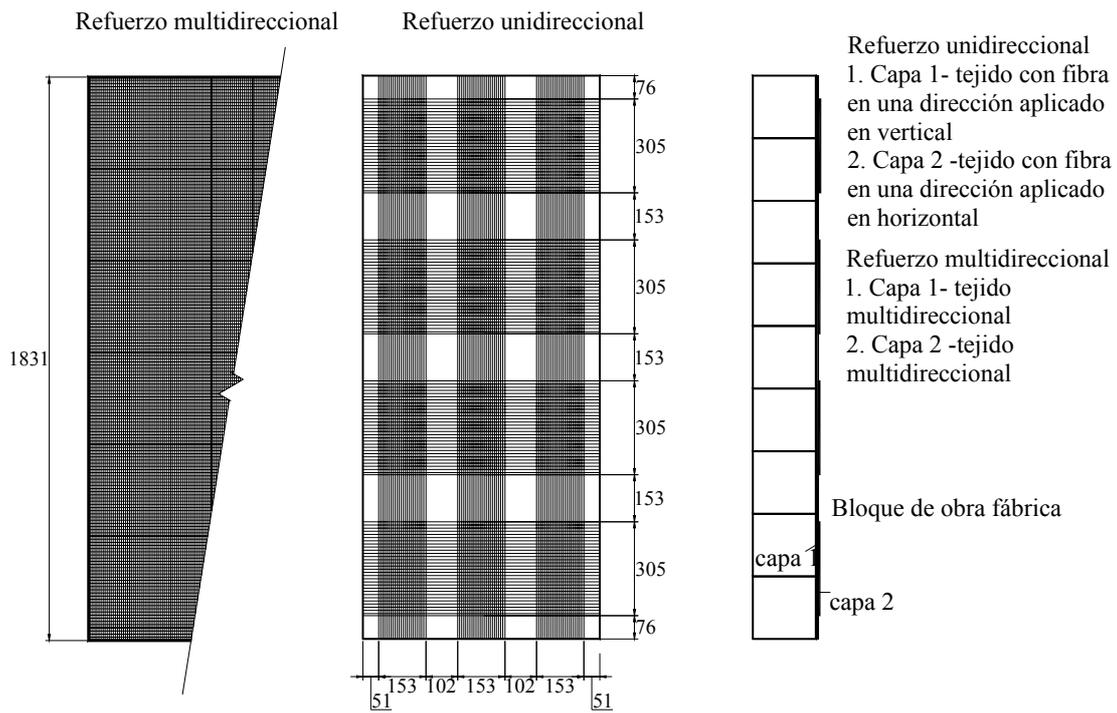


Figura 2. 77 — Configuración geométrica de los patrones de refuerzo estudiados (Hamoush et al., 2001).

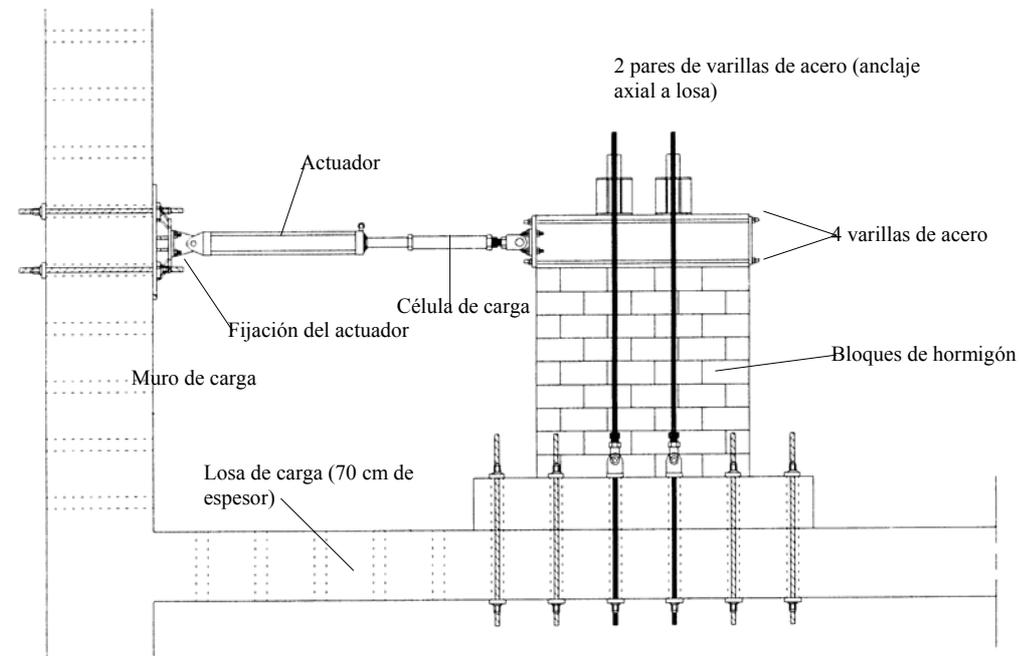


Figura 2. 78 — Configuración mecánica de los ensayos (Mosallam et al., 2003).

En la tabla 2.23 se puede observar una breve descripción y la resistencia última obtenida de los paneles ensayados.

Clave del espécimen	Descripción	Resistencia última (kN)
WU1	Panel de control no reforzado (resistencia última)	369.18
WU2	Panel de control no reforzado (previamente fisurado)	275.78
WU2-C-R	Reparación con fibra de carbono aplicada en las dos caras	444.80
W3-C-RT	Refuerzo con fibra de carbono aplicada en una cara	422.60
W4-C-RT	Refuerzo con fibra de carbono aplicada en dos caras	480.38
W5-E-RT	Refuerzo con fibra de vidrio aplicada en dos caras	471.49
W6-CS-RT	Refuerzo con laminados de fibra de carbono	435.90

Tabla 2.23 – Resistencia última de los especímenes ensayados (Mosallam et al., 2003).

En la tabla 2.19 puede observarse que el espécimen W3-C-RT presenta una resistencia última mayor que el espécimen de control WU1 (aproximadamente 14.4%) y que, en general, todas las aplicaciones de compuestos FRP incrementan la resistencia de los paneles en su propio plano, entre un 14 y un 30%.

CAPÍTULO

3

DISEÑO DE LAS CAMPAÑAS
EXPERIMENTALES

3.1. INTRODUCCIÓN

Las campañas experimentales conforman el ámbito práctico de esta tesis doctoral. A través de ellas se obtienen los datos de las características físicas y mecánicas de los materiales y procesos que fundamentan la investigación.

Estas campañas responden al objetivo general de la tesis y definen sus propiedades en conformidad con los objetivos particulares. Así mismo, el diseño de las campañas se ajusta a las condiciones técnicas de la infraestructura de laboratorio, a un esquema cronológico y a un plan de financiación:

- En su totalidad, los trabajos se han efectuado en el *Laboratorio de Tecnología de Estructuras*, que está integrado a la *Sección de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción*, en la *E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona*, en el Campus Norte de la *Universidad Politécnica de Cataluña*, cuyo equipamiento se describe a través de los apartados de éste capítulo.
- Las campañas experimentales se insertan en el calendario estimado para la realización total de la presente tesis doctoral, que abarca el período comprendido entre enero de 2001 y diciembre de 2004. La cronología se describe en el último subapartado de éste capítulo.
- Los trabajos experimentales se amparan en los recursos financieros aportados por el Ministerio de Educación y Cultura de 2000 a 2002 y, por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de 2003 a 2006, para los proyectos de investigación dirigidos por el Profesor Pere Roca i Fabregat: “*PB98-091 Evaluación resistente y refuerzo de edificios construidos en estructura portante de paredes de obra de fábrica de ladrillo y piedra*” y; “*ARQ2002-04659 Comportamiento resistente y refuerzo de construcciones de obra de fábrica ante acciones dinámicas y cíclicas*”, respectivamente.

El trabajo experimental se estructura en cuatro campañas, a su vez integradas por una serie de ensayos o por varios grupos de ensayos unitarios de probetas o paneles, incluyendo en algunos casos un grupo específico para control o calibración.

Las campañas experimentales responden a un proceso empírico en el que, siguiendo los objetivos globales de la investigación, se aborda inicialmente el ámbito de reparación de la obra de fábrica; y posteriormente se indaga en las aplicaciones de refuerzo, utilizando para ello diferentes materiales y procedimientos.

La eficacia comprobada de las resinas epoxi en las aplicaciones; la viabilidad de uso de las mismas como parte integral de algunos sistemas de refuerzo FRP y, la incipiente información existente en lo referente a las posibles incursiones en el ámbito del refuerzo de

las paredes, y la respuesta mecánica y resistente de las mismas ante incidencias de carga y esfuerzos de corte en su propio plano, definen el contexto general de actuación.

La tabla 3.1 presenta los títulos de las campañas; y señala los apartados del presente capítulo en que se despliega la información correspondiente a cada una.

Campaña experimental	Subapartado
CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO	3.2
CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP	3.3
CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PANELES REFORZADOS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP	3.4
CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS MATERIALES	3.5

Tabla 3.1— Campañas experimentales que conforman la tesis.

A través de la campaña de *rotura de paneles reparados con inyección y restitución de conglomerantes* se estudia el comportamiento resistente de las paredes de obra de fábrica sujetas a una carga normal constante, en combinación con una carga puntual horizontal y paralela al plano, previamente dañadas mecánicamente, intervenidas con varios procesos y materiales de reparación.

El criterio para la elección de los materiales y procesos, así como de los procedimientos de ejecución, se fundamenta en la optimización de los recursos para obtener datos suficientemente informativos. Se utilizan siete paneles de obra de fábrica de ladrillo fabricados a escala real, representativos de paredes convencionales. En el apartado 3.2. se describen íntegramente todos los aspectos involucrados en la campaña.

En la siguiente campaña; referente a *rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP*, se analiza el desempeño de las aplicaciones de tejidos y laminados de fibra de carbono, adheridos a la superficie de elementos de obra de fábrica de ladrillo, como refuerzo orientado hacia el aumento de la capacidad portante.

En dicha campaña se utilizan 40 tripletas de ladrillo sujetas a un proceso de carga cortante uniaxial. El extenso número de ensayos permite definir parámetros indicativos, de la influencia de los procesos de refuerzo en el comportamiento de la fábrica.

Posteriormente, la campaña relativa a *rotura de paneles reforzados con tejidos y laminados CFRP*, aporta mayor información acerca del desempeño mecánico y resistente de los refuerzos (algunas aplicaciones de laminados y tejidos compuestos), sobre la superficie de la obra de fábrica. Arroja los resultados obtenidos tras la realización de seis ensayos de paneles, reforzados y sujetos a carga biaxial.

Por último, la campaña *Rotura de probetas reforzadas con compuestos FRP y otros materiales*, estudia el desempeño de diversos tratamientos y materiales de refuerzo (GFRP, AFRP, madera micro-laminada y baldosas cerámicas) Se estructura en un amplio programa de ensayos, conformado por 15 grupos de probetas que en conjunto suman 170 ensayos unitarios de tripletas de ladrillo sujetas a procesos de carga biaxial.

En los apartados de este capítulo se describen las particularidades de cada campaña; las características de los especímenes, su fabricación y manipulación; los materiales utilizados para los tratamientos y procedimientos de reparación o refuerzo; los equipos utilizados para la ejecución de los ensayos y la instrumentación para la adquisición de datos; y los procedimientos de aplicación de los diversos tratamientos.

Todos los especímenes (paneles y probetas) se fabrican con piezas de ladrillo cerámico macizo de dimensiones $\pm 280 \times \pm 140 \times \pm 50 \text{ mm}$ (figura 3.1.) con una resistencia característica de 25 N/mm^2 . Todos los trabajos se realizan en laboratorio.

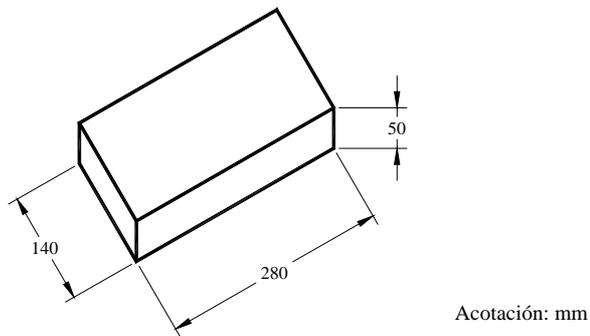


Figura 3.1— Pieza de fábrica de ladrillo macizo utilizada en todas las campañas experimentales.

3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO

3.2.1. Introducción

En este apartado se describe íntegramente la campaña experimental de rotura de paneles reparados con inyección y restitución de conglomerantes.

Primeramente se refieren las características de los paneles, su fabricación y manipulación; la procedencia y estado de deterioro y las directrices de intervención programadas para los mismos. Enseguida se puntualizan las características de los paneles, y a continuación se explica el procedimiento de ensayo al que son sometidos los especímenes reparados, incluyendo los equipos e instrumentación.

La campaña experimental se sitúa en el contexto de intervenciones de reparación de estructuras de obra de fábrica. Para ello se utilizan siete paneles de obra de fábrica de ladrillo dañados previamente, procedentes de la campaña experimental para determinación de la envolvente de rotura biaxial, realizada por Sánchez (2001).

Los paneles son reparados con resina y mortero epoxi o con mortero cementicio; y las intervenciones implican varios niveles de dificultad técnica.

3.2.2. Fabricación y manipulación de los paneles

Los paneles se fabrican a escala 1:1 con dimensiones que permiten su fácil manejo y traslado dentro del área de trabajo (1200 x 1150 x 140 mm).

Los paneles están conformados por la superposición de 16 hiladas de ladrillos macizos, formadas por cuatro piezas. Las juntas horizontales y verticales tienen un espesor aproximado de 10 mm. Están contruidos sobre una base compuesta por un perfil metálico (UPN 160) relleno de hormigón, con una resistencia de 30 N/mm².

La fabricación de todos los especímenes se realiza a la intemperie, durante los meses de febrero y marzo de 2001. Los ensayos se llevan a cabo en fechas posteriores al transcurso de 28 días, asegurando así la consecución de la resistencia óptima. Se utiliza un mortero comercial tipo M-80.

Para efectos de lograr una distribución uniforme de la carga normal, se utiliza una viga de hormigón armado (1240 x 150 x 150 mm), con una resistencia de 30 N/mm² y un refuerzo metálico conformado por 4 redondos de diámetro 8 mm y cercos de 6 cada 20 cm. La viga de hormigón se fija sobre el panel utilizando mortero M-80.

Las figuras 3.2. y 3.3. muestran respectivamente el panel tipo y el bastidor utilizado para su movimiento y traslado.

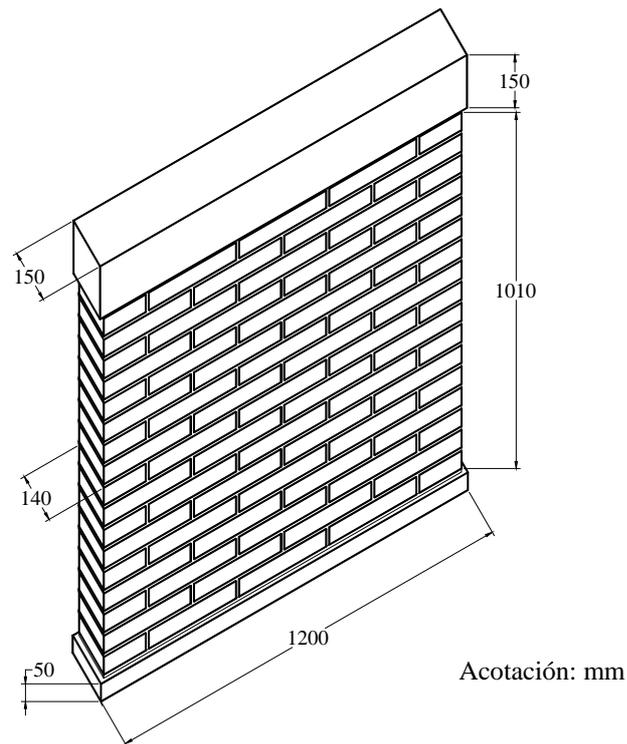


Figura 3.2 — Panel tipo único.

Cada panel tiene un peso aproximado de 400 kg, por lo que, para facilitar su manipulación, se utiliza un bastidor desmontable de acero que envuelve rígidamente al panel (figura 3.3).

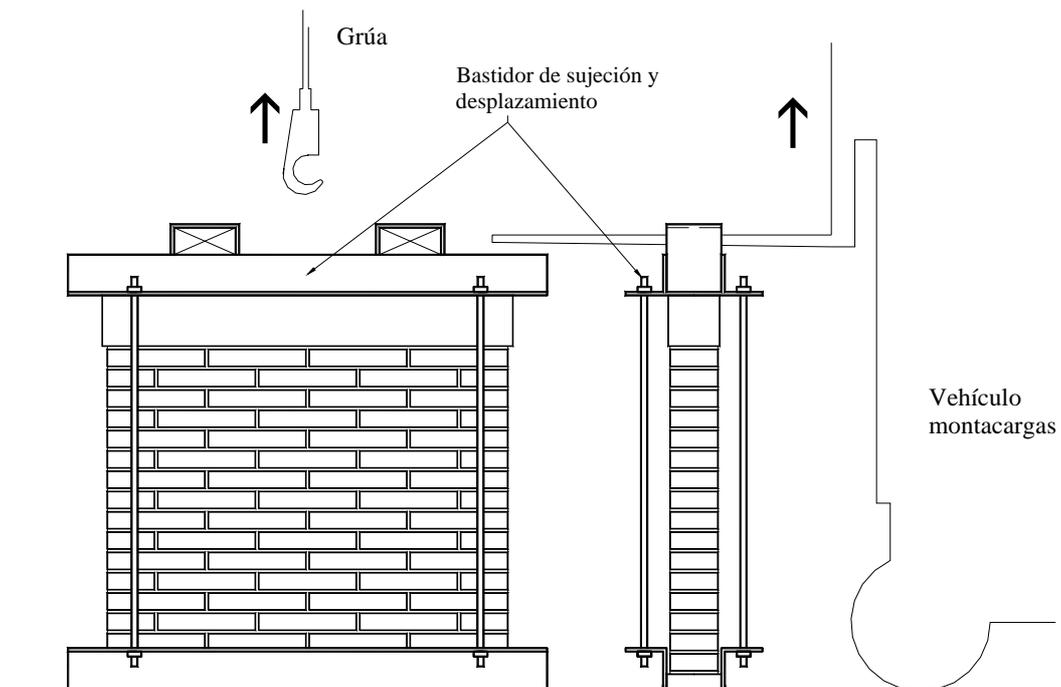


Figura 3.3 — Bastidor para manipulación y montaje de los paneles.

En la presente campaña se utilizan siete paneles previamente dañados, procedentes de la campaña de rotura biaxial realizada por Sánchez (2001). Dichos paneles son sometidos a un procedimiento de ensayo similar al efectuado en la campaña y que se describe a continuación.

3.2.3. Procedimiento de ensayo

El ensayo de los paneles consta de dos fases. Durante la primera fase los paneles son sometidos a una carga normal de compresión, distribuida uniformemente sobre la viga de hormigón, misma que se mantiene constante durante la totalidad del proceso. La fuerza normal se aplica a razón de 1 kN/s, con un incremento constante hasta alcanzar 200 kN; y es invariable en todos los ensayos. Genera en los especímenes una tensión normal de 1.2 N/mm^2 , y se sitúa dentro de un rango de valores convencional en edificios de estructura portante de obra de fábrica (figura 3.4-a).

En la segunda fase del procedimiento se genera sobre los paneles una fuerza tangencial, con incremento constante a razón de 0.205 kN/s hasta ocasionar la rotura. La carga es puntual y se aplica sobre un extremo de la viga de coronación (figura 3.4-b).

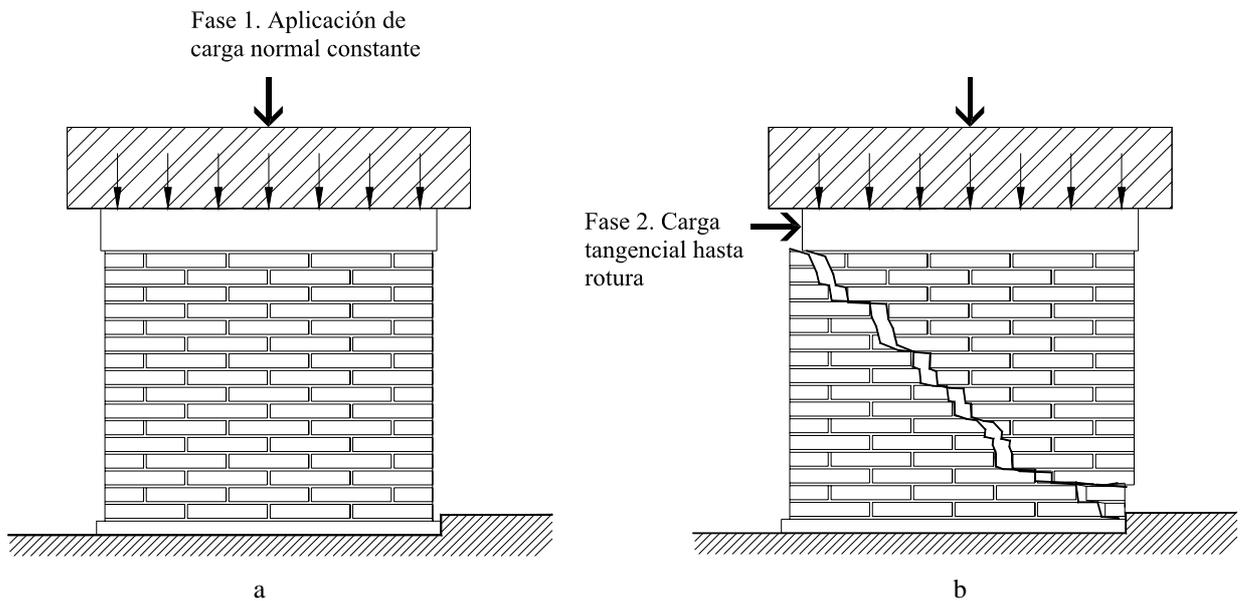


Figura 3.4 — Esquema de las fases del procedimiento de ensayo biaxial de paneles.

En la ejecución de los ensayos están involucrados principalmente los equipos de carga. El procedimiento incluye la utilización de un actuador servo-hidráulico integrado a un pórtico, que genera sobre los paneles la carga normal; y un cilindro hidráulico acoplado a un contrafuerte y a un controlador servo-hidráulico adicional, que genera en los paneles la carga tangencial (figura 3.5).



Figura 3.5 — (a) Pórtico de carga (b) servo-actuador vertical (c) controlador servo-hidráulico (d) cilindro hidráulico actuador horizontal.

Todos los aparatos y conjuntos de ensayo utilizados conforman parte del equipamiento con que cuenta el laboratorio. El pórtico de carga se desplanta en una superficie de 16 m² (figura 3.5-a) El actuador es un servo-actuador MTS biarticulado, con capacidad de carga de 1 MN, que permite un recorrido de ± 250 mm y es gobernado por un controlador digital (figura 3.5-b) El equipo de control servo-hidráulico regula la velocidad y fuerza de carga (figura 3.5-c) El cilindro de carga tiene una capacidad de 232 kN y una carrera máxima de 311 mm, con un área efectiva de contacto de 33.2 cm² (figura 3.5-d).

Se emplean también algunos elementos auxiliares que complementan las operaciones mecánicas de los equipos de carga; y reducen los riesgos de fallo durante la ejecución de los ensayos. Los elementos auxiliares incluyen contrafuertes, para contrarrestar los empujes laterales generados en los paneles como soporte del actuador hidráulico y transmisión de los esfuerzos hacia la losa de carga (figura 3.6 a y b).



Figura 3.6 — (a) contrafuerte base de la carga horizontal (b) bastidores de riostra.

Para trasladar los paneles se utiliza un vehículo montacargas y un puente grúa. El vehículo montacargas permite trasladar los paneles desde el exterior hacia el interior de laboratorio y posicionarlos en el sitio de ensayo. El puente grúa ofrece apoyo a la movilización de los paneles en el interior del laboratorio (figura 3.7 a y b).

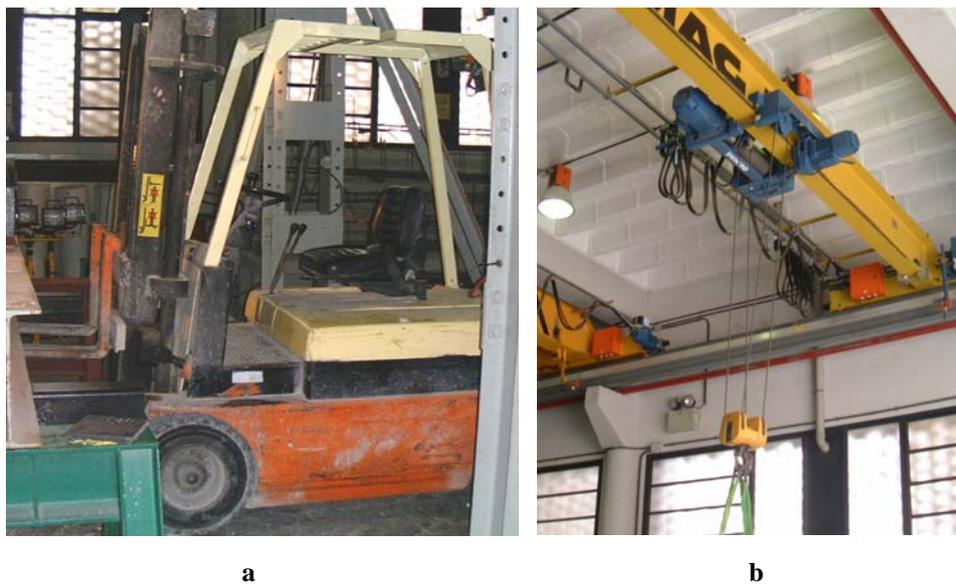


Figura 3.7 — Manipulación de los paneles: (a) Vehículo montacargas (b) Puente grúa.

Para registrar el comportamiento y resistencia de los paneles durante los ensayos, se utilizan aparatos que lectura continua de fuerzas y desplazamientos durante la ejecución, y permiten la creación de ficheros numéricos.

Para ello se utilizan dos células de carga independientes (figuras 3.8 a y b), que registran los esfuerzos de compresión generados sobre el panel por el actuador vertical (carga normal) y el actuador horizontal (carga tangencial) Se adquieren los datos automáticamente a través de los programas de software utilizados para control. La células de carga emiten una señal (voltaje) equivalente a una deformación interna del aparato, que se transforma a una carga determinada; y se realizan lecturas con intervalos de tiempo fijados previamente.

Se utilizan también unidades LVDT, colocadas en algunos puntos del panel para medir las deformaciones propias y el desplazamiento respecto a un punto fijo (Figuras 3.8 c y d) Estos aparatos emiten una señal de voltaje cuya intensidad determina el desplazamiento.

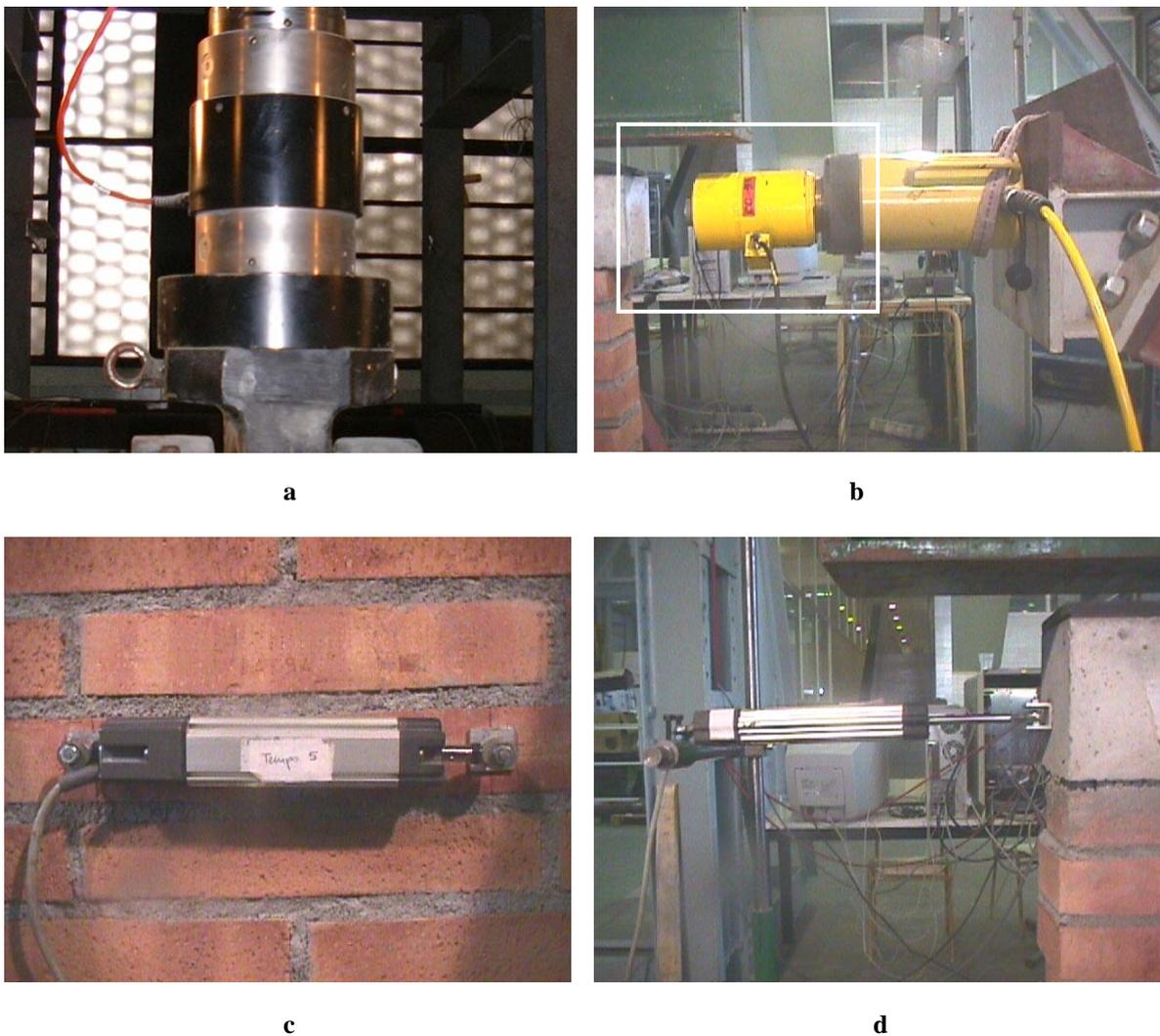


Figura 3.8 — Instrumentación y adquisición de datos: (a) célula de carga del actuador vertical MTS (b) célula de carga acoplada al gato hidráulico (c) unidad LVDT para captar deformación horizontal (d) LVDT medidor de desplazamiento.

Se habilitan ocho canales para la recepción de datos a través de un controlador digital (Figura 3.20) Los canales (a) y (b) reciben señales de las células de carga vertical y horizontal, respectivamente, registrando los valores de tensión en kN (figura 3.9).

El canal (c) mide el desplazamiento de la viga de distribución de carga en el panel, respecto a un punto fijo (LVDT 1); Los canales (d) y (e) registran las deformaciones verticales del panel en sus extremos (LVDT 2 y 3) y los canales (f), (g) y (h) registran las deformaciones horizontales del panel en tres puntos aproximados a la línea probable de rotura diagonal del panel (LVDT 4, 5 y 6).

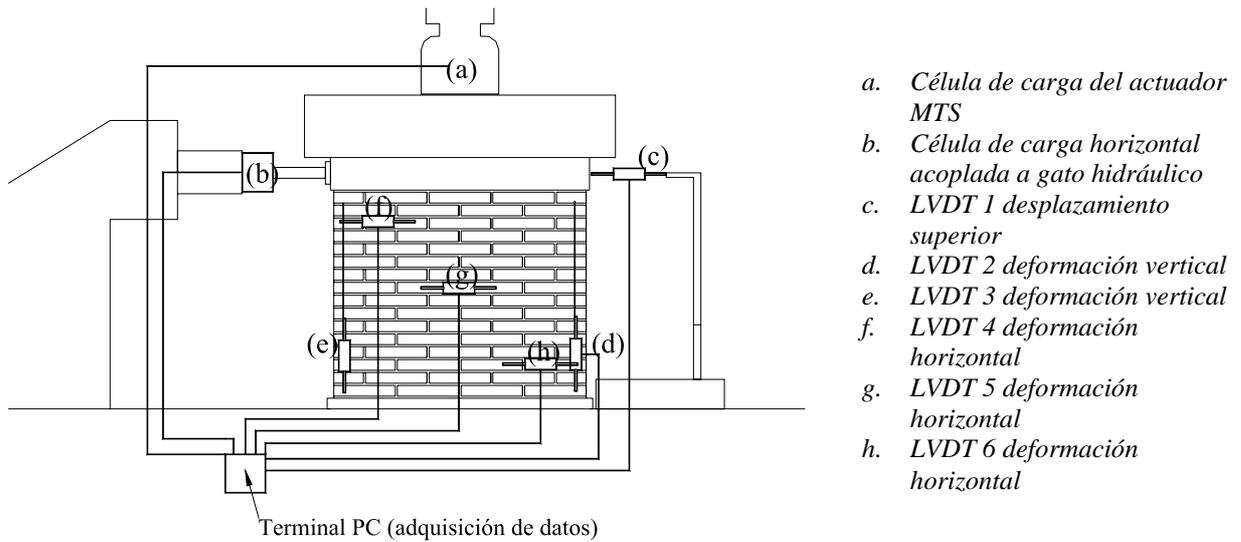


Figura 3.9 — Esquema de instrumentación y adquisición de datos en los paneles ensayados.

3.2.4. Montaje

La ejecución de los ensayos se realiza sobre la losa de carga del laboratorio, que tiene un espesor de 1.20 m; cuenta con 270 puntos de anclaje y una capacidad de carga por punto de 800 kN/m².

El montaje de ensayo está diseñado para producir en los paneles un estado de tensión biaxial, en el que la carga normal es constante y la carga tangencial, concentrada en un extremo de la viga de distribución, se incrementa gradualmente hasta ocasionar el fallo.

En la figura 3.10 (a) es la losa de carga; (b) es el actuador servo-hidráulico; (c) es el actuador horizontal; (d) es el contrafuerte de reacción a la fuerza tangencial; (e) es la viga de hormigón armado que distribuye la carga sobre el panel; (f) es el bastidor o anclaje de soporte para el actuador horizontal.

Los paneles se colocan directamente sobre la losa de carga, en el eje correspondiente a los actuadores vertical (MTS) y horizontal (gato hidráulico). Los elementos auxiliares como los contrafuertes, reaccionan ante las fuerzas transmitidas y distribuyen esfuerzos en torno al panel y debajo del pórtico de carga (figura 3.11).

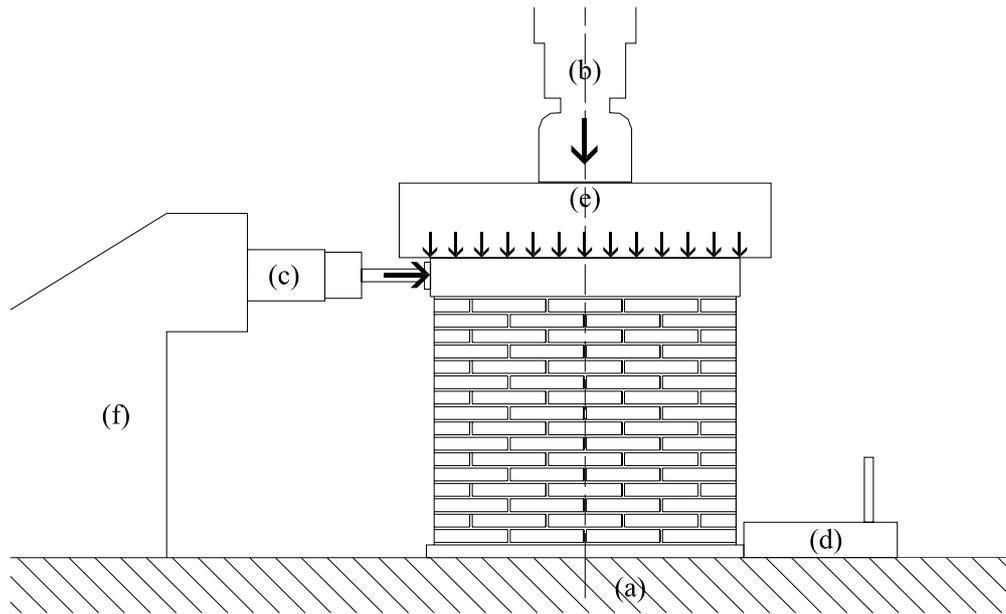


Figura 3.10 — Esquema del montaje de los ensayos.

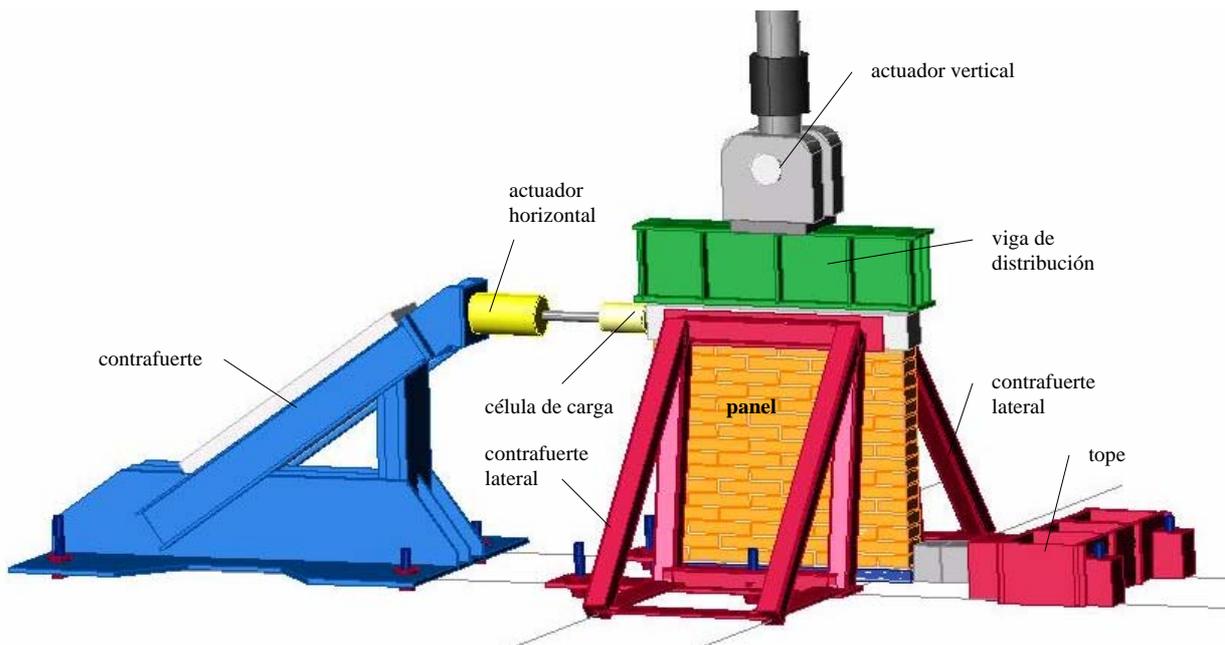


Figura 3.11 — Vista general en perspectiva del montaje de los ensayos biaxiales.

La ubicación de cada elemento responde a una o varias funciones durante los ensayos. El esquema de montaje (figura 3.12 a y b) muestra la disposición de los elementos y el texto que lo precede describe la función de los mismos.

En la planta, el panel es situado en el eje del actuador vertical. Una viga de acero transmite y distribuye uniformemente la fuerza vertical y los bastidores de riostra son anclados a la losa de carga para evitar que el panel gire sobre su base. En el alzado, el eje longitudinal

del panel coincide con el actuador horizontal (actuador hidráulico) y con el anclaje de reacción. El anclaje del soporte del gato hidráulico es paralelo al eje longitudinal del panel. Los bastidores de riostra permiten el desplazamiento del panel paralelo a la carga horizontal (figura 3.12).

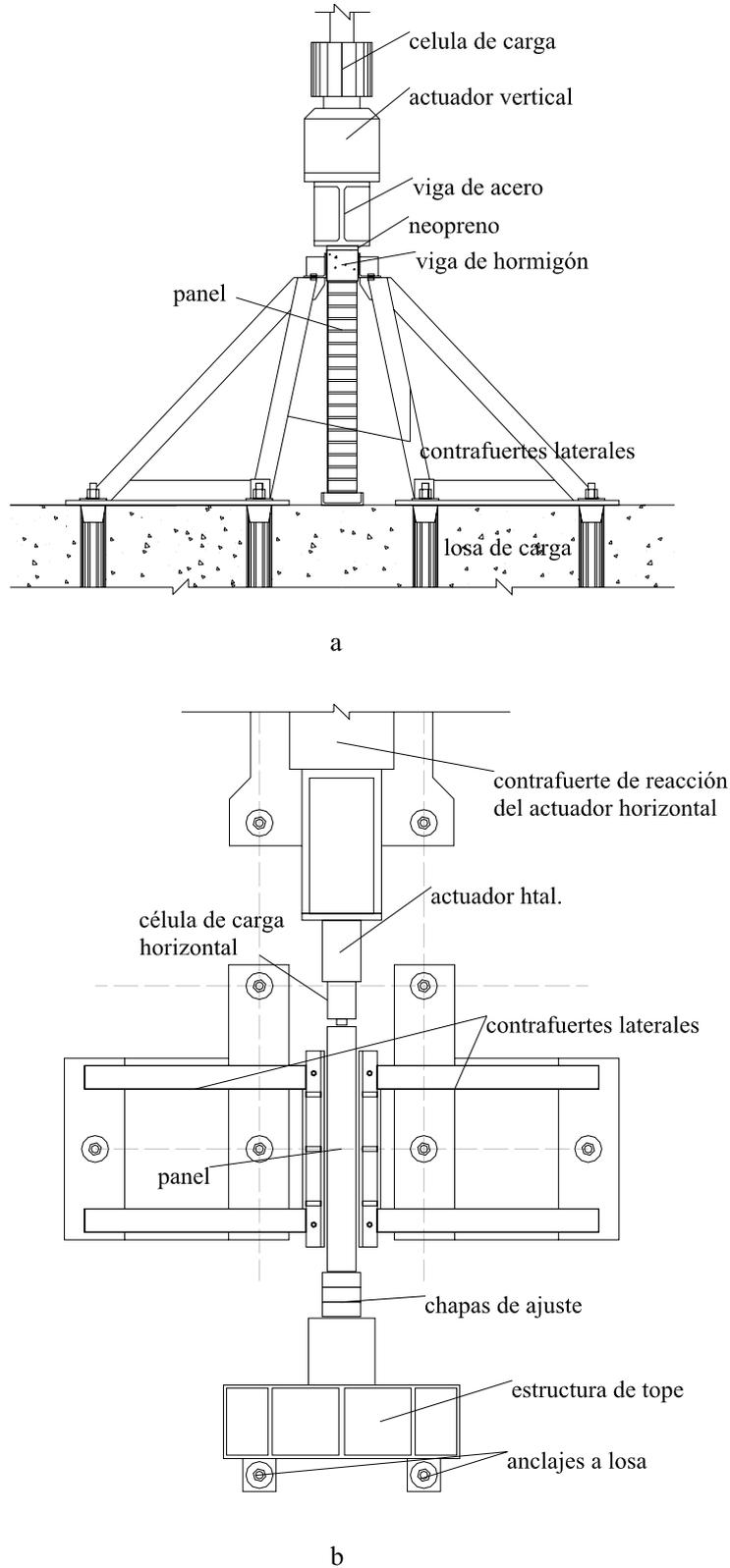


Figura 3.12 — Esquema general de montaje de los ensayos biaxiales: (a) planta (b) alzado.

3.2.5. Estado de deterioro de los paneles antes de la reparación

La tendencia de rotura que muestran los paneles, sometidos a tensión biaxial en su propio plano, sigue una trayectoria diagonal. La zona de fisura nace en el vértice superior próximo a la aplicación de la carga horizontal y baja hacia el vértice inferior opuesto. Los siete paneles presentan deslizamiento y rotura de piezas y juntas.

En los ensayos realizados a los paneles intactos se aplican diferentes niveles de carga normal, por lo que las características de daño se manifiestan de forma particular en cada espécimen; en los paneles que son sometidos a mayores intensidades de compresión, en la fase de carga normal, la línea principal de rotura tiende hacia la verticalidad. Sin embargo, la zona de mayor vulnerabilidad a la rotura se determina como una línea diagonal, que va del vértice cercano a la aplicación de la carga tangencial hacia el vértice inferior opuesto (figura 3.13).

El vértice opuesto al punto de presión de la carga horizontal es la zona de mayor concentración de tensiones, por lo que muestra un mayor nivel de daño.

Se distinguen claramente tres tipos de fisuras: fisuras mayores (con una amplitud superior a 4 mm); fisuras medias (con una amplitud entre 1 y 4 mm); y fisuras finas (con una amplitud menor a 1 mm) La figura 3.4 muestra el esquema de ensayo empleado para ocasionar daño a los paneles (mismo utilizado para el ensayo de los especímenes reparados).

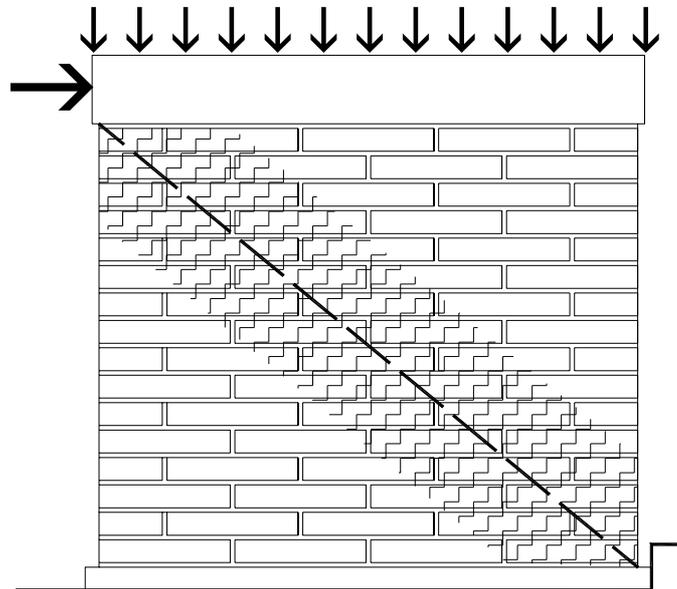


Fig. 3.13 — Esquema de ensayo y zona de mayor vulnerabilidad a la rotura.

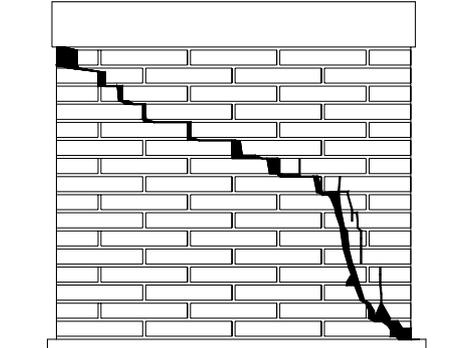
En la figura 3.14 puede verse un detalle de la rotura de uno de los paneles intactos, del ángulo opuesto a la aplicación de la carga horizontal.



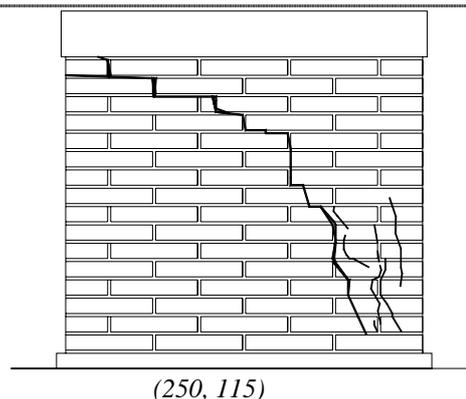
Fig. 3.14 — Detalle de fisura en uno de los paneles intactos (Sánchez, 2001).

Se eligen 7 paneles entre el total de especímenes ensayados hasta rotura por Sánchez (2001) Los paneles elegidos presentan estados medios de deterioro, lo que hace posible efectuar las reparaciones con diversos tratamientos.

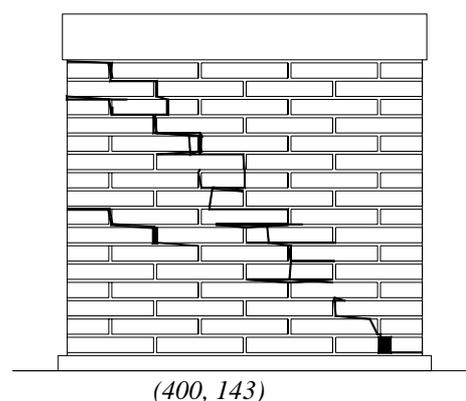
En la tabla 3.2. se refiere la denominación asignada a los ensayos de la actual campaña, y la clave de los paneles intactos correspondientes; se describe el estado deterioro y se presentan los registros gráficos de las líneas de fisura de cada espécimen.

Clave	Descripción del estado de deterioro	Esquema de fisuras
Panel 1 (M25V11H)	Presenta una línea diagonal de agrietamiento ligeramente curvada desde el vértice de aplicación de carga lateral hasta el vértice opuesto. Muestra claramente desplazamiento de la fracción superior del panel, con amplia separación de las piezas en las juntas verticales (de 18 a 30 mm) La línea de rotura sigue en varias ocasiones la dirección de las juntas horizontales, por lo que en estos puntos no hay espacio entre las piezas y la rotura es imperceptible. En la parte media del panel y sobre la línea de fractura algunas piezas muestran fragmentación. En el ángulo de aplicación de la carga horizontal, el panel presenta la pérdida de una importante fracción en una pieza.	Tensión normal aplicada, carga tangencial de rotura (kN)
Panel 2 (M25V12H)	El espécimen presenta un estado similar al del panel 1, sin embargo, la dirección general de rotura se manifiesta con mayor verticalidad a partir de la cuarta hilada. La fisura principal	 <p data-bbox="1134 1742 1251 1771">(250, 110)</p>

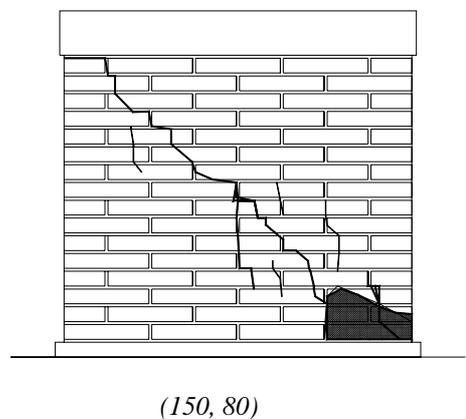
tiene un espesor mayor a 4 mm. En la zona próxima al vértice opuesto a la aplicación de la carga horizontal presenta múltiples grietas de menor espesor que la principal. La línea de fisura atraviesa indistintamente juntas y piezas.



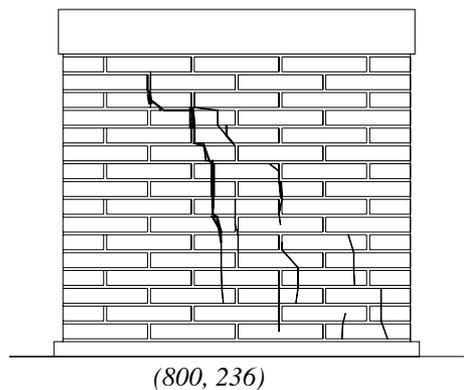
Panel 3 (M40V14H) La fractura de este panel se adecua más a la distribución de las juntas tanto verticales como horizontales, marcando una línea discontinua pero con una clara dirección diagonal. La amplitud de las fisuras verticales es igual o mayor a 4 mm, y la mayor parte de las fisuras horizontales solo se detecta por la abertura de las juntas verticales y por el desplazamiento del cuerpo superior del panel.



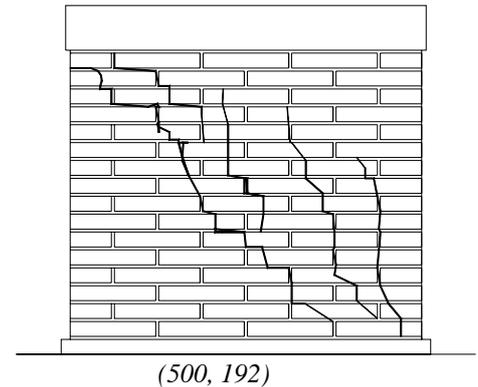
Panel 4 (M15V8H) El panel presenta una línea principal de rotura diagonal y quebrada, con un espesor de agrietamiento variable entre 1 y 4 mm. Muestra también algunas líneas secundarias con tendencia vertical, y en la zona de mayor concentración de tensiones sufre marcado fallo local, con fragmentación de las piezas y pérdida de un alto porcentaje de la sección útil.



Panel 5 (M80V23H) Este espécimen presenta mayor verticalidad en el agrietamiento, con un espesor de fisuras incluso mayor a 4 mm que atraviesa igualmente piezas y juntas de mortero. En la zona de mayor tensión muestra varias líneas de agrietamiento de menor espesor (de 1 a 4 mm)



Panel 6 (M50V19H) El panel 6 muestra varias líneas de rotura con mayor verticalidad. Los espesores de fisura máximos superan los 4 mm, pero predominan las fisuras con un espesor entre 1 y 4 mm. Presenta varias piezas fracturadas a lo largo de las líneas de rotura.



Panel 7 (M65V21H) Presenta desprendimiento total y desplazamiento de la viga de distribución, debido a ello el ensayo ha sido detenido prematuramente. Solamente muestra algunas líneas de fisura perceptibles y varias fracturas de reducido espesor (menor que 1mm)

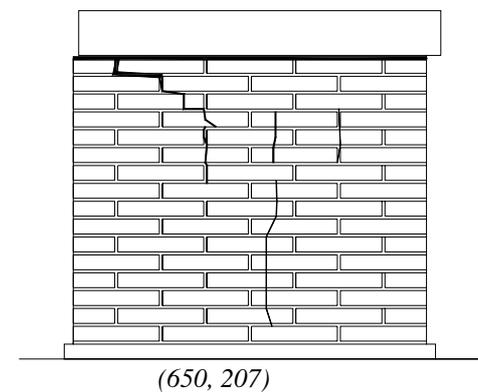


Tabla 3.2— Estado previo de deterioro en los paneles.

3.2.6. Programa de ensayos

El programa experimental contempla la ejecución de un ensayo específico por cada panel y tratamiento. Todos los ensayos siguen el mismo procedimiento y secuencia. En la tabla 3.3 se sintetizan las características de reparación y las condiciones de ensayo.

<i>Código de referencia del ensayo</i>	<i>Reparación</i>
<i>Panel 1</i>	<i>Restitución de fragmentos y relleno de juntas verticales con mortero tixotrópico base cemento</i>
<i>Panel 2</i>	<i>Restitución de fragmentos y relleno de juntas verticales con mortero tixotrópico base epoxi</i>
<i>Panel 3</i>	<i>Estrías con disco radial, relleno de juntas verticales y horizontales con mortero tixotrópico base epoxi</i>
<i>Panel 4</i>	<i>Estrías con disco radial, relleno de juntas verticales y horizontales con mortero tixotrópico base cemento</i>

<i>Código de referencia del ensayo</i>	<i>Reparación</i>
<i>Panel 5</i>	<i>Restitución de sustrato superficial de mortero en fisuras verticales y horizontales. Mortero tixotrópico base epoxi</i>
<i>Panel 6</i>	<i>Reparación similar a la de PB5 más sellado superficial con el mortero base epoxi e inyección de resina epoxi</i>
<i>Panel 7</i>	<i>Solo sellado superficial con mortero epoxi e inyección de resina mortero epoxi</i>

Tabla 3.3 — Tipo de reparación y condiciones de ensayo.

3.2.7. Materiales utilizados para reparación de los paneles

A efectos de reparación, en los procesos de inyección y adición de conglomerantes se utilizan tres productos. Los morteros y resinas empleados son productos manufacturados y comercializados, disponibles actualmente en el mercado.

La preparación y aplicación de los materiales se llevan a cabo siguiendo las guías técnicas, demostraciones y recomendaciones de los proveedores. Los procesos se realizan en laboratorio siguiendo un estricto control de calidad.

3.2.7.1. Mortero tixotrópico base cemento

El mortero tixotrópico cementicio es un producto de dos componentes a base de cemento, mejorado con resinas sintéticas, humo de sílice y fibras de poliamida¹, con alta resistencia mecánica (compresión: 50-60 N/mm², flexotracción: 9-12 N/mm², módulo de elasticidad aprox.: 18000 N/mm²)².

El producto se utiliza para restituir las fracciones de piezas y mortero en los paneles; y para rellenar fisuras. Conforme a la descripción del fabricante, el producto viene pre-dosificado y listo para aplicarse, cuenta con muy buena adherencia sobre la fábrica. Es impermeable al agua y permeable al vapor de agua. Está reforzado con fibra de poliamida; tiene buena resistencia a los ciclos hielo-deshielo y a las sales de deshielo, así como buena resistencia a la abrasión y no es corrosivo.

3.2.7.2. Adhesivo tixotrópico rígido epoxi

El adhesivo tixotrópico rígido es un producto de dos componentes a base de resinas epoxi que presenta una consistencia pastosa. Sus resistencias mecánicas son las siguientes: compresión: 600-700 kg/cm²; flexotracción: 300-400 kg/cm²; tracción: 150-200 kg/cm² y módulo de elasticidad: 43000 kg/cm².

¹ Polímero caracterizado por la presencia de múltiples grupos amida, como el nailon.

² Resistencias mecánicas según proveedor y normativa UNE (80.101-88)

Este adhesivo se emplea en los paneles como relleno de fisuras y oquedades reducidas. Su aplicación es fácil; tiene buena adherencia a la superficie de la fábrica.

Conforme a la prescripción del fabricante, es impermeable al agua y al vapor de agua, por lo que para su aplicación debe contemplarse éste aspecto. Presenta muy buena resistencia ante ataques químicos, y a temperatura ambiente de ácidos diluidos, bases, sales y salmueras, aguas muy puras, aguas residuales, aceites y carburantes.

3.2.7.3. Resina epoxi líquida para inyección

La resina epoxi líquida para inyección es un producto de gran fluidez de dos componentes, hecho a base de resinas epoxi de alta resistencia. Una vez endurecido adquiere una consistencia rígida con altas prestaciones. Su resistencia mecánica a compresión es de 700 a 900 kg/cm² y su módulo de elasticidad a flexión es de 2365 kg/cm² conforme al proveedor y según norma UNE 53.022-76.

Presenta la ventaja (conforme a prescripción del fabricante) de ser un líquido sumamente penetrante y adhesivo, con las siguientes propiedades: no contiene disolventes, tiene muy buena adherencia y poder de humectación (que le permite penetrar hasta los intersticios más finos) tiene alta resistencia mecánica, se puede utilizar para el relleno de fisuras secas o ligeramente húmedas, puede emplearse a bajas temperaturas, no es corrosivo y no es quebradizo ni frágil, teniendo al mismo tiempo una considerable dureza. Debe señalarse que la resina es impermeable al agua y al vapor de agua.

3.2.8. Procesos de reparación

Todos los paneles se someten a un proceso de limpieza, que consiste en la extracción de los fragmentos de piezas o mortero sueltas y de un barrido con aire comprimido para eliminar todas las partículas de polvo.

En los procesos de reparación se emplea uno de los materiales antes descritos, o bien la combinación de dos o tres de los mismos, siguiendo un criterio de máximo aprovechamiento de los paneles. A continuación se describen los tratamientos de reparación de cada espécimen.

Panel 1

En la intervención del panel 1 se utiliza únicamente el mortero tixotrópico base cemento (sub-aparado 3.2.8.1.) para restituir los fragmentos de mortero perdidos en las juntas verticales y rellenar las oquedades. Con el material se restablece la continuidad mecánica de las juntas verticales en el panel (figura 3.15) Las fisuras que el panel presenta en las juntas horizontales no son intervenidas.

El trabajo se hace de forma manual, con ayuda de una pistola de macillas y una espátula (figura 3.16) Previo a la aplicación del mortero, el panel es humedecido.

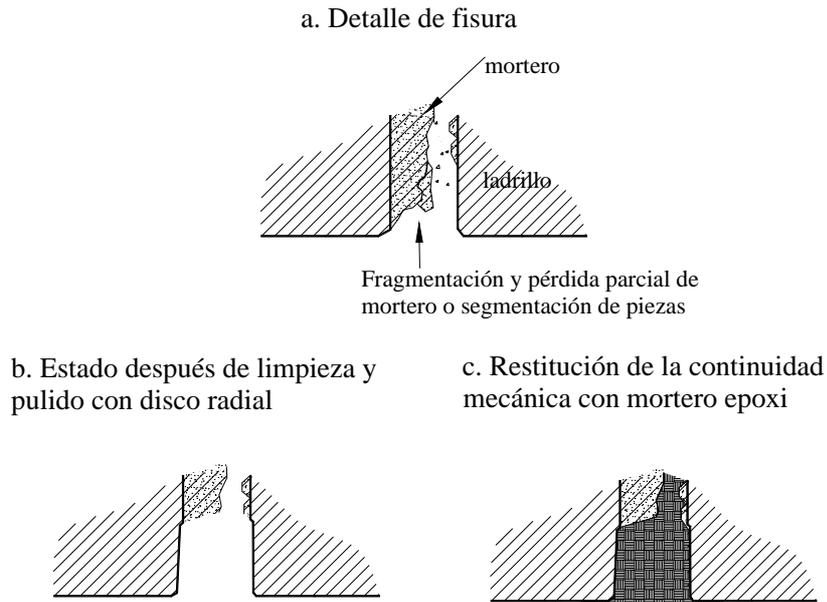


Figura 3.15 — Proceso de aplicación del mortero tixotrópico base cemento en las juntas verticales.



Figura 3.16 — Aplicación del mortero tixotrópico base cemento en las juntas verticales.

El ensayo de los paneles reparados con mortero base cemento se realiza cuando ha transcurrido un mínimo de 28 días de curado desde su aplicación.

Panel 2

En la reparación del panel 2 se utiliza el adhesivo tixotrópico epoxi (subapartado 3.2.8.2.) para rellenar todas las quedades que presenta, principalmente en las juntas verticales.

Su consistencia pastosa permite una fácil aplicación de forma manual, con una pistola de macillas y con la ayuda de una espátula. De esta manera se restablece la continuidad

mecánica de las juntas verticales del panel (Figura 3.17).

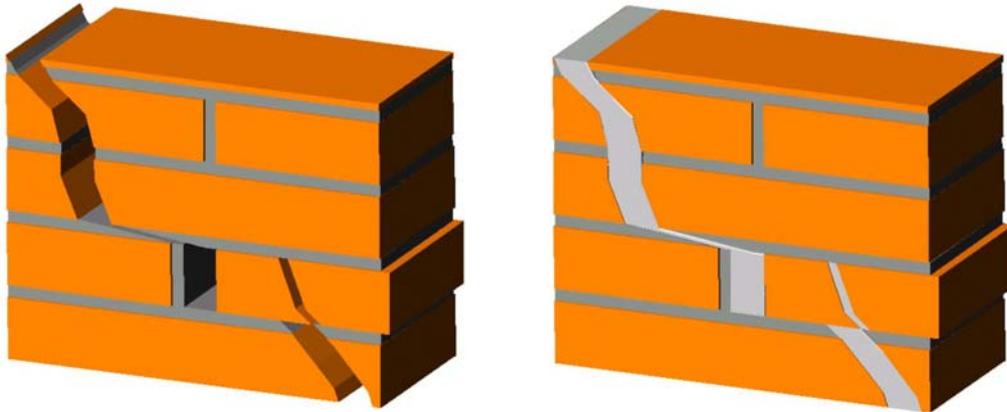


Figura 3.17 — Ilustración descriptiva de la rotura del panel antes y después del proceso de relleno.

Panel 3

Se utiliza el adhesivo tixotrópico rígido (subapartado 3.2.8.2.) para rellenar las oquedades. Previamente se desbasta la capa superficial de las juntas horizontales y de las piezas fracturadas del panel por medio de un disco radial (figura 3.18) hasta una profundidad aproximada de 15 mm. Entonces las oquedades se rellenan con el adhesivo, para recuperar parcialmente la continuidad mecánica de las juntas horizontales, siguiendo un proceso similar al antes descrito en el proceso de reparación del panel 2.

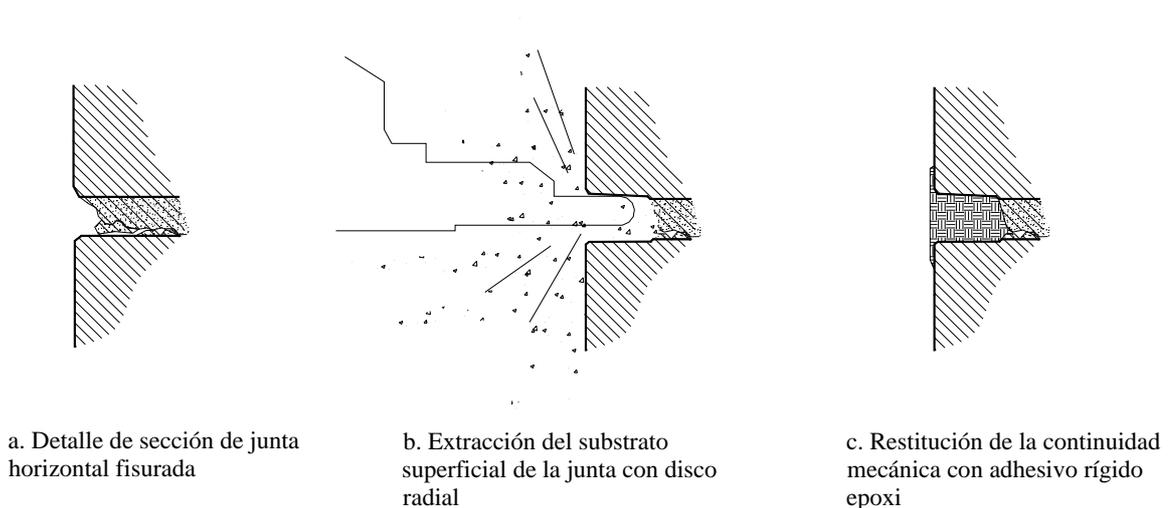


Figura 3.18 — Ilustración descriptiva del proceso de relleno de fisuras.

Panel 4

En el panel 4 se reproduce el tratamiento mecánico realizado al panel 3 y se utiliza el

mortero tixotrópico de reparación (3.2.8.1.).

Para restituir la pérdida de sección local se emplean algunas fracciones de piezas de fábrica y el mismo mortero a manera de conglomerante (figura 3.19 a y b).



a



b

Figura 3.19 — (a) Pérdida de sección en el vértice inferior opuesto a la aplicación de la carga horizontal (b) El panel 4 reparado.

Panel 5

El proceso de reparación del panel 5 consiste en extraer el substrato superficial de mortero en todas las fisuras verticales y horizontales mayores a 1mm. Posteriormente se aplica el adhesivo tixotrópico (3.2.8.2.) para restablecer la continuidad mecánica (Figura 3.20 a y b).



Figura 3.20 — (a) Substrato superficial de mortero extraído (b Aplicación del adhesivo tixotrópico.

Panel 6

La reparación del panel 6 se lleva a cabo en dos fases: inicialmente se rellenan las fisuras y oquedades con espesor mayor a 4mm con el mortero tixotrópico epoxi (3.2.8.2.) y con el mismo material se aplica una capa selladora en las zonas de agrietamiento de las dos caras del panel, con el fin de evitar derrames. Entonces se inyecta resina epoxi líquida (3.2.8.3.) (Figuras 3.21 y 3.22).

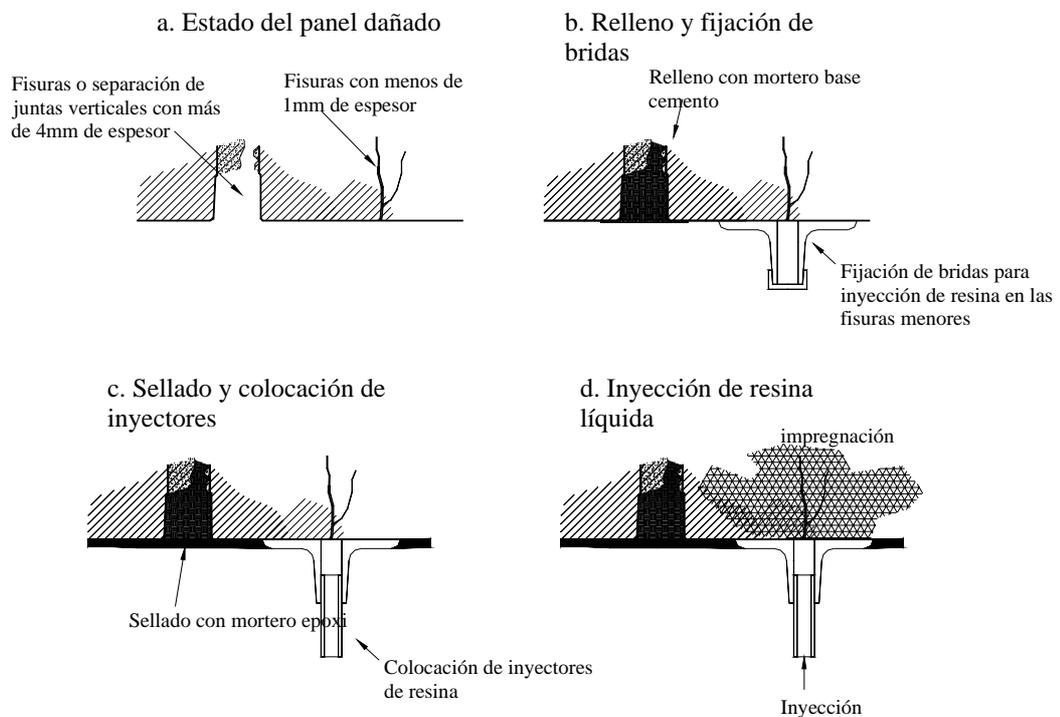


Figura 3.21 — Proceso de reparación del panel 6: (a) Estado después de la limpieza del panel dañado; (b) Relleno de fisuras mayores con mortero cementicio; (c) Sellado externo con mortero epoxi; (d)

Inyección de resina epoxi.

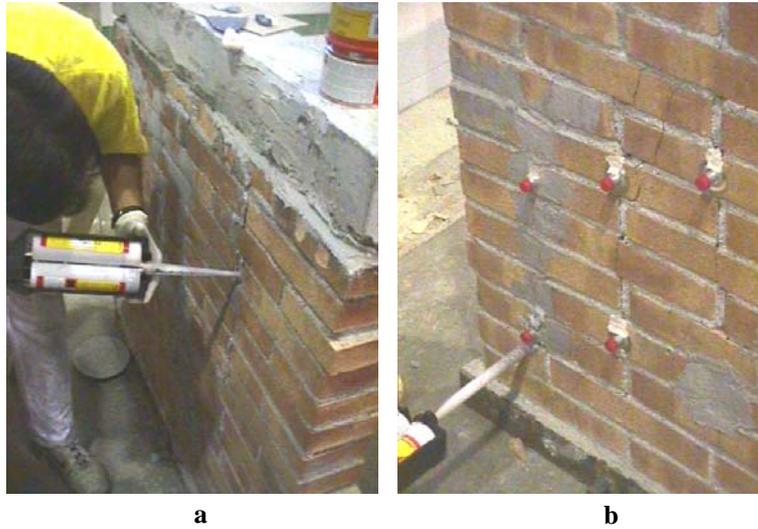


Figura 3.22 — Reparación del panel 6: (a) Proceso de sellado de juntas con mortero epoxi, utilizando un aplicador de auto-mezclado; (b) fijación de bridas.

Panel 7

El proceso de reparación de panel 7 es similar al efectuado en el panel 6, sin embargo, el nivel de daño de este es menor, por lo que solo se realiza el sellado superficial en las dos caras del panel y la inyección de resina epoxi (figura 3.23)



Figura 3.23 — El panel 7 durante la preparación para inyección de resina epoxi.

El proceso de inyección, siguiendo las recomendaciones del proveedor, consiste en distribuir y fijar bridas en una de las caras del panel, que permitirán la impregnación al inyectar la resina líquida. El procedimiento se describe en la figura 3.24.

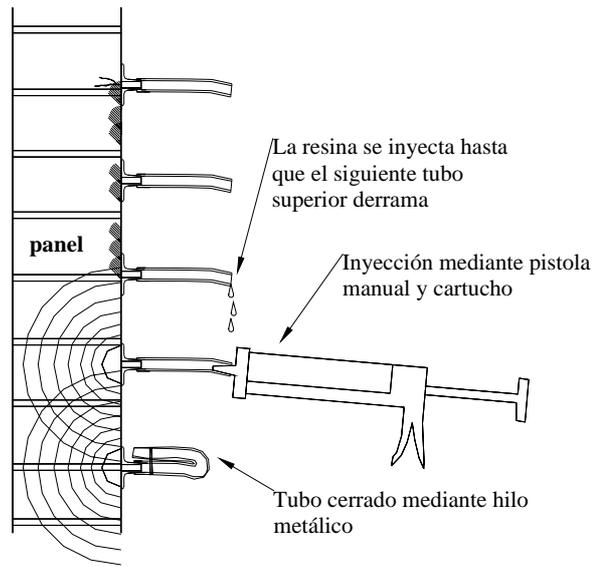


Figura 3.24 — Proceso de inyección de resina epoxi.

3.3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP

3.3.1. Introducción

En esta campaña se caracteriza el comportamiento mecánico y resistente de la obra de fábrica sujeta a estados de tensión cortante, utilizando para ello varios grupos de probetas sujetas a procesos de carga uniaxial. Las probetas son reforzadas bajo diferentes patrones geométricos y variantes cuantitativas de dos sistemas de refuerzo compuestos de fibra de carbono.

Los sistemas de refuerzo utilizados son: laminados y tejidos de fibra de carbono, que se adhieren a la superficie de la fábrica por medio de resina epoxi. Además de los materiales se consideran tres variables más en la aplicación: el patrón geométrico, la relación de superficie reforzada y la aplicación en una o dos caras; o envolviendo completamente la probeta, a manera de zuncho.

3.3.2. Fabricación de las probetas

Las probetas son confeccionadas con tres piezas de ladrillo macizo, unidas entre sí por la mitad su tabla por medio de una capa de mortero M-80 con un espesor aproximado de 10 mm (figura 3.25).

La fabricación de las probetas se realiza en laboratorio, empleando ladrillos y mortero similares a los descritos en el apartado 3.1, al inicio de este capítulo.

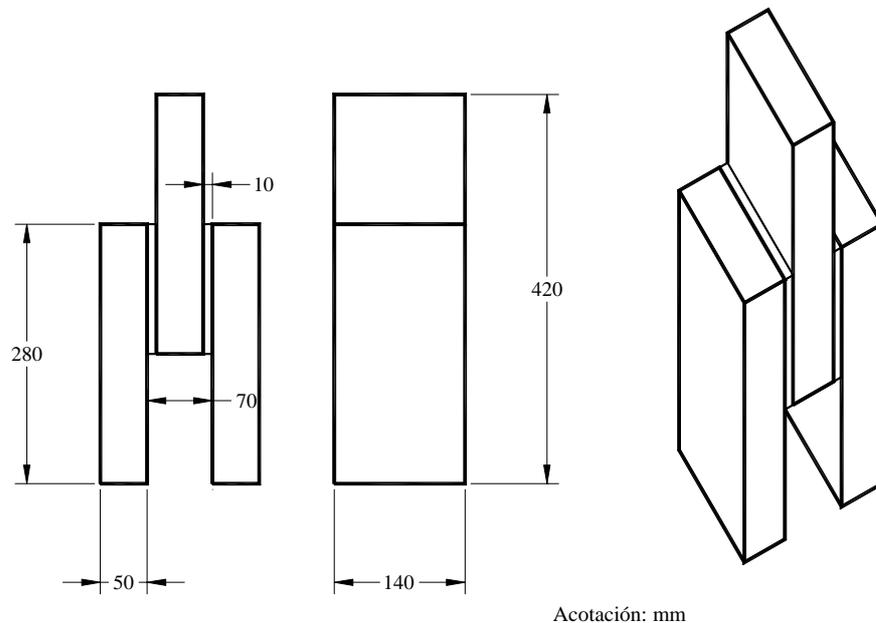


Figura 3.25 — Probeta tipo 1, empleada para los ensayos de cortante de la campaña 3.3.

3.3.3. Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo consiste en la aplicación de fuerza uniaxial en una rampa de carga, a una velocidad constante de 0.05 kN/s hasta fallo. El proceso de carga se programa a través de un controlador digital; y la duración media del procedimiento es de aproximadamente 600 s (figura 3.26).

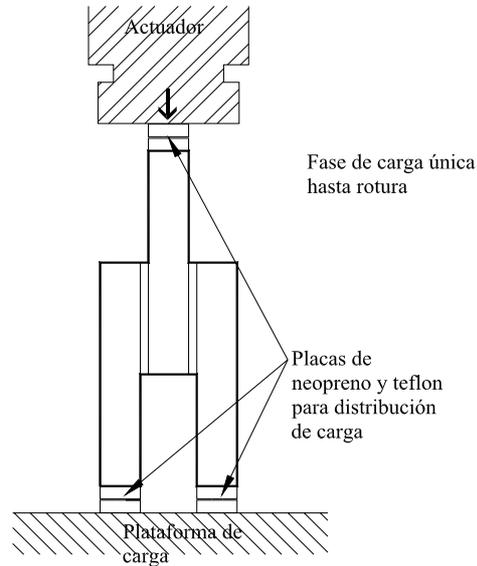


Figura 3.26 — Esquema de los ensayos de cortante bajo tensión uniaxial.

3.3.4. Montaje

El montaje de los ensayos consiste en colocar las dos piezas paralelas de ladrillo sobre la plataforma de carga, de forma que las juntas de mortero sean paralelas a la carga uniaxial y perpendiculares a la base (figura 3.27 a y b).

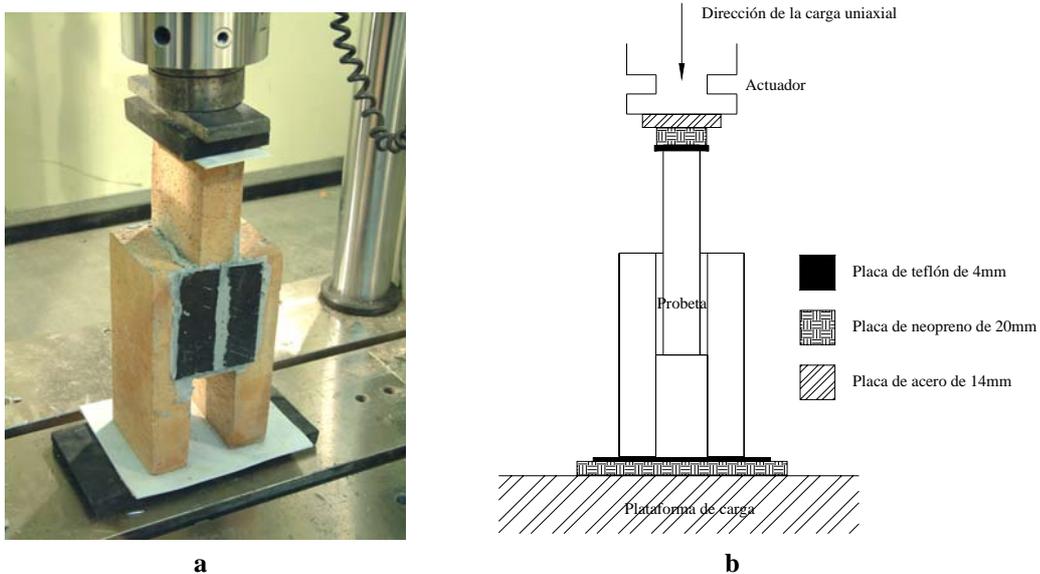


Figura 3.27 — Montaje de los ensayos de tripletas bajo carga uniaxial: (a) montaje de una de las probetas antes de iniciar el proceso de carga; (b) esquema del montaje.

3.3.5. Sistemas de refuerzo utilizados en las probetas

Se utilizan dos sistemas de refuerzo constituidos por laminado o tejido de fibra de carbono y resinas epoxi. Todas las fibras y resinas empleadas para refuerzo de las probetas son productos manufacturados comerciales, actualmente disponibles en el mercado.

3.3.5.1. Laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1

El laminado *de fibra de carbono* aporta la resistencia del sistema de refuerzo, que consiste en una matriz de polímeros (resina epoxi) reforzada con fibras de carbono. El laminado presenta una densidad aparente de 1.6 kg/dm^3 aproximadamente, con una anchura de 50 mm y una resistencia a tracción de 2800 N/mm^2 . Tiene un módulo de elasticidad de 165000 N/mm^2 y un alargamiento antes de rotura del 1.7%. Se ofrece en dos presentaciones, con secciones de 12 x 50 o 12 x 80 mm; para la actual campaña se emplea la primera.

El sistema de refuerzo es recomendado por el fabricante para el refuerzo estructural de elementos de hormigón armado, madera y acero; especialmente para casos de incremento de cargas, aumento de tráfico pesado en puentes, instalación de maquinaria pesada en edificios industriales, vibración y cambios de uso de las estructuras. Su utilización es también recomendada para casos de deterioro por envejecimiento de los materiales estructurales, corrosión de armaduras y disminución de la sección útil, impactos sobre la estructura y acción del fuego.

Las ventajas del sistema de refuerzo son el bajo peso, su disponibilidad en cualquier longitud, el reducido espesor, la facilidad de aplicación, su alta resistencia y elevado módulo de elasticidad, la alta resistencia a la fatiga, así como a ataques alcalinos y su carácter no corrosivo (figura 3.28).



Figura 3.28 — Laminado compuesto de fibra de carbono.

El laminado de fibra de carbono se aplica sobre la superficie de la estructura con una resina epoxi de dos componentes con proporción 3:1. La resina bi-componente aporta la

adherencia e integra al sistema de refuerzo. Se aplica como interfase adhesiva entre el laminado de fibra de carbono y la superficie del elemento de obra de fábrica. Tiene un modulo de elasticidad de 12800 N/mm^2 (figura 3.29) La resistencia a tracción (ensayada por el proveedor sobre hormigón) es de 4 N/mm^2 .



Figura 3.29 — Componentes a y b de la resina epoxi bi-componente 3:1.

3.3.5.2. Tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1

El tejido de fibra de carbono aporta la resistencia al sistema de refuerzo. Es un tejido unidireccional de fibras de carbono de alta resistencia, con un peso propio de 225 gr/m^2 . La resistencia del tejido a tracción es de 3500 N/mm^2 , tiene un módulo de elasticidad de 230000 N/mm^2 y permite un alargamiento antes de rotura de 1.5%. Se presenta en rollo de 300 mm de anchura.

El fabricante recomienda el producto para refuerzo de estructuras de hormigón armado, fábrica de ladrillo y madera, a cortante y flexión; también como refuerzo de pilares por zunchado (figura 3.30).

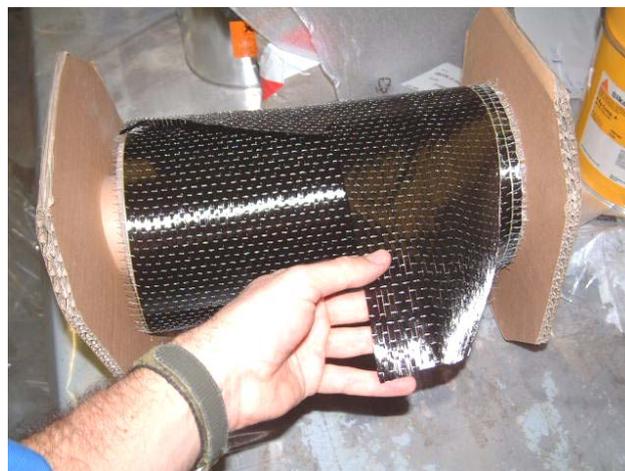


Figura 3.30 — Tejido de fibra de carbono

El tejido de fibra de carbono se aplica sobre la superficie de la obra de fábrica con una resina bi-componente, de proporción 4:1. Es el el adhesivo y matriz de integración de las fibras de carbono del compuesto. Presenta una consistencia pastosa al momento de ser mezclado y durante la impregnación, para después adquirir gran rigidez. Presenta una resistencia a tensión de 30 N/mm^2 , tiene una densidad de 1.77 kg/l , fluencia de 3 a 5 mm, una temperatura de transición vítrea igual a 62° y modulo de elasticidad de 12800 N/mm^2 (figura 3.31).

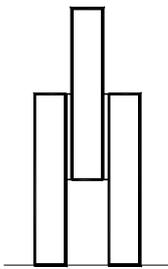


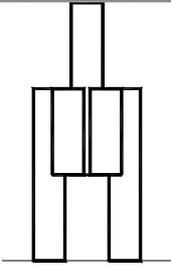
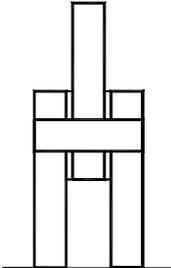
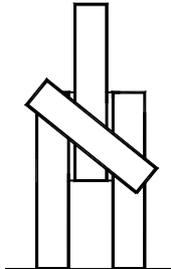
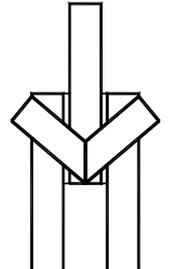
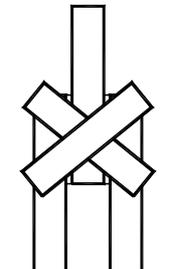
Figura 3.31 — Resina epoxi bi-componente 4:1.

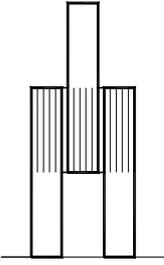
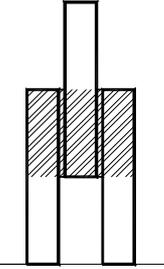
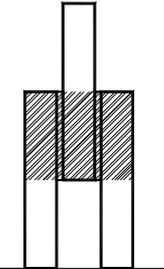
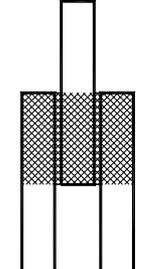
3.3.6. Programa de ensayos

El programa de ensayos se estructura en nueve grupos y un total de 50 probetas. Se ha diseñado conforme a un criterio de análisis de los siguientes parámetros: el sistema de refuerzo; la relación de superficie reforzada frente a la superficie total de la probeta (aplicación en una o dos caras); patrón geométrico de aplicación y; la orientación de las fibras resistentes en relación con la dirección de las juntas de mortero.

En la tabla 3.4 se presenta una síntesis de los grupos de ensayos de cortante uniaxial.

Clave	A_r/A_t *	Patrón geométrico de aplicación	Refuerzo
Sin	-		Sin refuerzo, probetas intactas
Par	0.59		Adhesión de dos bandas de laminado CFRP en posición vertical, paralelas a las juntas de mortero y a la dirección de la carga de cortante. El refuerzo se aplica en dos caras de las

			<i>probetas.</i>
<i>Per</i>	0.36		<i>Adhesión de una banda de laminado CFRP en posición horizontal, perpendicular a las juntas de mortero y a la dirección de la carga de cortante. El refuerzo se aplica únicamente en dos caras de las probetas.</i>
<i>D</i>	0.47		<i>Adhesión de una banda de laminado CFRP en posición diagonal, formando un ángulo aproximado a 50° respecto a las juntas de mortero y a la dirección de la carga de cortante. El refuerzo se aplica únicamente en dos caras de las probetas.</i>
<i>V</i>	0.47		<i>Adhesión de dos bandas de laminado CFRP en posición diagonal, apuntadas hacia el centro, formando ángulos aproximados a 45° con respecto a las juntas de mortero y a la dirección de la carga de cortante. El refuerzo se aplica en una cara de las probetas.</i>
<i>X</i>	0.82		<i>Adhesión de dos bandas de laminado CFRP en posición diagonal, formando una cruceta, en ángulos aproximados a 50° con respecto a las juntas de mortero y a la dirección de la carga de cortante. El refuerzo se aplica en dos caras de las probetas.</i>
<i>WPer</i>	1.00		<i>Adhesión de una capa de tejido CFRP sobre dos caras de las probetas. El sentido de la fibras es</i>

			<i>paralelo a la dirección de la carga y a las juntas de mortero.</i>
W45	1.00		<i>Adhesión de una capa de tejido CFRP sobre dos caras de las probetas. El sentido de la fibras forma un ángulo de 45° respecto a la dirección de la carga de cortante y a las juntas de mortero.</i>
WZ45	1.00		<i>Adhesión de una capa de tejido CFRP a manera de zuncho, envolviendo a la probeta en la zona de juntas de mortero. El sentido de la fibras forma un ángulo de 45° respecto a la dirección de la carga de cortante y a las juntas de mortero. La dirección de las fibras resistentes en las dos capas de tejido es perpendicular.</i>
WZ45d	1.00		<i>Adhesión de dos capas de tejido CFRP a manera de zuncho, envolviendo a la probeta en la zona de juntas de mortero. El sentido de la fibras forma un ángulo de 45° respecto a la dirección de la carga de cortante y a las juntas de mortero. La dirección de las fibras resistentes en las dos capas de tejido es perpendicular.</i>

* A_r/A_t es la proporción entre el área reforzada y el área total de la superficie de aplicación (en una o dos caras de la probeta).

Tabla 3.4 — Grupos de probetas de la campaña de rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP.

3.3.7. Procedimientos de aplicación

Conforme al programa de aplicación mostrado en la tabla 3.7, el proceso de refuerzo implica la utilización de 50 probetas del tipo 1 (figura 3.24 al inicio de este subapartado) asignando 5 especímenes para cada variable de aplicación. A continuación se describe el proceso de aplicación de los dos sistemas de refuerzo analizados:

En todas las probetas se elimina el polvo y las partículas sueltas utilizando aire comprimido (figura 3.32).



Figura 3.32 — Limpieza de las probetas con aire comprimido.

3.3.7.1. Refuerzo con compuesto de laminado de fibra de carbono

Se aplica compuesto de laminado de fibra de carbono a cinco grupos de probetas denominados *Par*, *Per*, *D*, *V*, y *X* con un mismo proceso. Los pasos del proceso se describen en la tabla 3.5.

Pasos del proceso de aplicación del compuesto de laminado de fibra de carbono
I. Corte del laminado de fibra de carbono
II. Mezcla de los componentes de resina epoxi
III. Impregnación de la superficie de la probeta con resina
IV. Impregnación de la superficie del laminado con resina
V. Aplicación

Tabla 3.5 — Pasos del proceso de refuerzo con laminado de fibra de carbono.

I. Corte del laminado de fibra de carbono

El laminado de fibra de carbono utilizado es altamente resistente, sin embargo puede cortarse manualmente con tijeras para lamina de acero o con una sierra circular (figura 3.33) El laminado tiene una sección de 50 x 1.2 mm y está disponible en el mercado con la longitud solicitada.



Figura 3.33 — Corte del laminado de fibra de carbono en sierra circular.

II. Mezcla de los componentes de la resina epoxi 3:1

El producto se presenta pre-dosificado en dos componentes. Las proporciones de la mezcla en peso son: *componente A: 3, componente B: 1*. Se emplea una báscula de precisión para mezclar pequeñas cantidades. El mezclado de los componentes se realiza con una batidora acoplada a un taladro manual, siguiendo las indicaciones del fabricante: baja velocidad, 600 rpm, durante un tiempo mínimo de 3 min., hasta conseguir una pasta homogénea y de color gris claro (figura 3.34).



Figura 3.34 — Utilización de una báscula de precisión para dosificar los componentes.

III. Impregnación de la superficie de la probeta con resina

Una vez preparada la resina epoxi, la aplicación de la mezcla se realiza manualmente con una espátula. El espesor aproximado de la capa de impregnación es de 2 mm (Figura 3.35).



Figura 3.35 — Utilización de una báscula de precisión para dosificar los componentes de la mezcla de resina epoxi.

IV. Impregnación de la superficie del laminado con resina

Se aplica manualmente una capa de resina a la superficie del laminado, con un espesor aproximado a 1mm, por medio de una espátula (figura 2.36).



Figura 3.36 — Utilización de una báscula de precisión para dosificar los componentes de la mezcla de resina epoxi 3:1.

V. Aplicación del laminado

La aplicación del laminado sobre la superficie de la probeta se realiza de forma manual, con una espátula, aplicando presión sobre el laminado y retirando los excedentes de resina epoxi (figura 3.37).



Figura 3.37 — Aplicación del laminado de fibra de carbono sobre la superficie de la probeta.

3.3.7.2. Refuerzo con compuesto de tejido de fibra de carbono

Se aplica compuesto de tejido de fibra de carbono a tres grupos de probetas denominados *WPer*, *W45*, y *W45d*, con un mismo proceso. Los pasos del proceso se describen en la tabla 3.6.

Pasos del proceso de aplicación del compuesto de tejido de fibra de carbono
I. Desbastado de aristas de la probeta
II. Corte del tejido de fibra de carbono
III. Mezcla de los componentes de resina epoxi <i>Sikadur 330</i>
IV. Impregnación de la superficie de la probeta con resina
V. Aplicación del tejido e integración con la resina

Tabla 3.6 — Pasos del proceso de refuerzo con tejido de fibra de carbono.

I. Desbastado de aristas en la probeta

Para los casos de refuerzo aplicados a manera de suncho, se desbastan las aristas en las probetas con un disco radial, para permitir la continuidad mecánica del tejido. En la figura 3.38 se muestra una de las probetas con aristas desbastadas.



Figura 3.38 — Probeta con aristas desbastadas.

II. Corte del tejido de fibra de carbono

El corte del tejido se hace manualmente utilizando unas tijeras para corte de tapices. El tejido de presenta en rollo, con un ancho de 300 mm. Los cortes se hacen conforme a las características geométricas de la probeta y a la orientación de las fibras. Algunos cortes de tejido se realizan formando un ángulo de 45°.

III. Mezcla de los componentes de resina epoxi

El producto, se presenta pre-dosificado en dos componentes. La proporción de la mezcla en peso es 4:1 de los componentes A y B respectivamente. Se emplea una báscula de precisión para mezclar pequeñas cantidades. El mezclado de los componentes se realiza con una batidora acoplada a un taladro manual, siguiendo las indicaciones del fabricante: baja velocidad, 600 rpm, durante un tiempo mínimo de 3 min., hasta conseguir una pasta homogénea y de color uniforme.

IV. Impregnación de la superficie de la probeta con resina

La impregnación de la superficie de las probetas es similar a la descrita en el paso III de la tabla 3.8, en el subapartado 3.3.5.1.

VI. Aplicación del tejido e integración con la resina

La aplicación del tejido y la integración del mismo con la resina se realiza manualmente, con ayuda de un rodillo metálico y siguiendo los pasos recomendados por el fabricante, mismos que se describen en la figura 3.39.

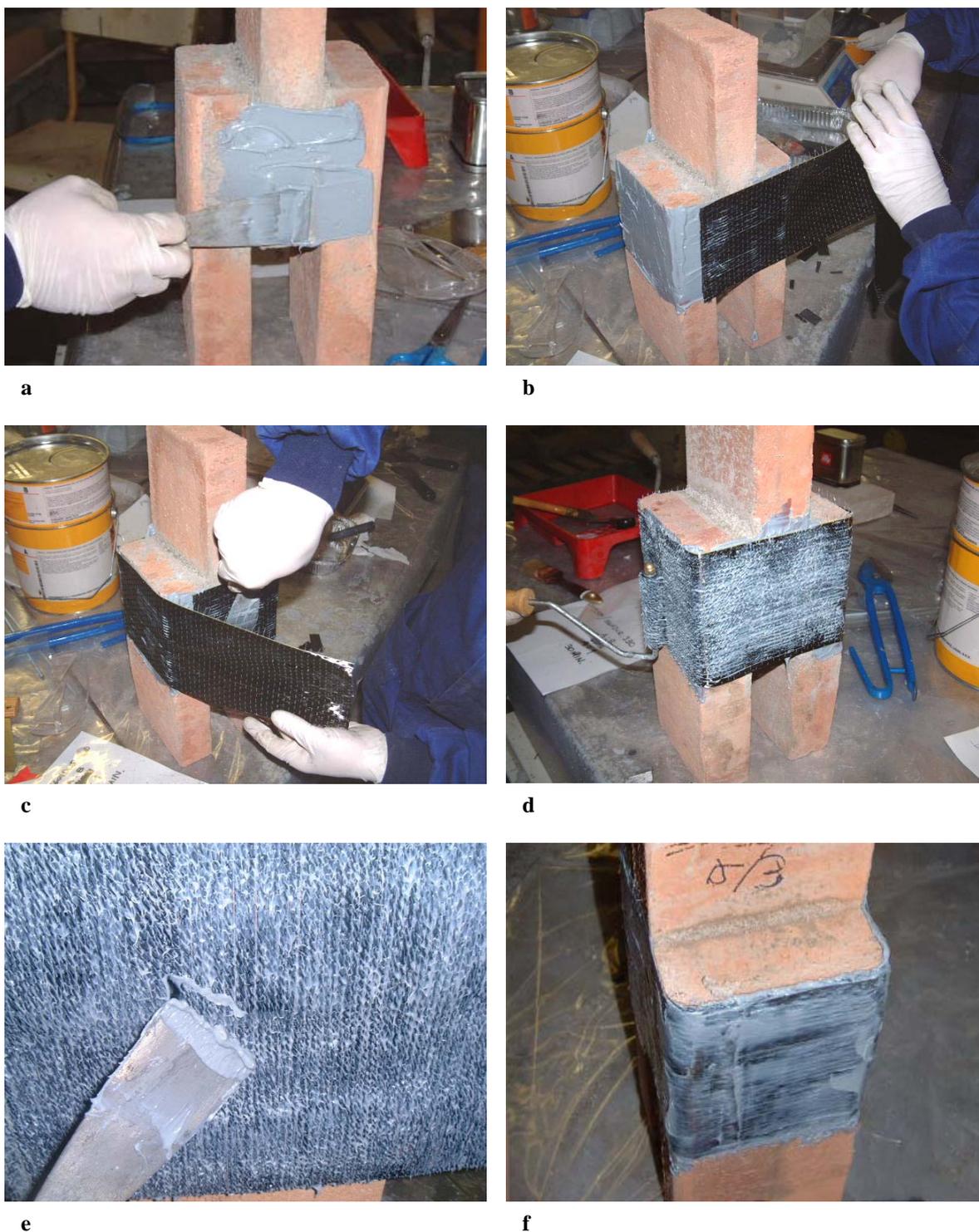


Figura 3.39 — Aplicación e integración del tejido de fibra de carbono y la resina epoxi 1:3; (a) impregnación de la superficie de la probeta; (b) fijación del tejido; (c) aplicación del tejido a manera de zuncho; (d) integración de la resina y el tejido con un rodillo metálico con estrías; (e) regulación de la superficie con una espátula; (f) aspecto del trabajo terminado.

3.3.8. Equipo e instrumentación

La ejecución de los ensayos se lleva a cabo en una máquina de ensayos que consta de un actuador montado sobre un marco o bastidor de carga; y la adquisición de datos se realiza por medio de una célula de carga integrada en la misma. A continuación se describe el equipo, los instrumentos de medición y adquisición de datos y el montaje de todos los elementos involucrados.

El equipo de ensayo es una máquina Instron, compuesta por un actuador montado sobre un marco de carga. El actuador es dinámico y tiene una capacidad de carga máxima de 1000 kN. Es gobernado por un controlador *digital* (figura 3.40).



Figura 3.40 — Máquina de ensayos utilizada en la campaña rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP.

Se emplean algunos sistemas de instrumentación y adquisición de datos. El instrumento de lectura de datos es una célula de carga integrada al actuador en la máquina de carga. Transmite una señal eléctrica que el ordenador transforma e interpreta como kN. Los datos se guardan en archivos numéricos en una hoja de cálculo por medio de un controlador digital.

3.4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PANELES REFORZADOS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP

3.4.1. Introducción

En este apartado se describe íntegramente la campaña experimental de rotura de paneles reforzados con tejidos y laminados CFRP.

En esta campaña se aplican algunos de los patrones de refuerzo más eficientes probados en la campaña precedente (3.2). La campaña esta compuesta por seis procesos de refuerzo y ensayo de paneles de obra de fábrica, reforzados con laminado y tejido de fibra de carbono.

A excepción de los valores de tensión normal aplicados, el proceso experimental es análogo al utilizado en la campaña 3.2. Los patrones de aplicación de refuerzo se describen en el subapartado 3.4.4. La numeración de los especímenes da continuidad a los ensayos realizados en la campaña 4.2.; y corresponde a la serie numérica que va de 8 a 13, ambos inclusive.

La campaña experimental se sitúa en el contexto de intervenciones de refuerzo de estructuras de obra de fábrica. Se emplean seis paneles de obra de fábrica de ladrillo similares a los utilizados en la campaña 3.2 (CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO).

Las condiciones y montaje de ensayo empleados en esta campaña; así como los sistemas de refuerzo aplicados a los tratamientos de los paneles, optimizan la información y los mejores resultados obtenidos en las campañas experimentales 3.2 (rotura de paneles reparados con inyección y restitución de conglomerantes) y 3.3 (rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP) llevadas a cabo previamente.

3.4.2. Fabricación y manipulación de los paneles

Los paneles utilizados para esta campaña son fabricados en sitio. Sus características físicas y mecánicas son análogas a los paneles descritos en el subapartado 3.2. (figura 3.2.). Así mismo, la manipulación y traslado de los paneles guarda idénticas características a las descritas en el subapartado mencionado.

3.4.3. Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo es análogo al empleado en la campaña 3.2 de paneles reparados; durante la primera fase los paneles son sometidos a una carga normal de compresión, distribuida uniformemente sobre la viga de hormigón, misma que se mantiene constante durante la totalidad del proceso.

La carga normal se genera a razón de 1 kN/s, con un incremento constante, hasta alcanzar niveles de compresión de 250 o 500 kN conforme al programa de ensayos (subapartado 3.4.6) generando en los especímenes tensiones normales de 1.48 o 2.98 N/mm².

En la segunda fase del proceso se genera sobre los paneles la carga tangencial, con un incremento constante a razón de 0.205 kN/s hasta ocasionar el fallo. La carga es puntual y se aplica sobre un extremo de la viga de hormigón de coronación (figura 3.41).

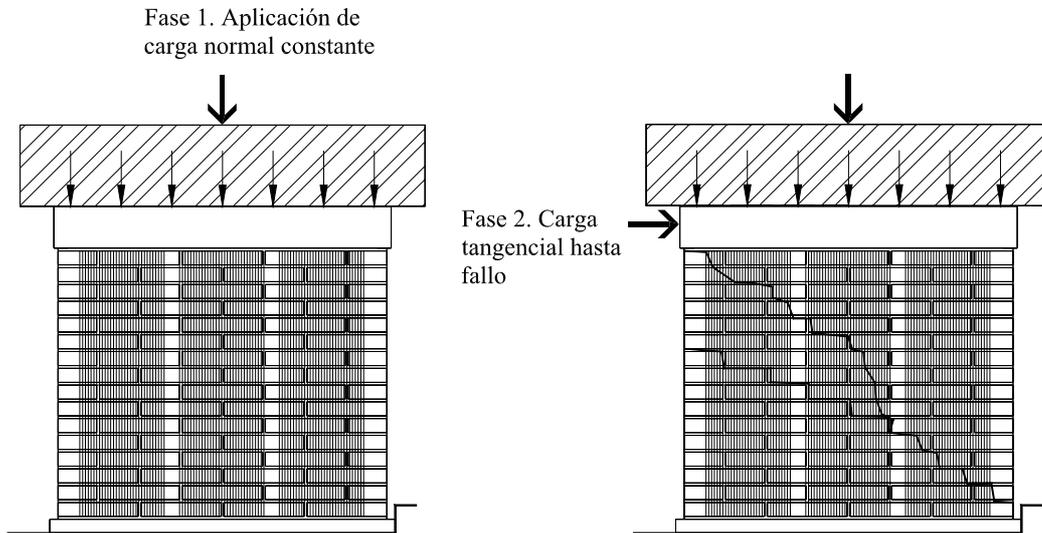


Figura 3.41 — Esquema de las dos fases del procedimiento de ensayo.

3.4.4. Montaje

El montaje de los ensayos es similar al descrito en el subapartado 3.2.4 para la campaña de rotura de paneles reparados. En la figura 3.42: (a) es la losa de carga; (b) es el actuador servo-hidráulico; (c) es el actuador horizontal; (d) es el contrafuerte de reacción a la fuerza tangencial; (e) es la viga de hormigón armado que distribuye la carga sobre el panel; (f) es el bastidor o anclaje de soporte para el actuador horizontal.

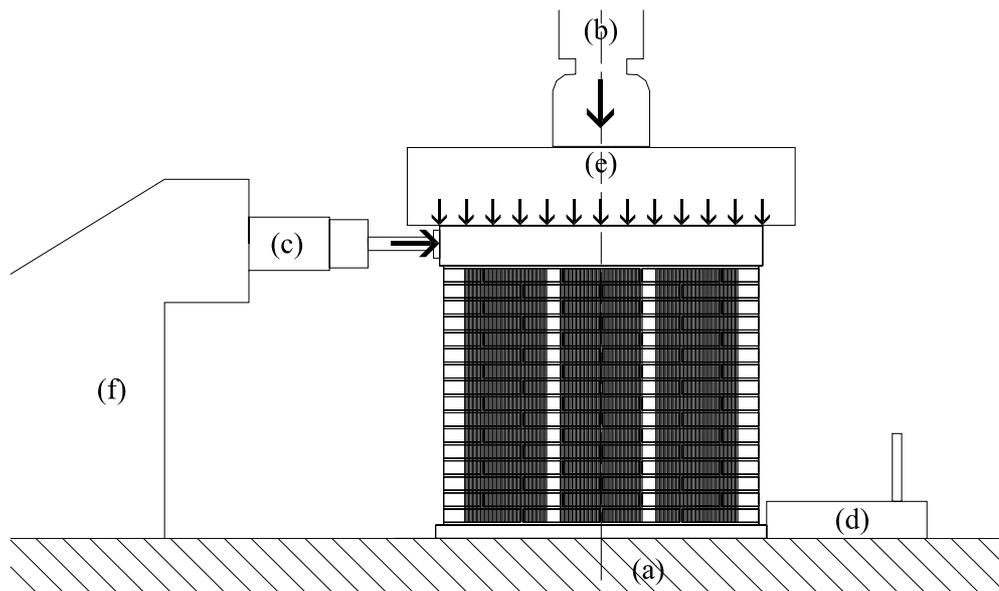


Figura 3.42 — Esquema del montaje de los ensayos de rotura de paneles reforzados con tejido y laminado CFRP.

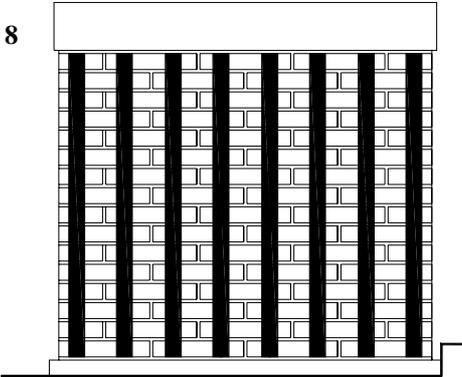
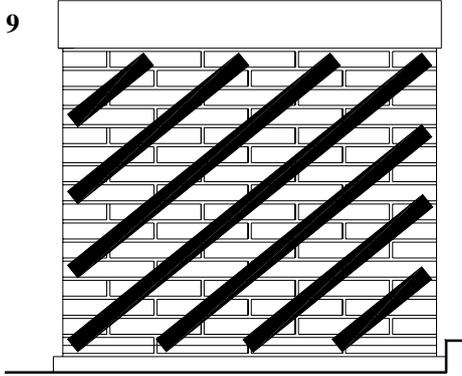
3.4.5. Sistemas de refuerzo

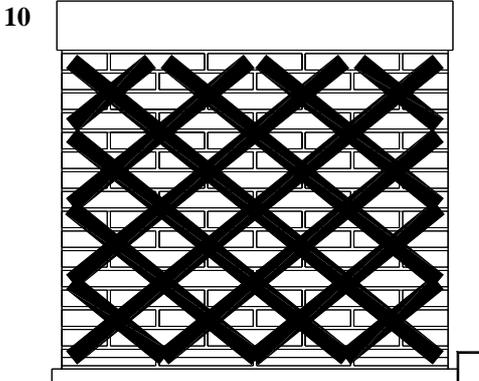
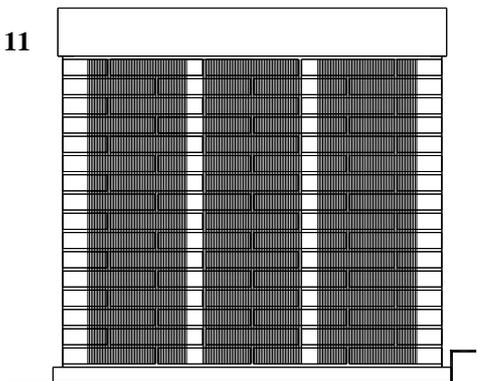
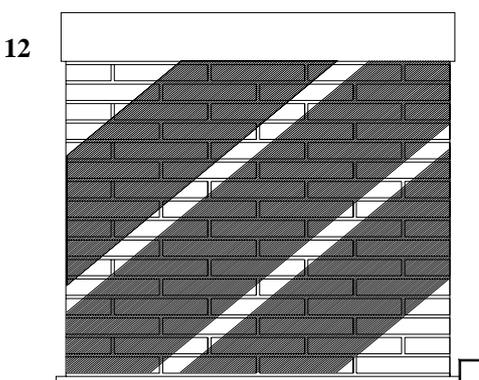
Se emplean los sistemas de refuerzo utilizados en la campaña de rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP (subapartado 3.3): *laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1* y; *tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1*, descritos en los subapartados 3.3.5.1. y 3.3.5.2.

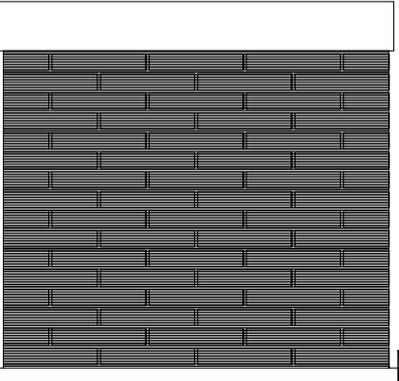
3.4.6. Patrones de aplicación de los sistemas de refuerzo

El criterio busca optimizar los recursos para trazar un perfil característico del comportamiento de las paredes, reforzadas por medio de los dos sistemas estudiados, sujetas a estados de tensión biaxial.

En la tabla 3.7 se describen los tratamientos de refuerzo aplicados a todos los paneles; la numeración de los especímenes responde en continuidad a la campaña de rotura de paneles reparados. Se representan gráficamente los patrones de refuerzo aplicados.

Clave	Patrón de refuerzo aplicado	A_r/A_{tot}^1	Caras reforzadas	Aplicación
Panel 8		0.33	2	Refuerzo con laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1. Aplicación en dirección paralela al sentido de la fuerza normal y en correspondencia geométrica entre las dos caras del panel. Los laminados son perpendiculares a las juntas horizontales del panel. Debido al comportamiento estándar de rotura cotejado en ensayos de paneles no reforzados (Sánchez, 2001) el patrón geométrico de aplicación debe aportar absorción a las tensiones normal y tangencial.
Panel 9		0.24	2	Refuerzo con laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1. Aplicación de bandas diagonales en una dirección con simetría en las dos caras del panel. ($\angle = 40^\circ$, separación 20 cm). El patrón geométrico se considera óptimo en base a los modos de fallo observados en la campaña de rotura de paneles (Sánchez, 2001).

Clave	Patrón de refuerzo aplicado	A_r/A_{tot}^1	Caras reforzadas	Aplicación
Panel 10		0.41	1	Refuerzo con laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1, con aplicación diagonal ($\angle = 40^\circ$) en dos direcciones, formando una semi-cuadrícula, con separación entre bandas de 20 cm. Este espécimen se refuerza solo en una cara, para determinar la influencia de la asimetría del refuerzo en el desempeño resistente del panel.
Panel 11		0.78	2	Refuerzo con <i>tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1</i> . Se sigue un patrón de refuerzo vertical, paralelo a la dirección de la fuerza normal, con perpendicularidad a las juntas horizontales. La aplicación consta de tres bandas con correspondencia geométrica de las dos caras del panel.
Panel 12		0.78	2	Refuerzo con <i>tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1</i> . El patrón geométrico es diagonal, con aplicación de tres bandas de tejido con correspondencia geométrica en las dos caras del panel.
		1.00	2	Refuerzo con <i>tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1</i> . El patrón geométrico de aplicación envuelve al panel en su

Clave	Patrón de refuerzo aplicado	A_r/A_{tot}^1	Caras reforzadas	Aplicación
Panel 13				totalidad, a manera de zuncho. La dirección de las fibras resistentes es paralela a las juntas horizontales.

* A_r/A_{to} es la relación que hay entre el área reforzada y el área total del panel.

Tabla 3.7 — Patrones de refuerzo aplicados a los paneles.

3.4.7. Programa de ensayos

El programa experimental consta de seis ensayos. Todos los ensayos siguen el procedimiento descrito en el subapartado 3.4.3. Originalmente se aplicaría una fuerza normal de 250 kN durante la primer fase de carga; sin embargo, debido a la detección de un drástico incremento en la rigidez del primer panel ensayado, en los ensayos subsiguientes se aumenta la fuerza normal a 500 kN (tabla 3.8).

Ensayo	Fase 1 Carga normal constante (kN)	Fase 2 Velocidad de aplicación de la carga tangencial (kN/s)
Panel 8	250	0.205
Panel 9		
Panel 10		
Panel 11	500	0.205
Panel 12		
Panel 13		

Tabla 3.8 — Síntesis de las características de refuerzo y las condiciones de ensayo.

3.4.8. Aplicación de los sistemas de refuerzo a los paneles

Los procesos de refuerzo utilizados en esta campaña son similares a los empleados en la campaña 3.3. Antes de la aplicación del refuerzo se realiza una profunda limpieza con aire comprimido en los paneles; y para el caso particular del panel 6, en que se aplica el tejido

de fibra de carbono como suncho, se desbastan los vértices del panel con una máquina radial, para permitir una continuidad en el trabajo mecánico del compuesto resistente. En la figura 3.39 puede verse el sitio de trabajo en el laboratorio durante el proceso de aplicación de los refuerzos (figura 3.43).



Figura 3.43 — Área de trabajo en laboratorio, proceso de refuerzo de paneles.

3.4.8.1. Aplicaciones de laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1

El procedimiento de aplicación del sistema de refuerzo de *laminado de fibra de carbono y resina epoxi 3:1* es similar al realizado en la campaña 3.3: estructurado en cinco pasos: *I. corte del laminado; II. mezcla de los componentes de la resina epoxi; III. impregnación de la superficie del panel; IV. impregnación de la superficie de los laminados y; V. colocación.*

La figura 3.44 muestra un momento del proceso de aplicación y un detalle del trabajo terminado.



Figura 3.44 — Aplicación del laminado de fibra de carbono sobre uno de los paneles: (a) fijación de los laminados; (b) detalle del trabajo terminado

Las figuras 3.45 y 3.46 a y b presentan los paneles reforzados 8, 9 y 10, respectivamente.



Figura 3.45 — Panel 8 reforzado.



a



b

Figura 3.46 — Refuerzo terminado de los paneles 9 (a) y 10 (b).

3.4.8.2. Aplicaciones de tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1

La aplicación del sistema de refuerzo de tejido de fibra de carbono y resina epoxi 4:1 es similar a la descrita en la campaña experimental de refuerzo de probetas (subapartado 3.3): *I. desbastado de aristas del panel; II. Corte del tejido de fibra de carbono; III. Mezcla de*

los componentes de la resina epoxi; IV. Impregnación de la superficie de los paneles con resina y Aplicación del tejido. Las figuras 47 y 48 a y b muestran los paneles 11, 12 y 13 reforzados.



Figura 3.47 — Panel 10 Reforzado.



a



b

Figura 3.48 — Refuerzo terminado de los paneles 12 (a) y 13 (b).

3.5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS MATERIALES

3.5.1. Introducción

En este apartado se describe íntegramente la campaña experimental de *rotura de probetas reforzadas con compuestos FRP y otros materiales*. La campaña consiste básicamente en el estudio de cuatro sistemas de refuerzo, aplicados a probetas de obra de fábrica de ladrillo sometidas a procesos de carga biaxial monotónicos o cíclicos.

En los siguientes subapartados se describen las características de las probetas de obra de fábrica y de los procedimientos de ensayo. A continuación se refiere la estructura general de la campaña y la clasificación de los grupos de ensayos; se explican los sistemas de refuerzo utilizados y se relatan los procedimientos de aplicación de cada uno. Por último, se describe el equipo de ensayo utilizado, la instrumentación y el montaje general.

3.5.2. Probetas

Las probetas están formadas por tres piezas de ladrillo macizo, unidas entre sí por la totalidad de su tabla, a escuadra y nivel, por medio de una capa de mortero tipo M-80, de espesor aproximado a 10 mm. Presentan dimensiones medias de $\pm 280 \times \pm 170 \times \pm 140$ mm (figura 3.49).

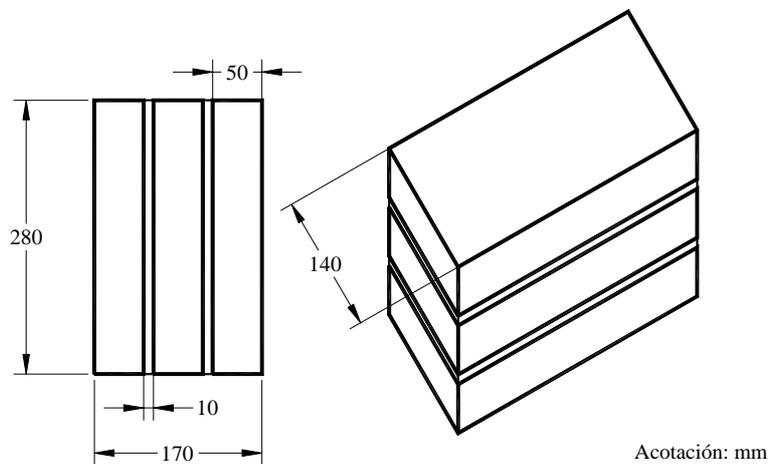


Figura 3.49 — Tipo de probeta utilizada en los ensayos de la campaña 3.5.

La fabricación de las probetas se realiza in situ, empleando ladrillos y mortero similares a los descritos en el apartado 3.1. La resistencia media a la compresión de las probetas es de 25 N/mm^2 .

3.5.3. Procedimiento de ensayo

Los ensayos consisten en someter a las probetas a un proceso de carga biaxial. Dicho proceso de carga consta de dos fases: la primer fase consiste en aplicar una carga normal con una tensión determinada; que se mantiene constante durante la ejecución total del ensayo (figura 3.50-a). Se manejan varios valores de tensión en la compresión de la carga normal, determinados por analogía a un rango real de tensiones admisible en las paredes de obra de fábrica portante; para ello se eligen cargas constantes de compresión de 20, 40, 60 y 80 kN, que generan en las probetas tensiones de 0.51, 1.02, 1.53 y 2.04 N/mm², y equivalen a 5, 10, 15 y 20 Kg/cm²; tensiones convencionales de edificios de obra de fábrica.

La segunda fase del proceso consiste en generar una carga cortante, hasta provocar la rotura a través de una de las juntas de mortero que conforman los especímenes. Esta carga se aplica en una rampa ascendente, monitoreada a una velocidad constante previamente establecida (figura 3.50-b).

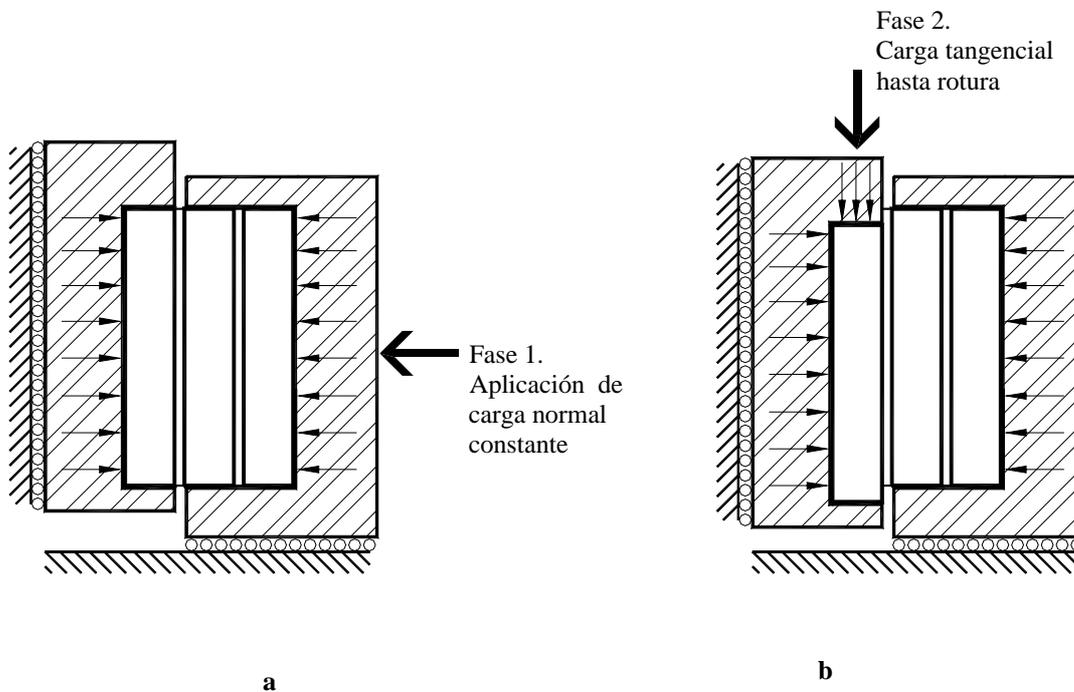


Figura 3.50 — Esquema del ensayo biaxial: (a) fase 1, en la que se aplica la carga normal de compresión y se mantiene constante durante la ejecución total del ensayo; (b) fase 2, en la que se aplica la carga cortante hasta ocasionar la rotura.

Durante la segunda fase de carga los especímenes son sometidos a un proceso monotónico o cíclico. El proceso monotónico consiste en la aplicación de una rampa de carga cortante, a una velocidad constante de 0.25 kN/s. El proceso cíclico genera períodos de carga y descarga con un incremento gradual de desplazamiento en cada reiteración, el cual ronda entre 0.1 y 0.5 mm y es variable en los diferentes conjuntos y grupos de ensayos.

Se utiliza un bastidor especial de carga para la ejecución de los ensayos. El bastidor es diseñado especialmente para esta campaña; buscando optimizar eficacia y dinamismo, máxime para agilizar la realización de más de 200 ensayos.

La función del bastidor especial es transmitir y distribuir las fuerzas sobre las probetas. Las fuerzas normal y tangencial son generadas por los actuadores horizontal y vertical, respectivamente. El bastidor guía los desplazamientos y condiciona a que la rotura ocurra en una de las juntas de mortero (figura 3.51).

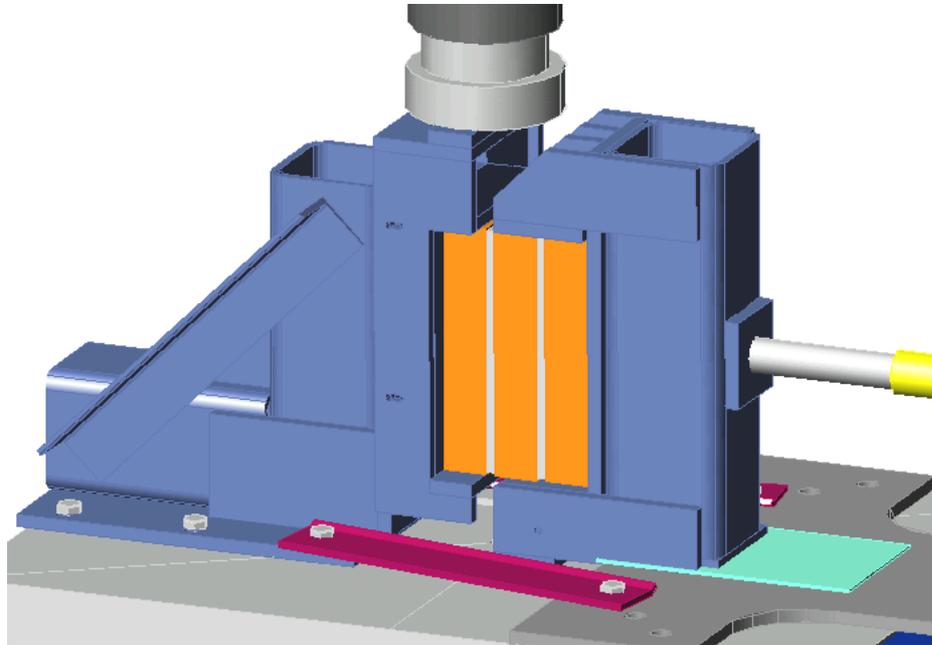


Figura 3.51 — Bastidor especial para rotura de probetas de la campaña experimental 3.5.

El bastidor está integrado por tres piezas de acero estructural y un lote de cuñas y tornillos de ajuste. En la figura 3.52 se presenta el esquema de funcionamiento.

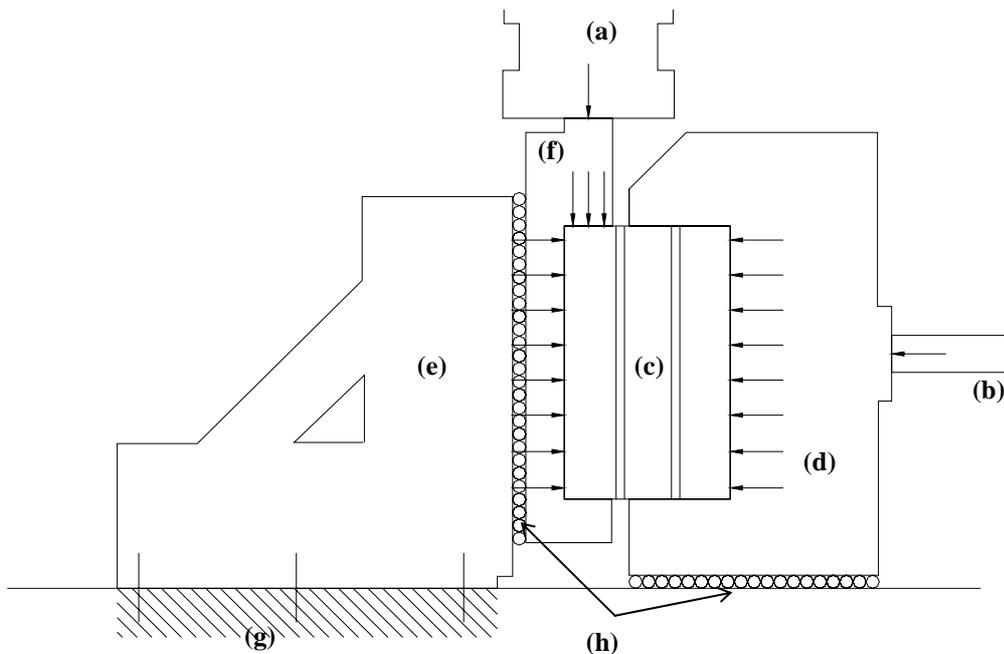


Figura 3.52 — Esquema de funcionamiento del bastidor especial.

La ilustración muestra cómo el contarfuerte (e) reacciona a la fuerza horizontal transmitida por la pieza d y sujeta al componente vertical (f) que envuelve una de las piezas de la probeta y solo permite el desplazamiento en dirección vertical; mismo que ejerce el actuador dinámico (a). La probeta también está sujeta por el componente de movimiento horizontal (d). El actuador hidráulico (b) genera en la probeta la fuerza normal. Se utilizan placas de teflón con aceite (h) para reducir la fricción entre las piezas.

3.5.4. Estructura y organización de los ensayos

La campaña experimental está estructurada en 15 grupos de ensayos, que se basan en la optimización de recursos para el estudio de los sistemas de refuerzo analizados, y en las condiciones de ensayos a que son sometidos. Los parámetros considerados en el análisis son la geometría (orientación de las fibras resistentes respecto a las juntas de mortero y a la dirección de la fuerza cortante); la aplicación del refuerzo en una o dos caras de la probeta; la dificultad del procedimiento de aplicación de los sistemas de refuerzo y; la secuencia, monótonica o cíclica, de la fase de carga cortante.

Se definen quince grupos característicos, que a su vez están constituidos por uno o varios conjuntos de ensayos. A los grupos de ensayos se asigna una clave de identificación, en la cual la primera letra define el sistema de refuerzo aplicado: (S) para los grupos de control no reforzados; (G) compuesto de fibra de vidrio; (A) compuesto de fibra de aramida; (M) enchapado con madera micro-laminada y; (C) embaldosado cerámico.

El primer superíndice denota la secuencia de la fase cortante en el proceso de ensayo: siendo ^(C) cíclica, y ^(M) monótonica. Por ejemplo: el grupo característico G^{MI} indica que las probetas son reforzadas con fibra de vidrio (G) y que la secuencia de la fase cortante en el proceso de ensayo es monótonica ^(M). El superíndice ^(I) señala que el conjunto difiere de otros similares debido a alguna variable. En la tabla 3.9 se describen los grupos característicos; los conjuntos correspondientes y los valores de tensión normal aplicados.

<i>Grupo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Conjuntos, tensión normal(kN)</i>
S^M	<i>Probetas sin refuerzo. Consta de cuatro conjuntos de probetas no reforzadas, con los que se caracterizan resistencias y modos de fallo bajo cuatro niveles de tensión normal</i>	<i>Sa, 0.51 Sg, 1.02 Sh, 1.53 Sd, 2.04</i>
G^M	<i>Consta de dos conjuntos de probetas reforzadas en una cara con una capa de compuesto de tejido de fibra de vidrio, con orientación de las fibras resistentes dispuesta en $\angle = 90^\circ$ respecto a las juntas de mortero</i>	<i>Ga, 0.51 Gb, 1.02</i>
G^{MI}	<i>Consta de un conjunto de probetas reforzadas en una cara con una capa de compuesto de tejido de fibra de vidrio, con orientación de las fibras resistentes dispuesta en $\angle = 45^\circ$ respecto a las juntas de mortero.</i>	<i>Gf, 2.04</i>

Grupo	Descripción	Conjuntos, tensión normal(kN)
G^{M2}	Consta de un conjunto de probetas reforzadas en dos caras con una capa de compuesto de tejido de fibra de vidrio, con orientación de las fibras resistentes dispuesta en $\angle = 45^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Ge, 0.51
G^{M3}	Consta de cuatro conjuntos de probetas reforzadas en dos caras con una capa de compuesto de tejido de fibra de vidrio, con orientación de fibras resistentes dispuesta en $\angle = 90^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Gc, 0.51 Gc1, 1.02 Gc2, 1.53 Gd, 2.04
A^M	Consta de cuatro conjuntos de probetas, reforzadas en una cara con una capa de compuesto de tejido de fibra de aramida, con orientación de fibras resistentes dispuesta en $\angle 90^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Aa, 0.51 Ab, 1.02 Ac, 1.53 Ad, 2.04
M^{M1}	Consta de tres conjuntos de probetas reforzadas en una cara con una capa de enchapado de madera microlaminada, con orientación de fibras resistentes dispuesta en $\angle 45^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Ma, 0.51 Mb, 1.02 Mc, 2.04
C^{M1}	Consta de tres conjuntos de probetas, reforzadas en una cara con una baldosa cerámica.	Ca, 1.02 Cb, 1.53 Cc, 2.04
S^C	Probetas sin refuerzo Consta de cuatro conjuntos de probetas no reforzadas, con los que se caracterizan resistencias y modos de fallo bajo cuatro niveles de tensión normal	Se, 0.51 Si, 1.02 Sj, 1.53 Sf, 2.04
G^{C1}	Consta de cuatro conjuntos de probetas reforzadas con una capa de compuesto de fibra de vidrio, aplicado en una cara, con orientación de las fibras resistentes dispuesta en $\angle = 45^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Gg, 0.51 Gi, 1.02 Gj, 1.53 Gh, 2.04
G^{C3}	Consta de tres conjuntos de probetas reforzadas con compuesto de fibra de vidrio, aplicado en una cara y en una capa, con orientación de las fibras resistentes dispuesta en $\angle = 90^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Gk, 1.02 Gl, 1.53 Gm, 2.04
A^{C1}	Consta de cuatro conjuntos de probetas reforzadas con compuesto de fibra de aramida, aplicado en una cara y en una capa, con orientación de las fibras resistentes perpendicular respecto a las juntas de mortero.	Ae, 0.51 Af, 1.02 Ag, 1.53 Ah, 2.04
A^{C2}	Consta de cuatro conjuntos de probetas reforzadas con compuesto de fibra de aramida, aplicado en dos caras y dos capas, con orientación de las fibras resistentes en $\angle = 90^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Ai, 0.51 Aj, 1.02 Ak, 1.53 Al, 2.04
M^{C1}	Consta de tres conjuntos de probetas reforzadas con enchapado de madera micro-laminada, aplicado en una cara y en una capa, con una orientación de las fibras resistentes en $\angle = 45^\circ$ respecto a las juntas de mortero.	Md, 0.51 Me, 1.02 Mf, 1.53

<i>Grupo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Conjuntos, tensión normal(kN)</i>
C^{CI}	Consta de cuatro conjuntos de probetas reforzadas con embaldosado cerámico aplicado en una cara.	$Cc1, 0.51$ $Cd, 1.02$ $Ce, 1.53$ $Cf, 2.04$

Tabla 3.9 — Denominación y descripción de los grupos de ensayos, conjuntos y valores de tensión normal.

3.5.5. Sistemas de refuerzo

En esta campaña se analizan cuatro técnicas de refuerzo, las cuales involucran diversos materiales. Se describen los procedimientos de aplicación correspondientes a cada sistema de refuerzo. Los compuestos *GFRP* y *AFRP* pertenecen a una línea comercial de productos; y para su empleo se han seguido las instrucciones facilitadas por el fabricante; sin embargo, en el transcurso de realización de la campaña experimental se han suprimido algunos pasos del procedimiento, o bien la utilización de algunos materiales auxiliares.

Los sistemas de refuerzo de madera micro-laminada o cerámica, adheridos a la superficie de obra de fábrica con un compuesto de poliuretano, integran diferentes materiales comerciales, normalmente aplicados en campos disímiles. Las placas de madera micro-laminada pertenecen a paneles de una línea comercial de estructuras. Las baldosas cerámicas se ofrecen comercialmente para pavimentos de uso doméstico o peatonal público; y el adhesivo de poliuretano empleado en los dos sistemas de refuerzo, se comercializa para la colocación de baldosas de cerámica sobre superficies de acero o poliéster .

3.5.5.1. Compuesto GFRP

El compuesto de fibra de vidrio esta integrado por dos materiales: un tejido bi-direccional de fibra de vidrio y una resina epoxi saturante. El tejido *de fibra* de vidrio se presenta en rollos de hoja continua, con una anchura de 680 mm. Tiene un espesor de 0.149 mm, un peso total de 440 g/m² y su densidad de fibra es de 2.68 g/cm³. Tiene un modulo elástico de 65000 N/mm², una resistencia a tracción de 3000 N/mm² y una elongación última del 4.3% (figura 3.53).

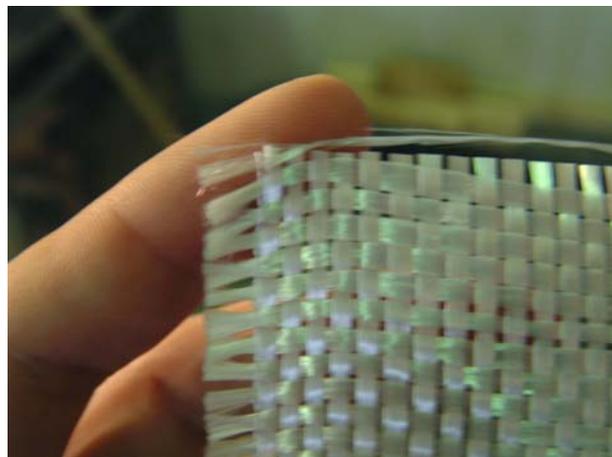


Figura 3.53 — Tejido de fibra de vidrio.

La resina epoxi saturante esta formada por dos componentes, se presenta pre-dosificada y es fluida durante su preparación y aplicación. Su función es unir entre sí las mechas de fibra del tejido formando un compuesto, y adherirlo a la superficie del espécimen de obra de fábrica a reforzar (figura 3.54).



Figura 3.54 — Resina epoxi saturante.

Tras la mezcla de sus dos componentes, tiene un tiempo abierto aproximado a 30 min. para su aplicación, ya que adquiere gran rigidez dentro de los 80 minutos posteriores a la misma. Tiene una densidad aproximada de $1,04 \text{ g/cm}^3$, una rotura y deformación a tracción de 54 N/mm^2 y 2.5% respectivamente; un modulo elástico de 3034 N/mm^2 , rotura a flexión de 124 N/mm^2 , módulo a flexión de 3731 N/mm^2 , rotura a compresión de 86 N/mm^2 , y módulo a compresión de 261 N/mm^2

Para la aplicación del compuesto de fibra de vidrio, se lleva a cabo previamente un proceso de preparación de la superficie de las probetas. Para ello se utilizan dos productos auxiliares: una imprimación de resina epoxi y un mortero de regulación.

La imprimación epoxi satura el substrato superficial de la fábrica, sellando así la porosidad y las oquedades. Evita la absorción excesiva y la oclusión de burbujas de aire, garantizando la óptima adherencia del refuerzo (figura 3.55).



Figura 3.55 — Imprimación de resina epoxi.

Tiene una rotura a tracción, (conforme al fabricante y basado en normas ASTM) de 12 N/mm^2 , con un modulo elástico de 717 N/mm^2 , deformación en rotura de 3%, rotura a flexión de 24 N/mm^2 y un módulo de flexión de 593 N/mm^2 . Su rotura a compresión es de 24 N/mm^2 y tiene un módulo de 669 N/mm^2 .

El mortero de regulación es tixotrópico. Esta integrado por dos componentes y tiene una consistencia seca. Su función es la regulación de la superficie para mejorar la continuidad mecánica del compuesto de refuerzo. Su capacidad mecánica es muy elevada; después de 24 horas de aplicación, alcanza una resistencia superior a los 500 kp/cm^2 (figura 3.56).



Figura 3.56 — Mortero epoxy tixotrópico.

3.5.5.2. Compuesto AFRP

El compuesto de fibra de aramida está integrado por dos materiales: un tejido uni-direccional de fibra de aramida y la resina epoxy saturante descrita en el apartado 3.5.3.1. El tejido de fibra de aramida se presenta comercialmente en rollos con anchura de 300 mm (figura 3.57).

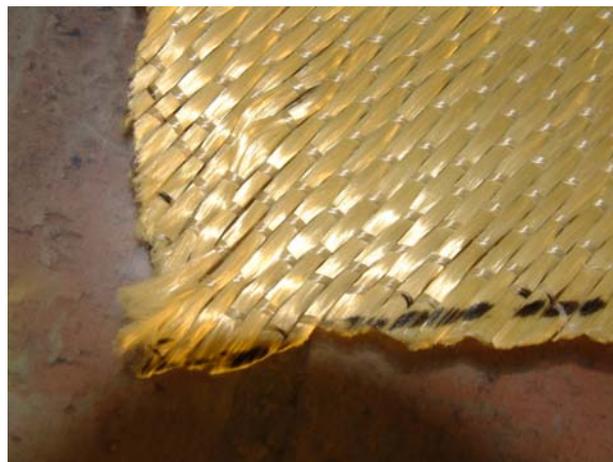


Figura 3.57 — Tejido de fibra de aramida.

El espesor de la hoja es de 0.2 mm, con un peso total de 290 g/m^2 , una densidad de fibra de 1.45 g/cm^3 y un modulo elástico de 120000 N/mm^2 . Tiene una resistencia a tracción de 2900

N/mm^2 y una elongación última del 2.5% Previamente a la aplicación del compuesto de fibra de aramida, se prepara la superficie de las probetas utilizando la imprimación epoxi descrita en el apartado 3.5.3.1.

3.5.5.3. Enchapado de madera micro-laminada

El enchapado de madera micro-laminada esta formado por dos productos comerciales: placas de laminados de madera (figura 3.58) encolados y un adhesivo de poliuretano.



Figura 3.58 — Madera micro-laminada.

Las placas de madera encolada están formadas por cinco laminas de madera de abeto que en conjunto tienen un espesor de 21 mm. Las propiedades mecánicas del producto son: flexión a canto y flexión plana de 36 N/mm^2 , tracción paralela a la fibra de 27 N/mm^2 y tracción perpendicular a la fibra de 6.7 N/mm^2 . Compresión paralela a la fibra de 27 N/mm^2 y compresión de canto, perpendicular a la fibra de 12 N/mm^2 . El valor medio del modulo de elasticidad es de 10000 N/mm^2 . Los paneles utilizados están compuestos por siete capas y solo las fibras resistentes de dos laminas del panel están orientadas en su sentido transversal. El adhesivo de poliuretano es bi-componente; se presenta pre-dosificado y una vez mezclado por medio de una batidora eléctrica, endurece rápidamente y sin agrietamiento, puesto que presenta alta flexibilidad. Tiene una densidad aproximada de 1.5 gr/cm^3 (figura 3.59).



Figura 3.59 — Adhesivo de poliuretano.

3.5.5.4. Embaldosado cerámico

Se utiliza una racilla cerámica comercial, apropiada por sus dimensiones y características físicas y mecánicas. Sus medidas son 131 x 272 x 13 mm; las baldosas tienen una absorción de agua $\leq 5\%$ y una resistencia a flexión $\geq 20 \text{ N/mm}^2$. Las dimensiones son adecuadas para su fijación a las probetas utilizadas en esta campaña (figura 3.60).



Figura 3.60 — Baldosa cerámica.

Para la fijación de las baldosas cerámicas sobre la superficie de las probetas se utiliza el adhesivo de poliuretano descrito en el apartado 3.5.3.3.

3.5.6. Procedimientos de aplicación de los sistemas de refuerzo

3.5.6.1. Refuerzo GFRP

En el procedimiento de refuerzo de probetas con compuesto de fibra de vidrio se siguen las recomendaciones hechas por el fabricante. En la tabla 3.10 se refiere cada paso del procedimiento. Enseguida se muestran imágenes captadas durante el proceso de refuerzo y se amplía la información citando los pormenores.

Procedimiento de refuerzo de probetas con compuesto GFRP

- a) Limpieza de las probetas con aire comprimido*
 - b) Corte de las hojas de tejido de fibra de vidrio*
 - c) Aplicación de imprimación epoxi*
 - d) Aplicación de mortero de regulación de la superficie*
 - e) Aplicación de resina epoxi saturante*
 - f) Incorporación del tejido GFRP*
 - g) Aplicación de la 2ª capa de resina epoxi saturante*
-

Tabla 3.10 — Pasos seguidos en el procedimiento de refuerzo de probetas con compuesto GFRP.

a) Limpieza de las probetas con aire comprimido

La finalidad de la limpieza con aire comprimido es eliminar totalmente las partículas de polvo, asegurando así una adherencia óptima del sistema de refuerzo a la superficie.

b) Corte de las hojas de tejido de fibra de vidrio

El corte del tejido de fibra de vidrio se hace con tijeras metálicas o con una navaja de mano. Las hojas de tejido se ajustan a las dimensiones de la cara que se reforzará en el panel (figura 3.61).



Figura 3.61 — Hojas de tejido de fibra de vidrio recortadas a medida.

c) Aplicación de imprimación epoxi

La imprimación epoxi se presenta pre-dosificada en dos componentes. Las dos partes se mezclan con una batidora eléctrica a baja velocidad (aproximadamente 600 rpm) hasta conseguir una consistencia y color uniformes.

La función de la mezcla bi-componente es sellar la superficie de la fábrica, para evitar que la porosidad de la fábrica absorba excesivamente la humedad del mortero de regulación o los compuestos y para optimizar la adherencia de los mismos. La aplicación se realiza con una brocha convencional y es suficiente una capa saturada. Por prescripción del fabricante es conveniente dejar transcurrir una hora antes de la aplicación del mortero de regulación.

La textura de la resina una vez transcurrido el tiempo de reacción es seca y sólida. Su apariencia es brillante y transparente con apariencia húmeda (figura 3.62).

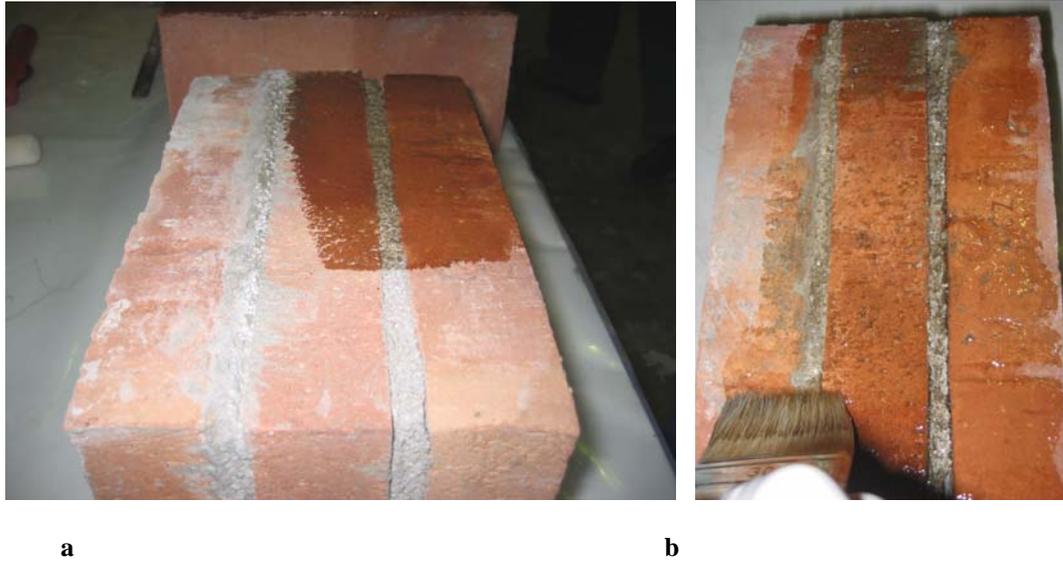


Figura 3.62 — Aplicación de la resina de imprimación en la superficie de las probetas: (a) apariencia húmeda (b) aplicación con una brocha.

d) Aplicación de mortero de regulación

El mortero de regulación aporta continuidad y homogeneidad a la superficie de la fábrica. Su alta adherencia y gran resistencia le permiten integrarse al sustrato superficial de la fábrica y el mortero en la probeta. Se aplica una capa de mortero con un espesor promedio de 2mm. Su apariencia final es ligeramente rugosa, similar a la de un mortero cal-arena-cemento convencional. El fabricante recomienda aplicar el refuerzo de fibra o una capa de resina saturante después de 24 horas (figura 3.63).



Figura 3.63 — Aplicación del mortero de regulación en la superficie: (a) Utilización de una paleta para albañilería (b) apariencia final.

e) Aplicación de resina epoxi saturante

La aplicación de la resina epoxi se realiza con un rodillo de fibra (figura 3.64 a y b). La consistencia de la resina es espesa y tiene gran adherencia. La operación es muy sencilla. Las hojas de tejido deben incorporarse de inmediato, pues el tiempo abierto de la resina es muy breve, alrededor de 30' desde su mezclado.

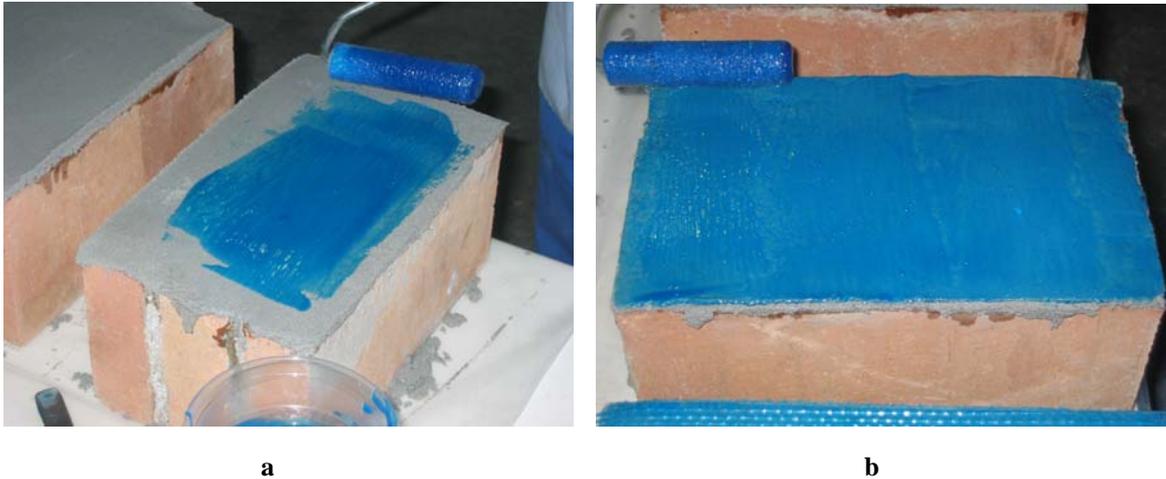


Figura 3.64 — Aplicación de la resina epoxi saturante: (a) utilización de un rodillo de fibra (b) apariencia de la aplicación terminada.

f) Adhesión del tejido GFRP

La adhesión del tejido de fibra de vidrio se hace manualmente. La hoja de tejido permite una fácil incorporación a la resina saturante. Con ayuda de un rodillo metálico con estrías se presiona para lograr la impregnación uniforme y la oclusión de burbujas de aire (figura 3.65).



Figura 3.65 — Incorporación del tejido GFRP a la resina saturante: (a) colocación manual; (b) integración a la resina con un rodillo metálico de rondanas.

g) *Aplicación de la 2º capa de resina epoxi saturante*

Después de la incorporación del tejido GFRP se aplica una nueva capa de resina saturante. Esta segunda capa de resina consolida la incorporación del tejido y aporta mayor volumen al compuesto. Tras 24 horas de la aplicación, la apariencia del refuerzo es brillante (figura 3.66) y conserva el color azul inicial y su textura es satinada y similar a la de un barniz grueso.



Figura 3.66 — apariencia final de la aplicación de refuerzo GFRP.

3.5.6.2. Refuerzo AFRP

El proceso de aplicación de refuerzo *AFRP* sobre las probetas es análogo al proceso seguido para la aplicación de *GFRP*. La figura 3.67 muestra algunas de las probetas reforzadas.

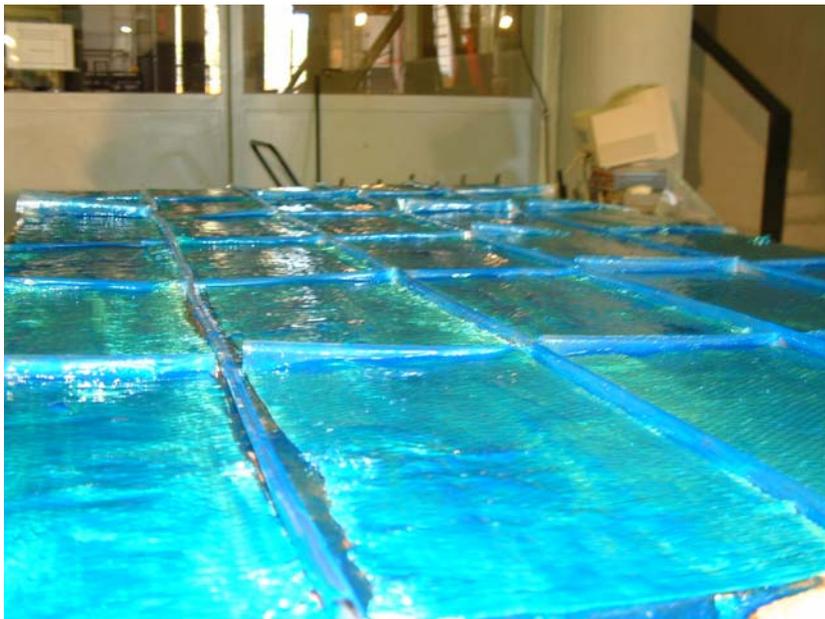


Figura 3.67 — probetas reforzadas con compuesto AFRP.

En la tabla 3.11 se enumeran los pasos del procedimiento de aplicación y enseguida se describen. Se suprime la utilización del mortero epoxi de regulación.

Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con compuesto AFRP
<i>h) Limpieza de las probetas con aire comprimido</i>
<i>i) Corte de las hojas de tejido de fibra de vidrio *</i>
<i>j) Aplicación de la imprimación epoxi</i>
<i>k) Aplicación de resina epoxi saturante</i>
<i>l) Incorporación del tejido AFRP</i>
<i>m) Aplicación de la 2ª capa de resina epoxi saturante</i>

*ejecución de mayor dificultad

Tabla 3.11 — Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con AFRP.

h) Limpieza de las probetas con aire comprimido

La finalidad de la limpieza con aire comprimido es eliminar totalmente las partículas de polvo, asegurando así una adherencia óptima del sistema de refuerzo a la superficie (similar al punto *a* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

*i) Corte de las hojas de tejido de fibra de vidrio**

El tejido de fibra de aramida es altamente resistente al corte. No es posible cortar las hojas de tejido con tijeras o con una navaja de mano. La dificultad se debe a la gran resistencia y densidad de hilos que conforman el tejido.

Para llevar a cabo esta tarea se utilizan unas tijeras de acero (recomendadas para trabajos de tapicería) y un adhesivo líquido de metacrilato comercial. El procedimiento de corte consta de los siguientes pasos:

- *Extendido del tejido sobre una superficie plana y horizontal, que debe protegerse con papel o plástico desechable.*
- *Marqueo de las líneas de corte con un rotulador de tinta permanente*
- *Aplicación de una capa saturante de metacrilato sobre las líneas de corte (con un ancho aproximado de 5 mm y esperar algunos minutos a que endurezca completamente*
- *Corte de la fibra con una navaja de mano utilizando como guía una regla metálica*

La figura 3.68-a muestra la fibra de aramida, las tijeras y el adhesivo utilizados para el corte; y en la figura 3.68-b se muestra un detalle del corte realizado.

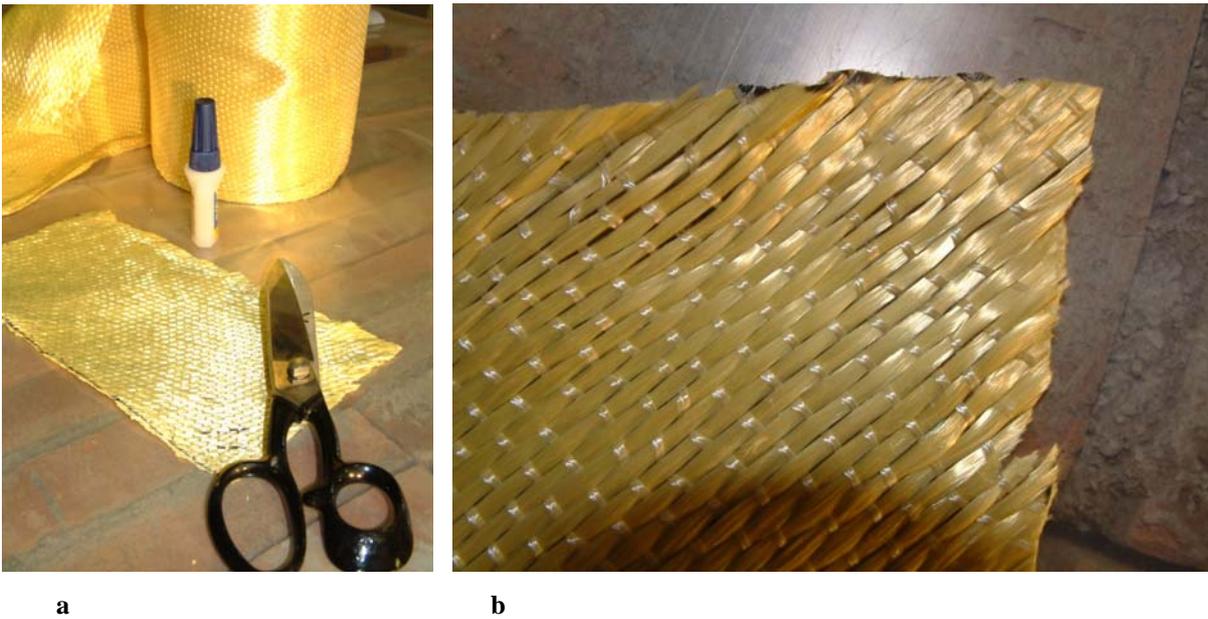


Figura 3.68 — Proceso de corte del tejido AFRP: (a) el tejido, adhesivo de metacrilato y tijeras de acero; (b) detalle del corte realizado en el tejido.

j) Aplicación de imprimación epoxi

(similar al punto *c* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

k) Aplicación de resina epoxi saturante

(similar al punto *e* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

l) Incorporación del tejido AFRP

(similar al punto *f* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

m) Aplicación de la 2ª capa de resina epoxi saturante

(similar al punto *g* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

3.5.6.3. Refuerzo con madera micro-laminada

El proceso de refuerzo de probetas con placas de madera micro-laminada presenta mayor simplicidad que los métodos descritos antes.

En la tabla 3.12 se refieren los pasos que se siguen durante la aplicación.

<i>Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con madera microlaminada</i>
<i>n) Limpieza de las probetas con aire comprimido</i>
<i>o) Corte de las placas</i>
<i>p) Aplicación de adhesivo de poliuretano en las superficies</i>
<i>q) Colocación de las placas de madera microlaminada</i>

Tabla 3.12 — Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con madera micro-laminada

n) Limpieza de las probetas con aire comprimido

El proceso es similar al punto *a)* descrito en el subapartado 3.5.4.1.

o) Corte de las placas

El corte de los laminados se rige por la dirección de las fibras resistentes del material, que se adaptan a un ángulo de 45° con respecto a las juntas horizontales de la probeta.

Para cortar las placas de madera micro-laminada se utiliza una caladora manual. Previamente se traza en los paneles (paneles suministrados por el comercial intermediario, de 2.0 x 0.6 m) las líneas de corte (Figura 3.69). Los trazos y cortes son girados 45° respecto al lado más largo del panel, logrando así que las fibras resistentes del mismo trabajen en la probeta con la orientación mencionada respecto a las juntas de mortero.

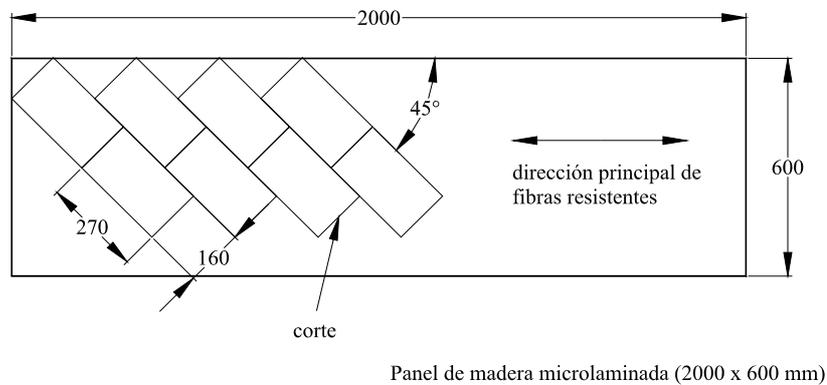


Figura 3.69 — Corte de las placas de madera micro-laminada.

p) Aplicación de adhesivo de poliuretano en las superficies

El adhesivo de poliuretano se aplica con una espátula metálica estriada a las superficies de las probetas y de las placas de madera micro-laminada (figura 3.70). Su aplicación se realiza extendiendo una capa espesa (aprox. 4mm) en las superficies de la fábrica y del enchapado. El adhesivo es muy adherente y tiene un tiempo abierto muy reducido (adquiere gran rigidez en 20 min aproximadamente) por lo que la aplicación debe ser muy rápida.

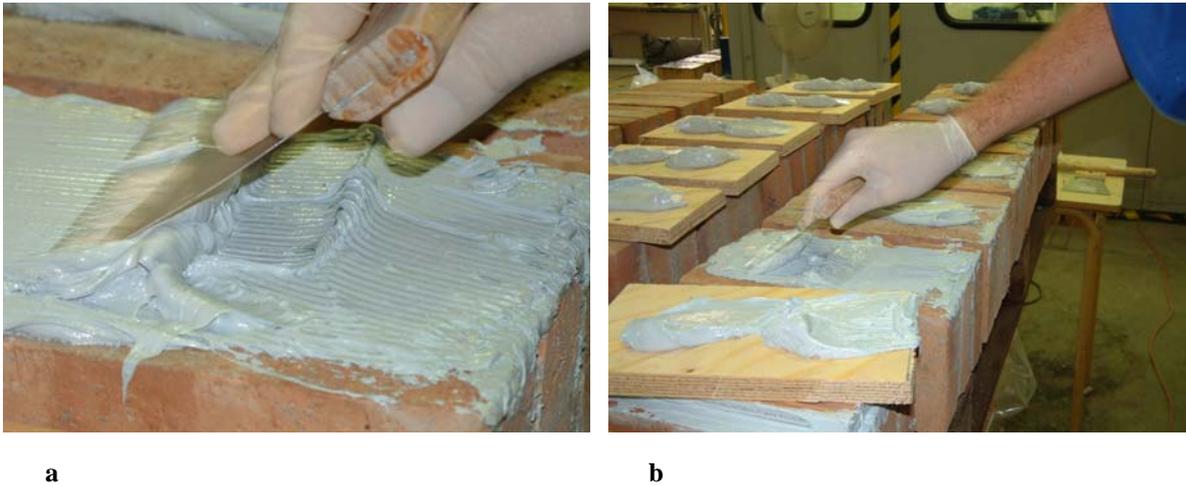


Figura 3.70 — Refuerzo de probetas de fábrica con placas de madera micro-laminada: (a) aplicación del adhesivo de poliuretano en una probeta; (b) vista del conjunto durante el proceso de aplicación.

q) Colocación de las placas de madera micro-laminada

Se colocan los enchapados con ayuda de un mazo plástico. La consistencia pastosa del adhesivo impregna las superficies y llena las irregularidades. Los especímenes tratados se mantienen una semana en reposo antes de ser sometidos a ensayo (figura 3.71).



Figura 3.71 — Probetas reforzadas con placas de madera micro-laminada.

Los especímenes reforzados con madera micro-laminada se mantienen una semana en reposo antes de ser sometidos a ensayo.

3.5.6.4. Refuerzo con embaldosado cerámico

El proceso de refuerzo de probetas con baldosas cerámicas es similar al proceso seguido para la madera micro-laminada. Sin embargo, en el caso de las baldosas cerámicas, la colocación es más delicada y minuciosa para evitar la fractura de las piezas. Los especímenes tratados se mantienen una semana en reposo antes de ser sometidos a ensayo. La tabla 3.13 enumera los pasos del procedimiento y a continuación se presenta una imagen de las probetas reforzadas.

<i>Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con baldosas cerámicas</i>
<i>r) Limpieza de las probetas con aire comprimido</i>
<i>s) Aplicación de adhesivo de poliuretano en las superficies</i>
<i>t) Colocación de las baldosas de cerámica</i>

Tabla 3.13 — Pasos seguidos en el proceso de refuerzo de probetas con baldosas cerámicas.

r) Limpieza de las probetas con aire comprimido

(similar al punto *a* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

s) Aplicación de adhesivo de poliuretano en las superficies

(similar al punto *p* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

t) Colocación de las baldosas de cerámica

(similar al punto *q* descrito en el subapartado 3.5.4.1.).

3.5.7. Equipo, instrumentación y montaje de los ensayos

Para llevar a cabo los ensayos de la campaña 3.5 se emplean en conjunto un actuador dinámico y un actuador controlado a través de una bomba hidráulica manual, que ejercen sobre las probetas las fuerzas tangencial y normal respectivamente. En este subapartado se describe el equipo de laboratorio, la instrumentación para la adquisición de datos, el montaje general y su funcionamiento.

Para proveer la fuerza tangencial a la probeta en los ensayos de cortante, se utiliza un actuador dinámico, montado sobre un marco estructural. El actuador permite un recorrido de $\pm 50\text{mm}$ y tiene una capacidad máxima de 1000 kN (figura 3.72).

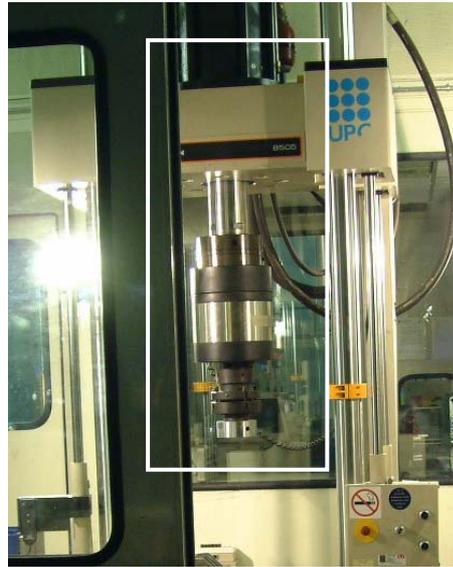


Figura 3.72 — Actuador dinámico.

La fuerza normal constante se aplica por medio de un equipoo hidráulico, compuesto por un actuador cilíndrico con capacidad máxima de 100 kN y un recorrido de 257 mm (figura 3.73-a) La presión se ejerce con una bomba manual con capacidad de 901 cm³ (figura 3.73-b).

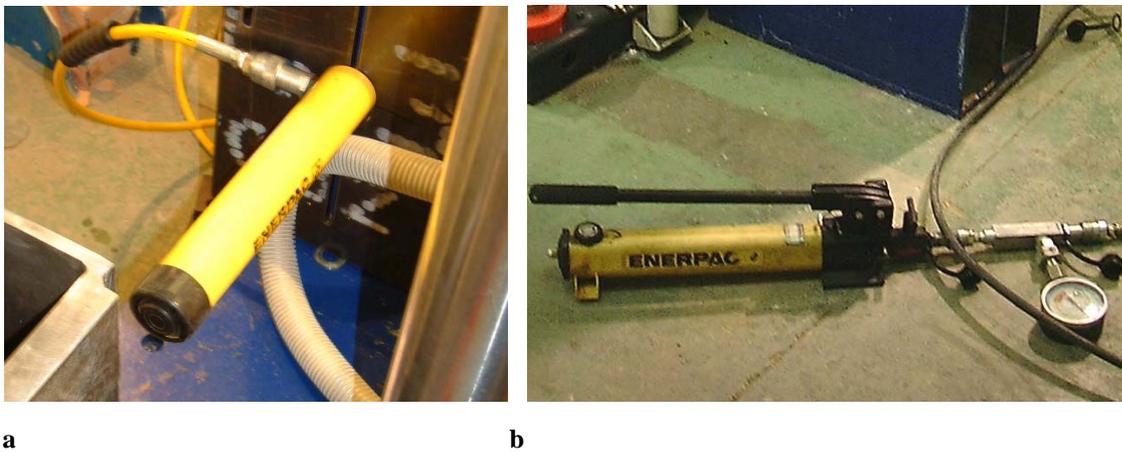


Figura 3.73 — Aplicación de la carga normal: (a) actuador cilíndrico ; (b) bomba manual.

El equipo de lectura de datos es una célula de carga integrada al actuador dinámico. La célula de carga transmite una señal eléctrica que el ordenador transforma e interpreta como fuerza en kN (figura 3.74).

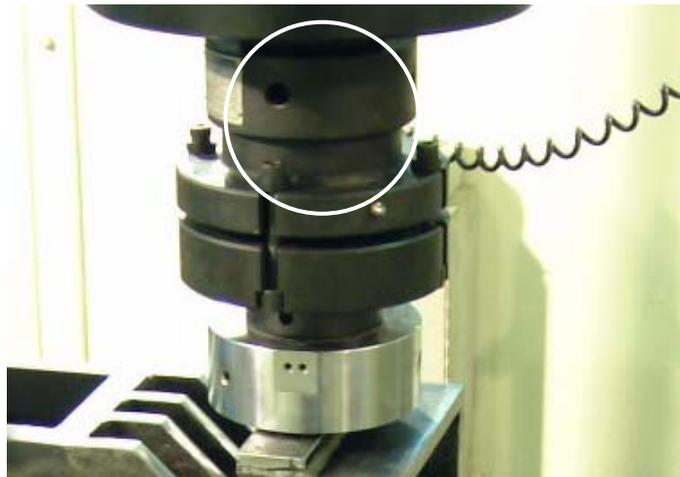


Figura 3.74 — Célula de carga integrada al actuador dinámico.

Los datos se guardan en archivos numéricos en una hoja de cálculo, por medio de la paquetería informática del equipo, y son monitoreados a través de un controlador digital. (figura 3.75 a y b).

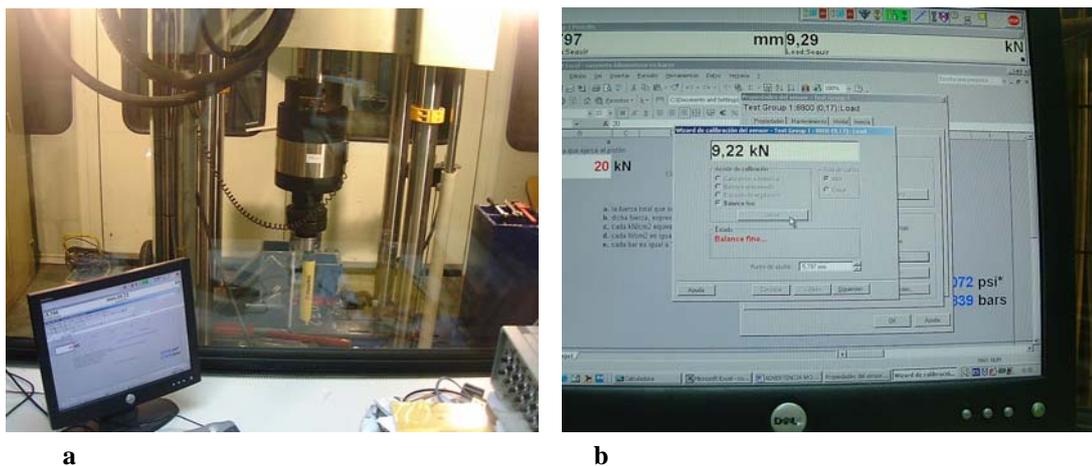


Figura 3.75 — Adquisición de datos: (a) vista general del marco de carga desde la cabina de mando; (b) detalle de la consola virtual durante la calibración automática del actuador dinámico.

Todos los ensayos se realizan en el marco de carga del actuador dinámico. En la plataforma de carga se colocan los anclajes y las piezas móviles del bastidor especial (figura 3.76). Posteriormente se coloca la pieza del bastidor especial que transmite a la probeta la fuerza tangencial y se posiciona el actuador dinámico y el actuador hidráulico horizontal (figura 3.77).

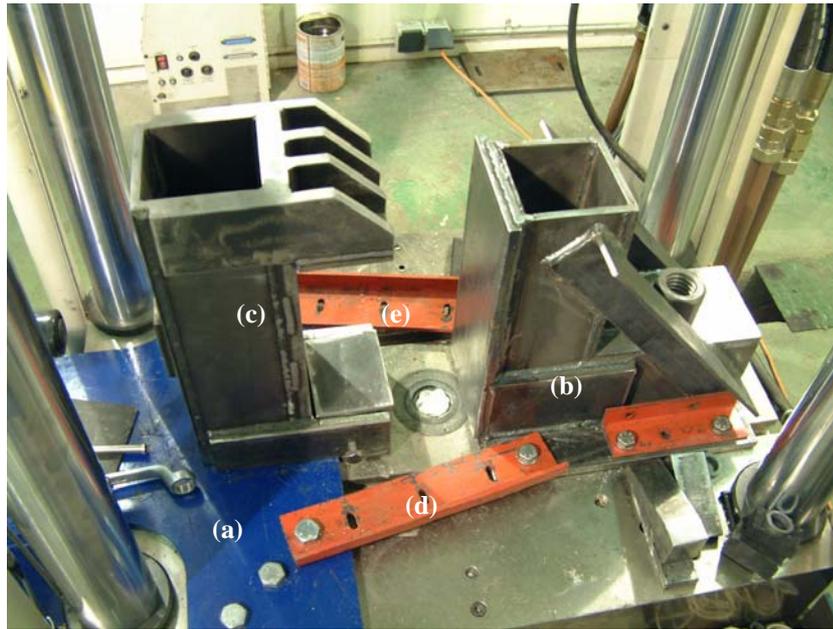


Figura 3.76 — Montaje de los contrafuertes y piezas móviles a la plataforma de carga: (a) anclaje de la base del actuador lateral; (b) anclaje del bastidor especial y reacción de la fuerza horizontal; (c) pieza del bastidor especial que solo permite el desplazamiento horizontal, transmite la fuerza normal a la probeta; (d) y (e) tirantes de fijación de los contrafuertes *a* y *b*.

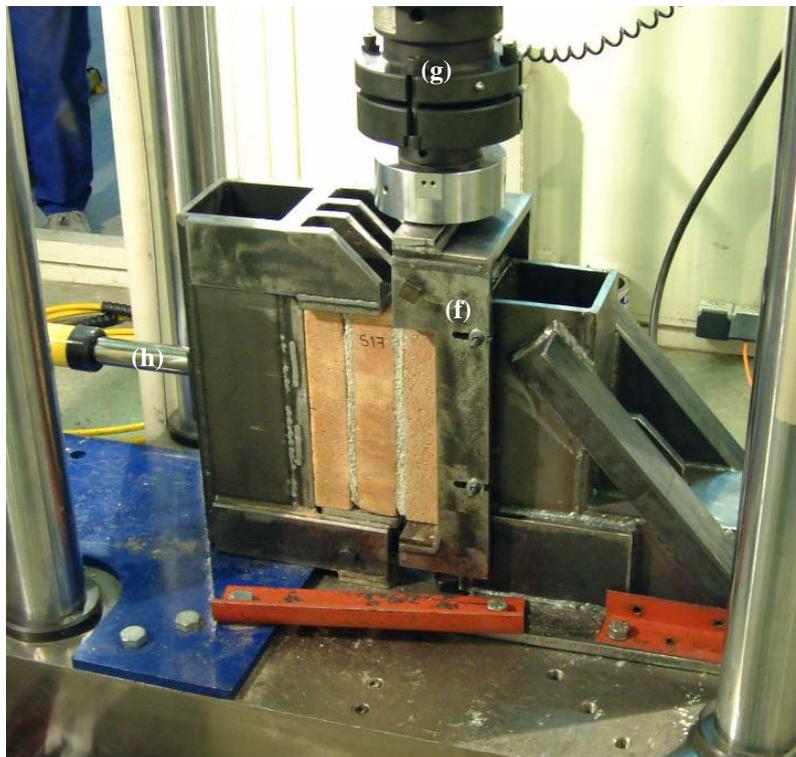


Figura 3.77 — Montaje completo del bastidor especial y colocación de la probeta: (f) pieza del bastidor especial que transmite la fuerza tangencial a la probeta y solo permite el desplazamiento vertical; (g) posicionamiento del actuador dinámico; (h) colocación del actuador horizontal.

CAPÍTULO

4

EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En éste capítulo se describe la ejecución de los ensayos de las campañas experimentales; se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos.

El capítulo incluye cinco subapartados, en los que se despliega la información referente a cada una de las campañas. Su numeración corresponde con la secuencia progresiva de los subapartados del capítulo 3. En la tabla 4.1 se describe el contenido de los subapartados de este capítulo.

<i>Subapartado</i>	<i>Contenido</i>
4.1. INTRODUCCION	Se describe el contenido del capítulo y los parámetros generales de las campañas experimentales.
4.2. ROTURA DE PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO	Se describen las condiciones, programación y ejecución de los ensayos realizados a los 7 paneles, así como los resultados obtenidos.
4.3. ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP	Se describe la ejecución de algunos ensayos representativos de los 10 grupos que conforman la campaña, así como el comportamiento mecánico y resistente. Se presentan los resultados generales.
4.4. ROTURA DE PANELES REFORZADOS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP	Se describe la ejecución de todos los ensayos que conforman la campaña (6 paneles), y los resultados obtenidos.
4.5. ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS MATERIALES	Se describe la ejecución de algunos ensayos representativos de los 15 grupos que conforman la campaña; y se presentan los resultados.

Tabla 4.1 — Contenido de los subapartados del capítulo 4.

El proceso de ejecución de las campañas relativas a rotura de paneles reparados con inyección y restitución de conglomerantes (4.2) y, rotura de paneles reforzados con tejidos y laminados CFRP (4.4.) es similar. Sin embargo las dos campañas persiguen diferentes ámbitos de estudio: reparación y refuerzo, respectivamente. En las dos campañas, el número de especímenes estudiados es reducido, por lo que se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo.

Contrariamente a lo anterior, y debido al extenso número de ensayos incluidos en las campañas rotura de probetas reforzadas con tejidos y laminados CFRP (4.3.) y, Rotura de probetas reforzadas con compuestos FRP y otros materiales (4.5.); en estos casos se despliega únicamente la descripción de los resultados generales de los grupos característicos, con algunos ejemplos representativos de las curvas $\sigma - \epsilon$ registradas.

4.2. ROTURA DE PANELES REPARADOS CON INYECCIÓN DE RESINA LÍQUIDA EPOXI Y RESTITUCION PARCIAL DE MORTERO

4.2.1. Introducción

En el apartado 3.2 del capítulo anterior se han descrito las características generales de la campaña experimental, incluyendo el procedimiento de ensayo. En el presente apartado se describe la de ejecución de los mismos. Cada ensayo se describe en un subapartado independiente e incluye las curvas de comportamiento tensión-deformación vertical y horizontal, principalmente. Se mencionan los valores de carga tangencial última registrada.

La carga vertical aplicada a todos los paneles en la primera fase del proceso es igual a 200 kN; y la tensión normal generada en los especímenes es de 1.2 N/mm^2 .

4.2.2. Ensayo del panel 1

Durante la fase de carga vertical, el panel presenta ligera deformación lineal debida a la compresión, hasta alcanzar una carga normal de 100 kN aproximadamente, que posteriormente se reduce de forma gradual hasta llegar a ser imperceptible, al alcanzar una tensión normal máxima, igual a 1.2 N/mm^2 (figura 4.1-a).

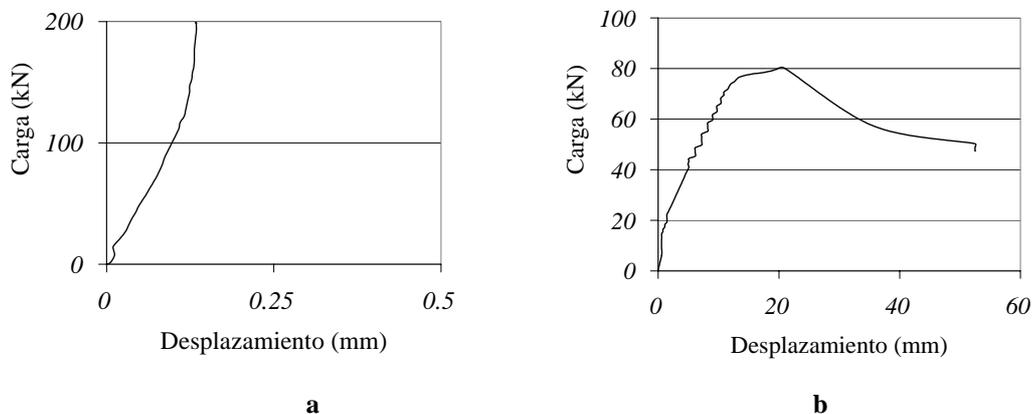


Figura 4.1 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 1.

Durante la fase de carga tangencial, inicialmente se presenta un comportamiento lineal, hasta superar una carga de 70 kN. Entonces se presenta un breve incremento en la deformación y el fallo (figura 4.1-b).

El fallo del panel reproduce la línea de fisura que presenta antes de ser reparado (figura. 4.2 a y b).



Figura 4.2 — Panel 1 reparado antes de ser ensayado (a); rotura después del ensayo (b).

El desplazamiento registrado por los extensómetros *f* y *g* muestra mayor amplitud de la fisura en el extremo cercano al punto de aplicación de la carga (figura 4.3 ay b).

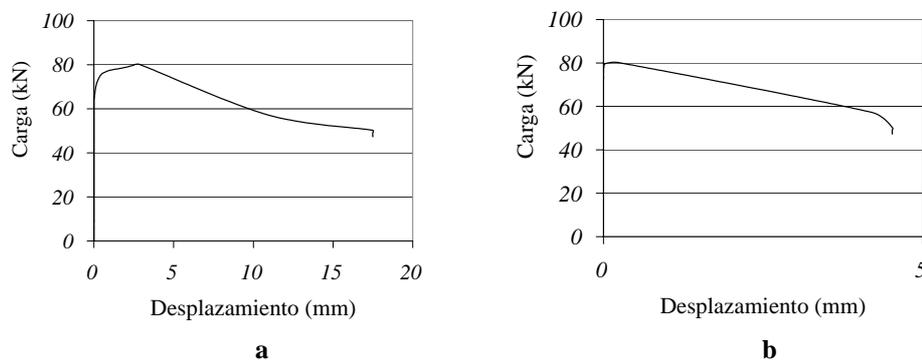


Figura 4.3 — Desplazamiento registrado por los extensómetros *f* (a) y *g* (b) conforme al esquema descrito en la figura 3.9 del capítulo 3.

4.2.3. Ensayo del panel 2

Durante la fase de carga vertical el panel exhibe una deformación superior a 5 mm y un ajuste mecánico hacia el final de la rampa de carga. Una vez sujeto a la carga vertical máxima el panel es estable. El desplazamiento vertical se obtiene de la lectura de los extensómetros *c* y *d* (figura 3.13 del capítulo 3). La figura 4.4-a muestra la curva carga-desplazamiento vertical.

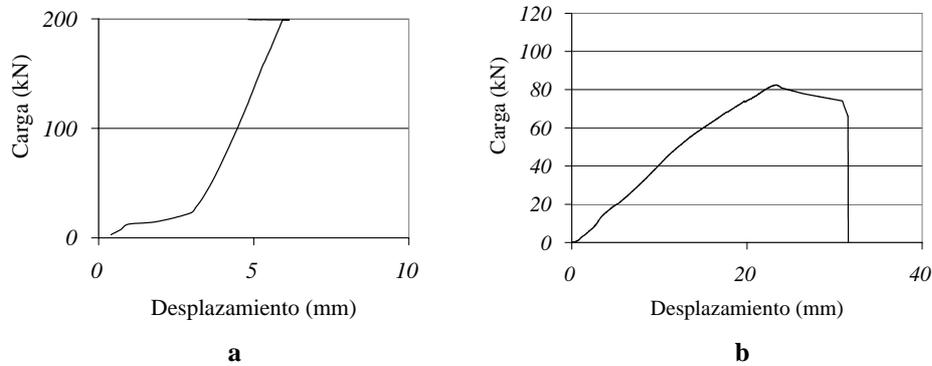


Figura 4.4 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 2.

En la fase de carga horizontal el panel mantiene rigidez hasta alcanzar 80 kN, en donde experimenta un drástico cambio con un ajuste mecánico y enseguida reduce su resistencia gradualmente. La rotura ocurre en la línea de fractura intervenida en la reparación (figura 4.5) y la carga tangencial última es 82.4 kN.



Figura 4.5 — Rotura del panel 2.

4.2.4. Ensayo del panel 3

El panel 3 durante la aplicación de la carga vertical presenta una deformación menor que un milímetro (figura 4.6-a) siendo estable cuando alcanza la carga normal máxima.

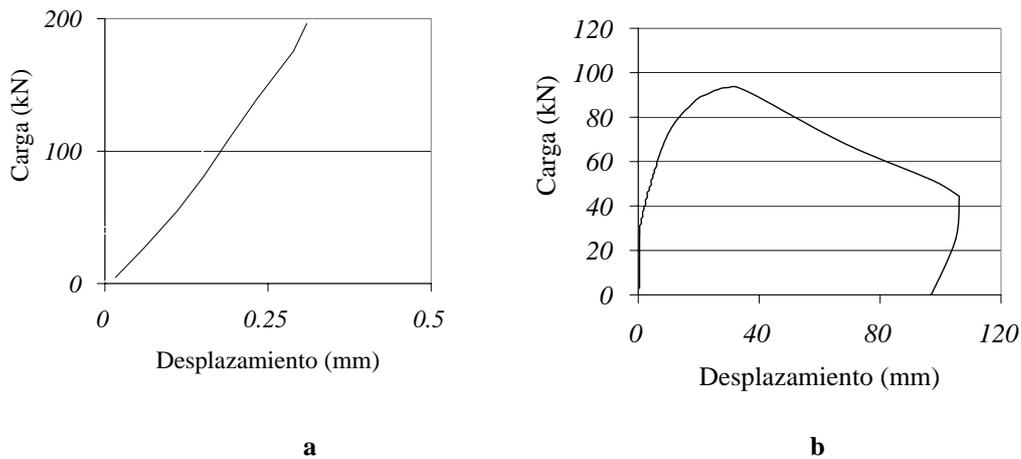


Figura 4.6 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 3.

En la fase de compresión tangencial el panel inicia deformación prematuramente; con un desplazamiento de varios centímetros. Sin embargo el fallo ocurre cuando la fuerza de horizontal es de 93.6 kN (figura 4.6-b). Se observa que el fallo del panel ocurre en una zona alterna a la línea de fisura reparada (figura 4.7).

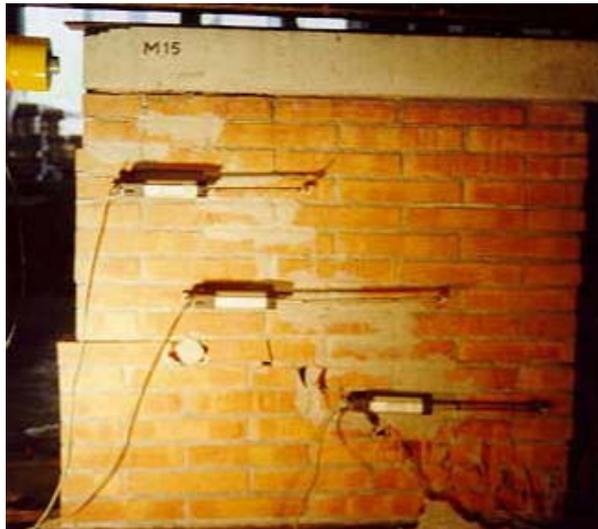


Figura 4.7 — Rotura del panel 3.

Los datos registrados a través de las células de carga y las tensiones normal y horizontal última se refieren en la tabla 4.2, al final de éste subapartado.

4.2.5. Ensayo del panel 4

La deformación del panel 4 durante la fase de carga vertical es apenas perceptible. En la figura 4.8-a se presenta la curva carga-desplazamiento, cuyo valor máximo es cercano a 0.125 mm.

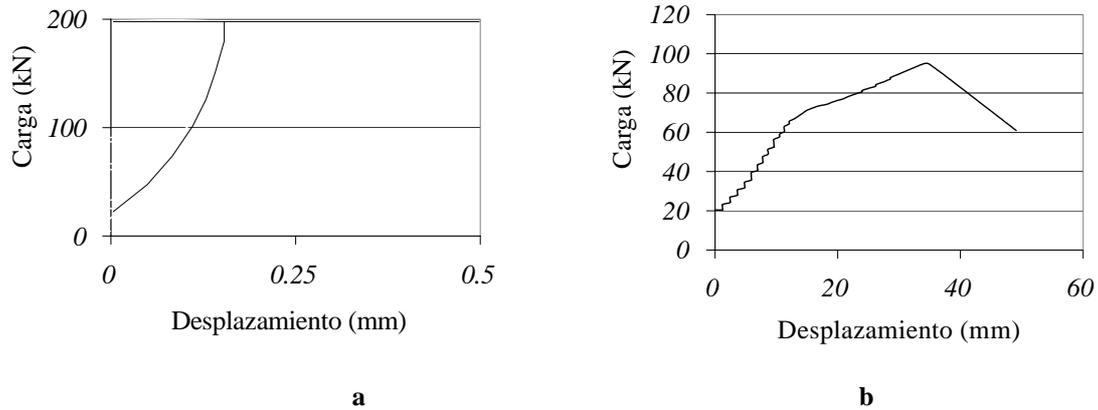


Figura 4.8 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 4.

La deformación inicia prematuramente (figura 4.8-b). Tras una fase de ajuste mecánico, el panel presenta deformación lineal en el comienzo, con un incremento perceptible cuando se acerca a su resistencia máxima. El fallo ocurre cuando la fuerza es superior a 95 kN. El comportamiento del panel ante la incidencia de carga horizontal es similar al mostrado por el panel 3: la rotura forma una línea externa a la zona reparada (figura 4.9). La carga horizontal última es 94.7 kN.



Figura 4.9 — Rotura del panel 4.

Los datos registrados a través de las células de carga y las tensiones normal y horizontal última se refieren en la tabla 4.2.

4.2.6. Ensayo del panel 5

Durante la aplicación de la carga de compresión, el panel 5 presenta poca deformación y se mantiene estable (figura 4.10-a).

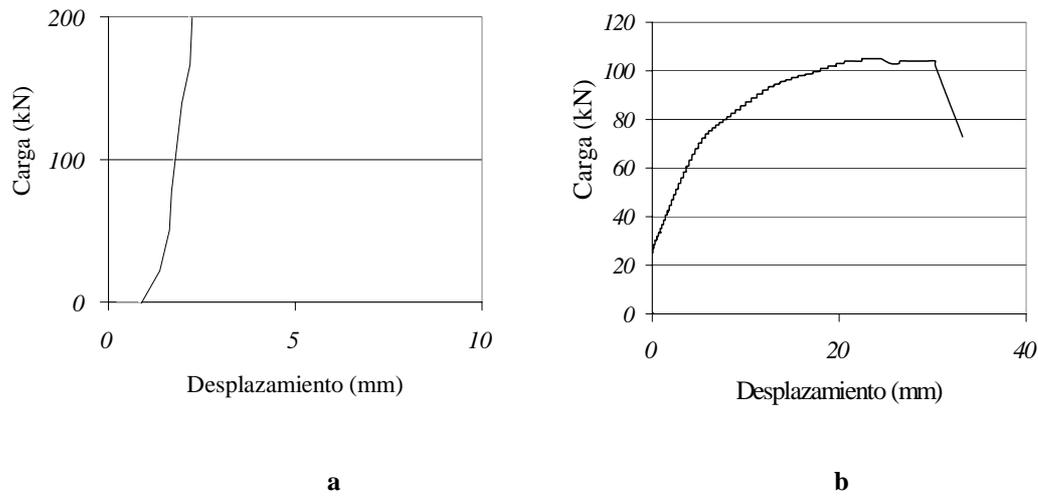


Figura 4.10 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 5.

La deformación del panel 5 inicia rápidamente; sin embargo la resistencia máxima alcanza un alto valor y el comportamiento tiene una marcada tendencia plástica que mantiene cierta estabilidad en la última fase resistente (figura 4.10-b).

La línea de fisura se forma fuera de la zona reparada (figura 4.11) con un fallo predominantemente por deslizamiento en las juntas horizontales inferiores, con fractura de algunas piezas y que manifiesta aplastamiento en el vértice opuesto al punto de transmisión de la carga horizontal (zona marcada en la figura).



Figura 4.11 — Rotura del panel 5.

Los datos registrados a través de las células de carga y las tensiones normal y horizontal última se refieren en la tabla 4.2.

4.2.7. Ensayo del panel 6

La compresión de la carga vertical ocasiona muy poca deformación en el panel 6 (figura 4.12-a). El panel mantiene estabilidad durante la totalidad del ensayo. Presenta deformación desde el inicio de la aplicación de la carga horizontal y muestra una deformación progresiva a medida que la fuerza horizontal aumenta. En la fase final presenta un pico resistente (figura 4.12-b).

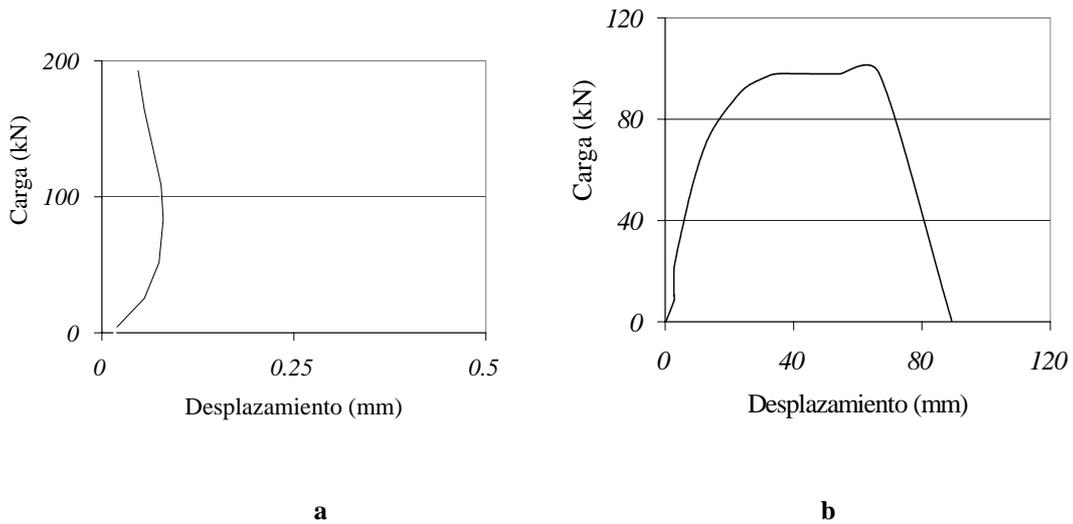


Figura 4.12 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 6.

El mecanismo de fallo hace evidente la magnitud del daño en el panel antes de la reparación: muestra marcada fragmentación; y aunque exhibe una elevada resistencia máxima, la línea de fisura ocurre fuera de línea principal de la rotura original (figura 4.13).



Figura 4.13 — Rotura del panel 6.

4.2.8. Ensayo del panel 7

El panel 7 presenta clara deformación durante la fase de pre-compresión. Se registran 7mm en promedio (figura 4.14-a). Cuando la fuerza de compresión lateral es cercana a 30 kN el panel inicia una fase lineal de deformación que mantiene hasta superar los 80 kN. Entonces la deformación aumenta y continua su trayectoria hasta alcanzar la carga máxima (figura 4.14-b).

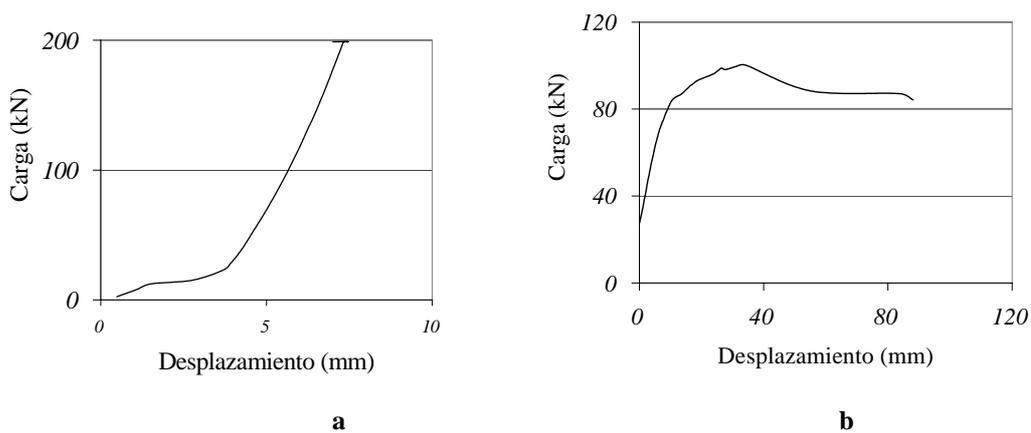


Figura 4.14 — Curvas carga-desplazamiento vertical (a) y horizontal (b) del panel 7.

Durante el fallo, la viga de hormigón se desprende del panel y desplaza varios centímetros; posteriormente el panel desarrolla una nueva línea de rotura que va desde la parte media superior hacia el vértice opuesto a la aplicación de la carga (figura 4.15-a). Las zonas oscuras del mortero y las piezas (figura 15-b) permiten distinguir claramente la eficaz impregnación de la resina líquida.



Figura 4.15 — Rotura del panel 7.

4.2.9. Resumen de resultados

Los valores resistentes obtenidos en la campaña actual se muestran en la tabla 4.2; destacan el panel 5 y el panel 1, que alcanzan la mayor y menor resistencia a la carga tangencial, respectivamente, con valores últimos iguales a 105.2 y 80.2 kN.

Entre paréntesis y en cursiva se muestran los códigos de identificación de los ensayos precedentes correspondientes (paneles no reparados) realizados por Sánchez en 2001, en donde se emplean valores de tensión normal que van de 0.89 hasta 5.95 N/mm².

<i>Ensayo</i>	<i>Carga normal (kN)</i>	σ_n <i>(N/mm²)</i>	<i>Carga tangencial última (kN)</i>	τ <i>(N/mm²)</i>
Panel 1 <i>(M25V11H)</i>	200 <i>(250)</i>	1.2 <i>(1.5)</i>	80.2 <i>(110.03)</i>	0.48 <i>(0.65)</i>
Panel 2 <i>(M25V12H)</i>	200 <i>(250)</i>	1.2 <i>(1.5)</i>	82.4 <i>(114.83)</i>	0.49 <i>(0.68)</i>
Panel 3 <i>(M40V14H)</i>	200 <i>(400)</i>	1.2 <i>(2.4)</i>	93.6 <i>(142.77)</i>	0.56 <i>(0.85)</i>
Panel 4 <i>(M15V8H)</i>	200 <i>(150)</i>	1.2 <i>(0.9)</i>	94.7 <i>(80.17)</i>	0.56 <i>(0.48)</i>
Panel 5 <i>(M80V23H)</i>	200 <i>(800)</i>	1.2 <i>(4.8)</i>	105.2 <i>(236)</i>	0.63 <i>(1.40)</i>
Panel 6 <i>(M50V19H)</i>	200 <i>(500)</i>	1.2 <i>(3)</i>	98.1 <i>(191.63)</i>	0.58 <i>(1.14)</i>
Panel 7 <i>(M65V21H)</i>	200 <i>(650)</i>	1.2 <i>(3.9)</i>	100 <i>(207.18)</i>	0.60 <i>(1.23)</i>
<i>M40V13H</i>	<i>400</i>	<i>2.4</i>	<i>135.75</i>	<i>0.81</i>
<i>M50V18H</i>	<i>500</i>	<i>3</i>	<i>185</i>	<i>1.10</i>
<i>M100V18H</i>	<i>1000</i>	<i>5.9</i>	<i>186.65</i>	<i>1.11</i>

Tabla 4. 2 — Valores resistentes obtenidos en esta campaña.

4.3. ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP

4.3.1. Introducción

Como se ha descrito en el subapartado 3.3 del capítulo 3, la campaña experimental esta constituida por diez conjuntos de ensayos, de probetas de obra de fábrica reforzadas con laminado o tejido CFRP.

Las probetas son sometidas a un proceso de carga uniaxial, generada por un actuador dinámico; y el proceso de ensayo consiste en la aplicación de una rampa de carga, controlada por desplazamiento de forma automática, a una velocidad de 0.05 mm/s.

Durante los ensayos se registra la fuerza transmitida por el actuador a través de la célula de carga integrada de la maquina de ensayo; y el desplazamiento es monitoreado por el controlador del sistema informático del conjunto. De esta forma se obtienen datos numéricos, con los cuales se definen las curvas fuerza-desplazamiento de los ensayos.

En el proceso de refuerzo se consideran principalmente tres parámetros: el patrón geométrico de aplicación de los laminados o tejidos; la relación A_r/A_t (producto de la superficie reforzada dividida entre la superficie total) y; la aplicación de refuerzo en una o dos caras de las probetas. Las variables elegidas para el estudio definen las características de los conjuntos de ensayos (ver tabla 3.4 del capítulo 3).

En los subapartados que se presentan a continuación se describe la ejecución de los ensayos de todos los conjuntos y se muestran las curvas fuerza-deformación representativas. Las curvas carga-deformación corresponden al valor promedio y al comportamiento regular de cada grupo. Posteriormente se presenta un resumen de los mencionados valores medios registrados en los grupos de probetas.

4.3.2. Ensayos del conjunto *Sin*

La media de la resistencia límite de las probetas sin refuerzo es de 23.5 kN. El comportamiento es básicamente lineal hasta la rotura; y presentan un modo de fallo frágil.

La figura 4.16 muestra la curva carga-desplazamiento de uno de los especímenes (dicha curva de deformación y, las correspondientes a ensayos representativos de todos los grupos mostradas a continuación, representan la deformación de las probetas registrada durante los ensayos; y debe observarse que la utilización de placas de neopreno incrementa varios milímetros de la deformación registrada).

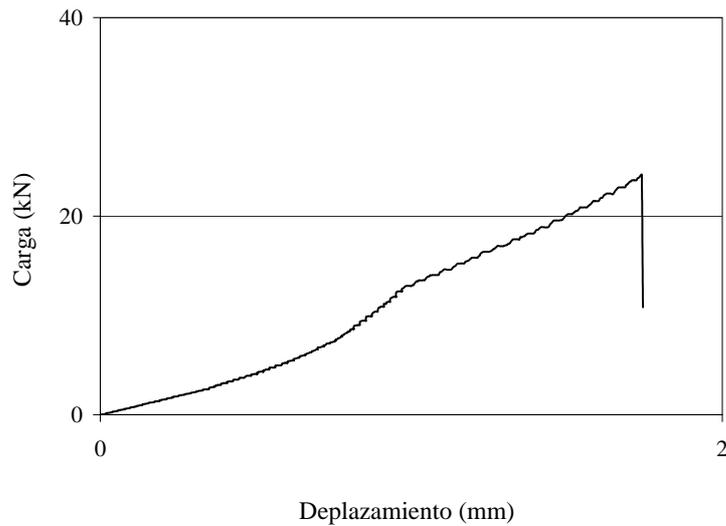


Figura 4.16 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto *SIN*.

En la figura 4.17 puede verse una de las probetas sin refuerzo colocada bajo el actuador dinámico.



Figura 4.17 — Probeta no reforzada situada bajo el actuador dinámico antes de ser ensayada.

4.3.3. Ensayos del conjunto *Par*

El primer conjunto de probetas reforzadas analizado determina el desempeño de las aplicaciones de laminado, en sentido paralelo a la dirección de la aplicación de la carga.

El sentido de las fibras es longitudinal en el laminado y paralelo a las juntas y a la carga cortante. Por tanto el sentido predominante de la transmisión de tensiones en los laminados, es paralelo a las juntas de mortero; sin embargo las probetas revelan un considerable incremento resistente: alcanzando una carga máxima promedio de 50.8 kN.

En la figura 4.18 se presenta la curva carga-desplazamiento de uno de los especímenes.

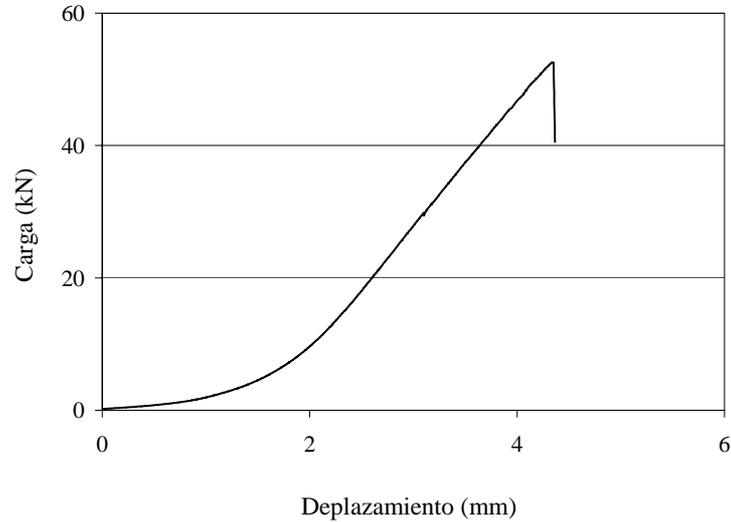


Figura 4.18 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto *Par*.

Los ensayos corroboran que, aún cuando la orientación paralela del laminado respecto a los esfuerzos no es recomendable, en éstos casos aporta considerable incremento. En la figura 4.19-a puede verse uno de los especímenes antes de la ejecución; y en la figura 4.19-b se denota el fallo longitudinal del laminado y su permanencia sobre la superficie, debido a la eficacia de la adherencia.

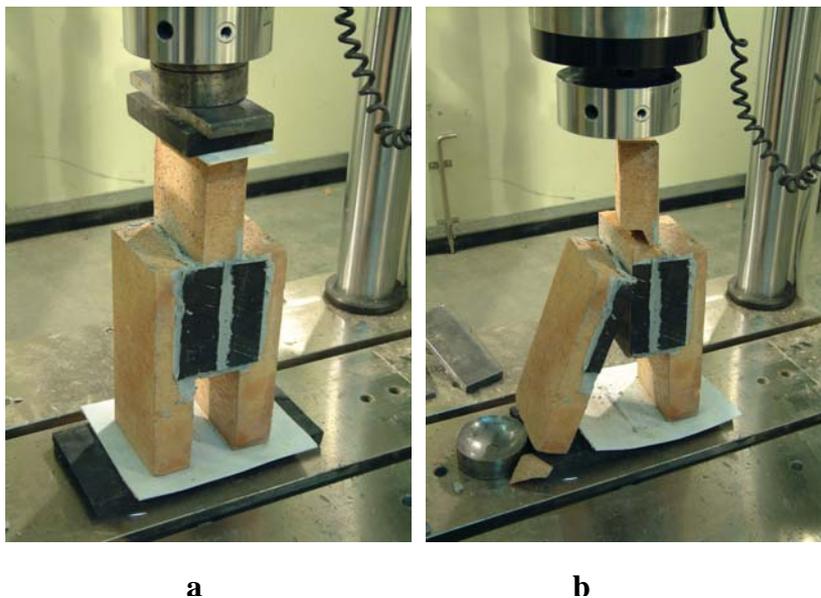


Figura 4.19 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado paralelamente a la dirección de la carga: (a) antes del ensayo; (b) después de la ejecución.

4.3.4. Ensayos del conjunto *Per*

Las aplicaciones de laminado en dirección perpendicular a la carga cortante revelan un incremento cercano a la resistencia media de 50.2 kN. La figura 4.20 muestra la curva carga-deformación obtenida en uno de los ensayos del conjunto *Per*.

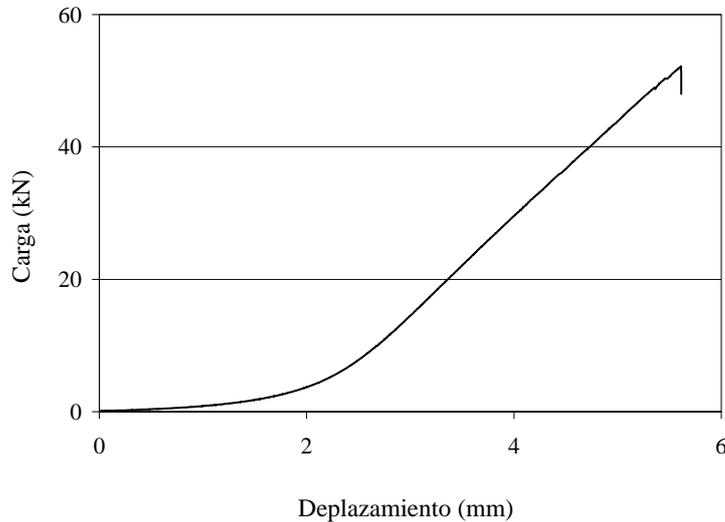


Figura 4.20 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto *Per*.

La orientación perpendicular del laminado en relación al sentido de la carga no es recomendada por el fabricante; sin embargo las aplicaciones analizadas muestran un incremento considerable. La figura 4.21 a y b muestran la probeta antes del proceso y un detalle del estado posterior al ensayo.

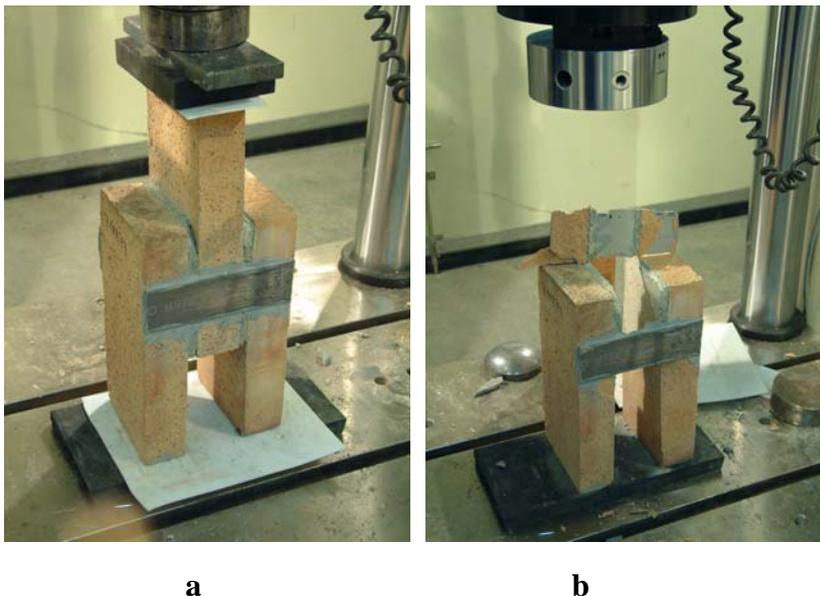


Figura 4.21 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en sentido perpendicular a la dirección de la carga: (a) antes del ensayo; (b) después de la ejecución.

4.3.5. Ensayos del conjunto *D*

La aplicación diagonal de laminado revela una resistencia última promedio igual a 50.4 kN. El comportamiento durante el proceso de ensayo de los grupos reforzados con laminado CFRP es iterativo. En la figura 4.22 puede verse la curva de comportamiento tipo de uno de los especímenes.

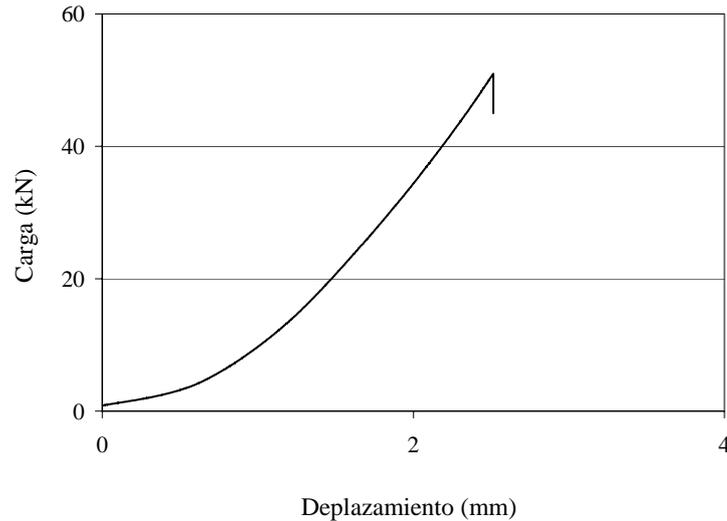


Figura 4.22 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto *D*.

La figura 4.23 muestra una de las probetas del conjunto *D* antes del ensayo.



Figura 4.23 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en sentido diagonal a la dirección de la carga y a las juntas de mortero.

4.3.6. Ensayos del conjunto V

Otra aplicación analizada consiste en dos segmentos del laminado CFRP, colocados en diagonal y apuntados hacia abajo y al centro, en una cara de las probetas. Este patrón de aplicación aporta menor incremento resistente que los casos anteriores, máxime por la aplicación en solo una cara: las probetas alcanzan en promedio una resistencia última de 33 kN (figura 4.24).

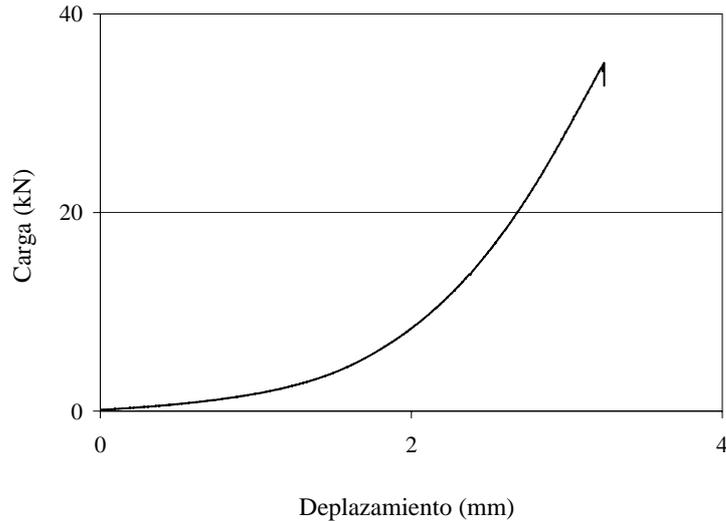


Figura 4.24 — Curva carga-desplazamiento de un ensayo del conjunto V.

En la figura 4.25 se observa una de las probetas antes de ser ensayadas y el patrón geométrico de aplicación del laminado.



Figura 4.25 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en dos segmentos contrapuestos en diagonal y apuntados hacia la base en las dos caras.

4.3.7. Ensayos del conjunto X

El conjunto de probetas reforzadas con la aplicación de dos segmentos de laminado con orientación diagonal respecto a las juntas de mortero, formando una cruzeta, presentan una media de incremento resistente igual a 71.2 kN (figura 4.26).

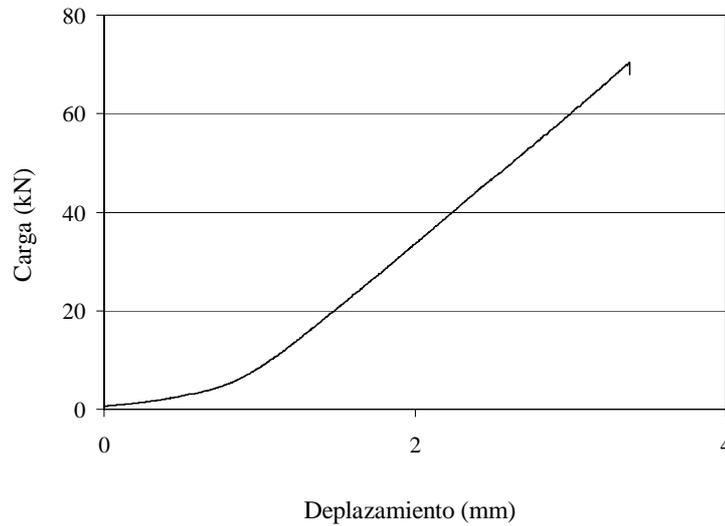


Figura 4.26 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto X.

En la figura 4.27-a se presenta el espécimen antes de ser ensayado. El fallo de los especímenes ocurre en las zonas de adherencia entre las piezas y el laminado. Sin embargo no falla la interfase; la fuerte adherencia provoca el desconchado del substrato superficial de las piezas de fabrica (figura 4.27-b).

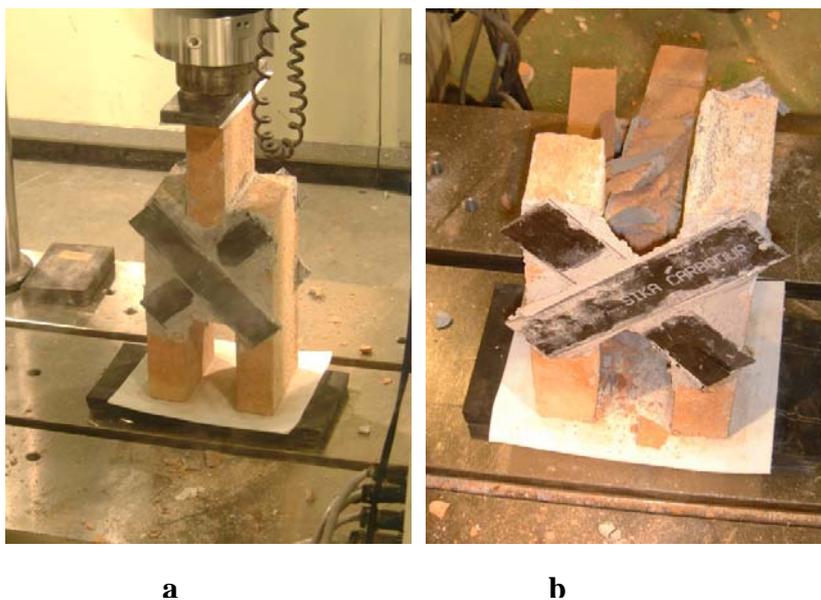


Figura 4.27 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en dos segmentos contrapuestos, formando una cruzeta en diagonal.

4.3.8. Ensayos del conjunto W_{par}

En el conjunto de ensayos W_{par} la orientación de las fibras de carbono es paralela a las juntas de mortero y a la dirección de la carga cortante. Las probetas no presentan incremento resistente y el valor promedio es ligeramente inferior al obtenido en el conjunto de control, con un promedio de 20.5 kN (figura 4.28).

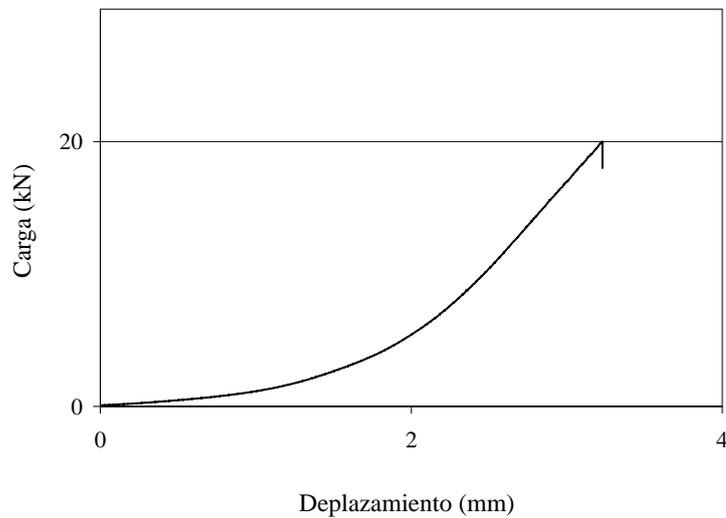


Figura 4.28 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto W_{par} .

La figura 4.29-a muestra una de las probetas del conjunto W_{Par} antes del ensayo. En la figura 4.29-b puede verse la rotura del espécimen, que ocurre en una de las juntas de mortero, con una clara línea de corte en el tejido $CFRP$.

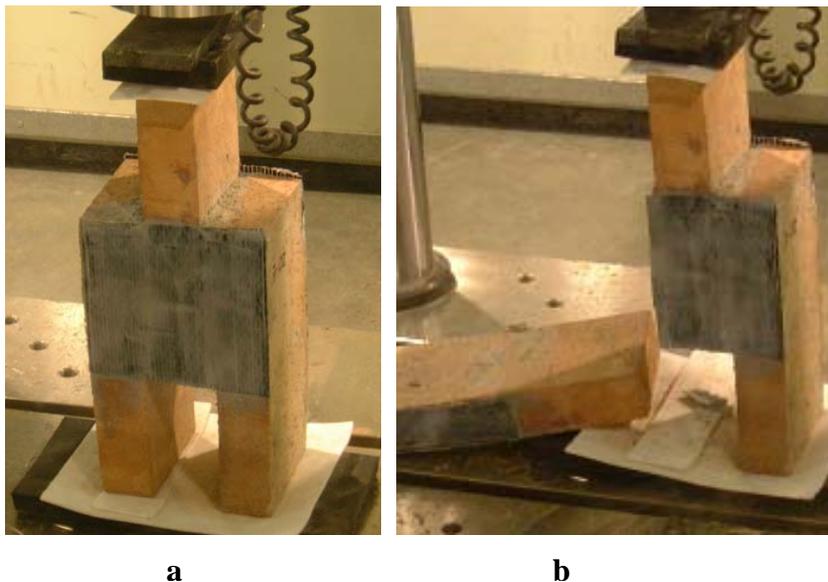


Figura 4.29 — Probeta reforzada con laminado CFRP aplicado en dos segmentos contrapuestos en diagonal, formando una cruceta.

4.3.9. Ensayos del conjunto W45

En este conjunto de probetas reforzadas con tejido de fibra de carbono, la dirección de las fibras resistentes se orienta formando un ángulo de 45° respecto a la carga y a las juntas de mortero. Las probetas muestran un incremento resistente que supera en un 84.5% a la carga última promedio registrada en las probetas sin refuerzo, con una carga última promedio de 48.8 kN (figura 4.30).

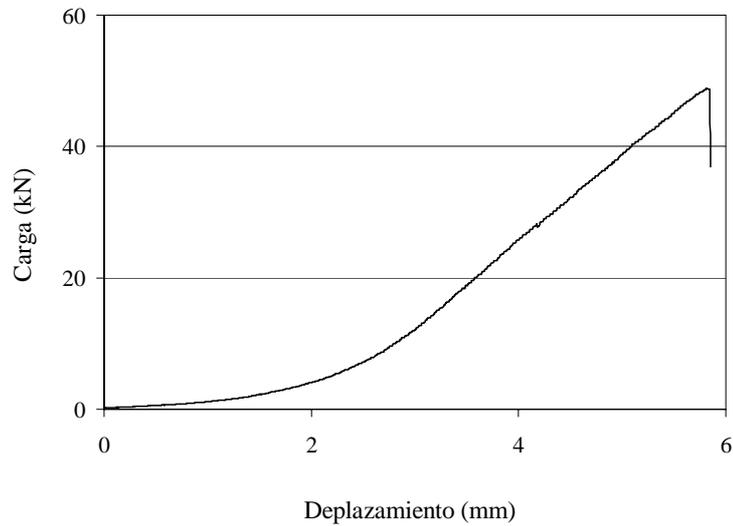


Figura 4.30 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto W45.

En la figura 4.31-a puede verse una de las probetas del conjunto W45 reforzadas con compuesto de tejido de fibra de carbono. La eficacia de la adherencia del tejido a la fábrica induce a que durante el fallo se desprenda una capa superficial de las piezas, quedando fija en el tejido (figura 4.31-b).

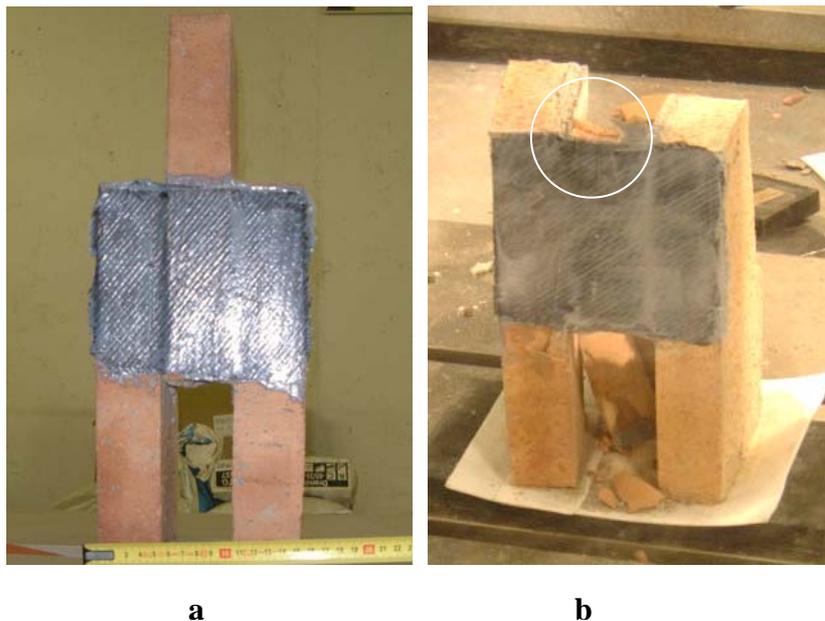


Figura 4.31 — Probeta reforzada con tejido de fibra de carbono: (a) tejido aplicado en sentido perpendicular a la carga y a las juntas de mortero; (b) pieza de fábrica central desplazada.

4.3.10. Ensayos del conjunto WZ45

La aplicación del laminado a manera de zuncho influye considerablemente en la resistencia última. En el conjunto de probetas WZ45 las mechas de tejido de fibra de carbono forman también un ángulo aproximado a 45° respecto a la dirección de la fuerza vertical. Las probetas alcanzan una resistencia última de 60.3 kN, superando en 138% al promedio de las probetas no reforzadas (figura 4.32).

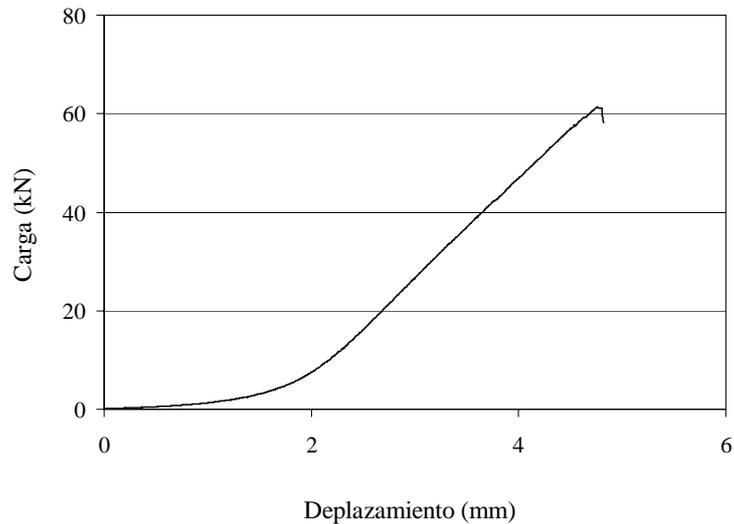


Figura 4.32 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto WZ45.

En la figura 4.33-a se muestra un espécimen antes del ensayo. Durante el fallo el tejido desprende una capa superficial de las piezas. la pieza de fábrica central cede y se desplaza debido a la carga tangencial aplicada. (figura 4.33-b).

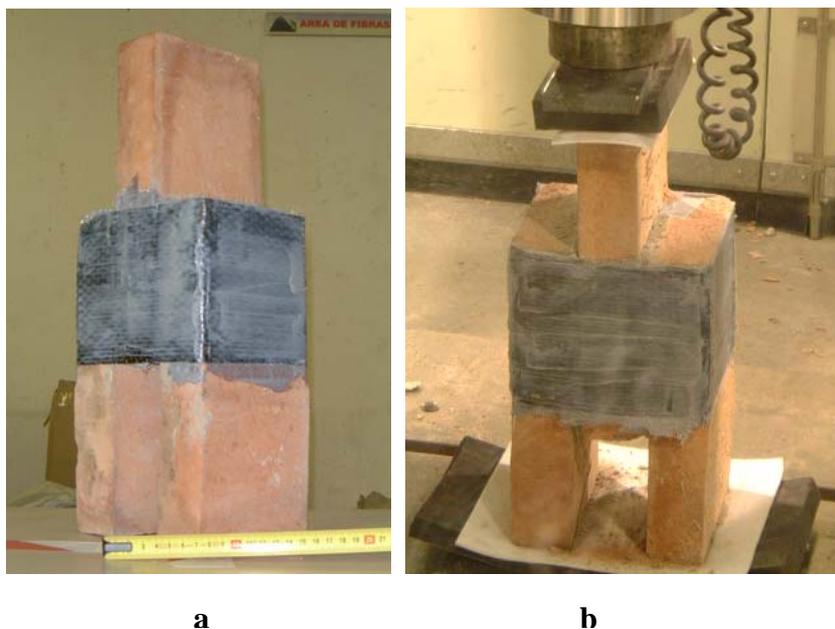


Figura 4.33 — Probeta reforzada con tejido de fibra de carbono: (a) tejido aplicado en sentido diagonal respecto a la carga y a las juntas de mortero; (b) desplazamiento de la pieza de fábrica central.

4.3.11. Ensayos del conjunto WZ45d

En el conjunto *WZ45d* se emplean dos capas de refuerzo perpendiculares entre sí y formando un ángulo de 45° respecto a la dirección de la aplicación de la carga. Con este proceso de refuerzo se obtiene la resistencia más alta de la campaña: en promedio 79.4 kN, que supera en un 242 % la resistencia promedio del conjunto *SIN*, de probetas no reforzadas (figura 4.34).

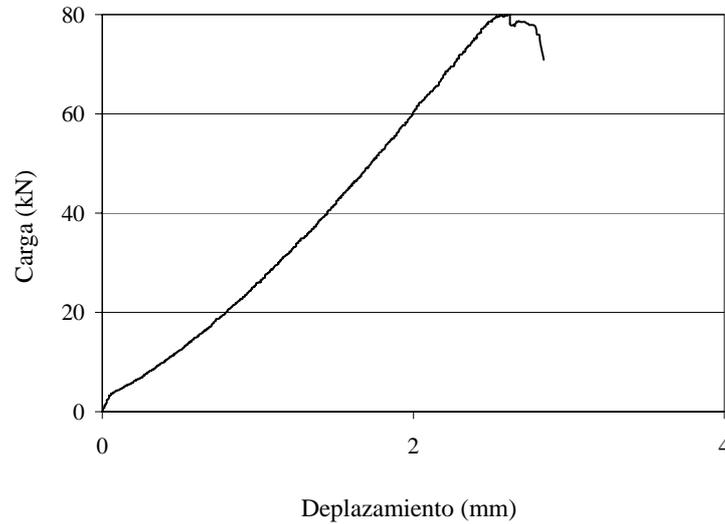


Figura 4.34 — Curva carga-desplazamiento de un espécimen del conjunto *W45d*.

El modo de fallo es similar al presentado por el grupo de ensayos anterior (subapartados 4.3.9 y 4.3.10). La pieza de fábrica central se desplaza y la dos piezas exteriores y el refuerzo continúan ejerciendo resistencia. En las letras a y b de la figura 4.35 puede verse una de las probetas antes de ser ensayada, en la cual se puede percibir la textura del tejido resistente y, el desplazamiento de la pieza central durante la fase posterior a la carga máxima.

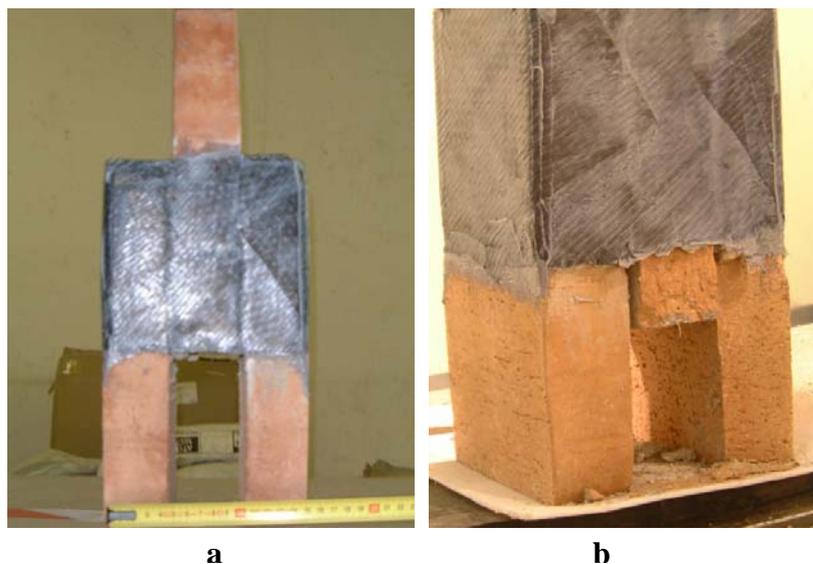


Figura 4.35 — Probeta reforzada con tejido de fibra de carbono: (a) tejido aplicado en dos capas, en sentido diagonal respecto a la carga y a las juntas de mortero; (b) pieza de fábrica central desplazada.

4.3.12. Parámetros de medición y resumen de resultados

Los parámetros obtenidos en la campaña experimental reflejan el desempeño de los tratamientos de refuerzo aplicados.

En la figura 4.36 se representan gráficamente dichos parámetros: v es la carga tangencial; δ es la deformación de la probeta; e es el espesor de las juntas de mortero y a es la suma de las áreas de las juntas de mortero.

Por tanto, la tensión tangencial $\tau = \frac{v}{a}$ y el módulo de deformación transversal $G = \frac{\tau}{\delta} e$

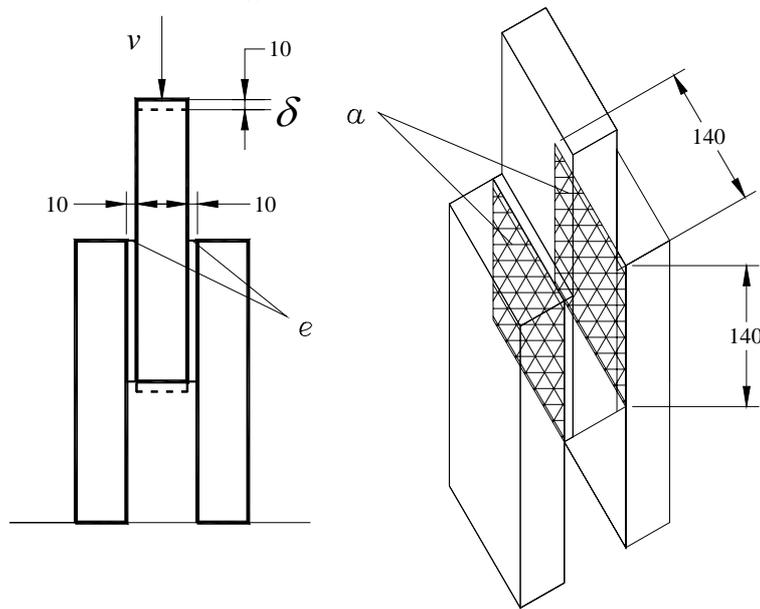


Figura 4.36 — Ilustración de los parámetros geométricos medidos en las probetas sometidas a carga cortante uniaxial.

En la tabla 4.3 se refieren los valores medios registrados en los grupos de probetas intactas y reforzadas.

Grupo	V (kN)	τ (N/mm ²)	δ (mm)	G (MPa)
Sin	23.5	0.60	1.75	6.85
Par	50.8	1.30	4.36	5.94
Per	50.2	1.28	5.61	4.57
D	50.4	1.29	2.50	10.29
V	33	0.84	3.24	5.20
X	71.2	1.82	3.38	10.75
WPar	20.5	0.52	3.02	3.46
W45	48.8	1.24	5.81	4.29
WZ45	60.3	1.54	4.82	6.38
WZ45d	79.4	2.03	2.72	14.89

Tabla 4.3 — Parámetros medios registrados grupos de probetas intactas y reforzadas con CFRP en los ensayos uniaxiales.

4.4. ROTURA DE PANELES REFORZADOS CON TEJIDOS Y LAMINADOS CFRP

4.4.1. Introducción

En los siguientes subapartados se describe la ejecución de los ensayos que conforman la campaña de rotura de paneles reforzados con tejidos y laminados CFRP. El procedimiento de ensayo (descrito en el apartado 3.4) es similar al realizado en los ensayos de la campaña de rotura de paneles reparados con inyección y restitución de conglomerantes (apartado 3.2).

Durante la fase de carga normal se aplica una fuerza de 250 kN al primer espécimen (panel 8) generando una tensión normal de 1.48 N/mm^2 . Se registra un nivel de rigidez muy alto y, debido a la rigidez, la carga normal es insuficiente para contrarrestar la carga tangencial; por lo que el empuje horizontal ocasiona el giro del espécimen, sobre el vértice opuesto al punto de aplicación de la carga (figura 4.37).

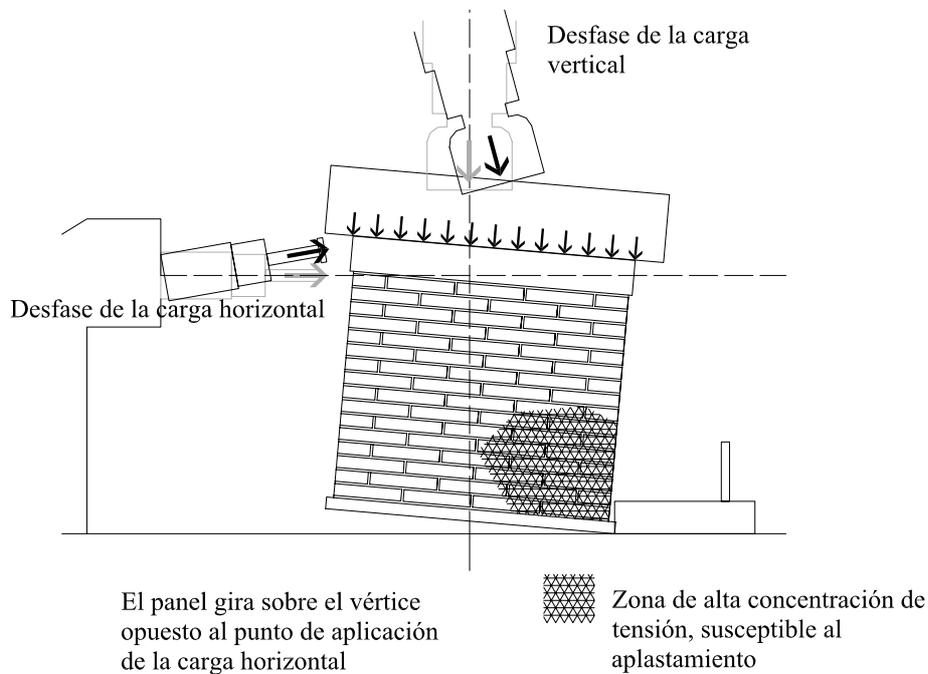


Figura 4.37 — Movimiento de los paneles reforzados debido a la rigidez.

Para reducir la susceptibilidad al vuelco en los ensayos subsecuentes (paneles 9, 10, 11, 12 y 13) se aumenta la carga normal a 500 kN, generando en los especímenes una tensión normal de 2.97 N/mm^2 . Sin embargo, aunque se detectan indicios de fallo en la fase final del proceso de carga tangencial, persiste el desequilibrio entre las cargas normal y tangencial; y la elevada tensión provocada por el refuerzo en los paneles. Todos los especímenes, a excepción del fallo por aplastamiento del panel 13, tienden al vuelco en la fase última de carga.

En los siguientes apartados se relatan los procesos de ejecución de los ensayos y los modos de fallo registrados. Posteriormente se presenta el análisis de la información obtenida. El desplazamiento registrado en los paneles no se considera representativo del comportamiento normal de especímenes reforzados.

4.4.2. Ensayo del panel 8

Durante el proceso de carga normal el comportamiento del panel 8 es estable. Se aplica una fuerza de 250 kN a razón de 1kN/s, que genera una tensión de 1.49 N/mm^2 .

En la fase de aplicación de la carga tangencial, el panel muestra alta rigidez; cuando la fuerza transmitida supera 120 kN el panel tiende a girar sobre el vértice opuesto al punto de aplicación de la carga (figura 4.38-a).

El ensayo es detenido cuando la fuerza horizontal aplicada es igual a 128.6 kN y el panel presenta indicios de desprendimiento del compuesto formado por el laminado CFRP y el adhesivo epoxi, en la zona de mayor concentración de tensión (figura 4.38-b).

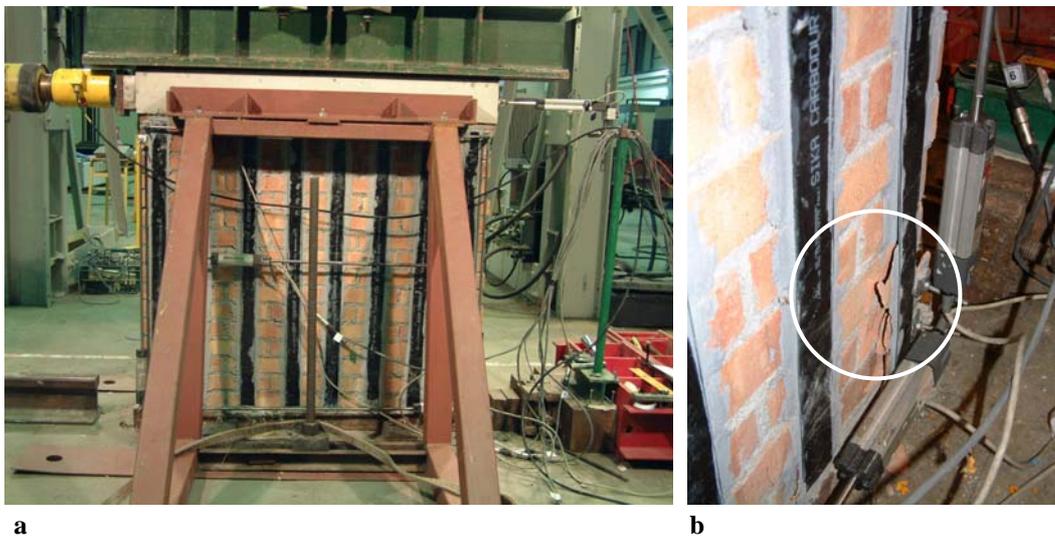


Figura 4.38 — Ensayo del panel 10: (a) antes del ensayo; (b) detalle del inicio de desprendimiento.

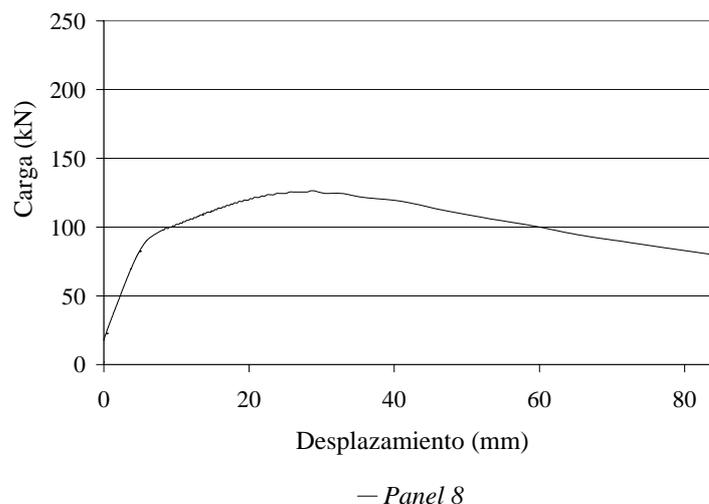


Figura 4.39 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 8.

4.4.3. Ensayo del panel 9

Durante el proceso de carga normal, el comportamiento del panel es estable. Se aplica una compresión de 500 kN a razón de 1kN/s, y se genera una tensión igual a 2.98 N/mm². Ante el proceso de aplicación de la carga horizontal, el panel muestra alta rigidez: cuando la fuerza transmitida supera 230 kN el panel tiende a girar sobre el vértice opuesto al punto de aplicación de la carga (figura 4.40-a).

Se interrumpe el ensayo cuando la fuerza horizontal aplicada es igual a 235,60 kN. El panel presenta algunos indicios de desprendimiento entre el compuesto de laminado CFRP y el adhesivo epoxi (figura 4.40-b).

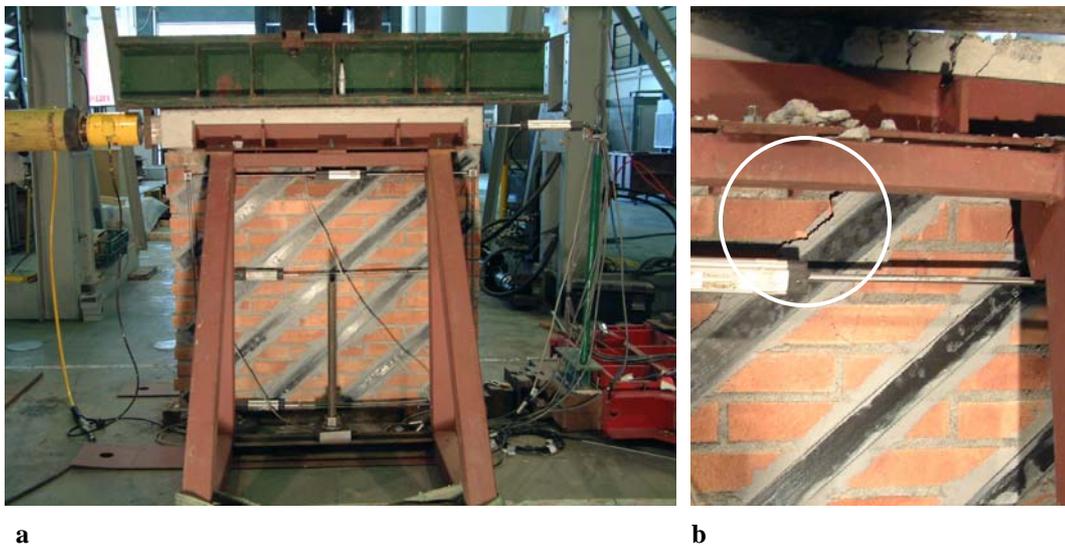


Figura 4.40 — Ensayo del panel 9: (a) antes del ensayo; (b) detalle del inicio de desprendimiento.

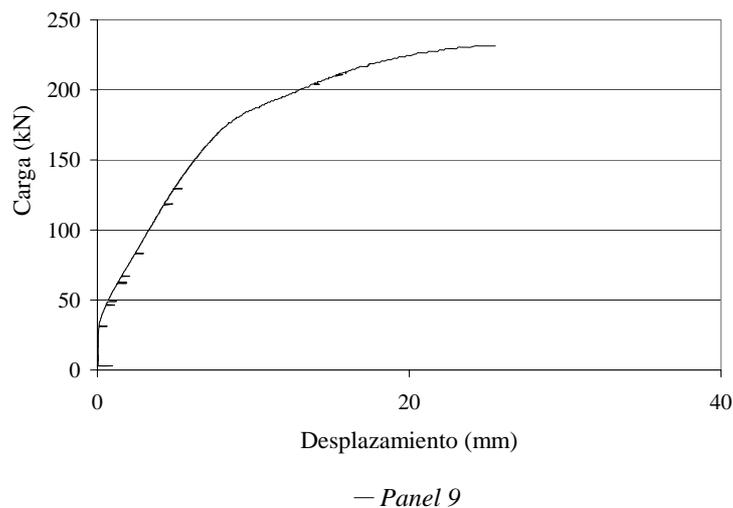


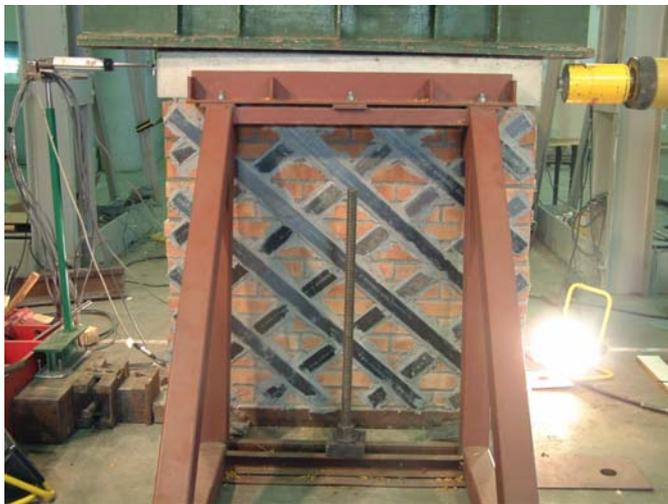
Figura 4.41 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 9.

4.4.4. Ensayo del panel 10

Durante el proceso de aplicación de la carga normal el comportamiento del panel es estable. Se aplica una compresión de 500 kN a razón de 1kN/s, generando una tensión de 2.98 N/mm^2 . Se observan algunas líneas de fisura en los márgenes del mortero epoxi sobre la superficie del espécimen.

Ante el proceso de aplicación de la carga horizontal, el panel muestra alta rigidez. Cuando la fuerza transmitida supera 220 kN el panel tiende a girar sobre el vértice opuesto al punto de aplicación de la carga, y en esa zona se genera aplastamiento.

El ensayo es interrumpido cuando la fuerza horizontal aplicada es igual a 225,80 kN. En la figura 4.42 se presentan algunas imágenes captadas durante la ejecución y al término del ensayo.



a



b



c



d



Figura 4.42 — Ensayo del panel 8: (a) el panel poco antes de ser ensayado; (b) detalle del aplastamiento en el vértice opuesto al punto de aplicación de la carga horizontal; (c) vista general después del ensayo; (d) cara posterior no reforzada; (e) desprendimiento de la retícula formada por los laminados; (f) detalle de los residuos del sustrato superficial de la fábrica sobre la cara interna de los laminados de refuerzo.

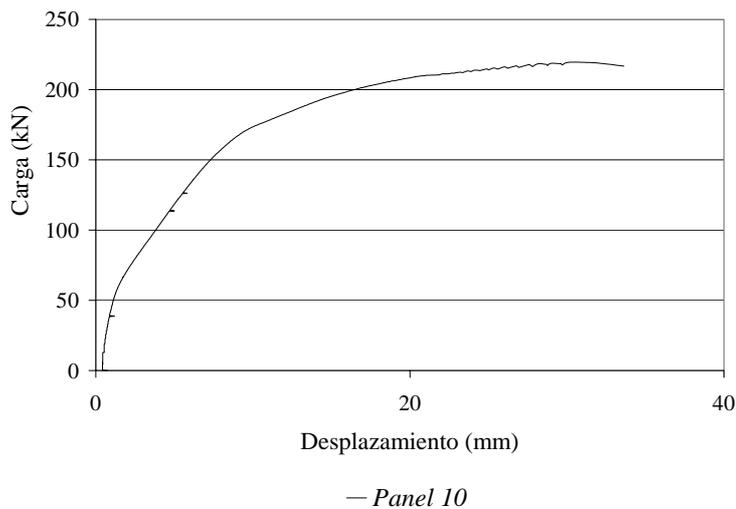


Figura 4. 43 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 10.

4.4.5. Ensayo del panel 11

Durante el proceso de carga normal, el comportamiento del panel es estable. Se aplica una compresión de 500 kN a razón de 1kN/s, que genera una tensión de 2.98 N/mm^2 . Ante el proceso de aplicación de la carga horizontal, el panel muestra alta rigidez. Cuando la fuerza transmitida supera 220 kN el panel tiende a girar sobre el vértice opuesto al punto de aplicación de la fuerza tangencial. El ensayo es detenido cuando la fuerza horizontal aplicada es igual a 223.7 kN. En el ángulo opuesto a la aplicación de la carga horizontal en panel presenta aplastamiento (figura 4.44 a, b, c y d), sin embargo el compuesto de tejido

de fibra no muestra indicios de desprendimiento; por el contrario la elevada adherencia del adhesivo epoxi desprende fragmentos de la capa superficial de los ladrillos y el mortero.

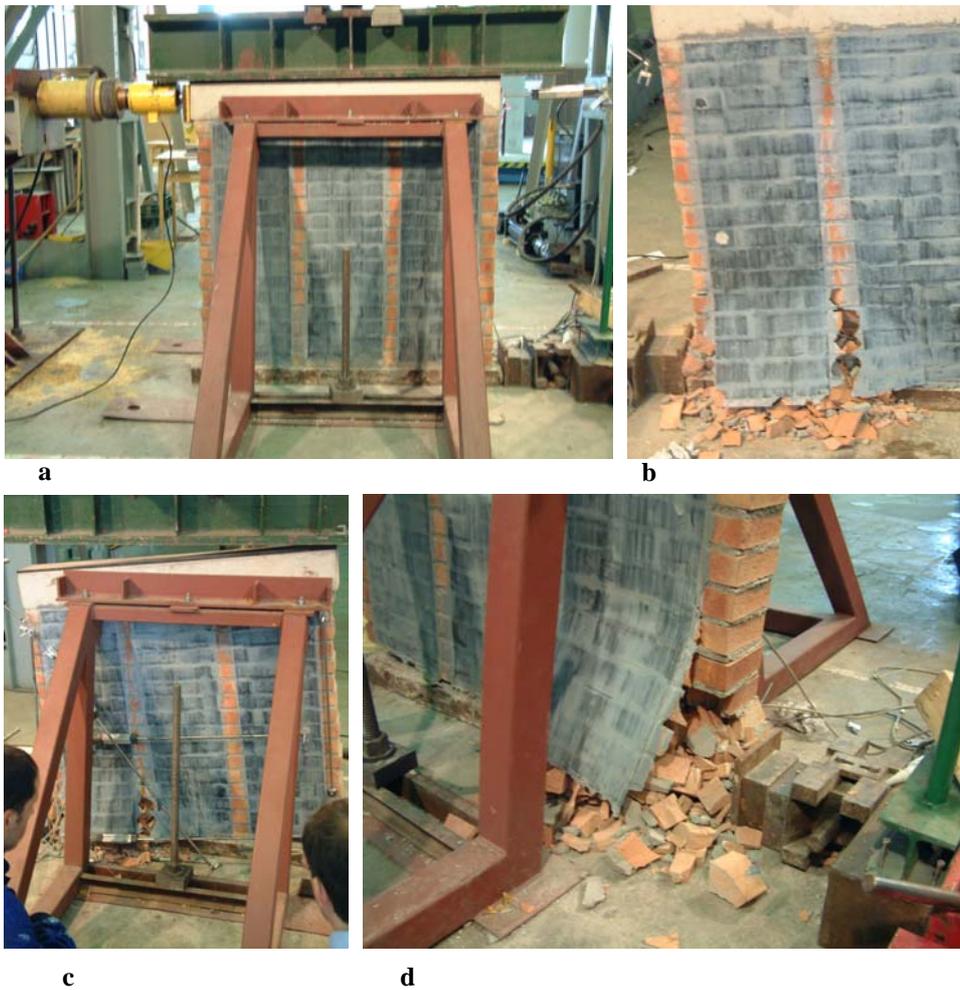
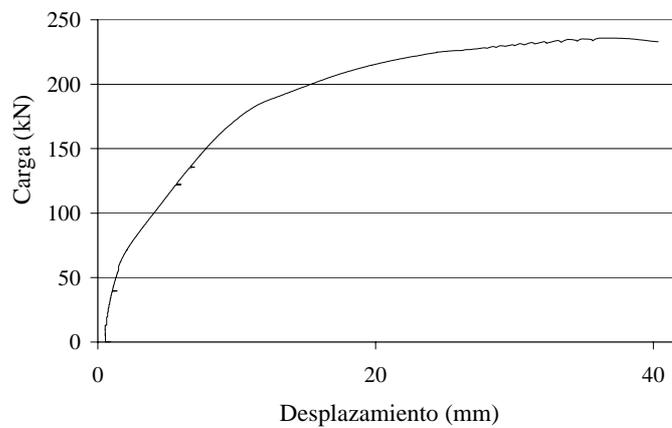


Figura 4.44 — Ensayo del panel 11: (a) antes del ensayo; (b) detalle del aplastamiento en el vértice opuesto a la aplicación de la carga horizontal; (c) vista general después del ensayo; (d) detalle de la zona de aplastamiento.



— Panel 11

Figura 4.45 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 11.

4.4.6. Ensayo del panel 12

Durante el proceso de carga normal el comportamiento del panel es estable. Se aplica una compresión de 500 kN a razón de 1kN/s, que genera una tensión de 2.98 N/mm².

Ante el proceso de aplicación de la carga horizontal, el panel muestra alta rigidez, cuando la fuerza transmitida supera 230 kN la viga de distribución se desprende y desliza sobre el panel en sentido paralelo a la carga.

El ensayo es detenido cuando la fuerza horizontal aplicada es igual a 239.5 kN. El aborto prematuro del ensayo, en conjunto con el deslizamiento de la viga impide alcanzar el desprendimiento del tejido o el aplastamiento ocurrido en los otros paneles (figura 4.46).

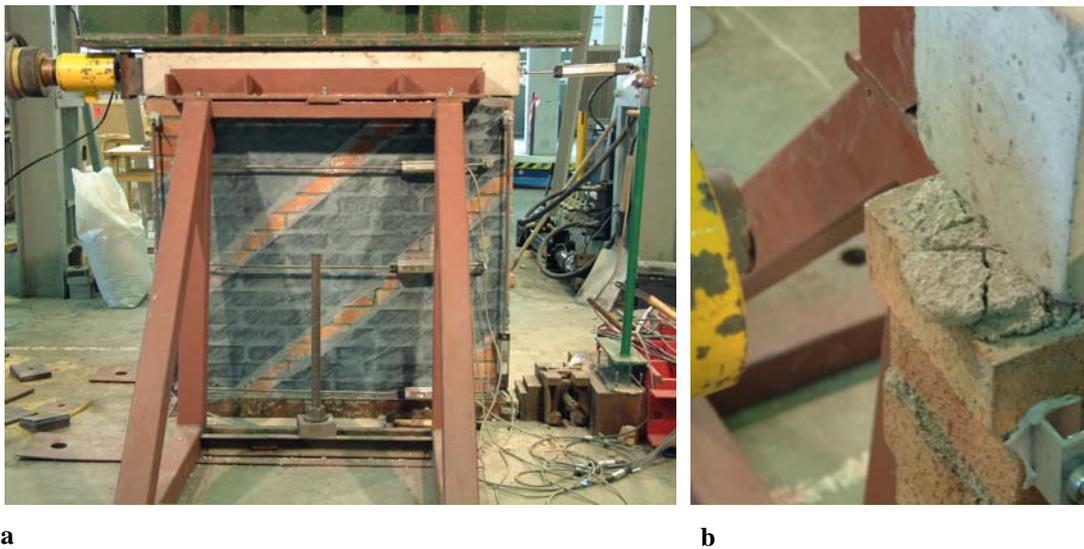
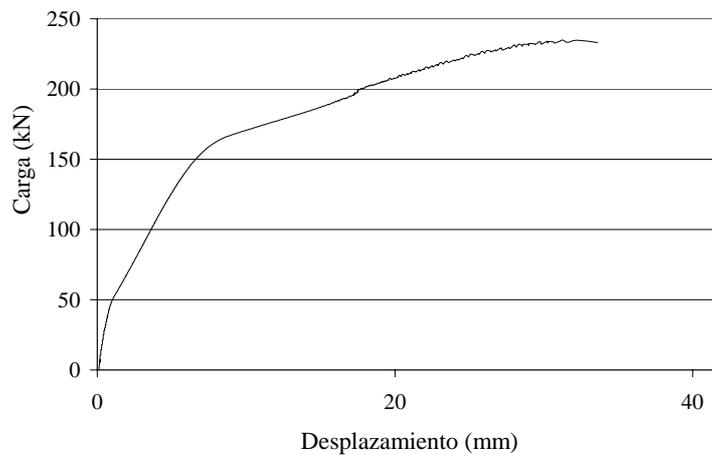


Figura 4.46 — Ensayo del panel 12: (a) antes de la ejecución; (b) deslizamiento de la viga de distribución.



— Panel 12

Figura 4. 47 — Curva carga desplazamiento registrada en el panel 12.

4.4.7. Ensayo del panel 13

Durante el proceso de carga normal el comportamiento inicial del panel es estable. Se aplica compresión a razón de 1kN/s. Cuando la carga alcanza 478.2 kN el panel presenta súbita deformación vertical por aplastamiento.

El ensayo es detenido y no se lleva a cabo el proceso de carga horizontal. En las figuras 4.48 a y b puede verse el estado del panel después del ensayo y un detalle del aplastamiento ocurrido.



Figura 4.48 — Ensayo del panel 12: (a) vista lateral del panel ensayado; (b) detalle del aplastamiento.

4.4.8. Resumen de resultados

Los valores resistentes obtenidos en la campaña de rotura de paneles reforzados con CFRP se presenta en la tabla 4.4. Los paneles M25V11H y M50V19H (Sánchez, 2001) anteceden en la tabla a los valores de los ensayos panel 8 y paneles 9, 10, 11, 12 y 13 de la campaña actual, respectivamente, debido a la correspondencia de las fuerzas aplicadas durante la fase de carga normal; 250 y 500 kN.

<i>Ensayo</i>	<i>Carga normal (kN)</i>	σ_n (N/mm ²)	<i>Carga tangencial última (kN)</i>	τ (N/mm ²)
<i>M25V11H (Sánchez, 2001)</i>	250	1.49	110	0.65
<i>Panel 8</i>	250	1.49	128.6	0.76
<i>M50V19H (Sánchez, 2001)</i>	500	2.98	191.6	1.14
<i>Panel 9</i>	500	2.98	235.6	1.40
<i>Panel 10</i>	500	2.98	225.8	1.34

<i>Ensayo</i>	<i>Carga normal</i> (kN)	σ_n (N/mm ²)	<i>Carga</i> <i>tangencial</i> <i>última</i> (kN)	τ (N/mm ²)
<i>Panel11</i>	500	2.98	223.7	1.33
<i>Panel12</i>	500	2.98	239.5	1.43
<i>Panel13</i>	500	2.98	*	-

*Panel confinado, presenta fallo por aplastamiento durante la fase de carga normal

Tabla 4.4 — Resumen de resultados de la campaña de rotura de paneles reforzados con CFRP y valores de los ensayos M25V11H y M50V19H obtenidos por Sánchez (2001).

4.5. ROTURA DE PROBETAS REFORZADAS CON COMPUESTOS FRP Y OTROS MATERIALES

4.5.1. Introducción

Previamente, en el apartado 3.5 del capítulo 3 se describen las características de la campaña experimental, incluyendo el procedimiento de los ensayos monotónicos y cíclicos. En este apartado concretamente se describe la ejecución de los ensayos que conforman la campaña de rotura de probetas reforzadas con compuestos FRP y otros materiales.

4.5.2. Ensayos de los grupos sometidos a procesos monotónicos

En los siguientes subapartados se describen los ensayos de probetas sujetas a procesos monotónicos durante la fase de carga tangencial. Los ensayos monotónicos conforman ocho conjuntos de probetas. El primer conjunto está integrado por probetas no reforzadas; y los grupos subsiguientes están formados por probetas reforzadas con GFRP, AFRP, madera micro-laminada o baldosas cerámicas.

4.5.2.1. Conjuntos del grupo S^M

El primer grupo de ensayos (denominado S^M) está integrado por probetas sin refuerzo sometidas a procesos de carga monotónicos. Los conjuntos de probetas que conforman a este grupo (S_a , S_g , S_h y S_d) se someten a niveles de compresión previa de 20, 40, 60 y 80 kN, respectivamente, generando en los especímenes tensiones normales de 0.51, 1.02, 1.53 y 2.04 N/mm².

La carga cortante es una rampa ascendente aplicada a una velocidad aproximada de 0.25 kN/s. La figura 4.44 muestra las curvas de comportamiento representativas de cada conjunto. El conjunto de ensayos S_a es sometido al menor nivel de tensión normal estudiado (20 kN = 0.51 N/mm²).

La relación entre la fuerza aplicada y la deformación es lineal hasta llegar a la resistencia última (en éste caso ligeramente superior a 30 kN) en donde la probeta fisura a lo largo de la junta de mortero, disminuyendo la resistencia hasta situarse en un nivel residual de 18 kN aproximadamente, en el que la fricción entre las piezas y el mortero permite el deslizamiento gradual.

El modo de fallo de las probetas no reforzadas es invariablemente frágil, sin embargo, en la fase posterior a la rotura, la incidencia de la fuerza normal regula la resistencia residual. El comportamiento general de los conjuntos sometidos a cargas de compresión normal de 40 y 60 kN presentan un comportamiento de gran similitud, con un claro aumento en la resistencia última y en la resistencia residual.

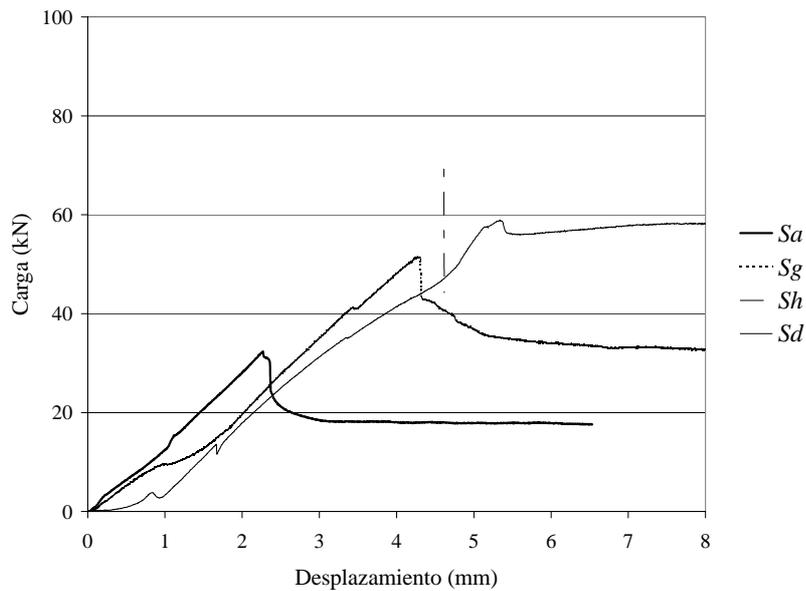


Figura 4.49 — Comportamiento del grupo experimental de probetas no reforzadas S^M .

Sin embargo, en la figura 4.49 puede percibirse claramente que la curva Sh (conjunto sometido a una tensión normal de $1,53 \text{ N/mm}^2$) alcanza una resistencia superior a la curva Sd (sometida a una tensión normal de $2,04 \text{ mm}^2$).

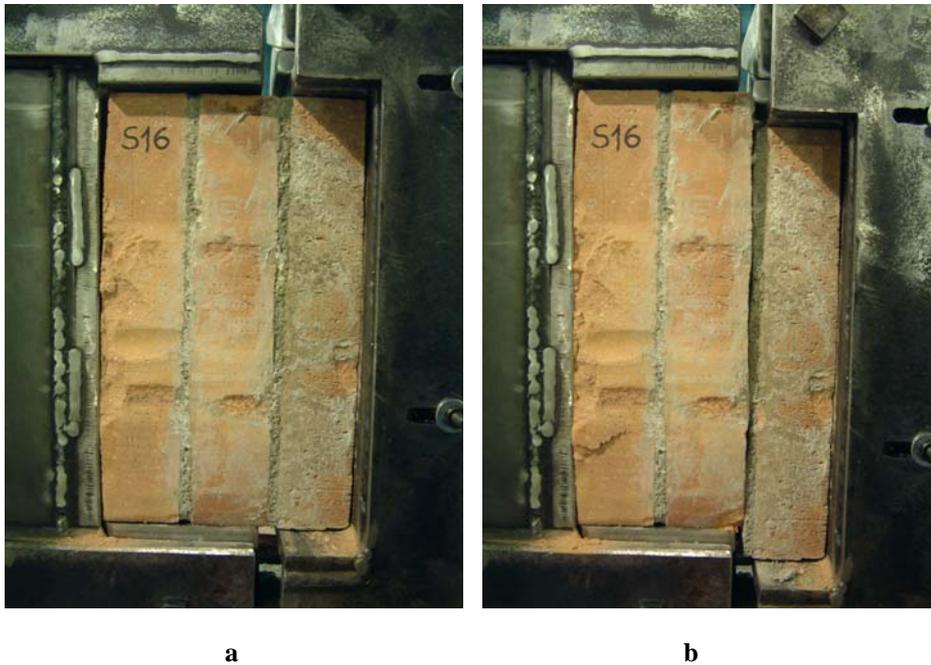


Figura 4.50 — Probeta sin refuerzo del grupo S^M : (a) probeta colocada en el bastidor de ensayo antes de la ejecución; (b) probeta después del ensayo.

El conjunto Sg asciende de forma lineal hasta la rotura, que ocurre en torno a 50 kN, seguido por una breve fase de estabilización (durante un desplazamiento aproximado a 1 mm) hasta situarse en la fase de resistencia residual, en torno a los 33 kN. El conjunto Sh comporta una

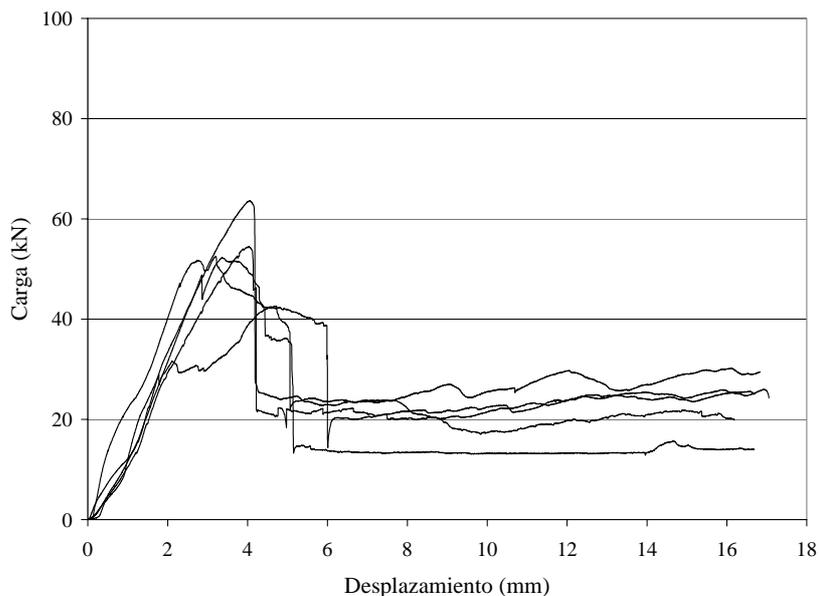
deformación similar, lineal hasta la rotura, con una caída más drástica de la resistencia y una rápida estabilización en la fase residual. El conjunto *Sd*, sin embargo, sitúa la resistencia máxima entre los niveles alcanzados por los grupos *Sg* y *Sh* (en torno a 67 kN) presenta una resistencia residual muy cercana al mismo valor. En la figura 4.50 se observa una de las probetas del grupo S^M antes y después de la rotura.

4.5.2.2. Conjuntos del grupo G^M

El grupo G^M está integrado por dos conjuntos de probetas reforzadas con compuesto de tejido de fibra de vidrio (*Ga*, *Gb*). Presenta claramente incrementos resistentes en relación al grupo de probetas no reforzadas (S^M). Durante el proceso de carga el comportamiento es constante hasta alcanzar la resistencia última. El conjunto *Ga*, sujeto a una tensión normal de 0.51 N/mm^2 , muestra una resistencia última próxima a 55 kN y un modo de fallo predominantemente frágil, mientras que el grupo *Gb*, sujeto a una tensión normal de 1.02 N/mm^2 alcanza una resistencia última cercana a 70 kN y muestra una ligera tendencia a la ductilidad en el fallo. En ambos casos, la resistencia residual es similar a la de los conjuntos sujetos a tensiones normales similares del grupo de probetas sin refuerzo S^M .

El modo de fallo en las probetas del conjunto *Ga* (sujeto a una tensión normal de 0.51 N/mm^2) muestra un descenso violento de la resistencia en la fase inmediata a la rotura, y niveles de resistencia residual muy cercanos a los obtenidos en las probetas del conjunto *Sa*, en el grupo de S^M (figura 4.51-a).

El conjunto *Gb* (sujeto a una tensión normal de 1.02 N/mm^2) muestra un proceso de fallo similar, pero con una fase de estabilización con descenso gradual hasta el nivel de resistencia residual en la fase posterior a la rotura (figura 4.51-b).



a

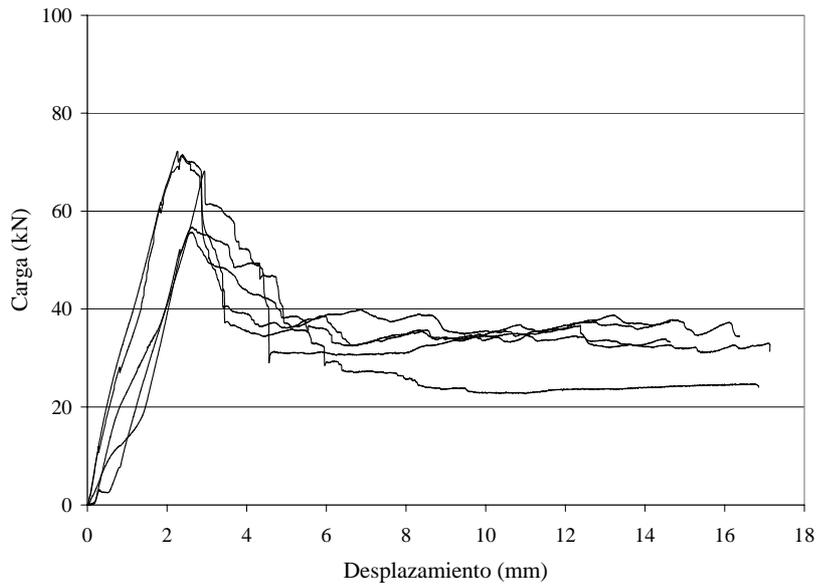
**b**

Figura 4.51 — Comportamiento resistente de los conjuntos de ensayos del grupo G^M : (a) conjunto de ensayos Ga ; (b) conjunto de ensayos Gb .

Puede verse claramente que el fallo ocurre en la junta de mortero y que el sistema de refuerzo tiene gran capacidad de adherencia. El compuesto de tejido de fibra, adherido fuertemente a la superficie de las piezas de ladrillo, desprende de esta una capa superficial (figura 4.52).

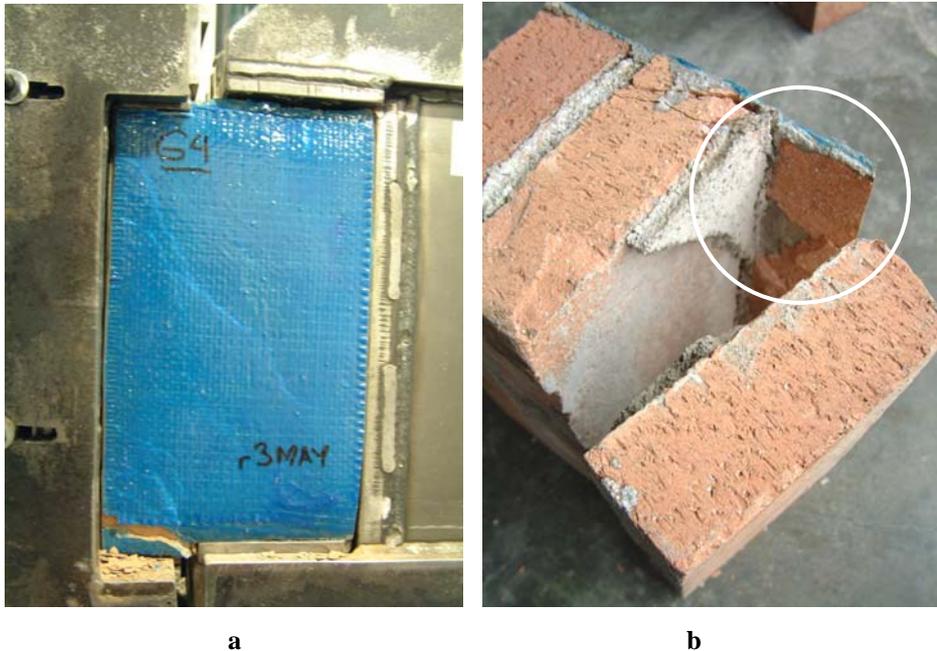
**a****b**

Figura 4.52 — Ensayo de probeta del grupo: (a) momento del fallo de la probeta durante el ensayo; (b) detalle de la probeta después del fallo. La adherencia del compuesto de refuerzo desprende la capa superficial de los ladrillos.

4.5.2.3. Conjuntos del grupo G^{M1}

El grupo G^{M1} está formado por un conjunto de probetas (Gf) reforzadas con tejido tipo $GFRP$. La orientación de las fibras resistentes forma un ángulo de 45° respecto a la dirección de la carga de cortante y a las juntas de mortero. En la ejecución de los ensayos, las probetas del conjunto Gf se someten a una tensión normal de 2.04 N/mm^2 (80 kN).

En el conjunto se observa una línea de deformación constante hasta alcanzar la resistencia última y se presenta en primera instancia un fallo frágil, seguido por una fase de ajuste en que la resistencia residual fluctúa de forma descendente hasta situarse en una fase lineal residual cercana a los 65 kN.

El conjunto Gf muestra un rápido ascenso lineal hasta la rotura y a continuación un descenso breve y gradual hasta la línea residual (figura 4.53).

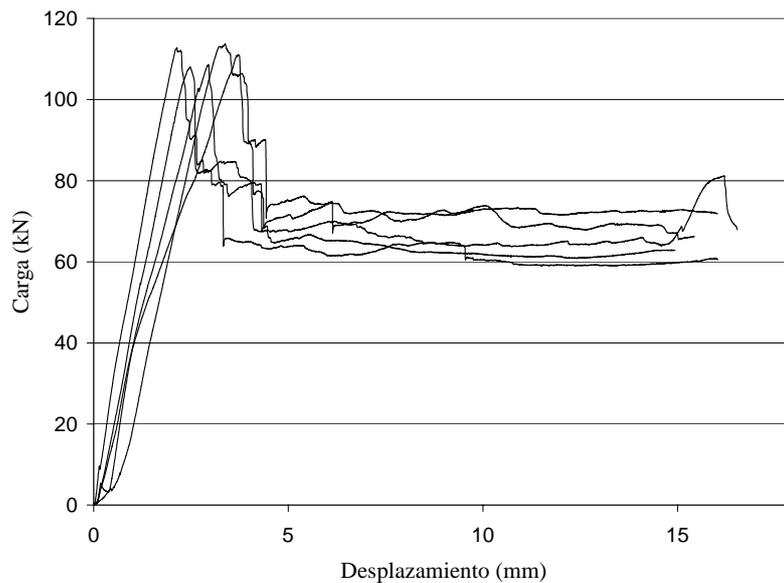


Figura 4.53 — Comportamiento resistente del conjunto de probetas Gf .

En las figuras 4.54 a y b se puede observar el fallo de una de las probetas del grupo de ensayos Gf .

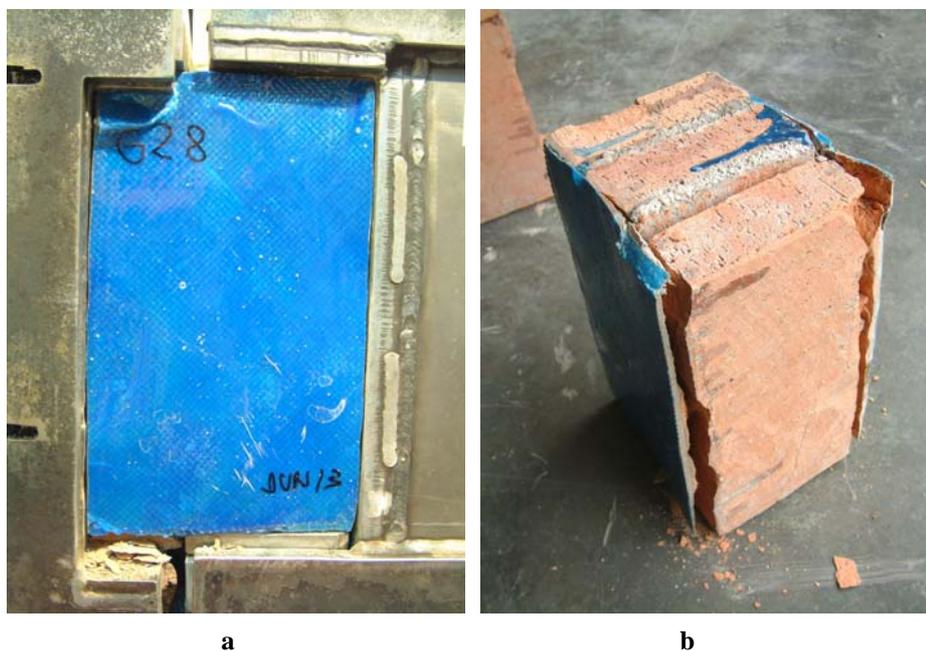


Figura 4.54 — Ensayo de una probeta del grupo G^{M1} : (a) Momento de fractura durante el ensayo; (b) detalle del fallo: en donde puede apreciarse el desprendimiento de la capa superficial de la pieza de fábrica por la adherencia del compuesto.

4.5.2.4. Conjuntos del grupo G^{M2}

El grupo G^{M2} está formado por un conjunto de probetas (Ge) reforzadas con tejido tipo *GFRP* aplicado en dos caras. La orientación de las fibras resistentes forma un ángulo de 45° respecto a la dirección de la carga de cortante y a las juntas de mortero. En la ejecución de los ensayos, las probetas del conjunto se someten a una tensión normal de 0.51 N/mm^2 (20 kN).

En el conjunto se observa una línea de deformación constante hasta alcanzar la resistencia última y presenta en primera instancia un fallo frágil, seguido por una fase de ajuste en que la resistencia residual fluctúa de forma descendente hasta situarse en una fase lineal residual (en torno a los 22 kN). En el conjunto Ge se presenta un extenso desplazamiento (cercano a 5 mm) durante la fase inicial resistente. Esto se debe a los ajustes de tipo mecánico por la irregularidad en la superficie de contacto de la probeta o por la geometría imperfecta de los especímenes.

El modo de fallo del conjunto tiende a ser más frágil, con una caída drástica de la resistencia, inmediata a la rotura y una rápida estabilización al desplazamiento lineal durante la fase de resistencia residual (figura 4.55).

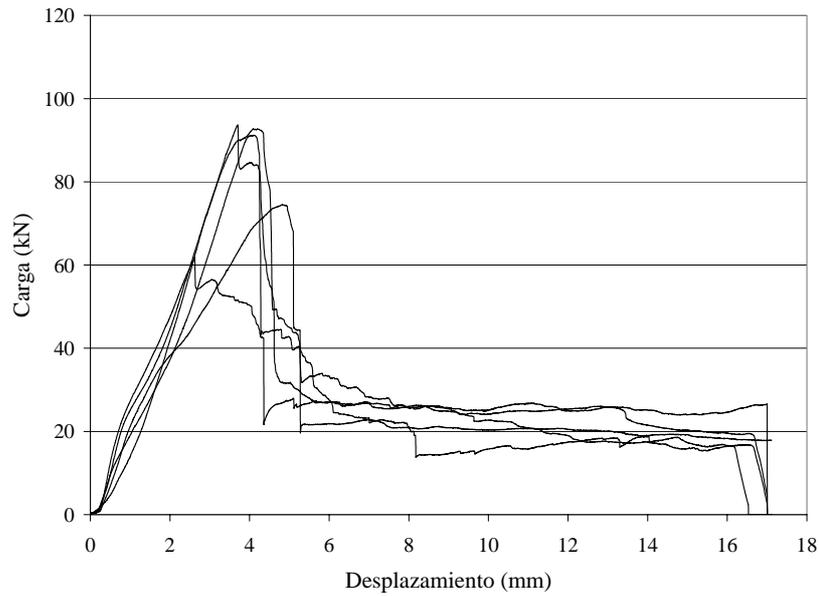


Figura 4.55 — Comportamiento resistente del conjunto de probetas *Gf*.

La transmisión de tensiones al compuesto de refuerzo puede ocasionar la rotura del tejido. Puede observarse con claridad la línea de fisura de una de las probetas reforzadas del grupo *Gf* (figura 4.56).

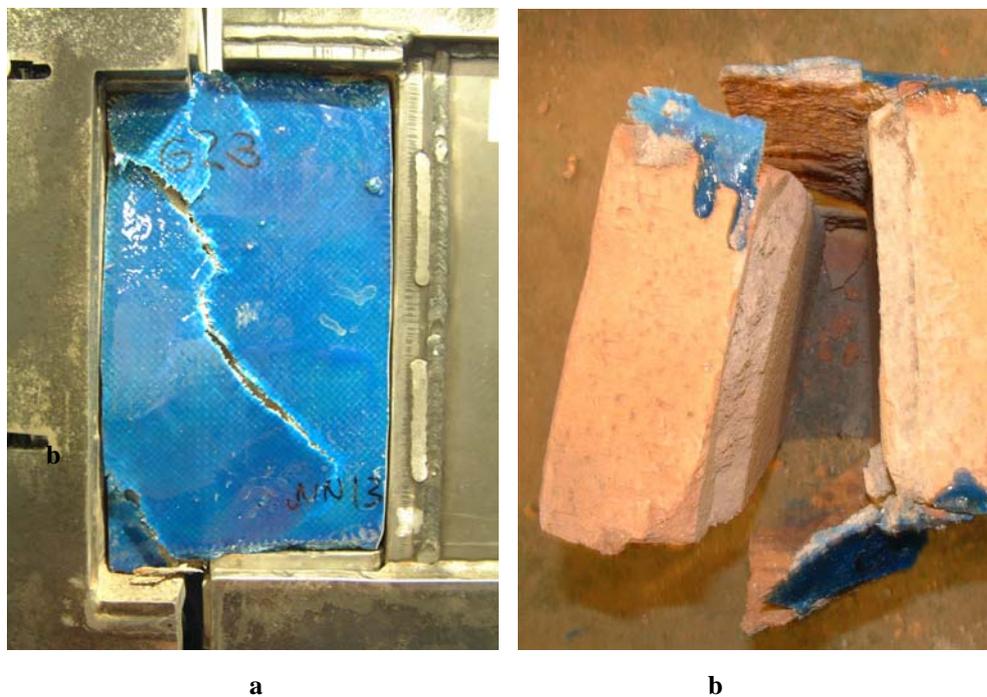


Figura 4.56 — Modo de fallo del conjunto *Ge*: (a) fisura de la capa de tejido (b) detalle de la probeta ensayada en donde se observa la capa superficial de la probeta adherida al tejido de refuerzo.

4.5.2.5. Conjuntos del grupo G^{M3}

El grupo G^{M3} está constituido por dos conjuntos de probetas (Gc , Gd), reforzadas con tejido tipo $GFRP$ aplicado en dos caras. La orientación de las fibras resistentes forma un ángulo de 90° respecto a la dirección de la carga de cortante y a las juntas de mortero. Las probetas se someten a niveles de pre-compresión de 20 y 80 kN (tensiones normales 0.51 , 2.04 N/mm², respectivamente).

Ambos conjuntos muestran independientemente gran uniformidad en el comportamiento. El conjunto Gc sigue una trayectoria de deformación ligeramente curvada hasta el punto de rotura (próximo a 75 kN), seguida de una fase de ajuste con disminución gradual de la resistencia hasta situarse en una línea residual equilibrada, en torno a 36 kN. El comportamiento del conjunto Gd es similar; la fase inicial de deformación manifiesta ligeramente una curvatura hasta la resistencia límite (superior a 105 kN), seguida de un descenso gradual, hasta situarse en la fase residual, cercana a 70 kN.

Los ensayos realizados con las probetas del conjunto Gc , presentan un modo de fallo homogéneo, como se muestra en la figura 4.57. En la fase inicial de carga, la deformación es prácticamente lineal hasta la rotura, y es seguida por un descenso gradual de la resistencia durante el desplazamiento, hasta la fase residual (en torno a 25 kN) que confiere un comportamiento más dúctil durante el fallo. El grupo Gd muestra una tendencia similar, con una fase ascendente lineal hasta la rotura y un descenso gradual de la resistencia hasta la fase resistente residual.

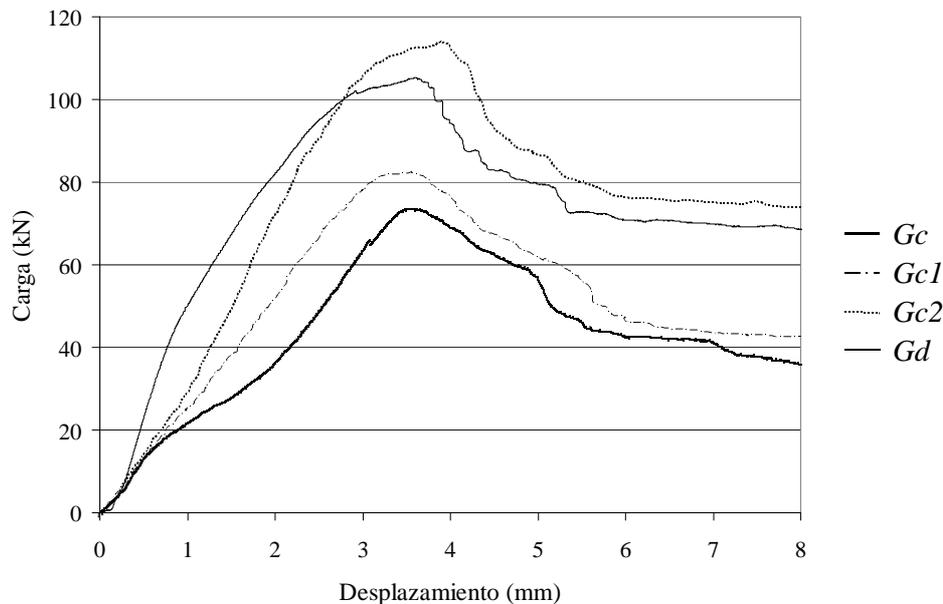


Figura 4.57 — Comportamiento resistente del grupo G^{M3} .

En la figura 4.53 (a y b) puede verse el modo de fallo de una de la probetas pertenecientes al conjunto *Gc*. El tejido se desprende parcialmente de la probeta y mantiene adheridas algunas fracciones del mortero de regulación (figura 4.58 a y b).

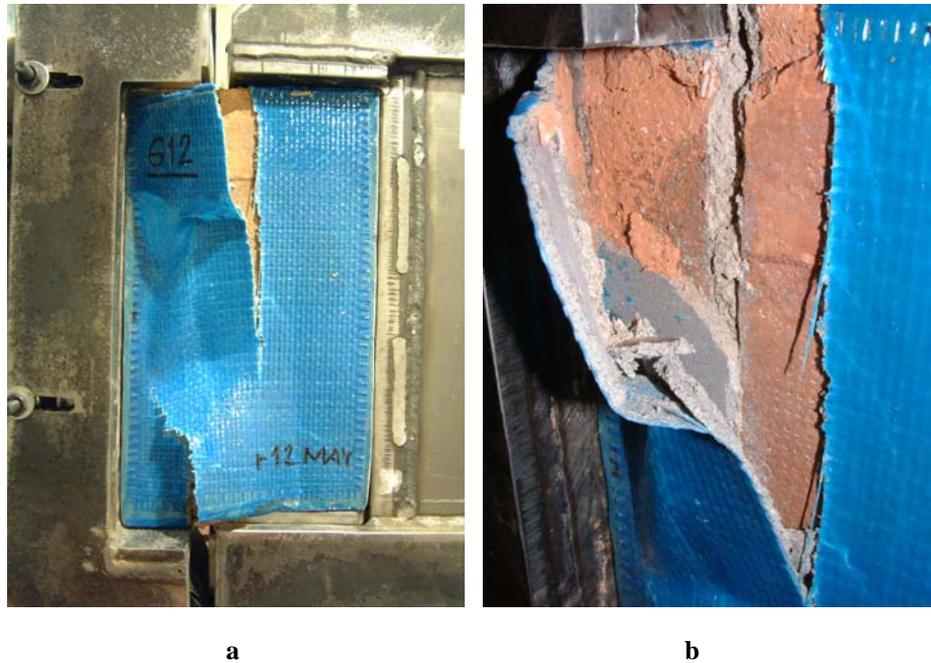


Figura 4.58 — Modo de fallo de una probeta del conjunto *Gc*: (a) la carga cortante ocasiona en el tejido una línea vertical de rotura; (b) detalle del desprendimiento del mortero de regulación adherido al tejido de fibra de vidrio.

4.5.2.6. Conjuntos del grupo A^M

El grupo A^M está constituido por cuatro conjuntos de probetas (*Aa*, *Ab*, *Ac*, *Ad*) reforzadas con compuesto de tejido AFRP. La orientación de las fibras es perpendicular a las juntas de mortero y a la dirección de la carga cortante. Cada conjunto es sometido a un nivel de tensión normal de 0.51, 1.02, 1.53, 2.04 N/mm², en la misma secuencia. El conjunto *Aa* presenta un comportamiento deformación lineal hasta la rotura, aproximadamente a 45 kN, seguido por una extensa fase gradual descendente que va de 40 hasta 14 kN aproximadamente.

El proceso de fallo de tendencia dúctil se atribuye al funcionamiento resistente del compuesto, ya que los conjuntos *Ab*, *Ac* y *Ad* lo manifiestan de forma similar, marcando así una tendencia. El conjunto *Ab* reproduce el comportamiento del conjunto *Aa*. Alcanza una resistencia última de 60 kN, con una caída violenta en la que desciende la resistencia en un 8% aproximadamente y es seguida de una fase descendente gradual hasta situarse en un nivel residual en torno a 32 kN (figura 4.59).

El conjunto *Ac* manifiesta un comportamiento similar a los dos conjuntos anteriores (*Aa*, *Ab*) en el que se percibe una mayor velocidad en la fase descendente de la resistencia hacia la zona residual, es decir, el deslizamiento detectado en la línea de fisura se desplaza en un período de

tiempo ligeramente menor. La resistencia última es cercana a 90 kN y la fase de carga residual se estabiliza en un nivel cercano a 50 kN

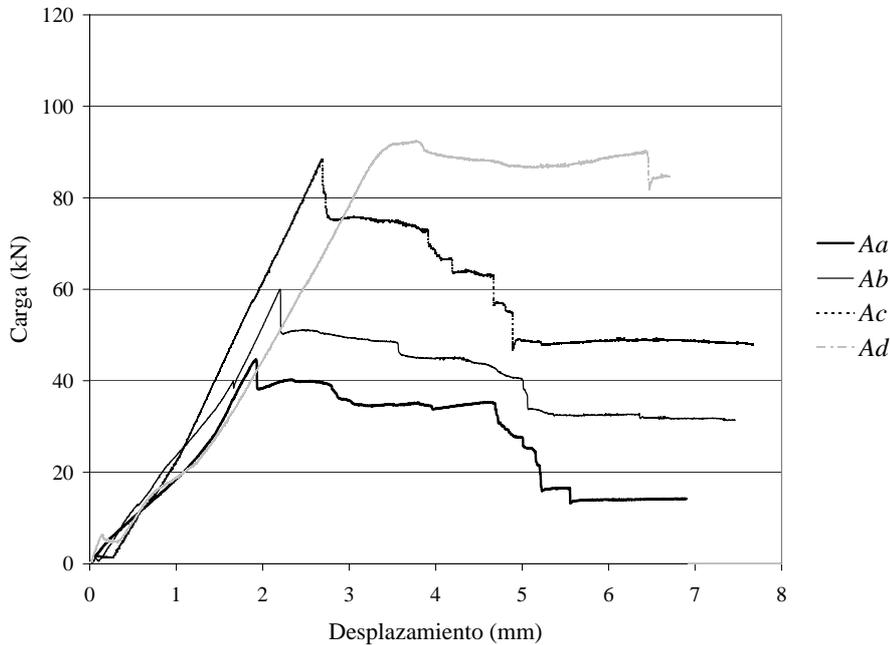


Figura 4.59 — Curvas de comportamiento de los conjuntos de probetas del grupo A^M .

El conjunto *Ad* muestra una variante en el comportamiento, en la fase inmediata a la resistencia última (ligeramente superior a 90 kN) en donde la fase residual permanece muy cerca del punto de rotura.

El mecanismo de fallo es similar en todos los conjuntos, siguiendo una línea constante de deformación hasta la resistencia última, secundada por una extensa fase descendente hasta la resistencia residual. Los conjuntos *Aa*, *Ab* y *Ac* presentan una caída de la resistencia (aproximadamente 1/10 del la carga última) inmediata a la rotura, seguida por el descenso gradual de la resistencia, en una línea descendente escalonada hasta la fase de resistencia residual.

Las probetas reforzadas pertenecientes al conjunto *Ad*, sujetas a una tensión normal igual a 2.04 N/mm^2 , exhiben un comportamiento particular en la fase posterior a la carga última: la línea de deformación se mantiene muy cerca a la carga última durante la fase residual, con un desplazamiento prolongado (de 2 a 3 mm) antes de iniciar la rampa descendente.

La figura 4.60 (a y b) muestra el modo de fallo de una de las probetas del conjunto *Ab*.

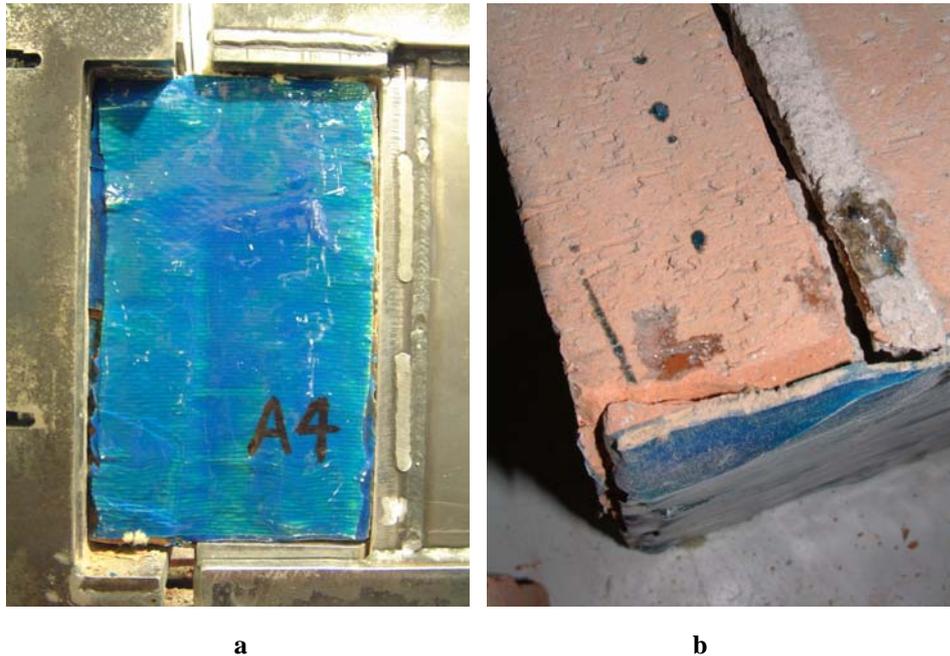


Figura 4.60 — Ensayo de una probeta del conjunto *Ab*: (a) proceso de carga (b) la rotura de la probeta ocurre en la junta de mortero; el refuerzo desprende la capa superficial de l ladrillo.

4.5.2.7. Conjuntos del grupo M^{M1}

El grupo M^{M1} está integrado por tres conjuntos de probetas (Ma , Mb , Mc) reforzadas con enchapado de madera micro-laminada. Presenta un comportamiento homogéneo en los niveles aplicados de tensión normal (0.51 , 1.02 , 2.04 N/mm^2) en una línea constante ascendente hasta rotura, seguida por un descenso drástico de la resistencia hasta situar una fase sinuosa de estabilización, en un nivel de resistencia residual.

El conjunto Ma alcanza una resistencia última en torno a 42 kN, con una caída en torno a al 50% a la rotura. Sin embargo, en la fase de desplazamiento las oscilaciones de la resistencia (durante un desplazamiento de 18 mm) alcanzan más del 95% de la carga última inicial.

El conjunto Mb presenta un comportamiento similar, con una resistencia última en torno a 60 kN, con una caída de la resistencia inmediata a la rotura de (1/3 de la carga última, aproximadamente) Se repite la sinuosidad en la línea de comportamiento durante la fase residual, rondando 40 kN (figura 4.61).

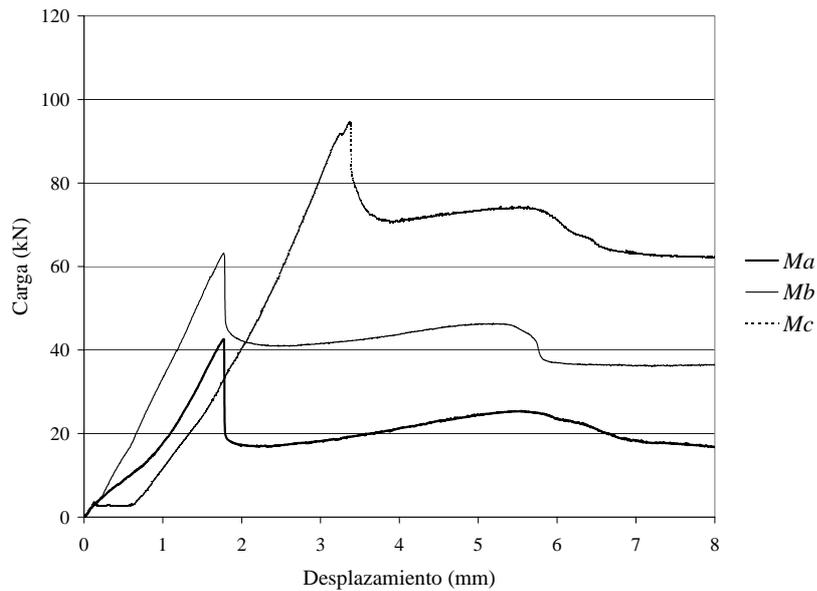


Figura 4.61 — Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo M^{M1} .

El conjunto Mc (sujeto a una tensión normal = 2.04 N/mm^2) es análogo a Ma y Mb , con una resistencia última cercana a 100 kN y una fase residual en torno fluctuante entre 70 y 60 kN, durante un desplazamiento de 18 mm. En general, el comportamiento muestra fragilidad a la rotura y sinuosidad en la curva de tensión-deformación durante la fase residual. Este comportamiento se atribuye al adhesivo utilizado. En la figura 4.62 se observa una de las probetas del conjunto M^{M1} colocada en el bastidor de ensayo (a) y un detalle del estado posterior a la ejecución (b).

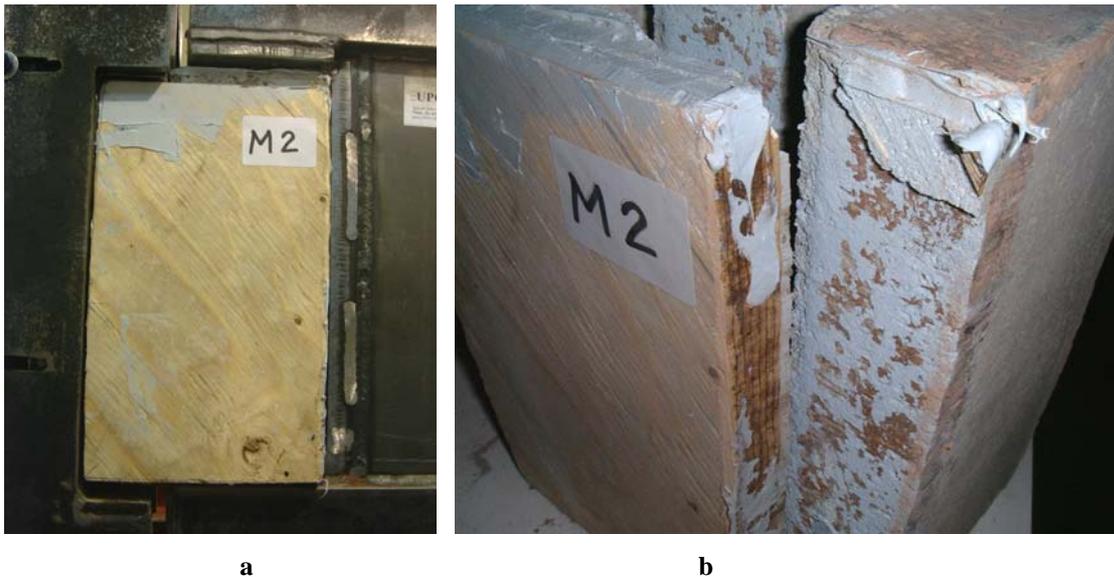


Figura 4.62 — Una probeta del conjunto M^{M1} : antes del ensayo (a); detalle del estado posterior a la ejecución (b).

4.5.2.8. Conjuntos del grupo C^{M1}

El conjunto C^{M1} está integrado por tres conjuntos de probetas reforzadas con embaldosado cerámico (Ca , Cb , Cc). Los conjuntos muestran un comportamiento similar: la fase inicial de deformación marca una curva de tensión-deformación ligeramente oscilante hasta la zona de rotura, seguida por una caída ligera de resistencia (entre 5 y 20%) y una fase descendente hasta la zona resistente residual (figura 4.63).

El conjunto Ca alcanza una resistencia máxima en torno a 50 kN que desciende a 40 kN aproximadamente en la fase residual. El conjunto Cb presenta un comportamiento análogo, con una resistencia última sobre 60 kN y una fase residual fluctuante entre 60 y 48 kN. El conjunto Cc presenta la tendencia marcada por los conjuntos Ca y Cb , con una resistencia máxima de 80 kN, en este caso escalonada. En los tres niveles de tensión normal examinados el pico de resistencia máxima es alcanzado dentro del primer segmento de deformación (desplazamiento en torno a 2 mm).

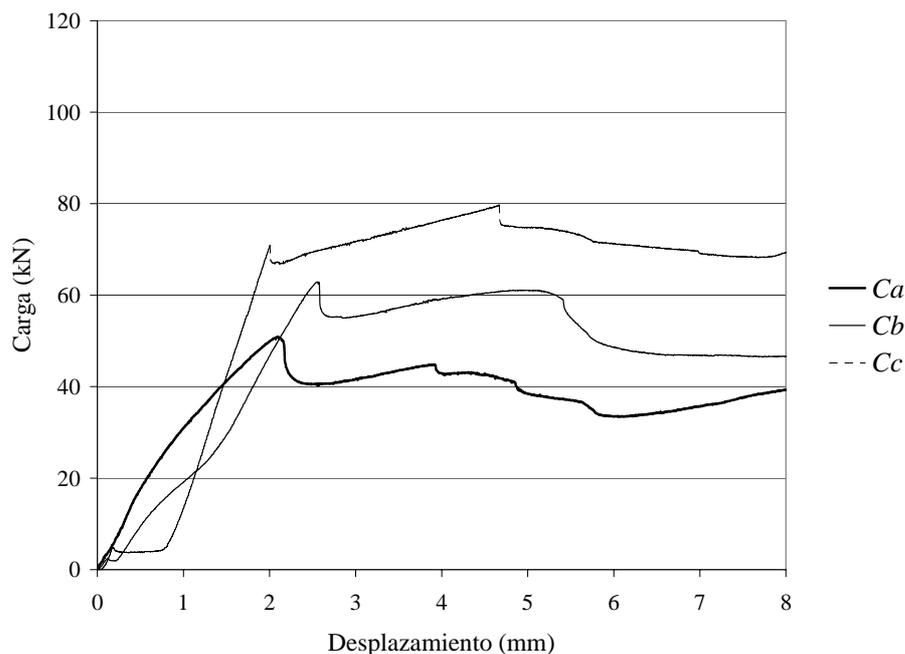


Figura 4.63 — Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo C^{M1} .

El adhesivo de poliuretano utilizado para la fijación de las placas de madera presenta gran adherencia. En la figura 4.64 (a y b) puede apreciarse claramente el modo de fallo de una de las probetas del grupo C^{M1} . Las líneas de fisura sugieren la transmisión de los esfuerzos de la probeta a la baldosa.

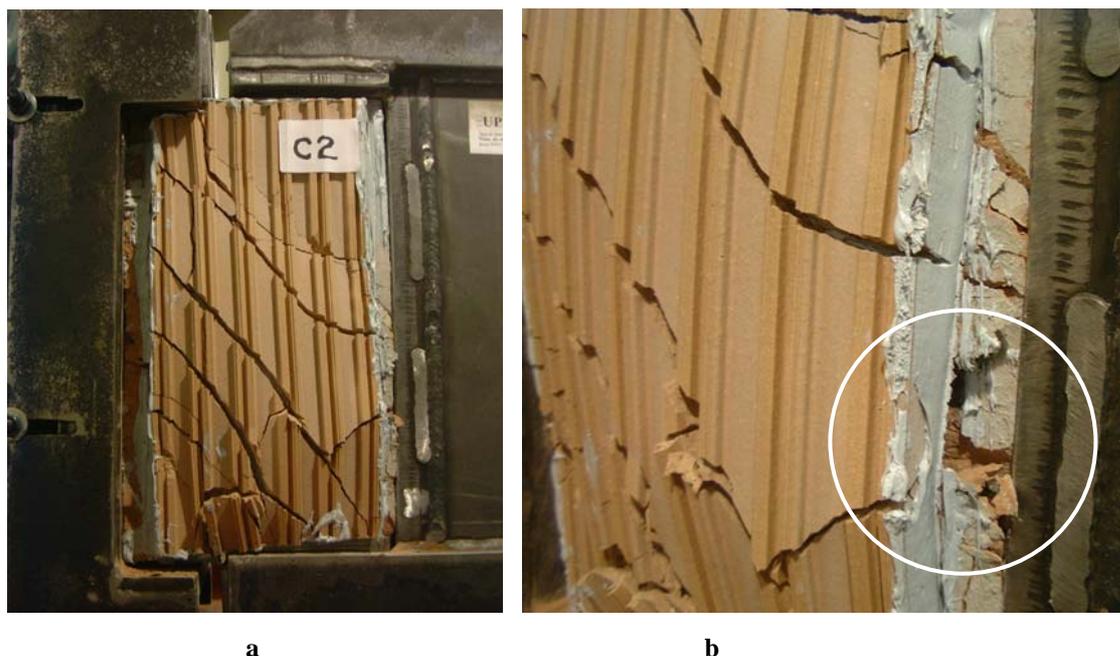


Figura 4.64 — Modo de fallo de una de las probetas del conjunto *Ca* perteneciente al grupo C^{MI} : (a) la baldosa cerámica muestra claramente el comportamiento de rotura; (b) detalle de la rotura en donde puede verse la fragmentación superficial de la probeta.

4.5.3. Ensayos de los grupos sometidos a procesos cíclicos

En los siguientes subapartados se describe la ejecución de los ensayos de probetas sujetas a procesos cíclicos durante la fase de carga tangencial. El grupo está conformado por siete grupos, a su vez integrados por varios conjuntos de probetas. El primer grupo está formado por las probetas no reforzadas; y los grupos subsecuentes están formados por conjuntos de probetas reforzadas con GFRP, AFRP, madera micro-laminada o baldosas cerámicas.

4.5.3.1. Conjuntos del grupo S^C

El grupo S^C está compuesto por cuatro conjuntos de probetas no reforzadas (Se , Si , Sj , Sf), sometidas a ensayos de cortante en estados de tensión biaxial, con niveles de carga normal de 20, 40, 60 y 80 kN respectivamente, que generan tensiones normales de 0.51, 1.02, 1.53 y 2.04 N/mm². La compresión previa se genera en una rampa ascendente a una velocidad constante de 0.05 kN/s. El proceso cíclico de carga cortante genera intervalos de compresión en las probetas, partiendo de 0 con incrementos en un rango entre 0.1 y 0.5 mm a cada período. La velocidad de desplazamiento del actuador de carga es variable, dentro de un rango de 0.01 a 0.55 mm/s, lo que forma intervalos con una duración aproximada a 10 s.

El conjunto Se , bajo una tensión normal (σ) igual a 0.51 N/mm², presenta una deformación lineal en la primer fase cíclica de carga, la cual parte del valor 0 y alcanza 43 kN en su resistencia última, seguida por una fase descendente de estabilización, aproximadamente hasta 20 kN, en donde la deformación es mínima y constante por efecto del rozamiento sujeto a la carga normal. El conjunto Si , sometido a $\sigma = 1.02$ N/mm² muestra un comportamiento similar, con una deformación lineal hasta alcanzar la resistencia última (68 kN), seguida por

una breve fase descendente hacia la zona de estabilización en la resistencia residual, en torno a 34 kN. El conjunto S_j ($\sigma = 1.53 \text{ N/mm}^2$) se comporta de forma semejante al conjunto S_i , con una resistencia máxima en torno a 70 kN y una residual aproximada de 50 kN. El conjunto S_f sujeto a ($\sigma = 2.04 \text{ N/mm}^2$) manifiesta un comportamiento semejante al conjunto S_e , con una resistencia máxima superior a 90 kN y una fase descendente (en este caso gradual) hacia la zona residual, en torno a 58 kN (figura 4.65) La figura 4.66 muestra el fallo de una de las probetas del conjunto S_d .

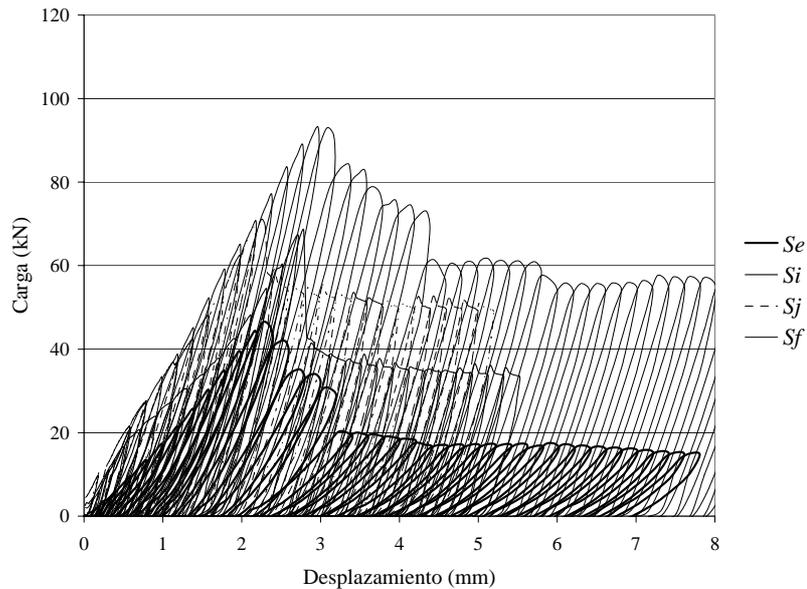


Figura 4.65 — Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo S^C .

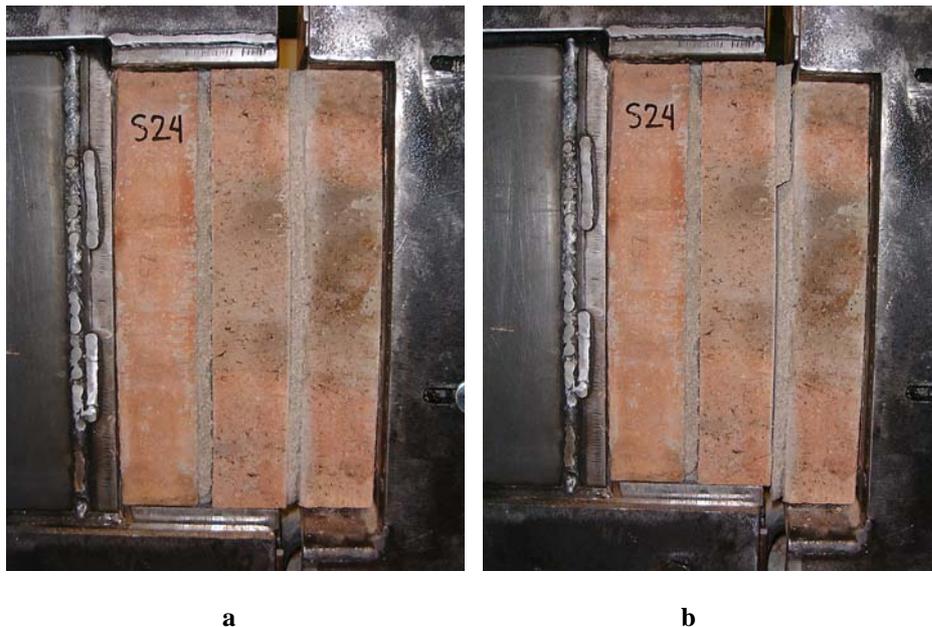


Figura 4.66 — Modo de fallo del grupo S_c : (a) probeta colocada en el bastidor de carga; (b) probeta después de la ejecución del ensayo.

El modo de fallo de las probetas sin refuerzo sujetas a procesos cíclicos de carga es similar al grupo de probetas S^M sujetas a procesos monotonicos; sin embargo, en los cuatro niveles de tensión normal aplicada, la resistencia máxima es ligeramente superior.

4.5.3.2. Conjuntos del grupo G^{CI}

El grupo G^{CI} está integrado por cuatro conjuntos de probetas (Gg, Gi, Gj, Gh) reforzadas con GFRP. Son ensayadas en estados de tensión biaxial bajo cargas de cortante con valores de 20, 40, 60 y 80 kN respectivamente, que generan tensiones normales de 0.51, 1.02, 1.53, 2.04 N/mm^2 . El comportamiento general de los conjuntos es visiblemente homogéneo. Inicia en una fase de deformación lineal hasta rotura, seguida por un descenso progresivo de la resistencia hasta situarse en una fase resistente residual. La carga última ocurre alrededor del décimo cuarto período del proceso cíclico.

El conjunto Gg presenta una resistencia máxima en un rango de 55 a 65 kN, con una tendencia hacia una resistencia residual en el orden de 30 a 40 kN. El conjunto Gi muestra un comportamiento similar a Gg , con una resistencia última en torno a 70 kN y una residual media cercana a 50 kN. Los conjuntos Gj y Gh presentan el mismo comportamiento mostrado por los anteriores, alcanzando resistencias máximas cercanas a 85 y 110 kN respectivamente. Así mismo, las resistencias residuales se sitúan en un rango cercano a 50 y 70 kN (figura 4.67).

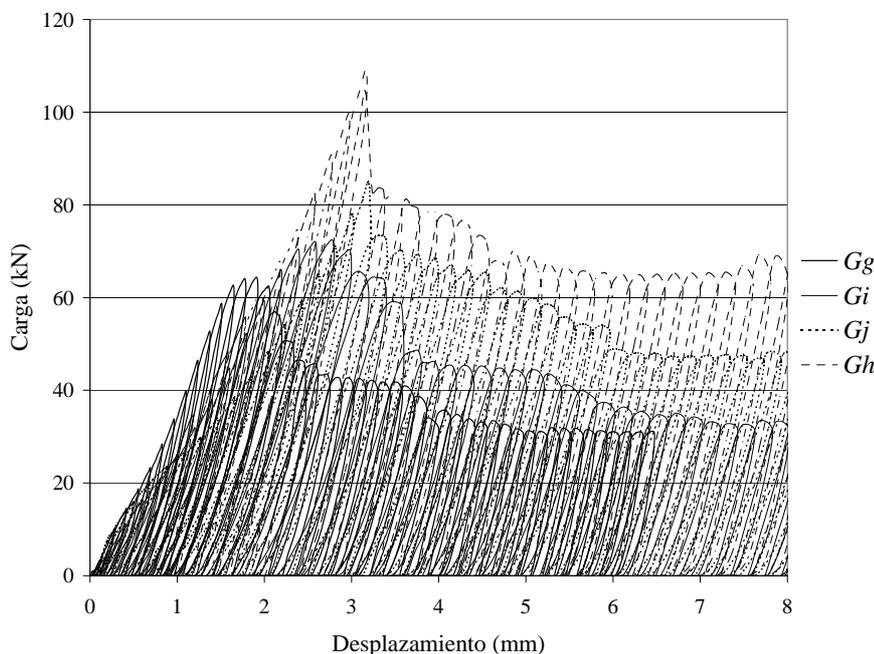


Figura 4.67 — Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo G^{CI} .

Durante el ensayo el tejido de fibra de vidrio no presenta líneas de fisura. La rotura en la probeta ocurre a través de la junta de mortero. La fuerte adherencia del tejido a las piezas de

ladrillo ocasiona el desprendimiento de la capa superficial de las mismas. En la figura 4.68 (a y b) se muestra el modo de fallo de las probetas del grupo G^{C1} .

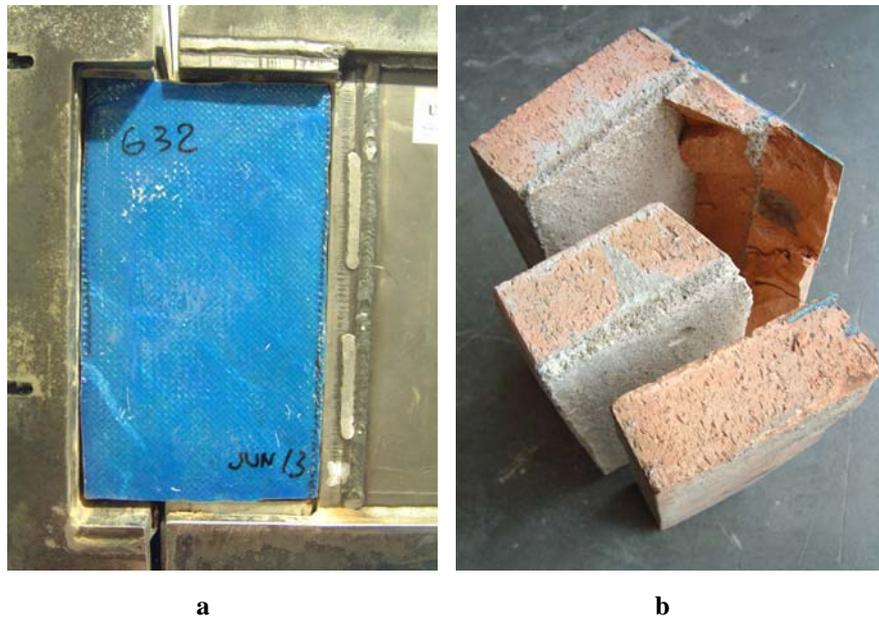


Figura 4.68 — Modo de fallo del conjunto G^{C1} : (a) en el tejido se perciben vagamente algunas líneas diagonales que denotan la rotura de una de las probetas; (b) detalle del espécimen ensayado.

4.5.3.3. Conjuntos del grupo G^{C3}

El grupo G^{C3} esta constituido por tres conjuntos de probetas (Gk , Gl , Gm) reforzadas con GFRP, sometidas a tensiones normales de 1.02, 1.53 y 2.04 N/mm^2 . Los conjuntos presentan en general resistencias últimas y residuales elevadas.

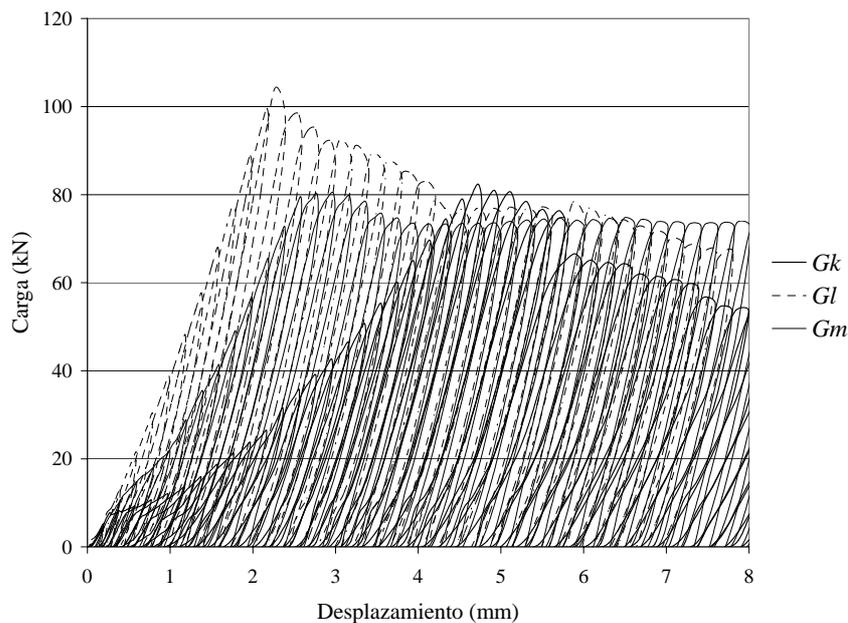


Figura 4.69 — Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo G^{C3} .

El conjunto Gk (sujeto a $\sigma = 1.02 \text{ N/mm}^2$) alcanza una resistencia última que se sitúa en un rango entre 84 y 94 kN, con una resistencia residual dentro de un rango más amplio que va de 34 a 50 kN (figura 4.69).

Las probetas del conjunto Gl muestran resistencias últimas entre 105 y 138 kN, con una residual en torno a 60 kN. Sin embargo, el conjunto Gm , presenta una tendencia de alta resistencia residual, pero tiende a una resistencia última similar a la del grupo Gk (*puede verse claramente la similitud entre los conjuntos Gk y Gm ($\sigma = 1.02$ y $\sigma = 1.53$, respectivamente).*

El comportamiento de los conjuntos del grupo G^{C3} es similar al de los conjuntos del grupo G^{C1} : el tejido muestra pocos indicios de rotura y durante el fallo el tejido desprende segmentos de ladrillo (figura 4.70 a y b).

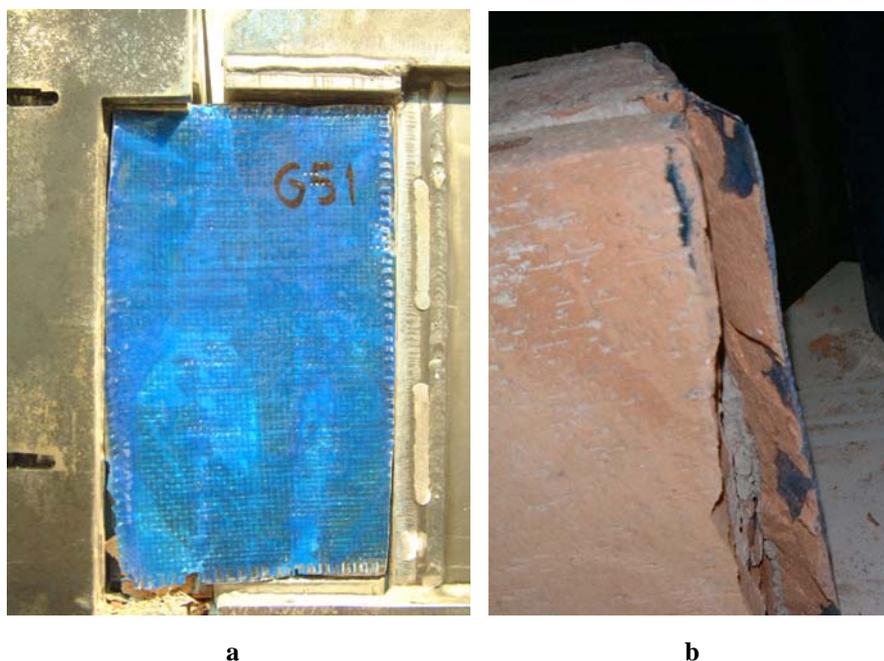


Figura 4.70 — Modo de fallo de una de las probetas del conjunto Gk : (a) el refuerzo no muestra líneas de fisura; (b) durante el fallo se desprende parte de la superficie y queda adherida al tejido.

4.5.3.4. Conjuntos del grupo A^{C1}

El grupo A^{C1} está formado por cuatro conjuntos de probetas (Ae , Af , Ag , Ah) reforzadas con AFRP. Se ensayan sujetas a tensiones normales de 0.51, 1.02, 1.53 y 2.04 N/mm^2 . Los conjuntos muestran algunas peculiaridades en el comportamiento, en relación a los distintos niveles de tensión normal.

El conjunto Ae ($\sigma = 0.51 \text{ N/mm}^2$) presenta notoria dispersión con resistencias últimas de 45, 48 y 64 kN; y residuales de 15, 27 y 23 kN (figura 4.63-b). El comportamiento del conjunto Af ($\sigma = 1.02 \text{ N/mm}^2$) presenta homogeneidad en la resistencia residual, con resistencias máximas de 68, 74 y 87 kN.

El conjunto *Ag* es más homogéneo en la fase residual, pero con notorias diferencias en las resistencias últimas (60, 78 y 94 kN). El conjunto *Ah* presenta resistencias últimas muy elevadas (98, 126, 134 kN) con niveles residuales entre 60 y 80 kN (figuras 4.71-a y b).

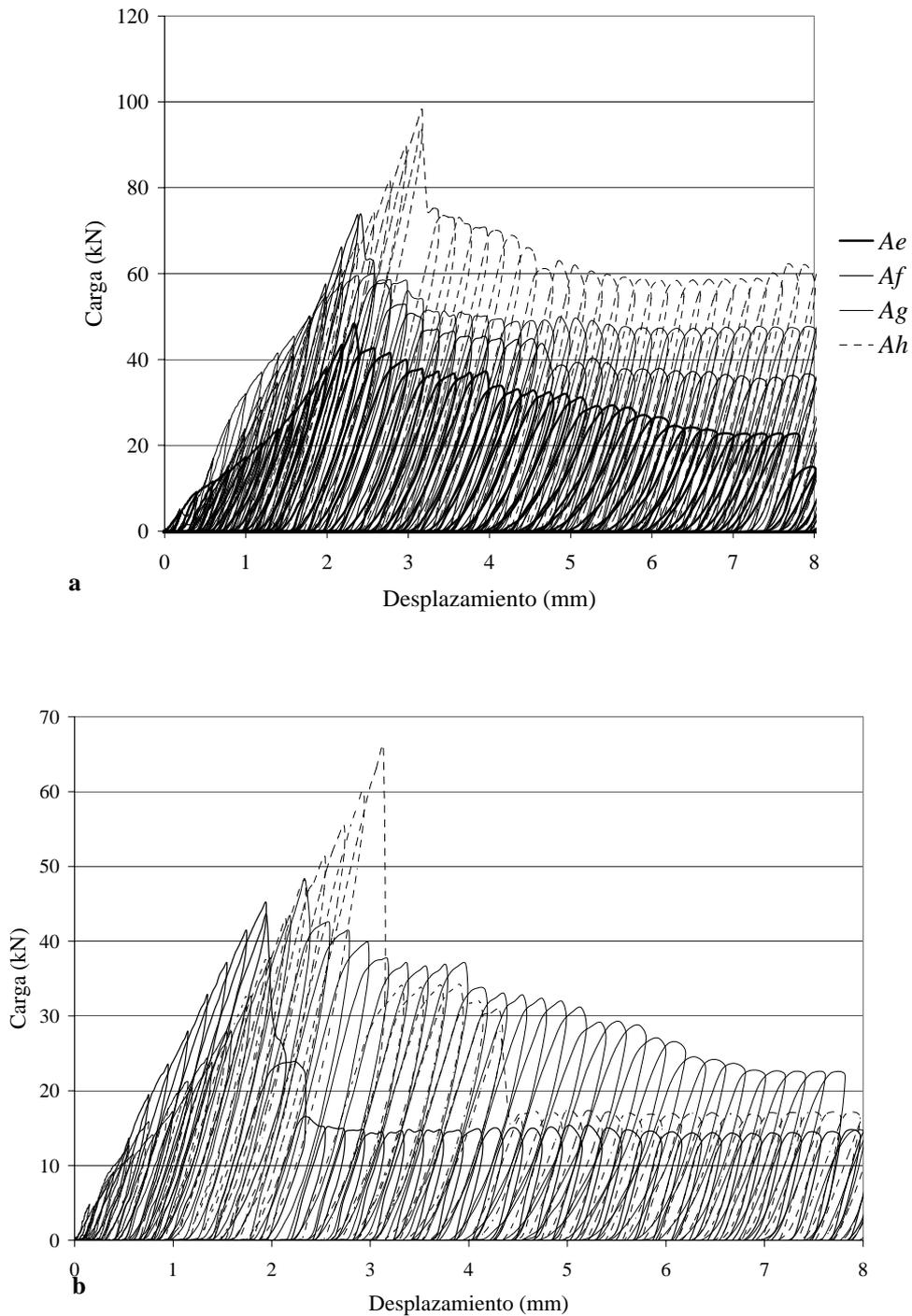


Figura 4.71—Comportamiento resistente de los conjuntos de probetas del grupo A^{CI} : (a) curvas de comportamiento por grupo; (b) detalle del comportamiento de los especímenes del conjunto de ensayos *Ae*.

En los conjuntos de probetas del grupo A^{C1} (figura 4.72 a y b) ocurre el fenómeno de desprendimiento superficial de las piezas de fábrica.

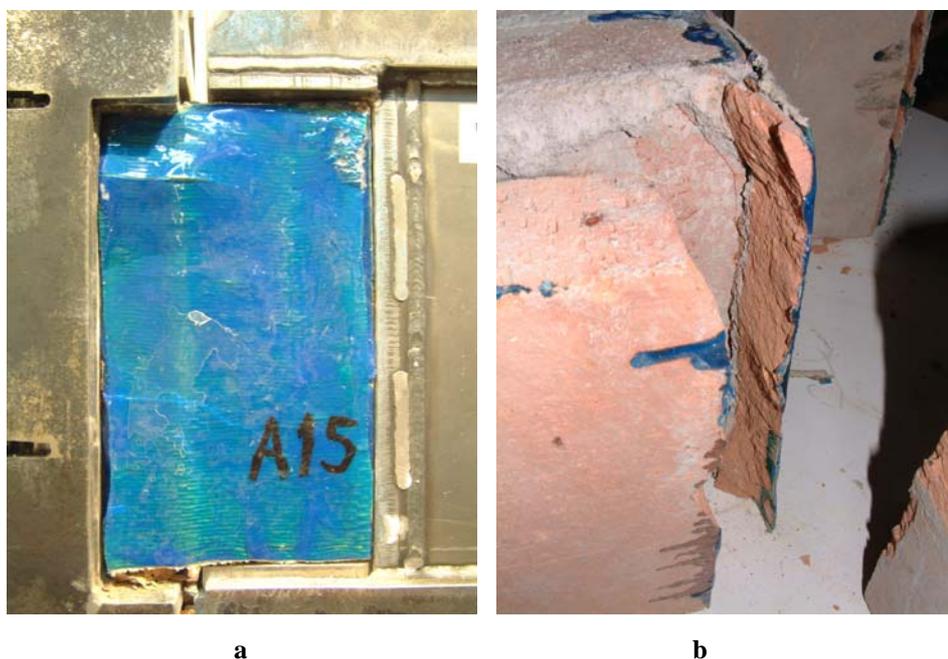


Figura 4.72 — Comportamiento de rotura de las probetas del conjunto Ae : (a) rotura de la probeta colocada en el bastidor de carga; (b) detalle del desprendimiento de la capa superficial de las piezas de fábrica.

4.5.3.5. Conjuntos del grupo A^{C2}

El grupo A^{C2} está formado por cuatro conjuntos de probetas (Ai , Aj , Ak , Al) reforzadas con tejido AFRP aplicado en dos caras. Los conjuntos manifiestan un comportamiento homogéneo con resistencias muy elevadas. Presentan características de deformación en dos fases; una rampa hasta la carga última y un proceso de descarga ligeramente gradual hasta la zona de estabilización residual.

El conjunto Ai comporta resistencias últimas cercanas a 100 kN, con una reacción frágil durante la fase de descarga, que se sitúa entre 20 y 36 kN. El conjunto Aj presenta resistencias últimas de 88, 111 y 115 kN, con una resistencia residual en torno a 36 kN. El conjunto Ak alcanza resistencias últimas de 103, 117 y 135 kN, con una resistencia residual de 57 kN.

Por último, el conjunto Al presenta las resistencias más elevadas (cercanas a 110, 117, 155 kN) con una resistencia residual próxima a 70 kN (figuras 4.73 a y b).

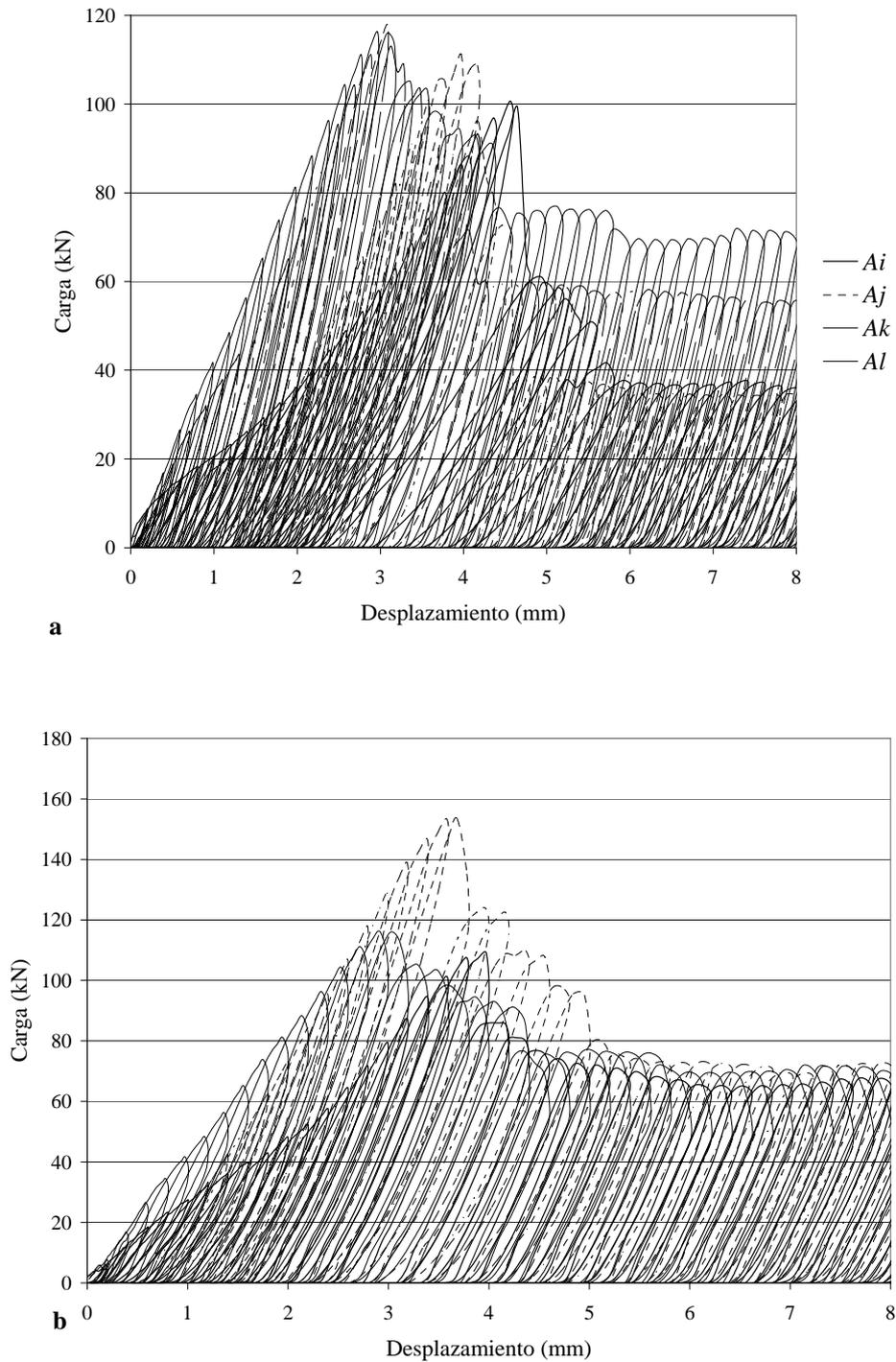


Figura 4.73 — Comportamiento de los conjuntos del grupo A^{C2} : (a) curvas carga-desplazamiento de los conjuntos; (b) ensayos del conjunto Al .

Las probetas del grupo A^{C2} (figura 4.74 a y b) exhiben alta adherencia del tejido a las piezas de fábrica. La superficie reforzada muestra pocos signos de deterioro, sin embargo en las probetas ocurre el desprendimiento de la capa superficial de los ladrillos en las dos caras

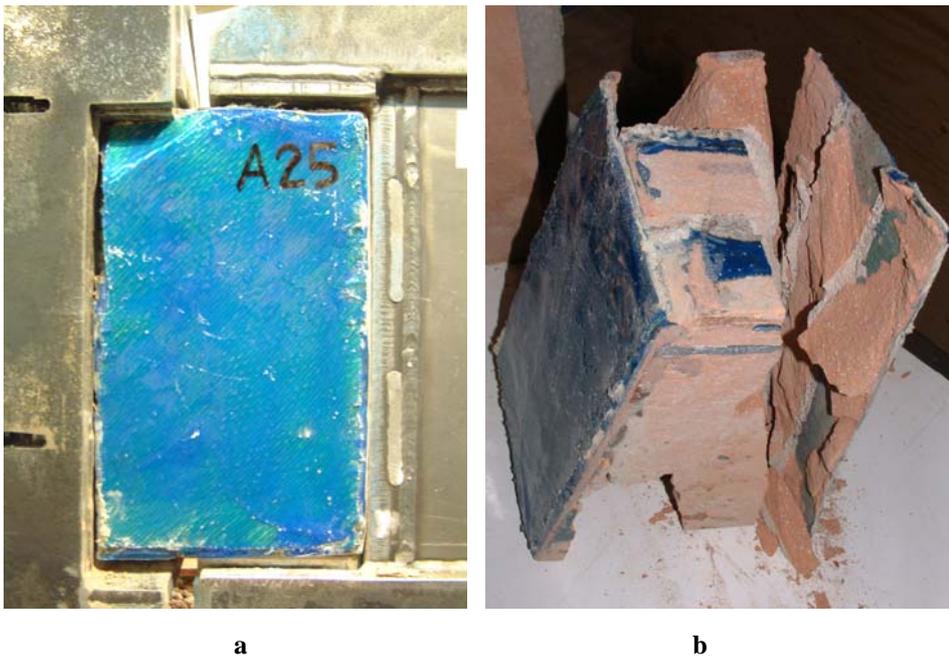


Figura 4.74 — Fallo de una de las probetas del conjunto A_i del grupo A^{C2} : (a) apariencia superficial de la probeta ensayada; (b) detalle del estado de la probeta después del ensayo.

4.5.3.6. Conjuntos del grupo M^{C1}

El grupo M^{C1} está constituido por tres conjuntos de probetas (Md , Me , Mf) reforzadas con enchapado de madera micro-laminada. Son ensayadas sujetas a tensiones normales de 0.51, 1.02 y 1.53 N/mm^2 (figura 4.75).

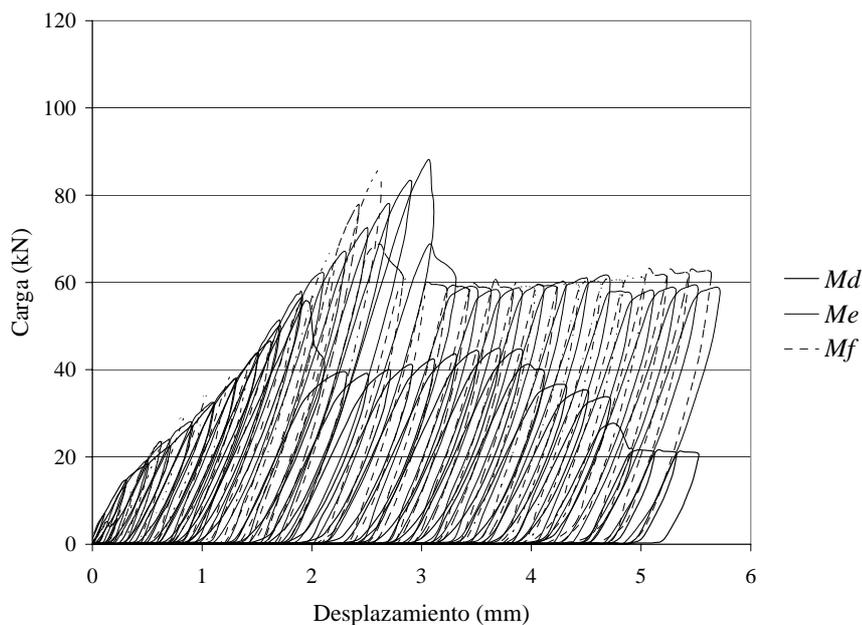


Figura 4.75 — Comportamiento de los conjuntos de probetas del grupo M^{C1} .

El conjunto Md presenta resistencias últimas superiores a 50 kN y un ajuste residual formando una línea sinuosa descendente, entre 25 y 33 kN. El conjunto Me denota resistencias máximas en un rango entre 80 y 90 kN, con resistencias residuales entre 50 y 60 kN. El conjunto Mf presenta resistencias entre 75 y 92 kN, inferiores a las del conjunto Me y una residual constante, en torno a los 60 kN. Los conjuntos exhiben heterogeneidad en su comportamiento.

En este grupo de probetas el refuerzo de madera micro-laminada no presenta deterioro (figura 4.76 a y b). El fallo ocurre por desprendimiento del adhesivo en algunas zonas de contacto con la probeta.

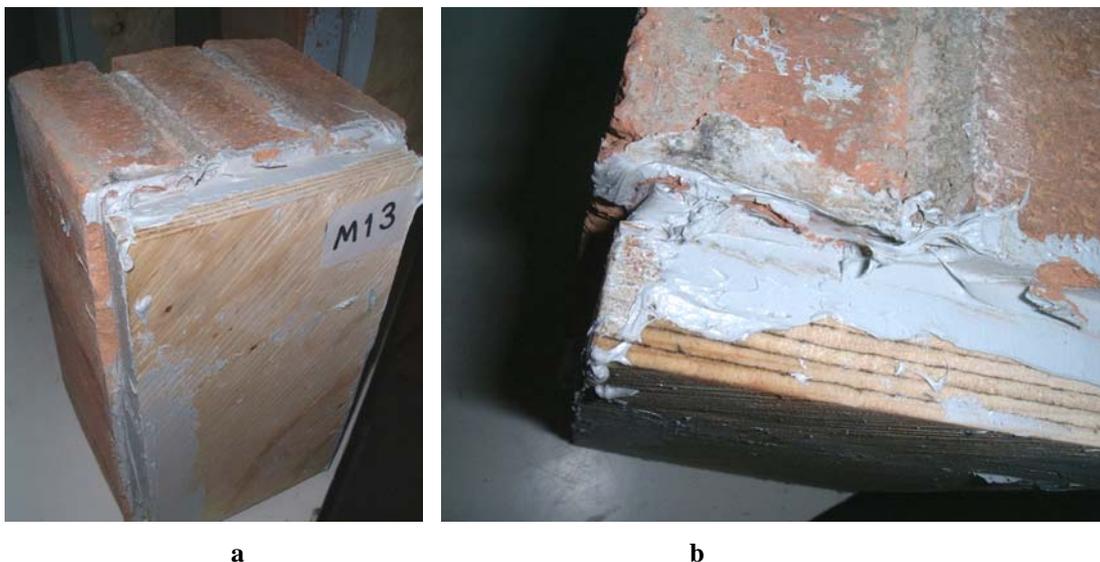


Figura 4.76 — Modo de fallo de las probetas del grupo M^{Cl} : (a) probeta después del ensayo; (b) detalle de la placa de madera micro-laminada adherida a la probeta. Debido a la eficacia del adhesivo no se perciben indicios de fisuras o desprendimiento.

4.5.3.7. Conjuntos del grupo C^{Cl}

El grupo C^{Cl} está constituido por tres conjuntos de probetas (Cd , Ce , Cf) reforzadas con embaldosado cerámico en una cara. En general se muestra un comportamiento homogéneo, con un incremento más reducido a mayor tensión normal aplicada.

El conjunto Cd exhibe resistencias últimas superiores a 70 kN y resistencias residuales en torno a 40 kN. El conjunto Ce alcanza resistencias últimas dentro de un rango situado entre 90 y 106 kN, con resistencias residuales variables (en torno a medias de 40 y 70 kN). El conjunto de ensayos Cf alcanza resistencias últimas de 103 a 111 kN y residuales oscilantes entre 65 y 82 kN, en un proceso dúctil (4.77).

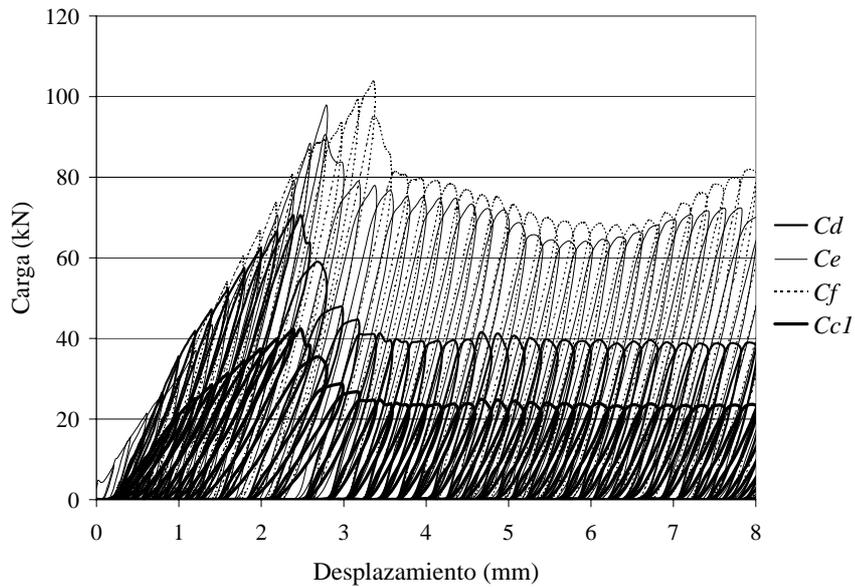


Figura 4.77 — Comportamiento de los conjuntos de probetas del grupo C^{CI} .

El desempeño del adhesivo tiene un papel muy importante en el comportamiento de este sistema de refuerzo. En la figura 4.78 se presenta el modo de fallo de las probetas.

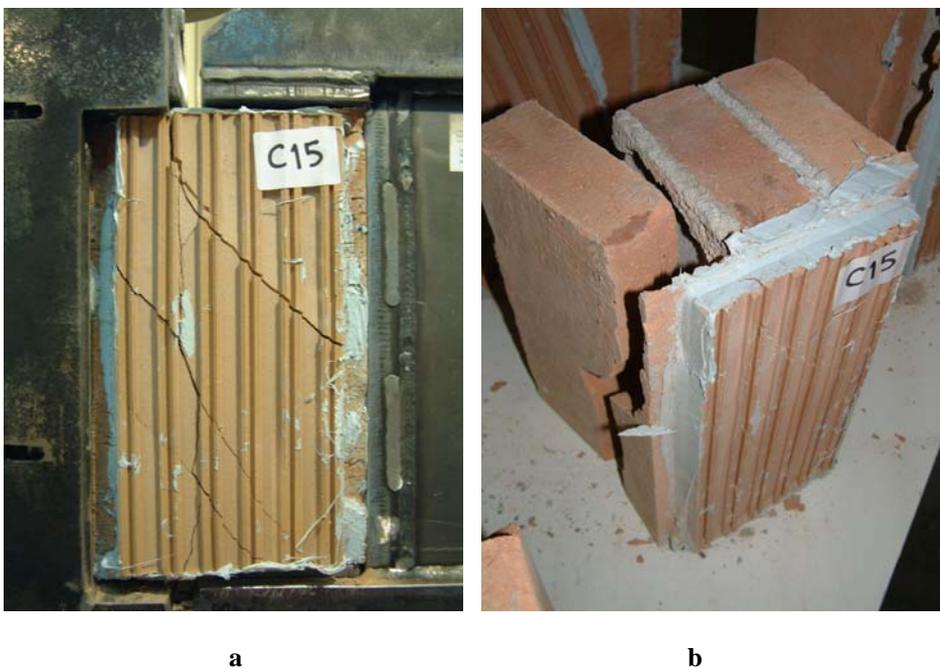


Figura 4.78 — Modo de fallo de las probetas reforzadas con baldosas cerámicas: (a) fisuras de la probeta ensayada; (b) rotura de la probeta.

4.5.4. Resumen de resultados

Los resultados obtenidos en la actual campaña experimental arrojan extensa información, tanto de la eficacia y viabilidad de uso de los sistemas de refuerzo estudiados, como de la contribución de los mismos a las propiedades resistentes y mecánicas de las paredes de obra de fábrica.

En las tablas se muestran los principales datos característicos de las probetas: la tensión de carga normal aplicada en el proceso de pre-compresión (σ_n); la tensión tangencial última (τ_u); el valor de la tensión tangencial residual (τ_r) y los valores medios porcentuales de incremento de las tensiones tangencial última (${}_{in}\tau_u$) y residual (${}_{in}\tau_r$) obtenidos en los conjuntos de probetas reforzadas.

En la tabla 4.5 se despliegan los valores resistentes medios de los conjuntos de ensayos sujetos a procesos monotónicos durante la fase de carga tangencial.

Grupo	Conjuntos	σ_n		τ_u		${}_{in}\tau_u$	τ_r		${}_{in}\tau_r$
		(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)		(kN)	(N/mm ²)	
S^M	Sa	20	0.51	33.19	0.85		16.7	0.43	
	Sg	40	1.02	56.57	1.44		31.1	0.79	
	Sh	60	1.53	75.16	1.92	-	46.2	1.18	-
	Sd	80	2.04	67.16	1.71		59.18	1.51	
G^M	Ga	20	0.51	53.09	1.35	60	21	0.54	26
	Gb	40	1.02	70.64	1.80	25	35	0.89	13
G^{M1}	Gf	80	2.04	110.83	2.83	65	69	1.76	17
G^{M2}	Ge	20	0.51	87.01	2.22	162	20	0.51	20
G^{M3}	Gc	20	0.51	73.65	1.88	122	20	0.51	20
	Gc1	40	1.02	94.54	2.41	67	48	1.22	54
	Gc2	60	1.53	119.32	3.04	59	75	1.91	62
	Gd	80	1.04	114.91	2.93	71	70	1.79	18
A^M	Aa	20	0.51	47.43	1.21	43	17	0.43	2
	Ab	40	1.02	65.20	1.66	15	32	0.82	3
	Ac	60	1.53	89.94	2.29	20	48	1.22	4
	Ad	80	2.04	99.47	2.54	48	60	1.53	1
M^{M1}	Ma	20	0.51	42.54	1.09	28	20	0.51	20
	Mb	40	1.02	60.34	1.54	7	40	1.02	29
	Mc	80	2.04	94.88	2.42	41	66	1.68	43
C^{M1}	Ca	40	1.02	65.61	1.67	16	40	1.02	29
	Cb	60	1.53	69.48	1.77	-8	50	1.28	8
	Cc	80	2.04	84.88	2.17	26	70	1.79	18

Tabla 4.5 — Resumen de resultados de los conjuntos de probetas ensayadas bajo proceso monotónico.

La tabla 4.6 despliega los valores resistentes de los conjuntos de ensayos sujetos a procesos cíclicos durante la fase de carga tangencial.

Grupo	Conjuntos	σ_n		τ_u		in τ_u (%)	τ_r		in τ_r (kN)
		(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)				
S^C	Se	20	0.51	38.19	0.97		17.5	0.45	
	Si	40	1.02	50.20	1.28		34	0.87	
	Sj	60	1.53	71.73	1.83	-	50.5	1.29	-
	Sf	80	2.04	90.76	2.32		50	1.28	
G^{C1}	Gg	20	0.51	62.19	1.59	63	34.5	0.88	97
	Gi	40	1.02	69.10	1.76	38	41	1.05	21
	Gj	60	1.53	78.78	2.01	10	55	1.40	9
	Gh	80	2.04	104.82	2.67	15	56.5	1.44	13
G^{C3}	Gk	40	1.02	85.33	2.18	70	39.5	1.01	16
	Gl	60	1.53	106.28	2.71	48	58	1.48	15
	Gm	80	2.04	85.34	2.18	-6	47.5	1.21	-5
A^{C1}	Ae	20	0.51	53.07	1.35	39	15.5	0.40	-11
	Af	40	1.02	70.75	1.80	41	36.5	0.93	7
	Ag	60	1.53	77.10	1.97	7	47	1.20	-7
	Ah	80	2.04	119.32	3.04	31	60	1.53	20
A^{C2}	Ai	20	0.51	99.50	2.54	161	28	0.71	60
	Aj	40	1.02	113.59	2.90	126	37.5	0.96	10
	Ak	60	1.53	119.05	3.04	66	54	1.38	7
	Al	80	2.04	112.58	2.87	24	68	1.73	36
M^{C1}	Md	20	0.51	54.21	1.38	42	25	0.64	43
	Me	40	1.02	86.50	2.21	72	52	1.33	53
	Mf	60	1.53	84.76	2.16	18	57.5	1.47	14
C^{C1}	Cc1	20	0.51	49.53	1.26	30	25	0.64	43
	Cd	40	1.02	71.62	1.83	43	41	1.05	21
	Ce	60	1.53	97.84	2.50	36	47.5	1.21	-6
	Cf	80	2.04	105.82	2.70	17	41	1.05	-18

Tabla 4.6 — Resumen de resultados de los conjuntos de probetas ensayadas bajo proceso cíclico.