

CAPITULO 6

ESTUDIO DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se presenta el análisis de resultados de las campañas experimentales Aramida y Carbono. Previamente a esto, ha sido procesada la información de los trabajos experimentales de ambas campañas experimentales, cuyos resultados y comentarios de cada ensayo se pueden encontrar en los Anexos A y B.

Una vez reunida la información de los resultados experimentales se presenta los mismos en tablas y gráficas, para describir y comentar el comportamiento de cada serie de ensayos en los que se aplicaron los materiales compuestos como elementos de refuerzo en hormigón, analizando, básicamente, las siguientes características:

- La carga máxima o de rotura de las probetas.
- Las microdeformaciones obtenidas en las láminas de refuerzo al aplicar la carga en las probetas.
- La rigidez en el rango elástico durante la aplicación de la carga en la probeta.
- El tipo de rotura: frágil o dúctil

6.1 ESTUDIO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL ARAMIDA

Los resultados experimentales de la aplicación de láminas de aramida como refuerzo a cortante se tienen comentados en el Anexo A donde se tiene una descripción detallada de cada ensayo. La situación de cada una de las galgas pueden verse también en dicho anexo.

La figura 6.1 muestra la simbología usada en campaña experimental Aramida, para referirse y diferenciar los diversos tipos de ensayos, agrupados por series, de acuerdo a las variantes tanto en las probetas de hormigón como en la disposición del material de refuerzo en cada ensayo. La tabla 6.1 presenta, la carga máxima o de rotura, determinada por la fractura del hormigón o el desprendimiento de la fibra; la rigidez obtenida en el tramo elástico del ensayo; y las microdeformaciones máximas registradas en las láminas de refuerzo hasta la carga máxima.

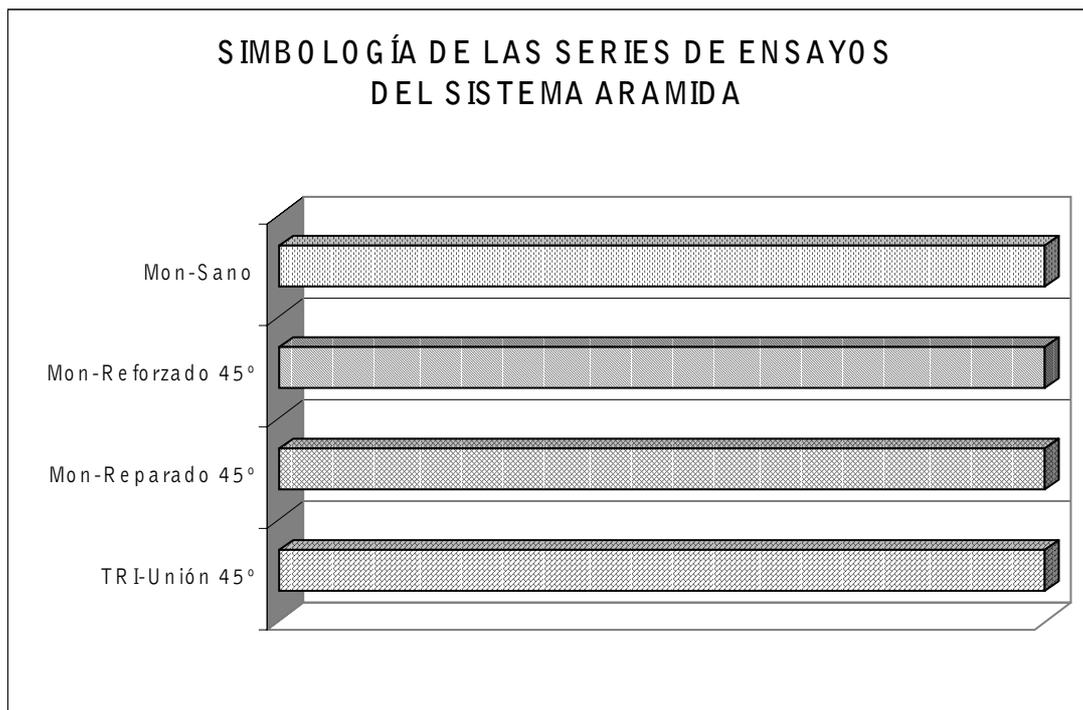


Figura 6.1 Simbología utilizada para definir cada serie de ensayos de la campaña experimental Aramida

TABLA 6.1 RESULTADOS GENERALES DEL SISTEMA ARAMIDA							
ENSAYO	CARGA MÁX. kN	K (kN/mm)	MICRODEFORMACIONES $\mu\epsilon$				PROMEDIO $\mu\epsilon$
			Galga $\mu\epsilon$ 1	Galga $\mu\epsilon$ 2	Galga $\mu\epsilon$ 3	Galga $\mu\epsilon$ 4	
Mon Sano 1	237,00	769					
Mon Sano 2	300,00	629					
Promedio	268,50	699					
Mon Ref 1	258,6	671	1.000	(-) 311 *	(-) 500 *	850	665
Mon Ref 2	269,26	634	1.103	535	1.020	500	790
Mon Ref 3	240,78	645	1.490	(-) 120 *	(-) 48 *	1.225	721
Promedio	256,21	650					725
Mon Rep 1	118,60	190	654	1.730	1.615	885	1.221
Mon Rep 2 δ	57,40	157	1.015	1.150	1.230	975	1.093 δ
Mon Rep 3	123,82	300	1.550	1.190	1.020	1.570	1.333
Mon Rep 4	97,94	200	1.559	735	794	1.735	1.206
Promedio	113,45	230					1.253
TRI Unión 1	31,46	319	1.780	738	523	-	1.014
TRI Unión 2	62,88	320	1.430	1.020	-	-	1.225
TRI Unión 3	43,21	155	1.640	980	875	-	1.165
TRI Unión 4	33,79	319	435	-	938	950	774
TRI Unión 5	30,48	159	1.315	1.050	-	-	1.183
TRI Unión 6	35,45	206	1.175	670	-	-	923
Promedio	39,55	246					1.047

Valores de Carga máxima, Rigidez (kN/mm) y microdeformaciones de las láminas de Aramida de cada uno de los ensayos y sus valores promedio de cada serie de ensayos.

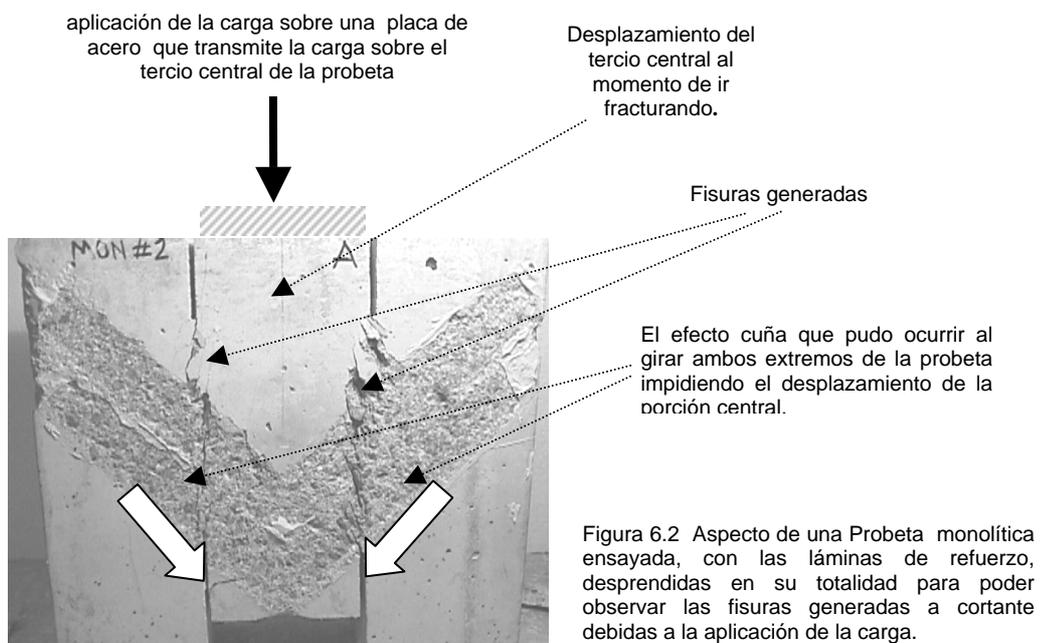
(*) Los valores negativos indican las microdeformaciones a compresión en las láminas de refuerzo adheridas en las probetas cuando éstas son sometidas a cortante.

(δ) Este ensayo está excluido por proporcionar datos que ponen esta serie en una posición muy favorable en cuanto a su relación carga VS. Deformación.

6.1.1 Consideraciones durante la etapa experimentales aramida

Al realizar comparaciones entre la serie Monolíticas-Sanas y Monolíticas-Reforzadas, en la tabla 6.1 se observa que no se presentó ninguna mejora en la capacidad de carga ni incremento de rigidez en las probetas monolíticas reforzadas. La rigidez obtenida en los resultados de la serie Mon-Sana de esta campaña Aramida presentó un valor consistente al verificar que la rigidez obtenida en la serie Mon-Sana de la campaña experimental carbono presentaron la misma rigidez en promedio, lo cual se puede apreciar en la tabla 6.7. Teóricamente, se tiene que los resultados deben ser los mismos, ya que las probetas de ambas campañas experimentales fueron fabricadas con el mismo tipo de hormigón, dosificado con el mismo diseño de mezcla.

Todos los ensayos fueron tomados en cuenta, llegando a justificar aquellos resultados que suponían la influencia de un factor externo; como es el caso del segundo ensayo de la serie Mon-Sana, el cual, no se descartó para determinar las propiedades de la misma serie, a pesar de la elevada carga de rotura obtenida, ya que la baja rigidez obtenida descarta la posibilidad de un efecto cuña, en el cual, el pretensado inferior en la probeta, pudiera, haber ocasionado un giro de ambos extremos de la probeta en el momento que se generan las fisuras, pudiendo haber impedido el desplazamiento vertical del tercio central de la probeta. Para visualizar esto, nos auxiliamos de la figura 6.2



Finalmente, se optó por tomar en cuenta el valor de este segundo ensayo de la serie Mon-Sanas, apoyándose en los resultados de los ensayos de la serie de probetas Mon-Sanas del sistema Carbono que, como se mencionó anteriormente, tienen el mismo diseño de mezcla, teniendo resultados similares y con una dispersión menor en sus resultados.

Si se hubiera optado por descartar el segundo ensayo Mon-Sano 02, la diferencia entre probetas monolíticas Sanas y Reforzadas sería del 3% a favor de las Reforzadas, y tomando en cuenta ambos ensayos (MonSano 01 y MonSano 02) la diferencia es de un 7% a favor de los ensayos de probetas monolíticas sanas.

6.1.1.1 Fuerza de Rozamiento entre Bloques

Es importante mencionar que la fuerza necesaria para vencer la fuerza de rozamiento entre las paredes de hormigón en contacto en el tercio central de cada probeta TRI-Unión 45° es considerable, ya que la fuerza requerida para permitir el deslizamiento entre superficies fue medida de la misma forma en la prensa hidráulica mostrada en la figura 5.19. La figura 6.3 muestra en el esquema, la zona donde se aplicó la fuerza para prensar los bloques mediante barras roscadas en forma manual antes de aplicar las láminas de refuerzo, requiriendo una fuerza F_v de 6,340 kN.

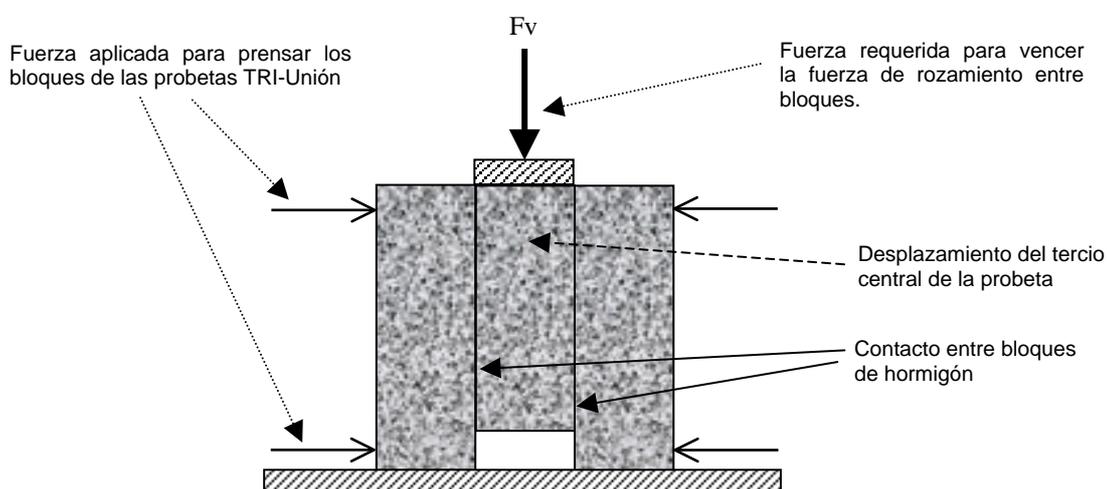


Figura 6.3 En esta figura se describe la fuerza necesaria para vencer la fuerza de rozamiento causada por la fuerza horizontal de prensado aplicada para unir los bloques de la probeta, previamente al encolado de las láminas de FRP. Las flechas horizontales indican la zona donde se aplicaron las fuerzas para unir los bloques.

Esta fuerza de rozamiento actuó sobre dos superficies de 10cm x 25cm teniéndose una superficie total de 0,05m². Calculando el esfuerzo se tiene:

$$6,340\text{kN} / 0,05\text{m}^2 = 126,80 \text{ kPa} = 0,127\text{MPa}$$

El esfuerzo de rozamiento obtenido en probetas de las series Tri-Unión aporta poca resistencia al ensayo, dicha magnitud de refuerzo equivale aun pequeño porcentaje del esfuerzo cortante de los ensayos Mon-Sano, de ambas campañas, aramida y carbono, teniendo una carga máxima promedio de 269,25 kN, la cual actuó sobre dos superficies paralelas de 10cm x 15cm teniendo una superficie total del 0,03m² con lo que se tienen los siguientes resultados:

$$\text{Esfuerzo cortante} = 269,25\text{kN} / 0,03\text{m}^2 = 8.957\text{kPa} = 8,975\text{MPa}$$

La razón de los esfuerzos anteriores de $\tau_{\text{rozamiento}} / \tau_{\text{cortante}}$ dan como resultado la proporción siguiente:

$$0,127\text{MPa} / 8,975\text{MPa} = 0,0142$$

Basados en la relación anterior se tiene que el esfuerzo de rozamiento representa un 1,4% del esfuerzo cortante promedio que resistieron las series Mon-Sano de las campañas aramida y carbono, pero la fuerza de rozamiento propia de los ensayos TRI-Unión 45° proporcionan una considerable contribución al valor de la fuerza máxima (39,55kN). Dicha razón es:

$$6,340\text{kN} / 39,55\text{kN} = 0,160$$

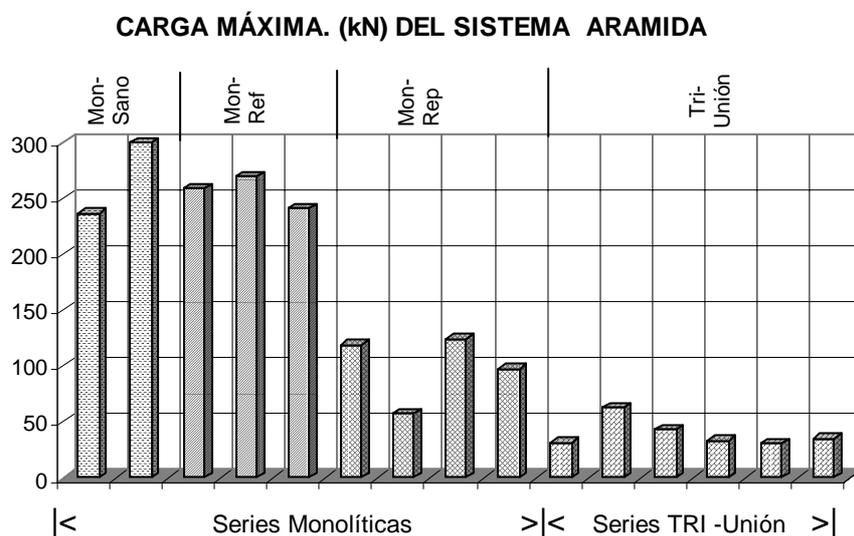
El valor anterior nos indica que la fuerza de rozamiento tomo un 16% de la carga total en los ensayos TRI-Unión 45° aramida, lo que implica que tiene una importante participación en la resistencia en estos ensayos, por lo que se considerará esta fuerza en los ensayos de las series TRI-Unión de las dos campañas (*aramida y carbono*).

6.1.1.2 Exclusión del refuerzo laminar horizontal y vertical

Tanto en las series Monolíticas como en las TRI-Unión, fue imposible reforzar las probetas con las láminas orientándolas verticalmente, debido a lo angosto de las láminas, las cuales sólo cuentan con 2 cm de ancho. En cuanto a la aplicación del refuerzo en dirección horizontal no tiene utilidad, ya que las láminas de aramida no están diseñadas para transmitir esfuerzos de torsión o momentos. En ensayos preliminares en el capítulo 4, punto 4.7.2 se menciona la baja resistencia de las láminas, al ser aplicadas como refuerzo horizontal, presentándose un desprendimiento, inmediato de las láminas, con respecto a la superficie de hormigón.

6.1.2 Descripción de resultados experimentales del sistema aramida

En la gráfica 6.1 se observa la carga máxima o de rotura de cada una de las probetas de la campaña aramida, y se aprecia la variación de resultados de cada serie.

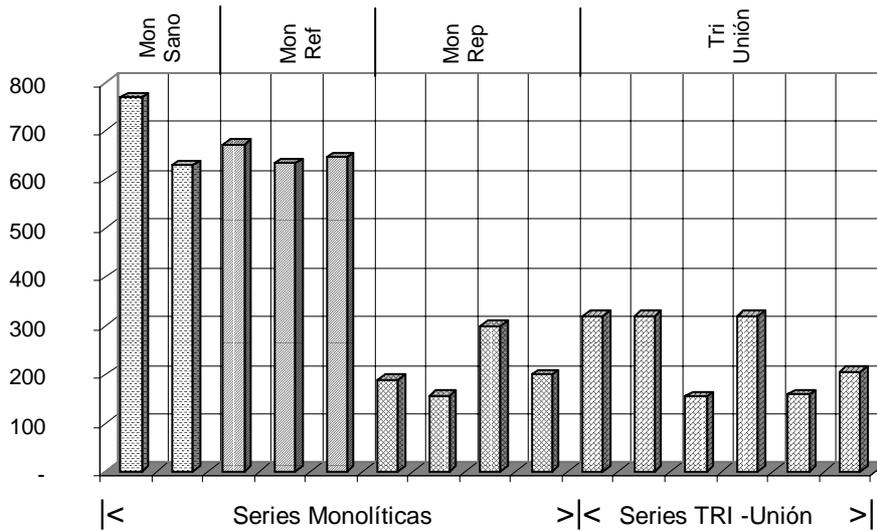


Grafica 6.1 Carga máxima (kN) de cada uno de los ensayos de las cuatro series de probetas del sistema Aramida

La rigidez K del sistema, medido en kN / mm , queda definida como la relación de la fuerza con respecto al desplazamiento en el rango de deformación lineal obtenido de los gráficos “Carga vs. Microdeformaciones” del anexo A. La rigidez K obtenida en cada serie de ensayos se observan en la gráfica 6.2

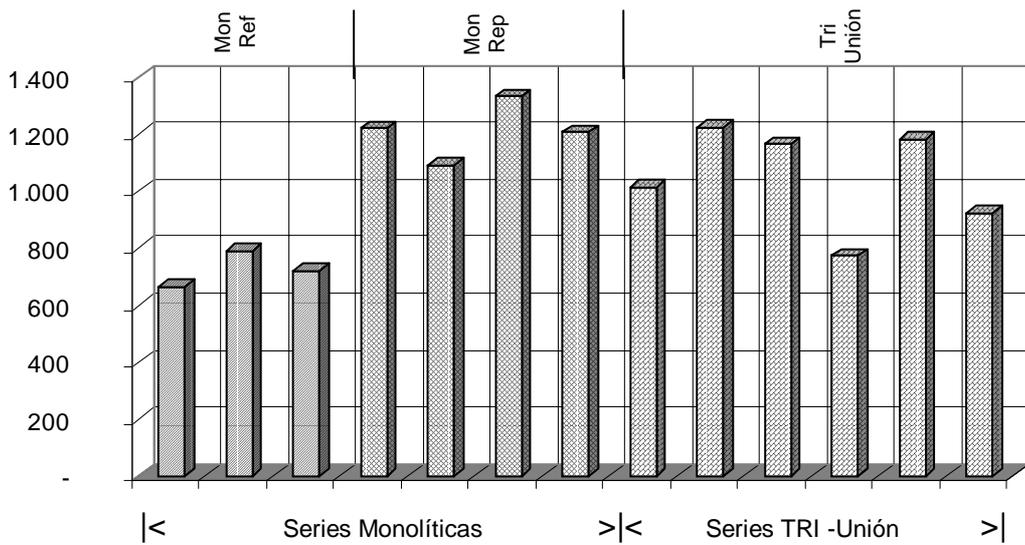
En la gráfica 6.3 se observan las lecturas promedio de las microdeformaciones longitudinales medidas en las láminas de refuerzo, en cada serie de ensayos, en el momento en que le son transferidas las tensiones del hormigón durante la aplicación de la carga. Por medio de dichas deformaciones, se podrá determinar las tensiones a las cuales estuvieron sometidas las láminas de refuerzo. Se observa como las deformaciones máximas en rotura (en valor medio) son del orden de $1,3\%$, mucho menores que la capacidad de deformación última medida en las bandas de aramida, que son del orden del 12% , es decir, prácticamente sólo se moviliza el 10% de la capacidad resistente de las bandas.

PENDIENTE K DE RIGIDEZ (kN/mm) SISTEMA ARAMIDA



Grafica 6.2 Valores de la pendiente K de rigidez de los ensayos de Carga (kN) vs Desplazamiento del LVDT (mm)

MICRO-DEFORMACIONES PROMEDIO DEL SISTEMA ARAMIDA



Grafica 6.3 Valores promedio en Microdeformaciones de las deformaciones acumuladas de las láminas de Aramida de cada ensayo, a partir del punto de inicio de carga hasta el punto de carga máxima.

En la Tabla 6.2 se observa el comportamiento de los valores promedio, registrados en forma porcentual de cada serie de ensayos. Para analizar la carga y la rigidez K se consideró como patrón de 100% la serie de probetas Monolíticas-Sanas, y para analizar las deformaciones sobre las láminas de refuerzo, se tomó como patrón de 100% la serie de probetas Monolítico-Reforzadas.

TABLA 6.2 COMPORTAMIENTO RELATIVO PORCENTUAL DEL SISTEMA ARAMIDA			
Serie	Carga Máx. (kN)	Rigidez K (kN/mm)	Microdeformaciones
Mon-Sano	100%	100%	0%
Mon-Ref 45°	95%	93%	100%
Mon-Rep 45°	42%	33%	173%
TRI-Unión 45°	15%	35%	144%

6.1.3 Influencia del refuerzo laminar en la variación de rigidez en el sistema aramida

Los resultados obtenidos en la campaña experimental Aramida indican que entre las series Mon-Sano y Mon-Ref 45° fueron mínimas las diferencias, no presentándose incremento ni en la capacidad de carga ni en la rigidez. Por tanto, puede concluirse que la colocación de las láminas sobre elementos no fisurados previamente resulta poco eficiente.

En cuanto a la serie Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45°, se deduce que gran parte de la capacidad de carga en la serie Mon-Rep 45° se debe a la fuerza de rozamiento Intergranular, generada en el plano cortante, la cual es considerablemente mayor que la fuerza de rozamiento entre bloques de la serie TRI-Unión 45°, lo cual explica el porqué esta serie tiene una capacidad de carga menor a la serie Mon-Rep 45°.

En cuanto a la resistencia de los elementos reparados de la serie Mon-Rep 45°, es considerablemente menor, en un 58% en promedio con respecto a los elementos originales (Mon-Sanos). En cuanto a la rigidez, se puede observar que la rigidez en la serie Mon-Rep 45° fue ligeramente menor, con respecto a la serie TRI-Unión 45°, debido probablemente a las fisuras existentes en las probetas reparadas, las cuales no permiten la continuidad a lo largo de toda la superficie de contacto entre el hormigón y las láminas de refuerzo; y dicha continuidad si existe en las probetas de la serie TRI-Unión 45°. Las deformaciones registradas en las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45° concuerdan con la rigidez, ya que la rigidez será inversamente proporcional a las deformaciones desarrolladas en las láminas de refuerzo.

6.1.4 Descripción del cálculo de tensiones sobre las láminas de refuerzo del sistema Aramida.

Para determinar la eficiencia con la cual trabajaron las láminas de refuerzo de Aramida, se calcularon las tensiones máximas que registraron las láminas de refuerzo, y cuáles fueron las cargas transmitidas a través de ellas hacia los apoyos de la probeta.

El siguiente es un ejemplo en el que se determinan las tensiones a las que estuvieron expuestas en promedio las láminas de refuerzo en el ensayo No.03 de la serie Monolítico Reparada, y las fuerzas que fueron transferidas a través de las mismas.

Módulo de elasticidad: = 50,41 GPa

Microdeformaciones promedio = 1.333 $\mu\epsilon$

Área de sección transversal = 0,0001m²

$$\begin{aligned} \text{Tensiones laminares} &= (50,41\text{GPa}) \times (1.333\mu\epsilon) \\ &= 76,20 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fuerza transmitida a través de la lámina} &= (50,41\text{GPa}) \times (1.333\mu\epsilon) \times (0,0001\text{m}^2) \\ &= 6,72 \text{ kN / lámina} \end{aligned}$$

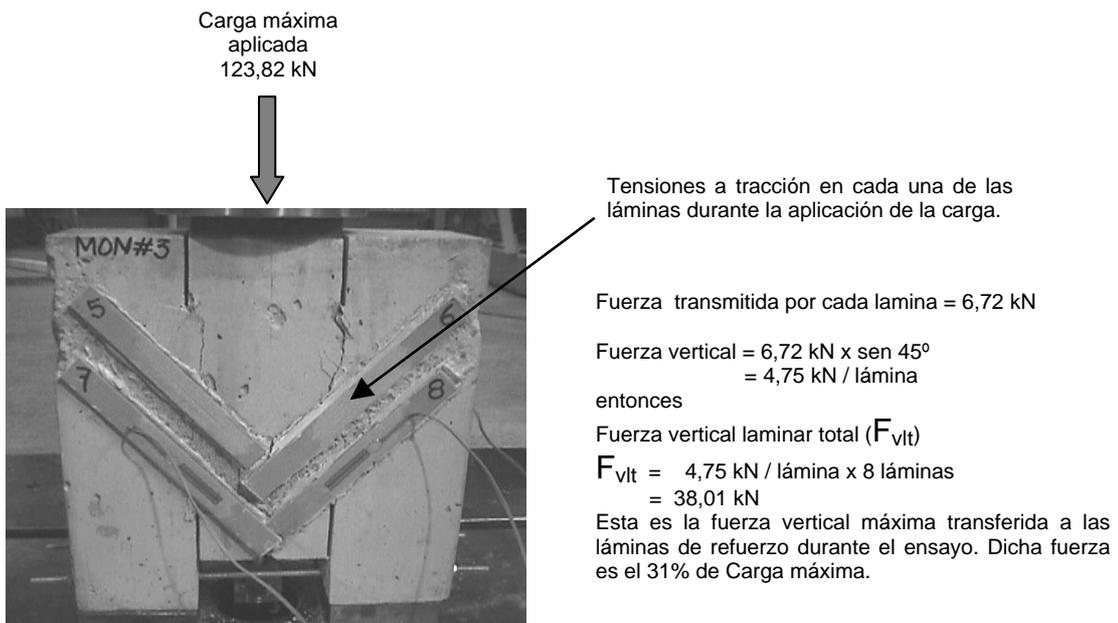


Fig. 6.4 Probeta Monolítica Reforzada 45° ensayada con 8 láminas de refuerzo (4 láminas a cada lado).

De la misma forma, que se calculó la carga vertical total, transmitida a las láminas, para la serie Mon-Rep 45°, se realizaron los mismos cálculos para las series Mon-Ref 45° y Tri-Unión 45°. En las tablas 6.3 y 6.4 se indican las microdeformaciones promedio en el sentido de la carga exterior aplicada a la probeta y la carga **transferida** en este mismo sentido (vertical) al conjunto laminar de aramida, usadas como refuerzo en las series MonRep-45° y TRI-Unión-45° del sistema aramida.

TABLA 6.3 CARGA TRANSFERIDA POR LAS LÁMINAS DE REFUERZO EN LA SERIE DE ENSAYOS MONOLÍTICO REPARADOS DEL SISTEMA ARAMIDA		
ENSAYO	DEFORMACION MAX. PROMEDIO	CARGA TRANSFERIDA
Mon-Rep 45° 01	1221 $\mu\epsilon$	34,82 kN
Mon-Rep 45° 02	1093 $\mu\epsilon$	(31,17) * kN
Mon-Rep 45° 03	1333 $\mu\epsilon$	38,01 kN
Mon-Rep 45° 04	1206 $\mu\epsilon$	34,39 kN
Carga transferida promedio		35,74 kN
Porcentaje de carga transferida (35,74kN / 113,45kN)		32%

Microdeformaciones promedio y porcentaje de la carga vertical máxima transferida a las fibras longitudinales en los ensayos Mon-Rep.

(*) Valor no considerado en el promedio

Para considerar un valor promedio de la carga que se transfiere al sistema de reparación en la serie de ensayos Mon-Rep 45°, se aplicó un criterio conservador, no tomando en cuenta el valor del porcentaje de carga transferida del segundo ensayo marcado con un asterisco (*) en la tabla 6.3 ya que su valor está muy por encima de la media, y la carga máxima obtenida está muy por debajo de la media de los ensayos de esta serie (Mon-Rep), por lo tanto, se concluye que las fibras longitudinales tomaron un 32% promedio de la carga vertical máxima en los ensayos Mon-Rep 45°.

TABLA 6.4 CARGA TRANSFERIDA POR LAS LÁMINAS DE REFUERZO EN LA SERIE DE ENSAYOS TRI-UNIÓN 45° DEL SISTEMA ARAMIDA		
ENSAYO	DEFORMACION MÁX. PROMEDIO	CARGA TRANSFERIDA
TRI-Unión 45° 01	1014 $\mu\epsilon$	28.92 kN
TRI-Unión 45° 02	1225 $\mu\epsilon$	34.93 kN
TRI-Unión 45° 03	1165 $\mu\epsilon$	33.22 kN
TRI-Unión 45° 04	774 $\mu\epsilon$	22.07 kN
TRI-Unión 45° 05	1183 $\mu\epsilon$	(33.73)* 30.48 kN
TRI-Unión 45° 06	923 $\mu\epsilon$	26.31 kN
Carga transferida promedio		29.32 kN
Porcentaje de carga transferida (29,32kN / 39,55kN)		74%

Microdeformaciones promedio y porcentaje de la carga vertical máxima transferida a las fibras longitudinales en los ensayos TRI-Unión 45°. (*) Dicho valor corresponde a un 10% más que la carga máxima del ensayo

Al ensayo No. 5 de la tabla 6.4, se le asignó el valor de su carga máxima, al valor de la carga transferida a las láminas, ya que el cálculo de la carga transferida a partir del valor de las microdeformaciones promedio, resulta ser un 10% mayor que la carga máxima. Como resumen general de la tabla 6.4 se indica que la carga vertical transferida en la serie TRI-Unión 45° fue un 74% de la carga máxima media de esta serie.

Los resultados de la campaña experimental Aramida se tienen tabulados en la tabla 6.5, donde también se presenta un resumen de la tabla 6.1, los resultados de los cálculos de las tensiones desarrolladas en las láminas, la carga transmitida por lámina durante el ensayo, y la reacción vertical del conjunto laminar, compuesto por las 8 láminas que trabajan como refuerzo en cada probeta reforzada.

TABLA 6.5 RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL ARAMIDA							
SERIE DE ENSAYO	CARGA MÁXIMA KN	RIGIDEZ K KN/mm	MICRO- DEFORM. LAMINAR $\mu\epsilon$	ESFUERZO LAMINAR MPa	CARGA LAMINAR kN	CARGA TRANSFERIDA kN	% Carga vertical transmitida a las fibras
Mon-Sano	268,50	699	-	-	-	-	-
Mon-Ref	256,21	650	725	36,55	3,65	20,65	8
Mon-Rep	113,45	212	1.213	61,15	6,11	35,74	32
Tri-Unión 45°	39,55	246	1.047	52,78	5,28	29,32	74

De los resultados anteriores se observa que al comparar la serie Mon-Sano con respecto a la serie Mon-Ref 45°, no se aprecia un incremento en la capacidad de carga, al ser aplicado el refuerzo en las probetas de la serie Mon-Ref 45°. Las series que presentaron más información, referente a la tensión a la que fueron sometidas las láminas y la carga que fue transferida a través de las mismas, fueron las series Mon-Rep 45° y Tri-Unión 45°. Primeramente se tiene que, la fuerza promedio transmitida a las láminas de Aramida en los ensayos TRI-Unión 45° es de 29,32 kN o sea, un 11% de la carga máxima en promedio, de una probeta Monolítica-Sana de hormigón, y dicha fuerza vertical depende mucho del estado del elemento estructural a reparar, variando desde un 8 a un 74%.

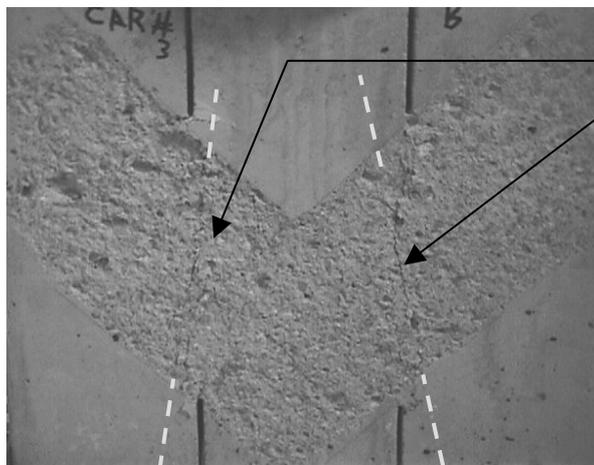
En las probetas Mon-Rep debe interpretarse que el 68% de la carga vertical es soportada por los mecanismos de rozamiento y de flexión sobre la banda rígida de aramida. En las probetas Tri-Unión 45°, al existir rozamiento, con un valor aproximado

del 16% de la carga máxima (*ver apartado 6.1.1.1*), se determinó que el 10% de la carga exterior aplicada es soportada por el mecanismo de flexión sobre la banda (efecto “dovela” de un elemento a tracción entre fisuras)

Comparando la eficiencia en las series, Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45°, observadas en las tablas 6.1 y 6.2 se tiene que, la capacidad de carga de la serie Mon-Rep 45°, de 113,45 kN (42% de la capacidad de carga de la serie Monolítica-Sana), transfiere 73,82kN (28% de la carga máx. de una probeta sana) a los apoyos de la probeta por medio de las fuerzas de rozamiento existentes en los planos de cortante previamente generados al ser fisuradas las probetas, tal como se describe en la figura 4.27 y como se puede observar por las fisuras generadas en la probeta como ilustra la figura 6.4. La fuerza de rozamiento Intergranular de 73.82kN se determinó calculando previamente la fuerza del mecanismo a flexión de las bandas, determinado en función de los ensayos de la serie Tri-Unión 45°. Una vez que se calculó la fuerza transmitida a través de las laminas en la serie TRI-Unión 45° se pudo determinar la carga que es soportada por el mecanismo de flexión sobre la banda rígida de aramida tal como se indica a continuación.

$$\begin{aligned} \text{Fza. Mecanismo a flexión} &= \text{carga max. TRI-Unión45}^\circ - (\text{Fza. laminar V} + \text{Fza. rozamiento}) \\ &= 39,55 \text{ kN} - (29,32 \text{ kN} + 6,34 \text{ kN}) \\ &= 3,89 \text{ kN} \end{aligned}$$

En los ensayos de la serie Mon-Rep 45°, parte de la carga es transferida por las fuerzas de rozamiento generadas por las fisuras que definen los planos de cortante, a través de los cuales, transmiten parte de la carga a los apoyos. En la figura 6.4 se observan las fisuras en la probeta.



Fisuras generadas por tracción indirecta, tomando como base la teoría de la prueba brasileña de tensión indirecta.

Figura 6.4 Probeta previamente fisurada y preparada para los ensayos de la serie Mon-Rep 45° antes de adherirle las láminas de refuerzo de aramida.

Una vez determinada la fuerza de los mecanismos de flexión sobre las bandas, se determina la fuerza de rozamiento Intergranular en las probetas de la serie Mon-Rep de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Fza. de rozamiento granular} &= \text{carga max. Mon-Rep}_{45^\circ} - (\text{Fza. laminar} + \text{Fza. Mec. Flex.}) \\
 &= 113,45 \text{ kN} - (35,74 \text{ kN} + 3,89 \text{ kN}) \\
 &= 73,82 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

La fuerza de rozamiento Intergranular obtenida es de 73,82kN. Dicho valor corresponde al 66% de la carga máxima (*Mon-Rep 45°*). Las tablas 6.6 y 6.7 indican la relación de las diversas fuerzas en tanto por ciento que intervienen en las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45°, las cuales son las series que previamente se comentó que eran las que mejor podían determinar el comportamiento del refuerzo con láminas de aramida sobre elementos de hormigón

Tabla 6.6 Relación de fuerzas verticales que intervienen en los ensayos Mon-Rep 45° Aramida		
Descripción de la contribución de fuerza en el ensayo	Fuerza (kN)	%
Fuerza de rozamiento granular	73,82	65
Carga vertical tomada por las láminas de refuerzo	35,74	32
Carga tomada por las tensiones transversales de las láminas y resina (<i>mecanismo a flexión de bandas</i>)	3,89	3

Tabla 6.7 Relación de fuerzas verticales que intervienen en los ensayos TRI-Unión 45° Aramida		
Descripción de la contribución de fuerza en el ensayo	Fuerza (kN)	%
Fuerza de rozamiento entre bloques	6,34	16
Carga vertical tomada por las láminas de refuerzo	29,32	74
Carga tomada por las tensiones transversales de las láminas y resina (<i>mecanismo a flexión de bandas</i>)	3,89	10

El valor de la fuerza del mecanismo de flexión sobre las bandas fue determinado a partir de la serie TRI-Unión 45°

De acuerdo con los resultados de las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45°, (*tablas 6.6 y 6.7*) se observa que el valor de la carga tomada por las tensiones transversales de las láminas y resina como por las tensiones longitudinales en la banda varían considerablemente, lo cual implica que existe alguna componente de fuerza que no se está tomando en cuenta en la serie TRI-Unión 45°. El mecanismo de transmisión de

carga a las láminas, tanto en sentido longitudinal como transversal, depende pues en gran manera del estado de las superficies en la zona fisurada.

6.1.5 Descripción del tipo de comportamiento y falla de cada serie del sistema aramida

En aplicaciones estructurales resulta interesante conocer hasta qué punto de carga las series tuvieron un comportamiento elástico lineal durante el ensayo así como si el fallo es de tipo frágil o dúctil. De acuerdo con los resultados del anexo A, en la tabla 6.8 se encuentra tabulado hasta que punto de la carga final se comporta linealmente cada serie y que tipo de falla presenta, si es de tipo frágil o dúctil.

TABLA 6. 8 CARACTERISTICAS DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO LINEAL DEL SISTEMA ARAMIDA			
SERIE	Carga máxima con comportamiento lineal kN	% Con respecto a la carga de rotura	Tipo de Falla
Monolítico-Sano	209	78	Dúctil
Monolítico-Reforzado 45°	215	84	Dúctil
Monolítico-Reparado 45°	99	100	Frágil
TRI-Unión 45°	39.55	100	Frágil

Para las series de ensayos Mon-Sano y Mon-Ref 45° el comportamiento de ambos estuvo definido por las características del hormigón de las probetas, ya que presentaron un comportamiento lineal hasta el 78% y 84% respectivamente, con una carga promedio de 212 kN que delimitó el periodo elástico lineal, teniendo después un comportamiento elástico no lineal, pasando a la falla dúctil cuando empezó a fisurar el hormigón.

Las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45° a diferencia de las dos series anteriores presentaron un comportamiento elástico lineal durante el 100% de la aplicación de la carga y tuvieron una falla de tipo frágil. Se puede decir que el comportamiento lineal está definido por las propiedades elásticas de las láminas de Aramida, las cuales son lineales en el 100% de sus deformaciones a tracción. Esta rotura de tipo frágil debe ser tomada muy en cuenta a la hora de proyectar una reparación con este tipo de material, en estructuras previamente fisuradas a cortante o bien entre elementos prefabricados.

6.2 ESTUDIO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL CARBONO

De la misma forma que la campaña experimental Aramida, se aplicó el mismo criterio para analizar los ensayos del sistema carbono. A partir de los resultados experimentales que se recogen en el anexo B, se elaboró la tabla 6.9 en orden similar, tabulándose los resultados del sistema carbono.

La figura 6.5 muestra la simbología que identifica cada serie de ensayos en las gráficas Carga máxima (kN); Rigidez K (kN/mm); y Microdeformaciones ($\mu\varepsilon$ *adimensional*).

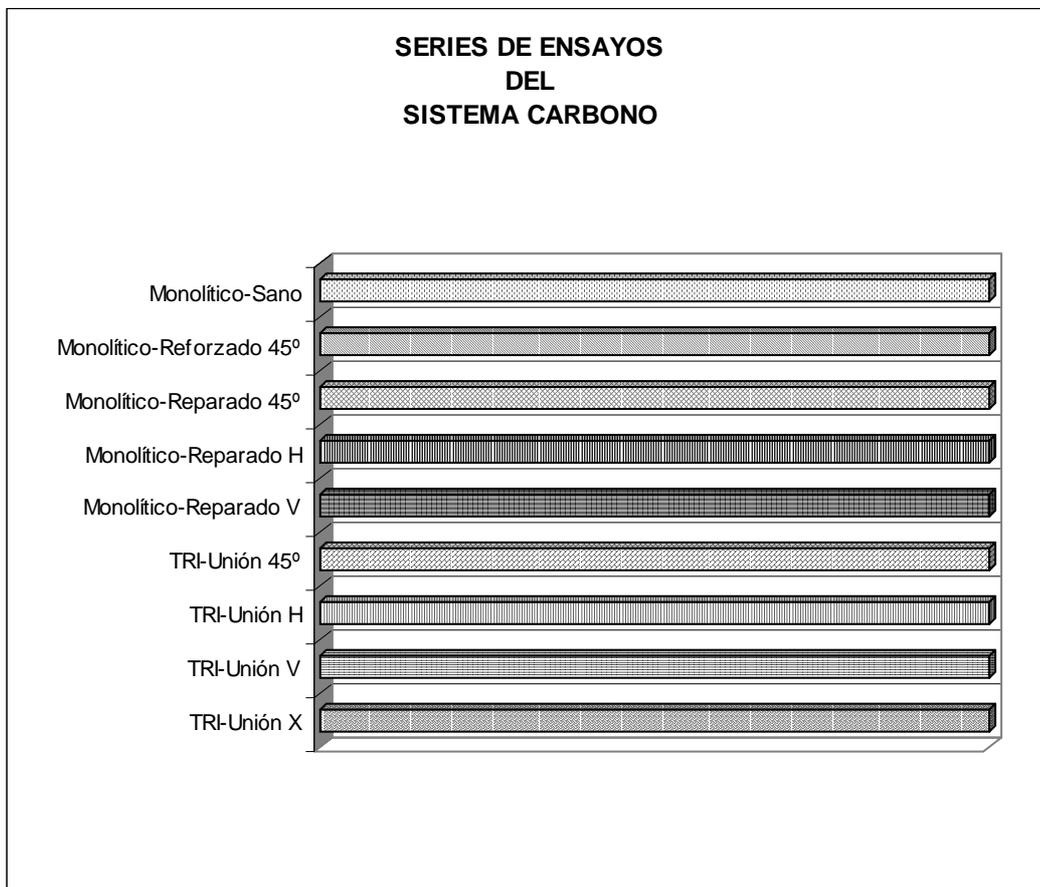


Figura 6.5 Simbología utilizada para definir cada serie de ensayos de la campaña experimental Carbono

TABLA 6.9 RESULTADOS GENERALES DEL SISTEMA CARBONO					
ENSAYO	CARGA MÁX. KN	RIGIDEZ K (kN/mm)	MICRODEFORMACIONES $\mu\epsilon$		PROMEDIO $\mu\epsilon$
			Galga 1 $\mu\epsilon$	Galga 2 $\mu\epsilon$	
Mon Sano 1	280,00	627			
Mon Sano 2	260,00	671			
Mon Sano 3	270,00	709			
Promedio	270,00	669			
Mon Ref 1	315,00	606	1.750	550	1.150
Mon Ref 2	312,00	719	2.700	1.850	2.275
Mon Ref 3	340,00	721	1.100	1.150	1.125
Promedio	322,33	682			1.517
Mon Rep. 45° 1	170,00	310	1.940	2.446	2.193
Mon Rep. 45° 2	153,00	537	1.663	1.580	1.622
Mon Rep. 45° 3	186,00	606	2.319	1.780	2.050
Promedio	169,67	484			1 955
Mon Rep. H	163,00	399	1.184	394 **	1.184
Mon Rep. V	196,00	473	(-) 275 *	(-) 1.380 *	(-) 828 *
TRI Unión 45° C1	108,00	462	2.788		2.788
TRI Unión 45° C2	92,12	450	1.389	1.378	1.384
TRI Unión 45° C3	88,00	338	2.477	2989	2.733
TRI Unión 45° C4	87,00	279	1.170		1.170
TRI Unión 45° V6	84,00	267			
TRI Unión 45° V7	90,00	315	1.650	2.118	1.884
TRI Unión 45° V8	82,13	381	2.277	1.886	2.082
TRI Unión 45° V9	80,00	333	2.224	2.681	2.453
Promedio	88,90	353			2.059
TRI Unión H	97,00	543	190	1.255	723
TRI Unión V	57,80	218	(-) 175 *	(-) 819 *	(-) 497 *
TRI Unión V	56,00	240	146		146
Promedio	56,90	229			(-) 176 *
TRI Unión X	95	362	1.522	2.752	2.137
TRI Unión X	95	277	2.365	3.000	2.683
Promedio	95	320			2.410

Carga máxima ó de rotura, Rigidez K y Microdeformaciones máximas de las láminas de Carbono registradas hasta antes de la carga máxima en cada uno de los ensayos y los valores promedio de cada serie de ensayos.

NOTA: La carga máxima considerada, fue aquella registrada hasta el instante en que una de las láminas de refuerzo se desprendió.

(*) Los valores negativos indican las microdeformaciones a compresión en las láminas de refuerzo.

(**) Galga orientada verticalmente.

6.2.1 Consideraciones durante la etapa experimental carbono

En Los ensayos donde se aplicó el refuerzo alineando las láminas con el eje longitudinal de las fibras en sentido vertical, como muestran los ensayos Mon-Rep V y TRI-Unión V en las figuras 6.6 y 6.7, no se presentaron en un principio deformaciones que sometieran a tracción a las fibras del eje longitudinal de las láminas conformadas por el sistema carbono tal como puede verse en la tabla 6.9. Recordemos que este sistema es un tejido de fibras donde el 70% de las fibras están orientadas longitudinalmente y el otro 30% perpendicularmente; siendo por lo tanto, las fibras transversales, las que únicamente pudieron llegar a ser sometidas a tracción en un principio.

En general, en los ensayos con refuerzo vertical, las fibras longitudinales de las láminas estuvieron sometidas a deformaciones de compresión, llegando a tener pequeñas deformaciones a tracción únicamente cuando uno de los extremos de la lámina se desprendía del hormigón, generando un efecto ligeramente parecido al de tensión diagonal como el que se presenta en chapas de acero que forman el alma en una viga de acero. A causa de la anisotropía de las láminas de carbono no es posible transmitir tensiones de una fibra a las fibras vecinas. Debido a esto, es muy difícil determinar cómo y cuándo trabajan las fibras longitudinales a tracción.

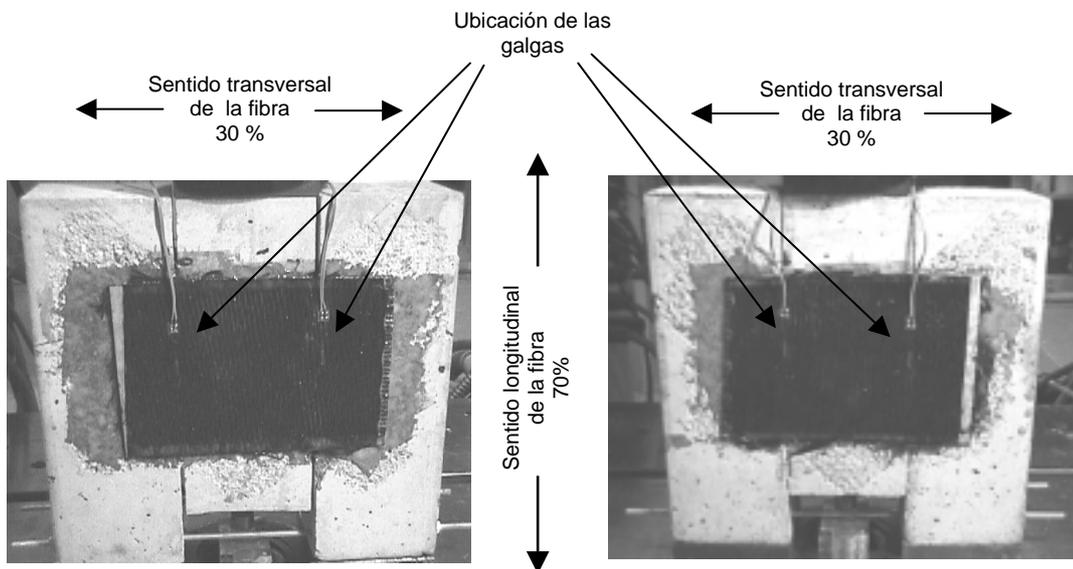


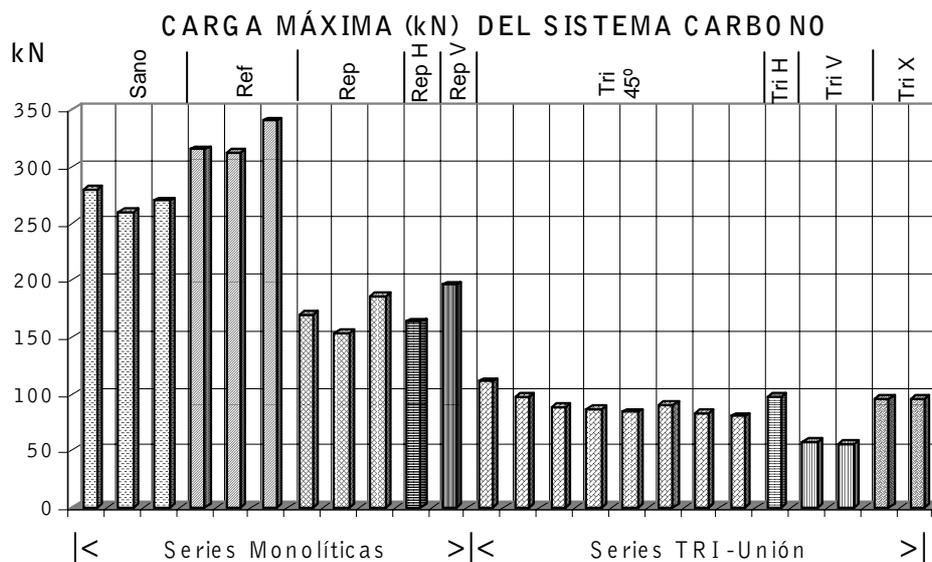
Figura 6.6 Ensayo MonRep V
Fibras longitudinales orientadas verticalmente

Figura 6.7 Ensayo TRI-Unión V
Fibras longitudinales orientadas verticalmente

Las figuras 6.6 y 6.7 indican la ubicación y orientación de las galgas con respecto a las fibras longitudinales y transversales de las láminas de refuerzo.

6.2.2 Descripción de resultados experimentales del sistema carbono

En la gráfica 6.4, donde se recoge la carga máxima de cada uno de los ensayos del sistema Carbono, se observa un claro incremento en la capacidad de carga de la serie Monolítico-Reforzado en relación con la serie Monolítico-Sano, caso contrario a lo que sucedía con el refuerzo usando bandas de aramida. Dicho incremento es de un 19%. También se observó que las probetas Monolíticas-Reparadas no lograron alcanzar la capacidad de carga de rotura de las probetas monolíticas-sanas. Otra de las comparaciones significantes fue entre las series TRI-Unión donde las series TRI-Unión "X" y TRI-Unión "H", presentaron capacidades de carga ligeramente mayores que los Ensayos TRI-Unión 45°. Esto es debido principalmente a que la superficie de contacto entre el hormigón y las fibras es menor en un 25% en esta última serie. Las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 pueden dar una apreciación visual de la diferencia de área de las láminas adherida al hormigón entre estas series.



Grafica 6.4 Carga Máxima (kN) de cada uno de los ensayos de las nueve series de probetas del sistema Carbono

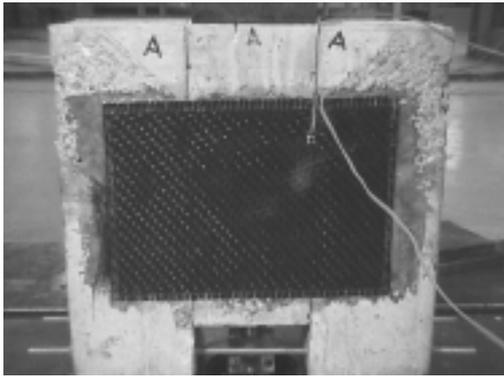


Fig. 6.8 Ensayo tipo TRI-Unión H con las galgas adheridas sobre las fibras transversales al sentido principal de las fibras

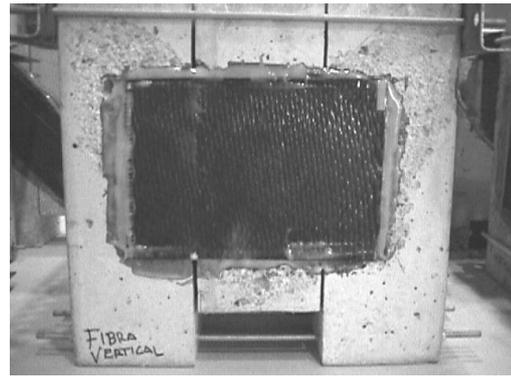


Fig. 6.9 Ensayo tipo TRI-Unión V con las galgas adheridas sobre las fibras longitudinales.

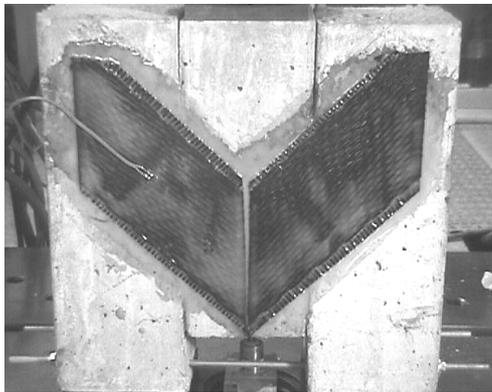


Fig. 6.10 Ensayo tipo TRI-Unión 45° con las galgas adheridas sobre las fibras longitudinales.

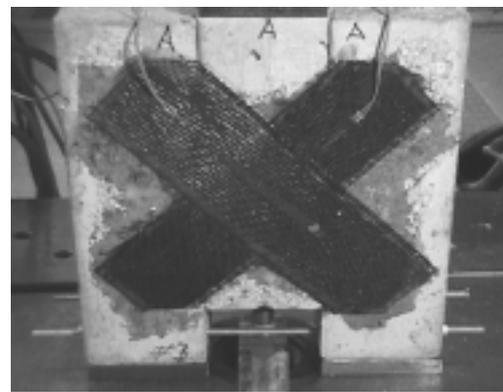
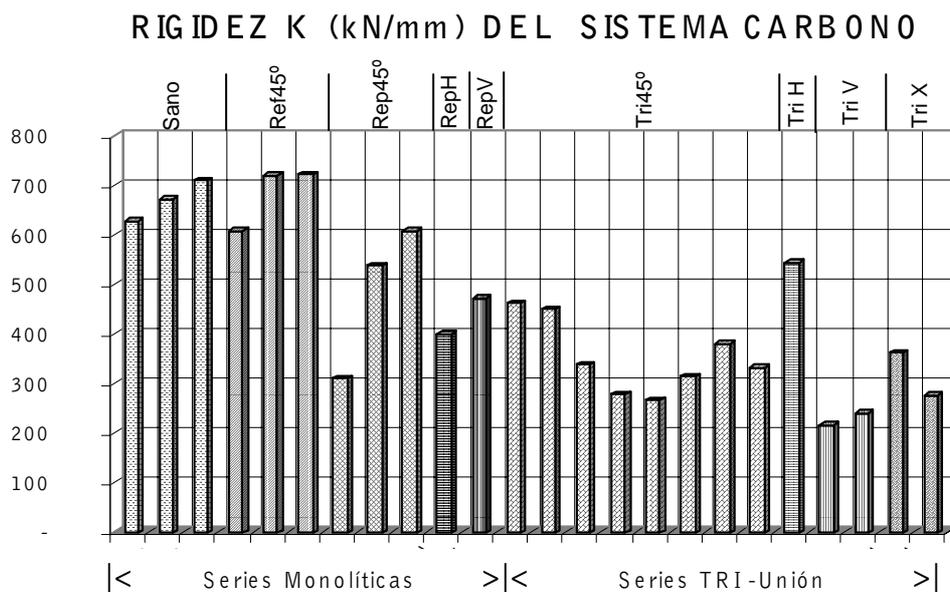


Fig. 6.11 Ensayo tipo TRI-Unión X con las galgas adheridas sobre las fibras longitudinales.

El comportamiento obtenido en los ensayos TRI-Unión X (ver Fig. 6.11) es análogo a los ensayos TRI-Unión 45° tal como se puede ver en las gráficas 6.4, 6.5 y 6.6

La comparación del comportamiento entre los refuerzos con Aramida y Carbono no fue con la finalidad de determinar qué material tiene mayor resistencia, sino para determinar las variaciones cualitativas entre las mismas series de ensayos de ambos materiales. La principal justificación que se da para entender por qué el sistema Carbono da mejores resultados que el sistema Aramida es debido a que la superficie de contacto entre las bandas de Aramida y el hormigón es aproximadamente un 40% menor que la superficie de contacto entre las bandas de carbono y el hormigón. Además, las láminas de aramida están compuestas por fibras unidireccionales y las fibras de carbono son bidireccionales, con una relación 70/30.



Grafica 6.5 Valor de rigidez K en cada ensayo que indica la fuerza necesaria para producir un desplazamiento vertical. Las unidades de rigidez son expresadas en kN/mm.

La gráfica 6.5 muestra los valores de la pendiente K de rigidez, en los ensayos del sistema carbono, medidos en kN / mm.

Comparando los resultados de la serie TRI-Unión 45° con la serie TRI-Unión-“H”, esta segunda tiene una capacidad de carga ligeramente mayor y una rigidez mayor en un 38%. Según los datos de la tabla 6.9, sí que trabaja a tracción, aunque la deformación es bastante menor que en la serie TRI-Unión 45°. El mejor comportamiento de las probetas TRI-Unión-“H”, se debe principalmente a que las láminas tienen aproximadamente un 31% más de superficie adherida al hormigón, ver la figura 6.12.

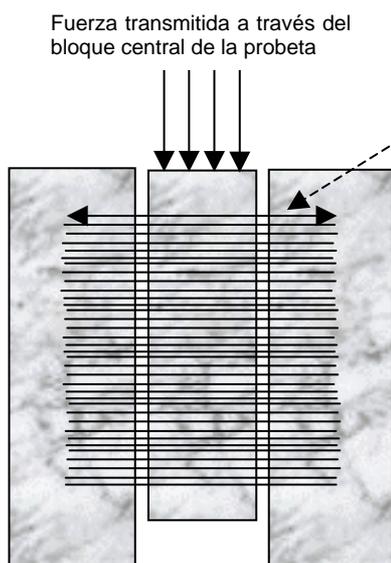


Fig. 6.12 Esquema de la orientación de las fibras de la serie de ensayos TRI-Unión Horizontal.

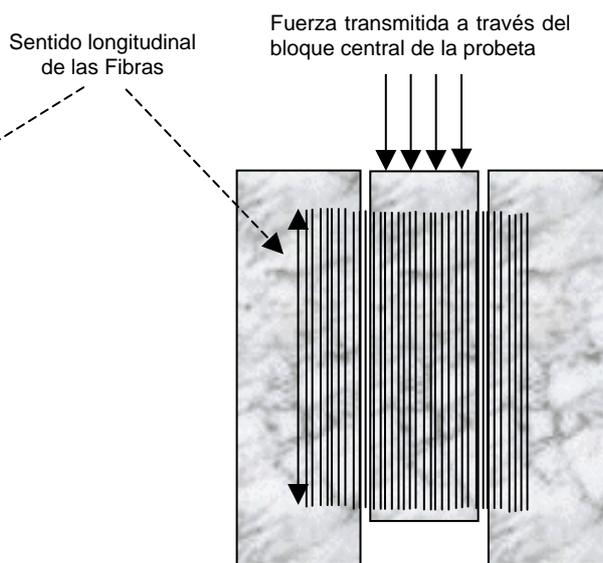
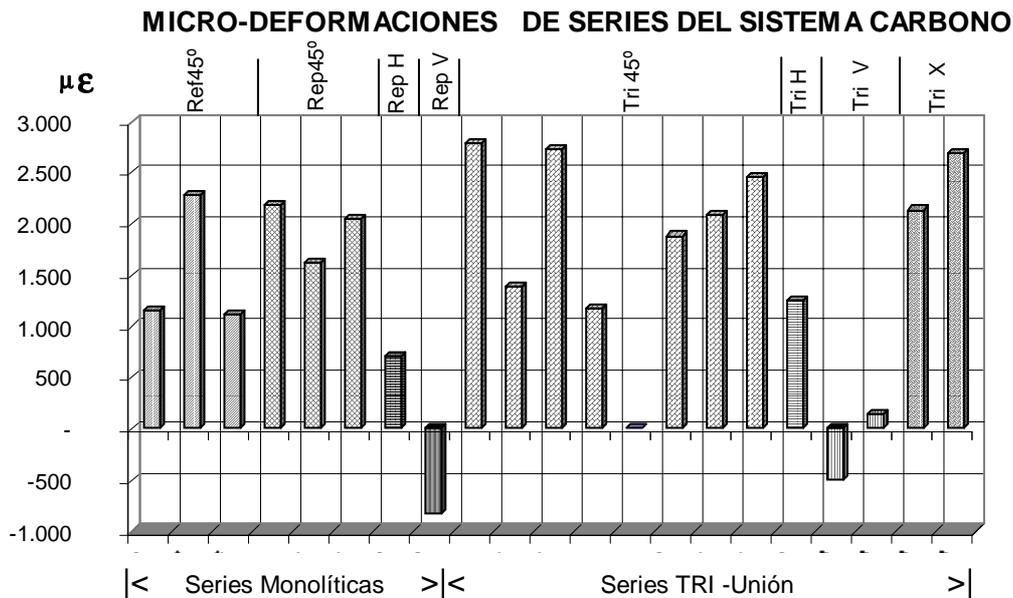


Fig. 6.13 Esquema de la orientación de las fibras de la serie de ensayos TRI-Unión Vertical.

En el caso de las probetas TRI-Unión-“V”, se obtuvieron resultados bajos respecto a las demás series TRI, debido a que las fibras longitudinales no transmiten tensiones a las fibras paralelas próximas a causa de la anisotropía de las láminas. La fig. 6.13 ilustra la independencia de las fibras longitudinales. Las bandas extensométricas colocadas según las fibras longitudinales registran deformaciones de compresión



Gráfica 6.6 Valores promedio en microdeformaciones acumuladas de las láminas de Carbono de cada ensayo, a partir del punto de inicio de carga hasta el punto de carga máxima

El interés principal en haber orientado las fibras longitudinales con un ángulo diferente a 45° fue para determinar como varía la aportación del refuerzo a la capacidad de carga en las series TRI y el incremento en la rigidez en las probetas reforzadas y reparadas. Los ensayos estuvieron limitados a orientar las fibras longitudinales en forma horizontal, vertical y 45°.

La tabla 6.10 muestra el comportamiento relativo de cada serie de ensayos del sistema carbono, donde se compara la capacidad de carga de la serie Mon-Sano con respecto a las demás series. En la columna de microdeformaciones, se puede observar como las series Mon-Rep V y TRI-Unión V, no trabajaron eficientemente, ya que las fibras de carbono, lejos de ser sometidas a tracción, fueron sometidas a compresión, para lo cual, la resistencia de las fibras longitudinales de carbono es mínima. Caso contrario, las series donde las fibras longitudinales presentaron una

orientación a 45°, presentaron las mayores deformaciones. A pesar de ello, la serie Mon-Rep V es la que representa una carga de rotura mayor de todas las probetas reparadas, lo cual indica que las fibras orientadas transversalmente pueden aportar una capacidad resistente no despreciable.

TABLA 6.10 COMPORTAMIENTO RELATIVO PORCENTUAL DEL SISTEMA CARBONO			
Tipo Ensayo	Carga (kN)	K (kN/mm)	Microdeformaciones
Mon-Sano	100%	100%	0%
Mon Ref	119%	102%	100%
Mon Rep 45°	63%	72%	129%
Mon-Rep H	60%	52%	47%
Mon-Rep V	73%	71%	(-) 55%
TRI-Unión 45°	33%	48%	149%
TRI-Unión H	36%	66%	48%
TRI-Unión V	21%	30%	(-) 12%
TRI-Unión X	35%	45%	159%

Valores porcentuales de la capacidad de Carga, Rigidez y las deformaciones en las láminas de FRP de cada serie de probetas tomando como parámetro de comparación la serie Mon-Sano

6.2.3 Influencia del refuerzo laminar en la variación de rigidez

Los resultados obtenidos en la campaña experimental carbono indican que entre las series Mon-Sano y Mon-Ref 45° fueron considerables las diferencias, presentándose incremento únicamente de carga de un 19%. La rigidez prácticamente no presentó ningún cambio. Por tanto, puede considerarse que el refuerzo con láminas de carbono sobre elementos no fisurados, incrementó la capacidad de carga favorablemente, pero no presenta ninguna mejora en la rigidez en los ensayos Mon-Ref 45°.

Al igual que en el sistema aramida, las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45° del sistema carbono, se deduce que gran parte de la capacidad de carga en la serie Mon-Rep 45° se debe a la fuerza de rozamiento Intergranular generada en el plano cortante, la cual es considerablemente mayor que la fuerza de rozamiento entre bloques de la serie TRI-Unión 45°. Ello explica el porqué esta serie tiene una capacidad de carga menor a la serie Mon-Rep 45°.

En cuanto a la resistencia de los elementos reparados de las series Mon-Rep 45°, "H" y "V", es considerablemente menor, en un 35% en promedio con respecto a los elementos originales (Mon-Sanos). En cuanto a la rigidez "K" se puede observar, que la rigidez en la serie Mon-Rep 45° fue mayor, con respecto a la serie TRI-Unión 45°, debido principalmente a la fricción granular existente en las fisuras de las probetas reparadas, las cuales no permiten la continuidad a lo largo de toda la superficie de contacto entre el hormigón y las láminas de refuerzo. Aunque la rigidez en las probetas de la serie TRI-Unión 45° es mayor, es menos predecible y lineal, tal como lo muestran los gráficos Carga vs Deformación B2, B14 y B19 en el Anexo B. Las deformaciones registradas en las series Mon-Rep 45°, TRI-Unión 45° y TRI-Unión 45° en "X" concuerdan con la rigidez, ya que la rigidez será inversamente proporcional a las deformaciones desarrolladas en las láminas de refuerzo. Para el caso de las series Mon-Rep y TRI-Unión con las fibras orientadas en forma horizontal y vertical, no se puede concluir lo mismo, ya que las fibras longitudinales de estas láminas, son adheridas en direcciones que presentan tracciones mínimas.

6.2.4 Descripción del cálculo de tensiones sobre las láminas de refuerzo del sistema Carbono.

Para determinar la eficiencia con la cual trabajó el sistema de láminas de refuerzo de carbono, al igual que en el sistema aramida, se calcularon las tensiones máximas que registraron las láminas de refuerzo, en función de las máximas deformaciones registradas en los ensayos a cortante sobre las probetas de hormigón.

El siguiente es un ejemplo en el que se determinan las tensiones máximas a las que estuvieron expuestas en promedio las láminas de refuerzo en el ensayo 03 de la serie TRI-Unión 45° y las fuerzas que pudieron ser transferidas a través de las mismas hacia sus apoyos.

$$\text{Modulo de elasticidad:} = 92,22 \text{ GPa}$$

$$\text{Microdeformaciones promedio} = 2.733\mu\epsilon$$

$$\text{Área de la sección transversal} = 8\text{cm} \times 7,8274 \times 10^{-6} \text{m}^2 / \text{cm}$$

$$\text{Área de la sección transversal} = 6,2619 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

$$\text{Puesto que } F = \text{Módulo elástico} \times \text{deformación} \times \text{Área}$$

$$\text{Fuerza transmitida / lámina} = 92,22 \text{ GPa} \times 2.733\mu\epsilon \times 6,2619 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

$$\text{Fuerza transmitida / lámina} = 15,86 \text{ kN}$$

Como las probetas de la serie TRI-Unión 45° cuentan con cuatro láminas con una dirección a 45°, la fuerza total es:

$$\text{Fuerza Total a } 45^\circ = 15,86 \text{ kN/lámina} \times 4 \text{ láminas} = 63,13 \text{ kN}$$

Por lo tanto, la proyección vertical de dicha fuerza, es la carga transmitida a los apoyos, tal como muestran las flechas verticales en la figura 6.18, donde la fuerza transmitida ó reacción vertical es:

$$\text{Fuerza vertical transmitida por las fibras longitudinales} = 63,13 \times \text{sen } 45^\circ = 44,64 \text{ kN}$$

Como resultado de la repetición de este cálculo, en las tablas 6.11 y 6.12 se indican las microdeformaciones promedio en el sentido de la carga exterior aplicada y la carga máxima porcentual **transferida** en este mismo sentido (vertical) al conjunto laminar de Carbono, usadas como refuerzo en los ensayos de las series Mon-Rep-45° y TRI-Unión-45° respectivamente.

TABLA 6.11 CARGA TRANSFERIDA POR LAS LÁMINAS DE REFUERZO EN LA SERIE DE ENSAYOS MONOLÍTICO REPARADOS DEL SISTEMA CARBONO		
ENSAYO	DEFORMACION MAX. PROMEDIO	CARGA TRANSFERIDA (kN)
Mon-Rep 45° 01	2193 $\mu\epsilon$	35,82
Mon-Rep 45° 02	1622 $\mu\epsilon$	26,49
Mon-Rep 45° 03	2050 $\mu\epsilon$	33,48
Carga transferida promedio		31,93
Porcentaje de carga transferida (31,93 / 169,67)		19%

Microdeformaciones promedio y porcentaje de la carga vertical máxima transferida a las fibras longitudinales en los ensayos Mon-Rep.

TABLA 6.12 CARGA TRANSFERIDA POR LAS LÁMINAS DE REFUERZO EN LA SERIE DE ENSAYOS TRI-UNIÓN 45° DEL SISTEMA CARBONO		
ENSAYO	DEFORMACION MÁX. PROMEDIO	CARGA TRANSFERIDA (kN)
TRI-Unión 45° 01	2788 $\mu\epsilon$	45,54
TRI-Unión 45° 02	1384 $\mu\epsilon$	22,60
TRI-Unión 45° 03	2733 $\mu\epsilon$	44,64
TRI-Unión 45° 04	1170 $\mu\epsilon$	19,11
TRI-Unión 45° 05	----	----
TRI-Unión 45° 06	1884 $\mu\epsilon$	30,77
TRI-Unión 45° 06	2082 $\mu\epsilon$	34,01
TRI-Unión 45° 06	2453 $\mu\epsilon$	40,06
Carga transferida promedio		33,82
Porcentaje de carga transferida (33,82 / 88,90)		38%

Microdeformaciones promedio y porcentaje de la carga vertical máxima transferida a las fibras longitudinales en los ensayos TRI-Unión.

Comparando los valores de las tablas 6.11 y 6.12 con los de las tablas 6.3 y 6.4 se ve como el refuerzo por sí mismo soporta más porcentaje de carga exterior en el caso de las bandas rígidas de aramida que las flexibles de carbono (aproximadamente el doble).

Los resultados de la campaña experimental carbono se muestran en la tabla 6.13, donde se presenta un resumen de los resultados de los cálculos de las tensiones desarrolladas en las láminas, la carga transmitida por lámina durante el ensayo, y la reacción vertical del conjunto laminar, compuesto por las láminas que trabajan como refuerzo en cada probeta reforzada.

TABLA 6.13 RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL CARBONO							
SERIE DE ENSAYO	CARGA MÁXIMA kN	RIGIDEZ K KN/mm	MICRODE-FORMACIÓN LAMINAR $\mu\epsilon$	TENSIÓN LAMINAR MPa	CARGA LAMINAR kN	CARGA TRANSFERIDA kN	% Carga vertical transmitida a las fibras
Mon-Sano	270,00	669	-	-	-	-	-
Mon-Ref 45°	322,00	682	1.517	140,00	8,77	24,80	8
Mon-Rep 45°	169,67	484	1.955	180,30	11,30	31,93	19
Mon-Rep Horizontal	163,00	399	1184	65,40	4,10	94,74	58
Mon-Rep Vertical	196,00	473	(-) 828	-	-	-	-
Tri-Unión 45°	88,90	353	2.059	208,00	13,03	33,82	38
Tri-Unión Horizontal	97,00	543	1.257	66,68	4,18	94,29	97
Tri-Unión Vertical	56,90	229	(-) 173	-	-	-	-
Tri-Unión 45° "X"	95,00	320	2.410	222,25	13,92	78,73	83

(-) Los valores negativos indican las micro-deformaciones a compresión en las láminas de refuerzo adheridas en las probetas.

En los ensayos TRI-Unión 45° las fibras orientadas en dirección transversal al eje principal de las fibras, que son tan solo el 30% del total del sistema (TFC "tejido de fibras de carbono") también se les transmitió carga por lo cual se puede calcular la aportación de resistencia al sistema de refuerzo, siempre y cuando también se instrumente colocando galgas en las fibras orientadas en sentido transversal, ya que las fibras longitudinales no tomaron el 100% de la carga, en especial en los ensayos Car-Tri-

Unión 45° , ya que existen zonas donde el flujo de tensiones no son precisamente a 45° con la horizontal. Esto se puede ilustrar con fotos de ensayos de probetas monolíticas, donde las fisuras presentan un ángulo de inclinación aproximado de 60° , tal como lo muestra las figuras 6.14 y 6.15. Teóricamente se tiene que las tensiones son perpendiculares a las fisuras, las cuales presentarían entonces un ángulo de inclinación de 30° , lo cual varía en 15° con respecto a la dirección con la cual están orientadas las fibras longitudinales.

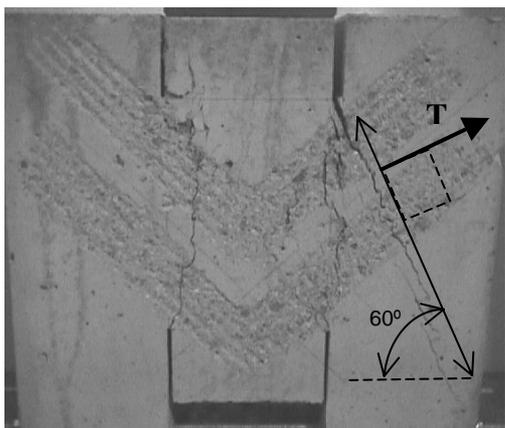


Fig. 6.14 Probeta Monolítica-Sana, la cual presenta una fisuración diagonal a 60° de inclinación y tensiones "T" perpendiculares a 30° .

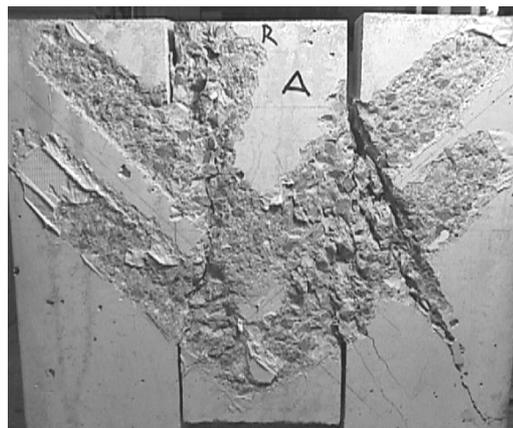


Fig. 6.15 Probeta Monolítica-Reforzada a 45° , que al igual que la Fig. 6.14 presenta fisuraciones a 60° , por lo que las tensiones no están alineadas totalmente con las fibras longitudinales.

Aunque la foto de la figura 6.15 corresponde a una probeta de la campaña aramida, las probetas monolíticas de ambas campañas presentan las mismas direcciones en las tensiones, incluso en probetas donde la fractura se presentó con pequeñas fisuras paralelas a lo largo del plano de cortante, tal como lo muestra la figura 6.16 y 6.17.

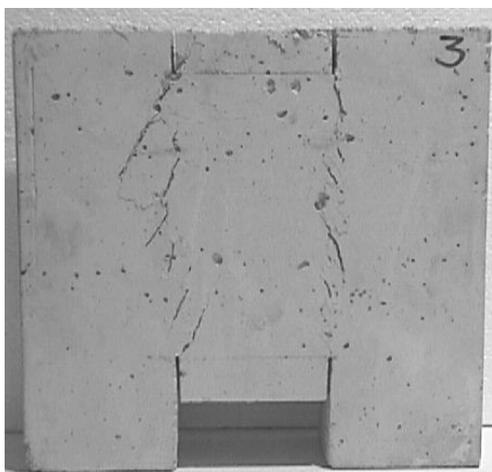


Fig. 6.16 Probeta Monolítica-Sana con fisuras paralelas a lo largo del plano de corte, con una orientación a 60° con la horizontal.

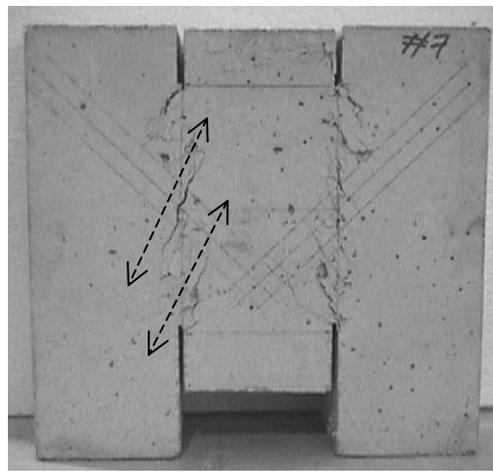


Fig. 6.17 En forma similar a la Fig. 6.16 se presenta el cortante en la probeta con pequeñas fisuras paralelas a 60° sobre el plano de corte.

Considerando la fuerza de rozamiento, previamente determinada en el punto 6.1.1.1, y la fuerza vertical transmitida por las fibras longitudinales se obtiene la fuerza que soportan las fibras transversales y la resina. Dicha fuerza es considerada como un mecanismo a flexión de las bandas de carbono, dando como resultado:

$$\begin{aligned}
 \text{Fza. Mecanismo a flexión} &= \text{carga max.}_{\text{TRI-Unión}45^\circ} - (\text{Fza. laminar V} + \text{Fza. rozamiento}) \\
 &= 89,57 \text{ kN} - (33,82 \text{ kN} + 6,34 \text{ kN}) \\
 &= 49,41 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

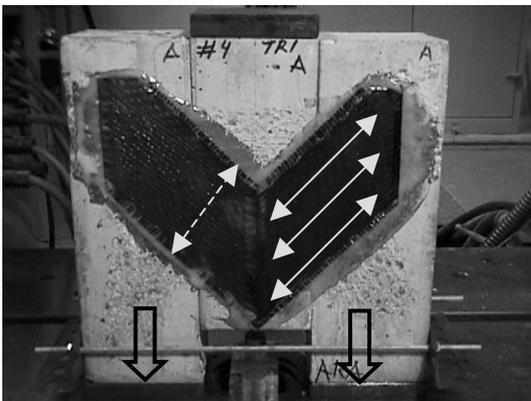


Fig. 6.18 Esta foto muestra una probeta de la serie TRI-Unión a 45° en la cual, las líneas continuas, muestran la dirección del eje longitudinal de las fibras de carbono y la línea intermitente muestra la sección transversal, la cual es de 8 cm.

En el caso de las probetas de la serie TRI-Unión X 45° se hizo un cálculo análogo, pero se consideró el doble de láminas, ya que cada lámina atravesó dos veces la unión entre cada par de bloques, tal como se describe en la figura 6.19.

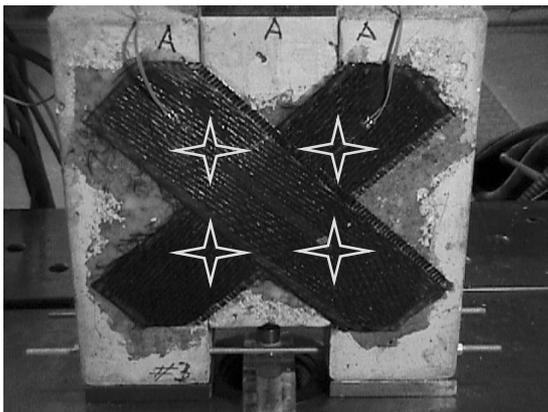


Fig. 6.19 Cada una de las cruces, indica una zona de intersección entre cada par de bloques, por lo cual se tiene un total de 8 zonas de unión entre bloques. A diferencia de las probetas de la serie TRI-Unión 45° que solo cuenta con 4 zonas de unión.

Una vez que fue determinada la fuerza de los mecanismos de flexión sobre las bandas, se determina la fuerza de rozamiento intergranular en las probetas de la serie Mon-Rep tal como se indica a continuación.

$$\begin{aligned}
 \text{Fza. de rozamiento granular} &= \text{carga max.}_{\text{Mon-Rep45}^\circ} - (\text{Fza. laminar} + \text{Fza. Mec. Flex.}) \\
 &= 169,67 \text{ kN} - (31,93 \text{ kN} + 49,41 \text{ kN}) \\
 &= 88,33 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

La fuerza de rozamiento Intergranular obtenida es de 88,33kN, dicho valor corresponde al 52% de la carga máxima $\text{Mon-Rep } 45^\circ$. Las tablas 6.14 y 6.15 indican la relación de los distintos mecanismos en tanto por ciento que intervienen en las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45°, las cuales son las series que previamente se comentó que eran las que mejor podían determinar el comportamiento del refuerzo con láminas de carbono sobre elementos de hormigón.

Tabla 6.14 Relación de fuerzas verticales que intervienen en los ensayos Mon-Rep 45° carbono		
Descripción de la contribución de fuerza en el ensayo	Fuerza (kN)	%
Fuerza de rozamiento granular	88,33	52
Carga vertical tomada por las láminas de refuerzo	31,93	19
Carga tomada por las tensiones transversales de las láminas y resina (<i>mecanismo de flexión de las bandas</i>)	49,41	29

Tabla 6.15 Relación de fuerzas verticales que intervienen en los ensayos TRI-Unión 45° carbono		
Descripción de la contribución de fuerza en el ensayo	Fuerza (kN)	%
Fuerza de rozamiento entre bloques	6,34	7
Carga vertical tomada por las láminas de refuerzo	33,82	38
Carga tomada por las tensiones transversales de las láminas y resina (<i>mecanismo de flexión de las bandas</i>)	49,41	55

El valor de la fuerza del mecanismo de flexión sobre las bandas fue determinado a partir de la serie TRI-Unión 45°

De acuerdo con los resultados de las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45° se observa, que el valor de la carga soportada por las tensiones longitudinales de las bandas solo tienen una pequeña variación del 6% entre ellas, lo que muestra que las fibras fueron traccionadas prácticamente igual, independientemente del tipo de refuerzo, siempre y cuando las fibras estén orientadas en la misma dirección. Esto también se puede ver entre las series Mon-Rep“H” y TRI-Unión“H” las cuales son prácticamente iguales. El mecanismo de transmisión de carga a las bandas en sentido longitudinal es menos

dependiente del estado de la superficie en la zona fisurada, que en el caso del refuerzo con aramida. Comparando los valores de las tablas 6.14 y 6.15 con los de las tablas 6.6 y 6.7, se observa como el porcentaje de carga tomada por el mecanismo de flexión del propio refuerzo es mucho mayor en el caso del tejido que en el caso de las bandas unidireccionales.

6.2.5 Descripción del tipo de comportamiento y falla de cada serie del sistema carbono

Los ensayos de las series TRI-Unión con sus variantes de orientación de fibras longitudinales a 45°, horizontal 0°, vertical 90° y "X 45°" presentaron un trazo de la rampa "carga vs. Deformación" con un comportamiento elástico lineal, entre un 50% y 84% de la carga máxima. La porción de rampa de carga restante correspondió a un comportamiento no lineal, y llegaron a la falla bajo un comportamiento dúctil.

En la tabla 6.16 se ha resumido el comportamiento de las láminas en la fase lineal de la curva carga – flecha, indicándose el porcentaje de la carga total que se desarrolla en régimen lineal así como el tipo de fallo. A diferencia del caso de reparación con aramida, en este caso el tipo TRI-Unión también presenta un comportamiento de tipo dúctil.

TABLA 6. 16 CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO ELASTICO LINEAL DEL SISTEMA CARBONO			
SERIE	Carga Máxima Bajo Deformación Elástica Lineal kN	% De Carga Máxima Bajo El Periodo Elástico Lineal	Tipo de Falla
Monolítico-Sano	245	91	Dúctil
Monolítico-Reforzado 45°	230	71	Dúctil
Monolítico-Reparado 45°	322	100	Frágil
Monolítico-Reparado H	163	100	Frágil
Monolítico-Reparado V	160	81	Dúctil
TRI-Unión 45°	75	84	Dúctil
TRI-Unión H	58	60	Dúctil
TRI-Unión V	28	50	Dúctil
TRI-Unión X	62	65	Dúctil

6.3 RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.3.1 Láminas de aramida

El comportamiento de estas láminas variará, según su aplicación, sea como material de refuerzo estructural de un elemento no fisurado ó como material de reparación de un elemento fisurado previamente a cortante.

El comportamiento de un sistema “Hormigón-Aramida” de refuerzo es de tipo elástico lineal hasta el 84% de la carga máxima y presenta un fallo de tipo dúctil, lo cual permite tomar ciertas precauciones previas al colapso. El incremento en la resistencia no es notorio, ya que las fibras sólo desarrollan un 6% de su capacidad de deformación máxima debido a que las láminas de refuerzo se desprenden rápidamente tras el inicio de fisuración del hormigón.

El comportamiento de un sistema “Hormigón-Aramida” de reparación, es de tipo elástico lineal durante el 100% de la aplicación de la carga, presentando un fallo de tipo frágil, lo cual impide tomar precauciones previas al fallo o colapso. En este caso, las fibras proporcionan algo más de resistencia que en el caso de sin refuerzo aunque, sólo llegaron a trabajar al 10% de su capacidad, lo cual implica que la resistencia del sistema está delimitada por la resistencia a tracción del hormigón. Esto implica que el refuerzo de aramida está, también, subutilizado.

El modo de fallo entre un elemento Sano sin fisuras (*Mon-Ref*) y uno previamente fisurado (*Mon-Rep*) son completamente distintos, En el primer caso, al abrirse la fisura por aplicación de la carga, se produce una fisuración también de la resina de unión que provoca el fallo de la unión por el adhesivo, desprendiéndose la lámina del hormigón. En este caso gobierna la resistencia del adhesivo. En el segundo caso, al aplicar la resina en el elemento ya fisurado, ésta se introduce también en las fisuras, de manera que antes de llegarse a producir el fallo por el adhesivo, se produce la delaminación de la banda por la aparición de las fisuras de cortante que provocan tracciones en el hormigón, perpendiculares al refuerzo, que llegan finalmente a romperlo. En este caso, por tanto, gobierna el fallo final la resistencia a tracción del hormigón reforzado.

La aplicación de las láminas de aramida está limitada a su uso en superficies planas, debido a la rigidez de las mismas. Previamente a su aplicación sobre la superficie de hormigón a reforzar o reparar, ésta debe ser aplanada para permitir un buen contacto entre las superficies de hormigón y aramida.

6.3.2 Láminas de carbono

El comportamiento en las distintas series fue variado, tanto en la deformación laminar como el tipo de falla.

Las probetas de la serie Mon-Ref 45° presentaron un comportamiento elástico lineal hasta el 71% de su carga máxima, falla de tipo dúctil y las láminas de carbono trabajaron hasta el 16% de su capacidad máxima, incrementando su capacidad de carga en 19%.

Las probetas de las series Mon-Rep prácticamente en todas sus variantes de refuerzo presentaron falla de tipo frágil, lo cual es un resultado poco favorable para tomar medidas de precaución antes de la falla. Las láminas de fibra de carbono que mayor deformaciones presentaron, fueron las probetas de la serie Mon-Rep 45° , trabajando las láminas hasta un 21% de su capacidad de resistencia.

Todas las series TRI-Unión tuvieron una falla de tipo dúctil, teniendo los mejores resultados La serie TRI-Unión 45°. En cuanto a las series Mon-Rep H y TRI-Unión H donde las fibras longitudinales fueron adheridas horizontalmente, la forma en que se calculó la carga vertical transmitida a las fibras horizontales fue sobrestimada, como se puede ver en la tabla 6.13. En el caso de la serie TRI-Unión H se consideró un porcentaje de carga vertical transferido a las fibras del 97%, lo cual implica que si además se le agrega la fuerza de rozamiento entre bloques, y la carga tomada por las tensiones transversales de las láminas y resinas (*mecanismo de flexión de las bandas*) se obtendría una carga mayor que la carga máxima. También se obtuvo que los ensayos con las láminas alineadas, horizontalmente presentaron un rendimiento por debajo de lo esperado, pero no tan bajo como los ensayos TRI-Unión “V” y “X”, lo que se muestra en la tabla 6.17, donde se indica la cantidad de tejido de fibras (cm^2) que fue usado en

las series de los ensayos TRI-Unión “H”, “V” y “X” del sistema carbono, y se hace la comparación entre la carga máxima y la carga que debería soportar cada serie de probetas de acuerdo a una extrapolación de la carga máxima soportada por la serie TRI-Unión 45°, y en la última columna se muestra el tanto por ciento de pérdida de material ó eficiencia de material (*TFC*) a causa de la orientación en las Series TRI-Unión “H”, “V” y “X”.

Sistema Carbono	Carga máxima (kN)	Superficie adherida (cm ²)	Extrapolación de carga en función del área de serie TRI-Unión 45°	% de pérdida de TFC en función de la carga máxima
TRI-Unión 45°	89,57	512	512	-
TRI-Unión H	97,00	672	117,56	17
TRI-Unión V	56,90	560	97,97	42
TRI-Unión X	95,00	933	163,22	42

Las investigaciones realizadas en este trabajo, no son concluyentes en cuanto al análisis y comportamiento del refuerzo externo a cortante en hormigón, sino una introducción en este tema. Es claro que la aplicación del refuerzo externo tendrá las limitaciones de la resistencia de adherencia al hormigón, ya que si las láminas no están ancladas a la superficie del hormigón, éstas no podrán desarrollar tensiones aproximadamente por arriba de un 25% de su capacidad a tracción, la cual está en función de la deformación máxima. Ver la tabla 5.2 que muestra las propiedades de las láminas de carbono y, comparando con las deformaciones obtenidas en las láminas de los ensayos en las series Mon-Rep 45° y Tri-Unión 45°.

Para que las fibras puedan desarrollar mayores esfuerzos, es necesario el anclaje de las láminas en sus extremos, lo cual puede ser posible en laboratorio pero muy difícil en un elemento estructural real. Para esto será necesario analizar cada caso individualmente.

Comparando los resultados de las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45° de ambas campañas experimentales se puede observar la mayor eficiencia de las láminas de carbono sobre las de aramida, basándose en el área transversal total de refuerzo del material compuesto en cada probeta. La tabla 6.18 muestra la carga máxima obtenida en cada serie.

TABLA 6.18 COMPARACIÓN DE EFICIENCIA ENTRE LAS CAMPAÑAS ARAMIDA Y CARBONO				
SERIE	ARAMIDA		CARBONO	
	Carga máxima (kN)	Carga vertical (kN) Transferida a las láminas	Carga máxima (kN)	Carga vertical (kN) Transferida a las láminas
Mon-Rep 45°	113,45	35,74	169,67	31,93
TRI-Unión 45°	39,55	29,32	88,90	33,82

La tabla 6.19 muestra el área total adherida sobre la superficie en las series Mon-Rep 45° y TRI-Unión 45° y el área de la sección transversal efectiva de las fibras orientadas longitudinalmente en las bandas de ambos materiales.

TABLA 6.19 COMPARACIÓN DE SUPERFICIE ADHERIDA AL HORMIGÓN Y SECCIÓN TRANSVERSAL		
Material compuesto	Superficie adherida al hormigón cm ²	Área de sección transversal cm ²
Aramida	320	8
Carbono	512	2,5

La relación de la carga máxima media “aramida VS. Carbono” resultó:

$$(113,45/169,67 + 39,55/88,90) / 2 = 0.55, \text{ lo cual corresponde a un } 55\% \text{ de carga}$$

La relación entre superficies adherida al hormigón fue:

$$(320/512) = 0.63, \text{ lo cual corresponde a un } 63\%$$

Y la relación entre secciones transversales fue:

$$(8 / 2,5) = 3,2, \text{ lo cual corresponde a un } 320\%.$$

Los resultados anteriores nos indican que, aunque aparentemente se usó una mayor cantidad de material compuesto en las probetas de láminas de carbono, el área de la sección transversal carbono nos indica que trabajó en forma más eficiente al transferir prácticamente la misma cantidad de carga vertical a través de un área de sección transversal del orden de un tercio de la sección transversal requerida por las láminas de aramida.

