

Capítulo 4

DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS PARA ELEMENTOS REFORZADOS A CORTANTE

Para poder definir las bases teóricas necesarias con las que poder diseñar los ensayos en los que se pretende determinar el comportamiento real de las láminas de fibra de carbono y de fibra aramida en su aplicación como elementos de refuerzo a cortante en elementos de hormigón, nos apoyaremos en los conceptos de refuerzo convencional a cortante de hormigón armado, del modo de fractura y de diversas experiencias y modelos de investigaciones anteriores.

Una de las finalidades de la aplicación del refuerzo externo a cortante con láminas de *FRP* en elementos estructurales es permitir que una posible falla sea de tipo dúctil en vez de frágil. Las posibles fallas por cortante pueden ser causadas por (*Freitas, 2000*):

- Agentes patológicos
- Deficiencia de proyecto
- Fallas de ejecución
- Exposición en medio ambiente agresivo
- Sobrecargas provenientes de readecuación de la estructura para nuevas finalidades entre otras.

4.1 Esfuerzo cortante en vigas de hormigón

La fuerza cortante viene a ser el resultado de la acción de fuerzas verticales que actúan en una sección determinada de una viga y tiende a cortar la viga, tal como muestra la figura 4.1.

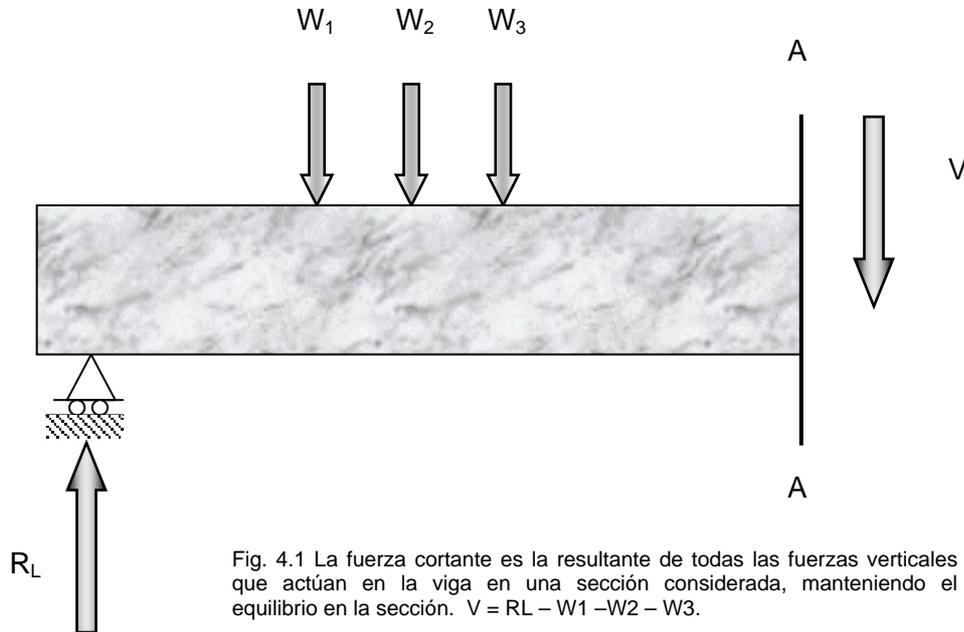


Fig. 4.1 La fuerza cortante es la resultante de todas las fuerzas verticales que actúan en la viga en una sección considerada, manteniendo el equilibrio en la sección. $V = R_L - W_1 - W_2 - W_3$.

La fuerza cortante resultante genera esfuerzos horizontales y verticales. Los esfuerzos horizontales generados se pueden demostrar si se toma una viga profunda de madera y se le corta en una serie de tablones horizontales como muestra la figura 4.2. Los tablones individuales se deslizan entre ellos, y su resistencia es mucho menor que la de la viga de la cual fueron cortados. Si ahora prensamos los tablones con mordazas grandes de manera que la acción de deslizamiento sea impedida, se restaurará la resistencia original de la viga.

Los esfuerzos cortantes verticales y horizontales son iguales ya que los momentos generados por estos son iguales, impidiendo que la viga rote.

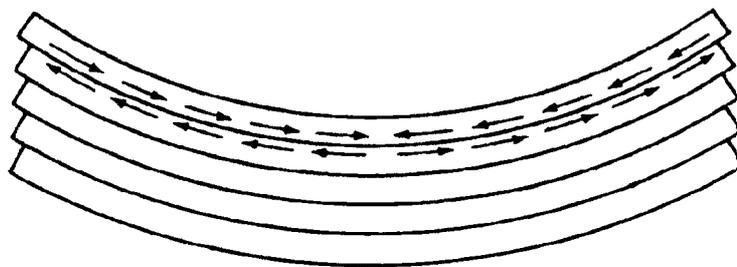


Figura 4.2 En este ejemplo se muestra el deslizamiento que tiende a ocurrir entre superficies de tablones adyacentes al ser flexionados. La fuerza cortante genera esfuerzos horizontales y verticales

La combinación de estos esfuerzos cortantes genera esfuerzos de compresión y esfuerzos de tracción diagonal, los cuales se ilustran en la figura 4.3

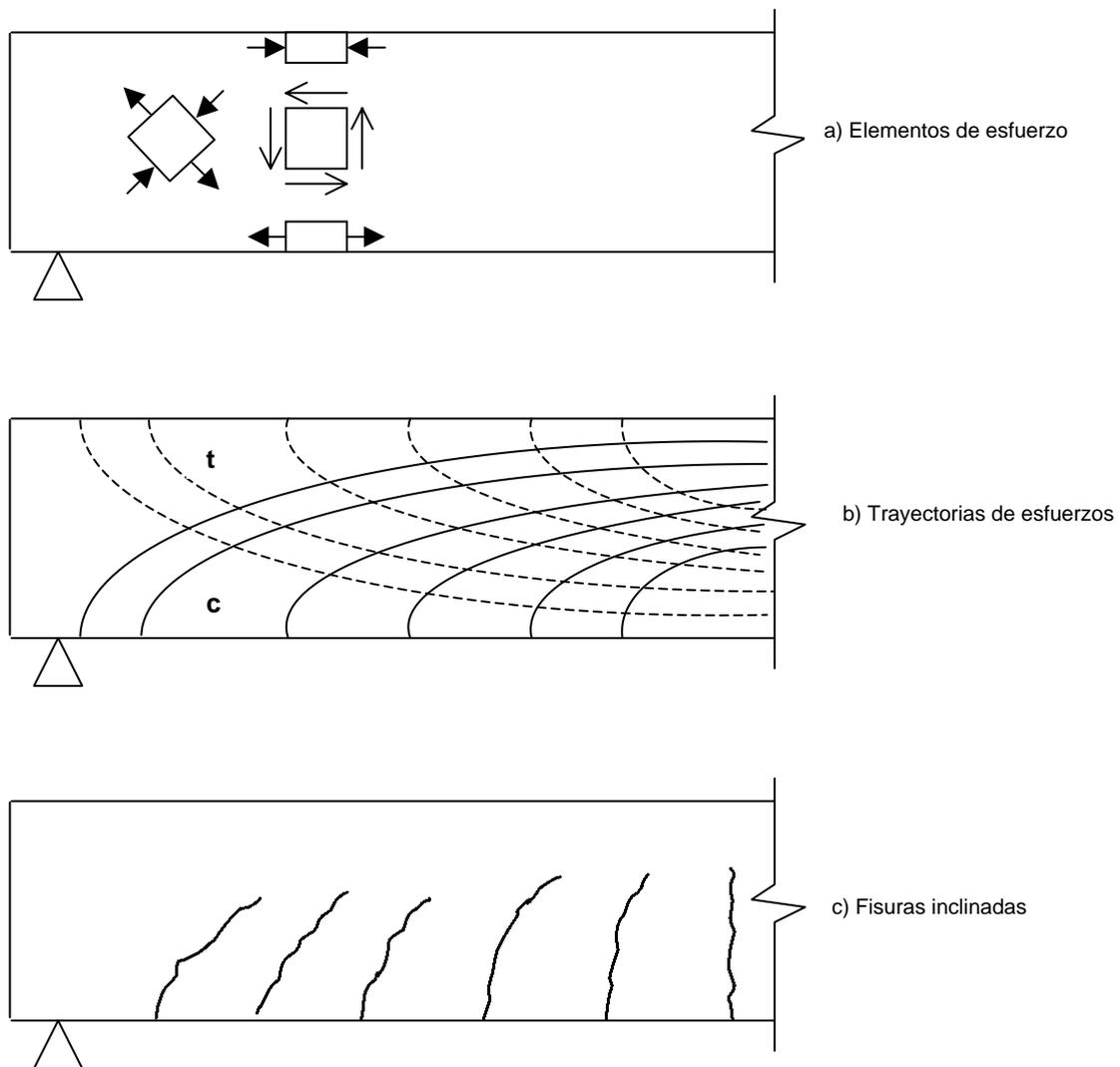
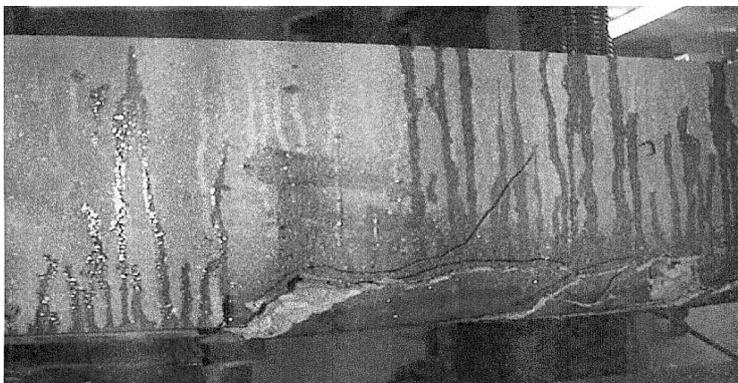
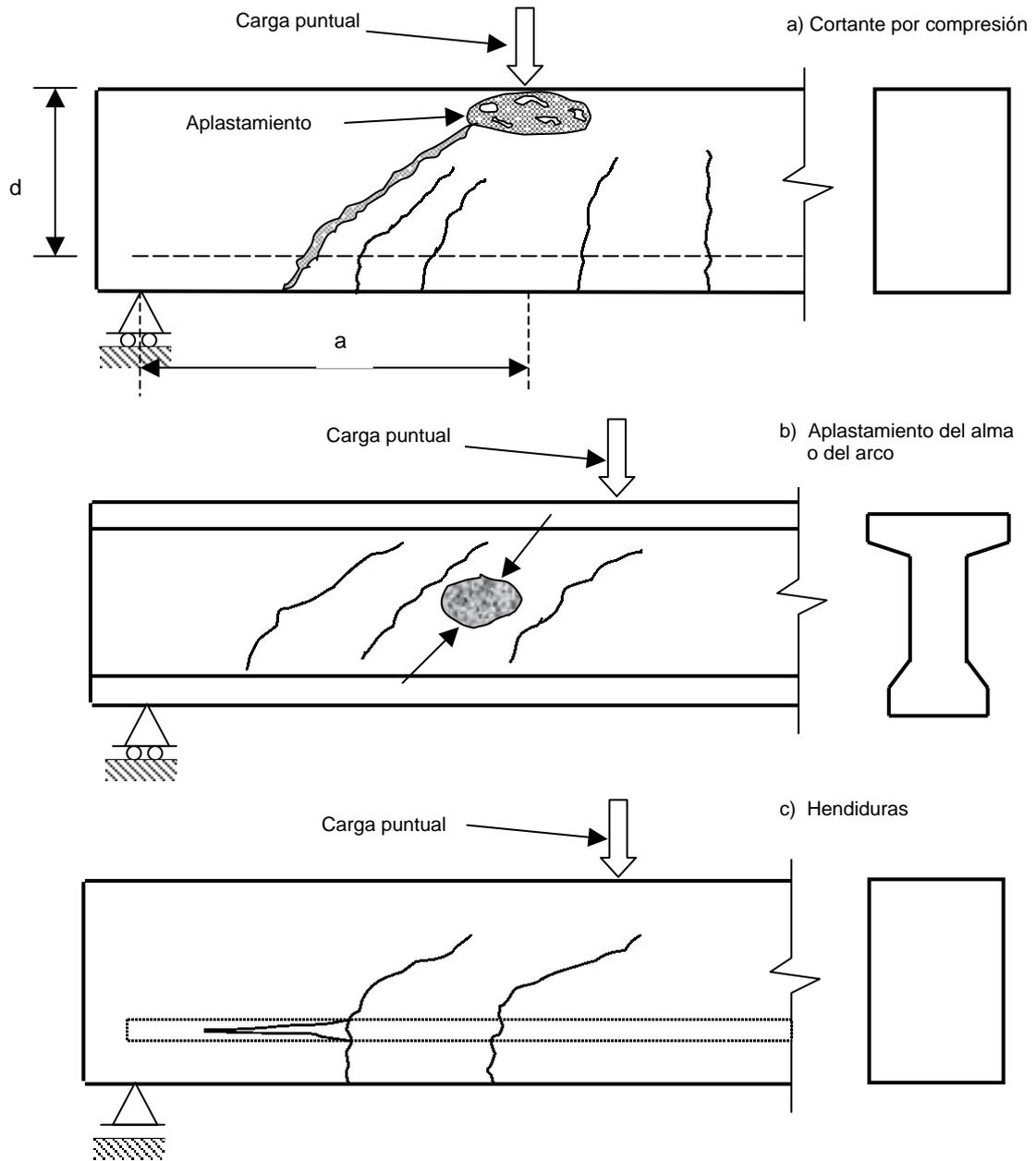


Figura 4.3 Efectos de la tensión diagonal en vigas de hormigón a), b) y c)

En la actualidad, aunque son muchos los problemas de ingeniería que han enfocado su atención en la transferencia de cortante en vigas de hormigón armado, son pocos aún los trabajos donde se ha estudiado la aplicación de láminas de FRP en el refuerzo o reparación a cortante, de vigas de hormigón armado.

Existen varios tipos de secciones transversales en vigas de hormigón armado, pero, en general, el tipo de falla en vigas sin armadura a cortante es muy semejante entre ellas. A continuación, en la figura 4.4 damos ejemplos de ello.



d) Falla por hendidura de cortante
 (University of Missouri-Rolla
 Khalifa, 1999)

Figura 4.4 Tipos de falla por cortante a), b), c) y d)

4.2 Distribución de las fuerzas en una viga fisurada

En la teoría tradicional se aceptaba en forma general que la zona a compresión no fisurada (V_c) soportaba todo el cortante resistido por el hormigón (V_h), pero investigaciones posteriores (ver Fig. 4.5) indican que parte del cortante se soporta por la acción de dovela del acero longitudinal V_d (alrededor de 10 a 20% del cortante total) y parte la transmiten fuerzas (aspereza superficial o “transferencia de cortante en la superficie de interacción” V_a) a lo largo de la fisura por tensión diagonal. De hecho parece que V_a es alrededor de un 45 a 60% del corte total y que el cortante en la zona de compresión apenas es del 20 a 35% del total. Dichas referencias (Cornell Structural Testing laboratory) suponen que conforme las fisuras a tensión diagonal se abren bajo carga creciente, V_a decae y cuando la zona a compresión no puede absorber el cortante que crece rápidamente, además de la compresión, ocurre la falla a cortante por aplastamiento del hormigón en la zona a compresión. También se presenta la contribución de resistencia a cortante a lo largo del acero a tensión como se indica en V_d . En la figura 4.5 se observa como se presenta cada una de las contribuciones al esfuerzo cortante nominal por parte del hormigón ($V_h = V_c + V_a + V_d$). (Willems, Easley, Rolfe, 1981)

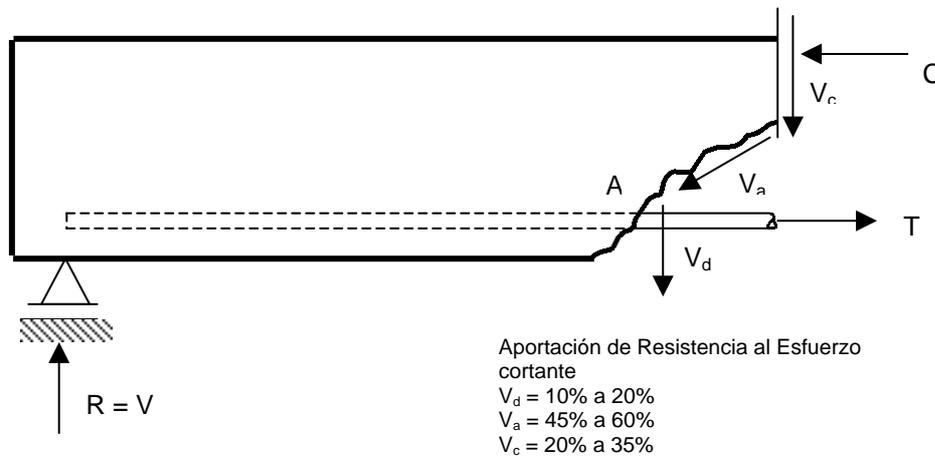


Figura 4.5 Tensiones en el extremo de una viga

4.3 Aplicación y comportamiento de FRP

Al ser aplicadas las láminas de FRP como refuerzo a cortante, se incrementa el Cortante resistente, que inicialmente esta constituido por la resistencia a cortante del hormigón (V_h) y el acero transversal (V_s), quedando finalmente como se muestra en la formula (4.1)

$$V_R = V_h + V_s + V_f \quad (4.1)$$

La aportación del V_h está dada por la sección transversal a compresión de la viga, la aportación del V_s esta dada por el acero transversal de los estribos los cuales vienen espaciados a una distancia determinada, y la aportación del V_f es semejante a la resistencia del acero transversal V_s tal como muestran las ecuaciones 4.2 y 4.3.

Para poder comprender mas claramente la similitud de las ecuaciones 4.2 y 4.3 nos referimos a la figura 4.6 en la que se muestra la geometría de la viga y armadura.

$$V_s = \left[\frac{A_s * \sigma_s}{S} \right] * Z \quad (4.2)$$

$$V_f = \left[\frac{A_f * \sigma_f}{S_f} \right] * Z \quad (4.3)$$

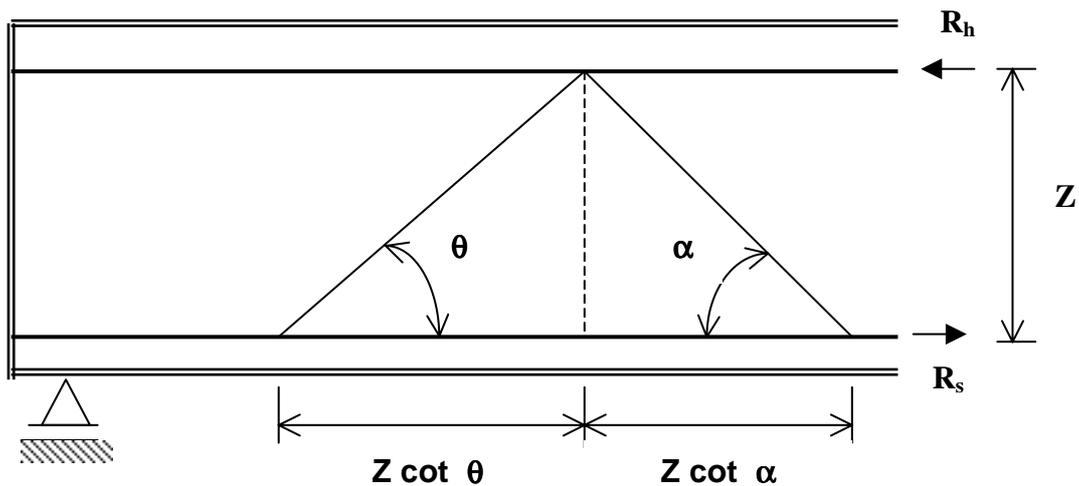


Figura 4.6 En esta figura se muestra la geometría para dimensionar el área requerida de FRP como refuerzo a cortante

R_h - Resultante de compresión en el hormigón

R_s - Tracción en el acero a flexión

V_f - Resistencia al esfuerzo cortante del refuerzo FRP transversal en una sección dada

V_s - Resistencia al esfuerzo cortante del refuerzo de acero transversal en una sección dada

σ_f - Resistencia de diseño del FRP

σ_s - Resistencia de diseño del acero

S_f - Separación entre cada par de láminas de FRP de refuerzo a cortante

L - Longitud de la proyección de cada fisura a reforzar a cortante

n - Número de láminas de FRP por cada fisura a reforzar a cortante

Z .- Distancia entre la resultante a tracción del acero y la resultante del hormigón a compresión

θ .- Ángulo de inclinación de la fisura a cortante

α .- Ángulo de inclinación de las láminas de FRP.

$$L = (Z \cot \theta) + (Z \cot \alpha) \quad (4.4)$$

$$n = \left(\frac{Z}{S_f} \right) (\cot \theta + \cot \alpha) \quad (4.5)$$

La separación entre láminas de FRP estará en función del cortante adicional requerido para satisfacer las sollicitaciones de cortante actuales. En la figura 4.7 se muestra la aplicación de láminas de FRP como refuerzo a cortante, con un ángulo de inclinación, el cual se busca preferentemente que forme un ángulo de 90° con la fisura, para estar debidamente orientadas con la trayectoria de las tensiones a tracción diagonales. En muchas ocasiones, por cuestiones prácticas, se colocan las fibras de refuerzo con una orientación vertical cómo lo muestra la figura 4.8

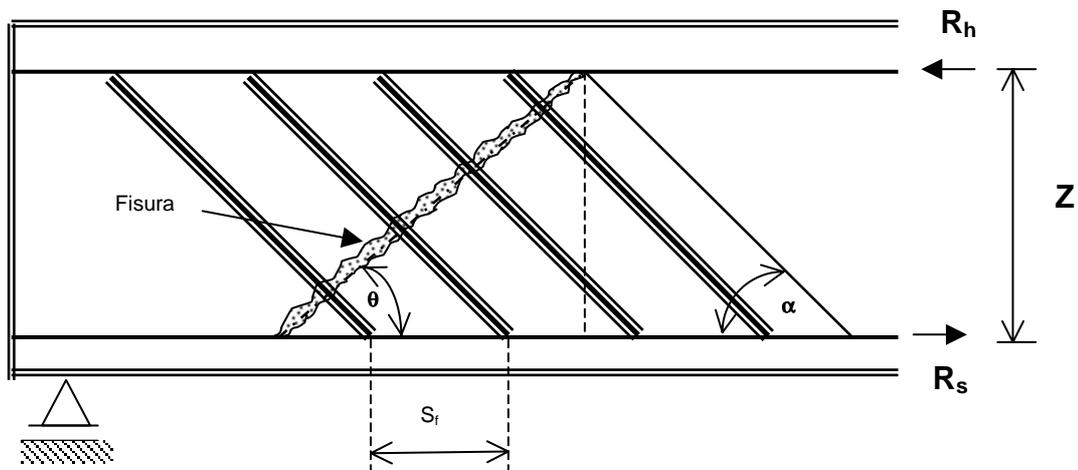


Figura 4.7 Viga de hormigón armado reforzada a cortante con láminas de FRP inclinadas a un ángulo muy próximo a 45°

En el capítulo 3 se trató de las diversas configuraciones de aplicación del refuerzo a cortante con láminas de FRP transversales, mediante la envoltura total; alrededor de la viga en forma parcial en forma de "U" y mediante la adherencia de las láminas de FRP a los dos lados de la viga. Las configuraciones mencionadas, pueden tener también la variante de ser aplicadas con la fibra en forma intermitente como lo muestran las figuras 4.7 y 4.8, y no necesariamente con FRP a lo largo de toda la viga.

Los análisis siguientes tendrán en cuenta únicamente la aplicación de láminas de *FRP* en forma intermitente, con una inclinación a 45° con respecto a la horizontal, y en forma vertical. (Galvez, 2000)

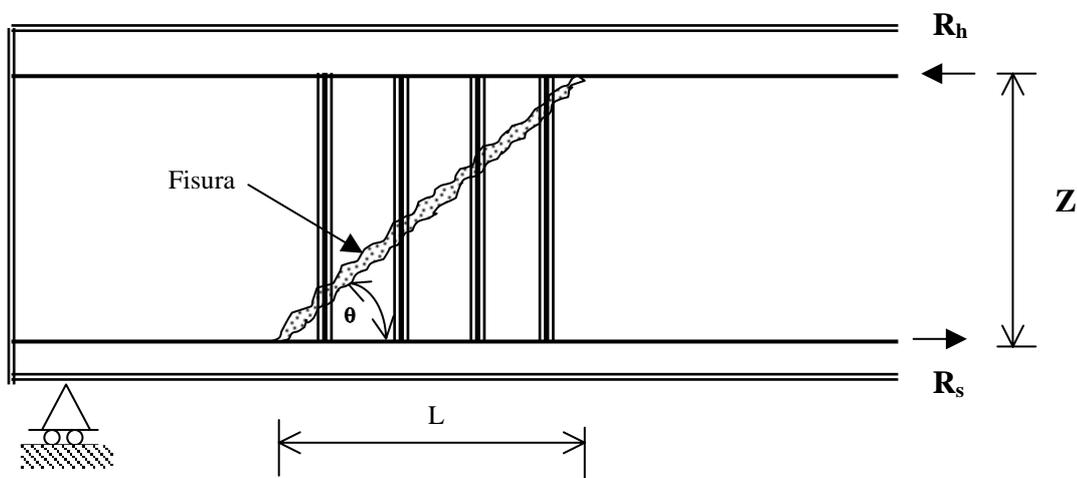


Figura 4.8 Viga de hormigón armado reforzada a cortante con láminas de FRP orientadas verticalmente.

4.4 Descripción del fenómeno de fisuración por cortante.

Dentro de la evolución de los estudios de mecánica de fractura, especialmente para el hormigón, se destaca en la actualidad un relevante desarrollo de metodologías de ensayo para la determinación de los parámetros de tenacidad a la fractura de materiales, así como para conocer de que forma las características de la composición de los materiales afectan estos parámetros.

Para poder identificar mejor el modo de propagación de las fisuras por cortante en los elementos de hormigón de este trabajo, se ha requerido apoyar en la teoría de mecánica de fractura, describiéndose los modos de propagación de fisura mostrados en la figura 4.9 (Oller, 2001).

Son tres tipos de Modos de Fractura identificados, que describen tres movimientos cinemáticamente independientes, que son:

- *Modo de apertura* o "*Modo I*", en el cual las caras de la fisura se separan casi paralelamente entre sí. Se supone que en este modo sólo se desarrollan tensiones de tracción.
- *Modo de deslizamiento* o "*Modo II*", en el cual las caras de la fisura se deslizan una sobre otra. Se supone que bajo este modo sólo puede generarse tensiones tangenciales.
- *Modo de torsión* o *de rasgado* o "*Modo III*", donde las caras de una fisura se deslizan lateralmente una respecto a la otra. Se supone que también en este caso se desarrollan tensiones tangenciales.

Con ensayos de deformación controlada, desde un punto de vista de la mecánica de fractura elástica no lineal, se puede catalogar el tipo de fractura de vigas cortas de hormigón simple como las que se ensayarán en este trabajo, como **Modo II**. Esta concepción en cuanto al modo de fractura, sirve para delimitar las dimensiones y la geometría de las probetas a ensayar en este trabajo para el estudio del comportamiento de las láminas de FRP como refuerzo a cortante en elementos de hormigón.

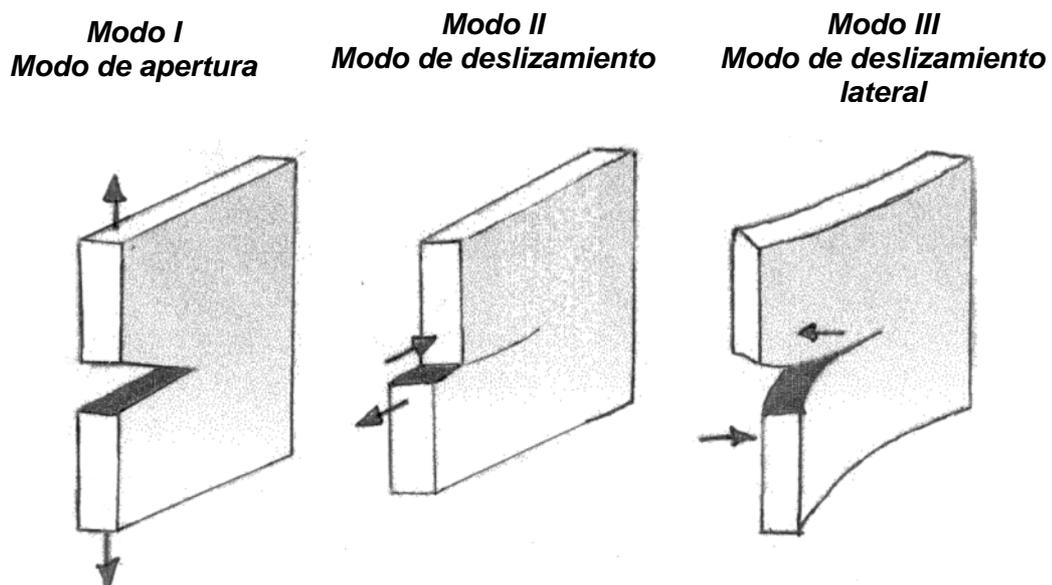


Figura 4.9 Modos de Fractura en materiales pétreos de acuerdo a la teoría de mecánica de rocas.
Santos, Antunes, Nogueira (1999)

Aunque según la teoría, una fractura puede ser de tres modos distintos, también se puede presentar una posible combinación de estos modos de fractura. Por ejemplo, algunas fisuras de cortante son generadas inicialmente por fisuras generadas por esfuerzos de Flexión, las cuales pueden ser consideradas como fracturas de **Modo I**. En la figura 4.10 se describen los movimientos sobre una fisura generada por esfuerzo cortante en una viga de hormigón simple.

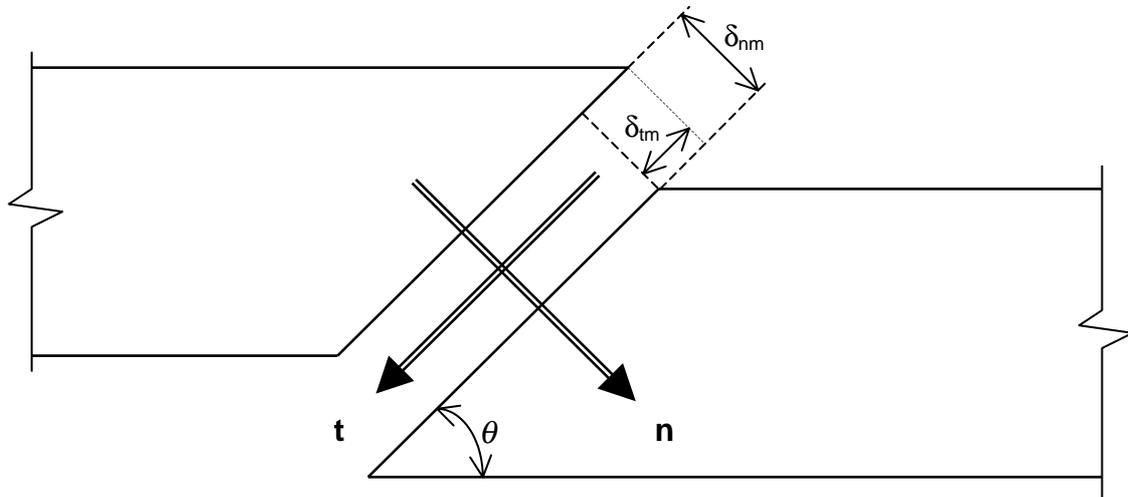


Figura 4.10 Deslizamiento y apertura de fisura, y direcciones de tensiones, donde δ_{tm} y δ_{nm} son respectivamente el deslizamiento y la apertura promedio de fisura.

La figura 4.10 muestra los desplazamientos al generarse una fisura a cortante. A partir de la misma, se puede interpretar que la aplicación de láminas de FRP como refuerzo a cortante, estará sujeta a tensiones de tracción y fuerzas perpendiculares o diagonales a la dirección longitudinal de las fibras, generadas por los esfuerzos normales y cortantes respectivamente (*Ianniruberto; Imbimbo, 1999*). La figura 4.3 también sirve de apoyo para complementar lo dicho.

Para poder analizar mas fácilmente el comportamiento de FRP como refuerzo a cortante, nos abstendremos de incluir acero de refuerzo a cortante para que de esta forma sólo se considere V_f y V_h , para posteriores análisis donde se aplicaran láminas de FRP como único material de refuerzo a cortante. Básicamente, se estudiarán dos tipos de probetas de hormigón, unas donde se considere el V_h además del V_f , y otras, donde sólo se involucre V_f .

4.5 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

Inicialmente se optó por trabajar con láminas de fibras de Aramida “*Kevlar*” y fibras de Carbono “*TFC*” (Tejido de fibras de carbono) como aplicación de materiales compuestos en el refuerzo o reparación exterior en elementos de hormigón sometidos a esfuerzo cortante. Por una parte la Aramida, la cual llamaremos **AFRP**, es un polímero que se ha aplicado previamente como refuerzo a flexión y que posteriormente lo estudiaremos como forma comparativa con las láminas de “*TFC*”, ya que en forma más detallada se estudiará la aplicación de láminas de “*TFC*” embebidas en resina epóxica. A estas últimas las llamaremos, de aquí en adelante, como **CFRP**. Dichas láminas (CFRP), son sobre las que se han enfocado la mayoría de los trabajos actuales en materia de refuerzo externo mediante **FRP**.

Un aspecto importante a estudiar es ver en qué grado se puede pasar de una falla frágil a una falla dúctil por cortante mediante la aplicación de láminas de **FRP** como refuerzo externo a cortante, y determinar en que proporción se incrementa la capacidad de resistencia a cortante mediante el refuerzo externo a base de láminas de **FRP**.

Como punto de partida para el desarrollo del modelo experimental, se presta principal atención al tipo de falla causada por esfuerzos cortantes en vigas de hormigón armado, sujetas a cargas estáticas, tal como se muestra en la figura 4.11

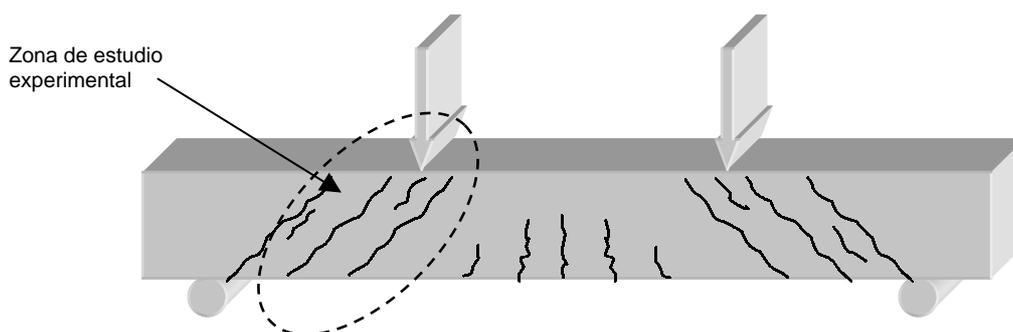


Figura 4.11 Viga de hormigón bajo cargas concentradas

La figura 4.12 muestra la viga anterior, reforzada con las fibras de refuerzo, colocada en forma perpendicular a las fisuras diagonales del esfuerzo cortante sobre la viga. Las fibras de refuerzo de **FRP** están actuando como estribos.

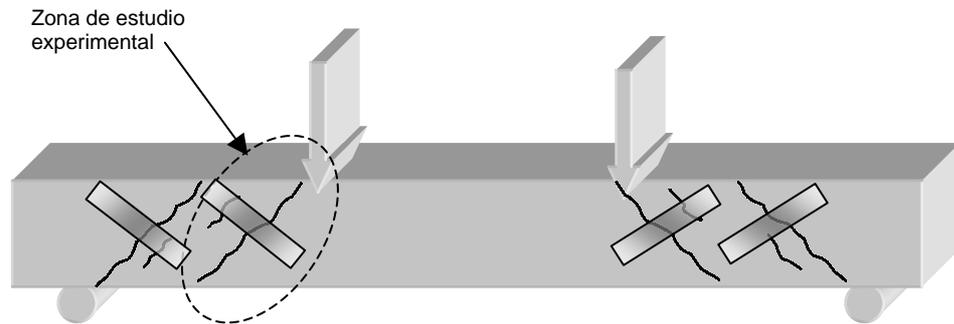


Fig. 4.12 Viga con refuerzo externo a cortante

La figura 4.13 muestra la descomposición de la fuerza cortante aplicada sobre el extremo de la viga, en la zona remarcada, mostrándose el deslizamiento y las tensiones entre los dos elementos..

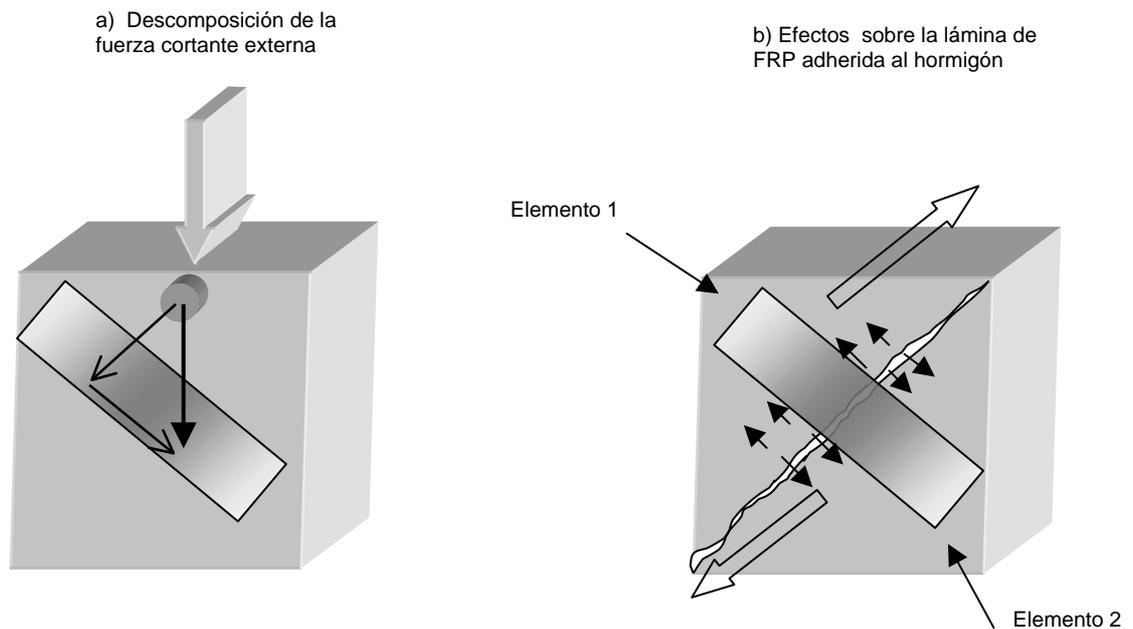


Figura 4.13 Estas figuras muestran una porción de una viga de hormigón donde se ven los esfuerzos y momentos a los que esta sometida la lámina de FRP bajo los efectos de la generación de una fisura por cortante.

La figura 4.14 muestra los elementos 1 y 2 girados 45° , indicando las tensiones generadas sobre el hormigón y la lámina de refuerzo.

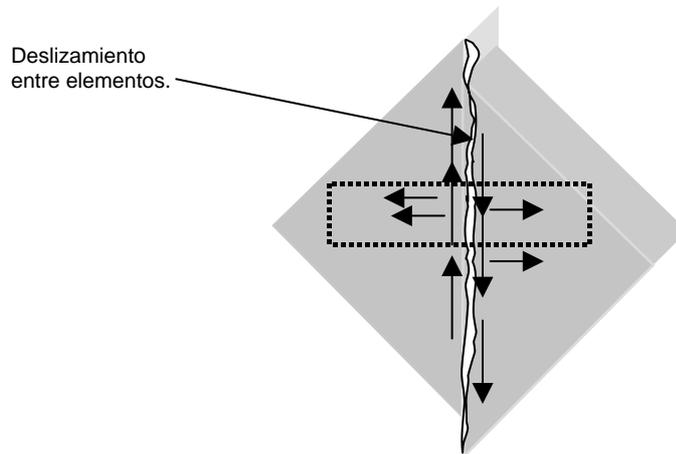


Figura 4.14

En base, a la analogía anterior de la falla por cortante en la viga y apoyándose en el tipo de falla de la figura 4.14 se pasa a la modelización del fenómeno como se plantea en la figura 4.15

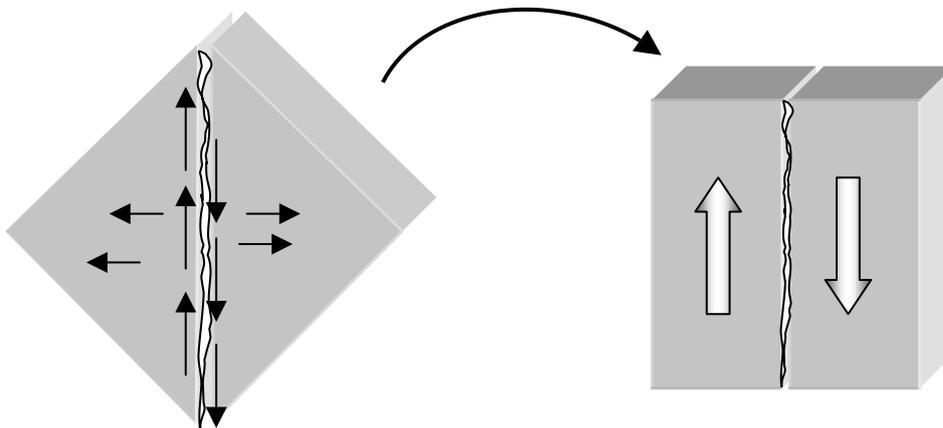


Figura 4.15 En esta figura se muestra el paso que se da, al proponer elementos donde el movimiento principal es el deslizamiento entre dichos elementos, y casi despreciando la separación entre ellos.

Finalmente, el modelo experimental que se utilizará como base inicial de los ensayos para el estudio del comportamiento de láminas de FRP como refuerzo externo, queda definido como se muestra en la figura 4.16. En este ensayo se pretende determinar los

esfuerzos que puede tomar la fibra de refuerzo, para lo cual será necesario instrumentar las probetas como se muestra en la misma figura.

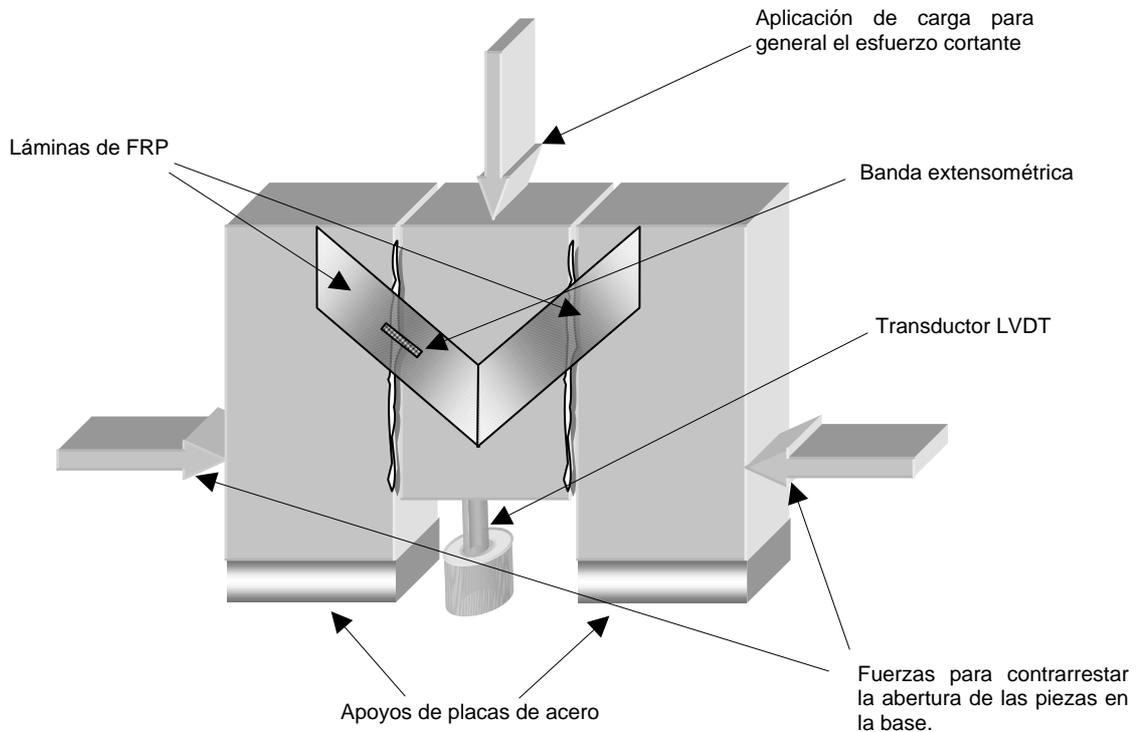


Figura 4.16 Descripción general del Modelo experimental para los ensayos

Es de interés conocer el comportamiento de las láminas de FRP cuando son usadas tanto como material de refuerzo como cuando constituyen material de reparación. Por ello, se ensayarán una serie de probetas monolíticas para conocer el comportamiento de las láminas de FRP como material de refuerzo a cortante, mientras que una serie de probetas fisuradas, es decir, con rozamiento entre sus caras, servirán para conocer el comportamiento de las láminas de FRP como material de reparación en elementos que hayan sufrido fisuración por cortante. También será de gran importancia conocer el tipo de falla que presenten las probetas: frágil ó dúctil.

4.6 Programa experimental de la aplicación de materiales compuestos como refuerzo a cortante

El diagrama 4.1 muestra en forma general como se han organizado las series de ensayos experimentales de las campañas Aramida y Carbono.

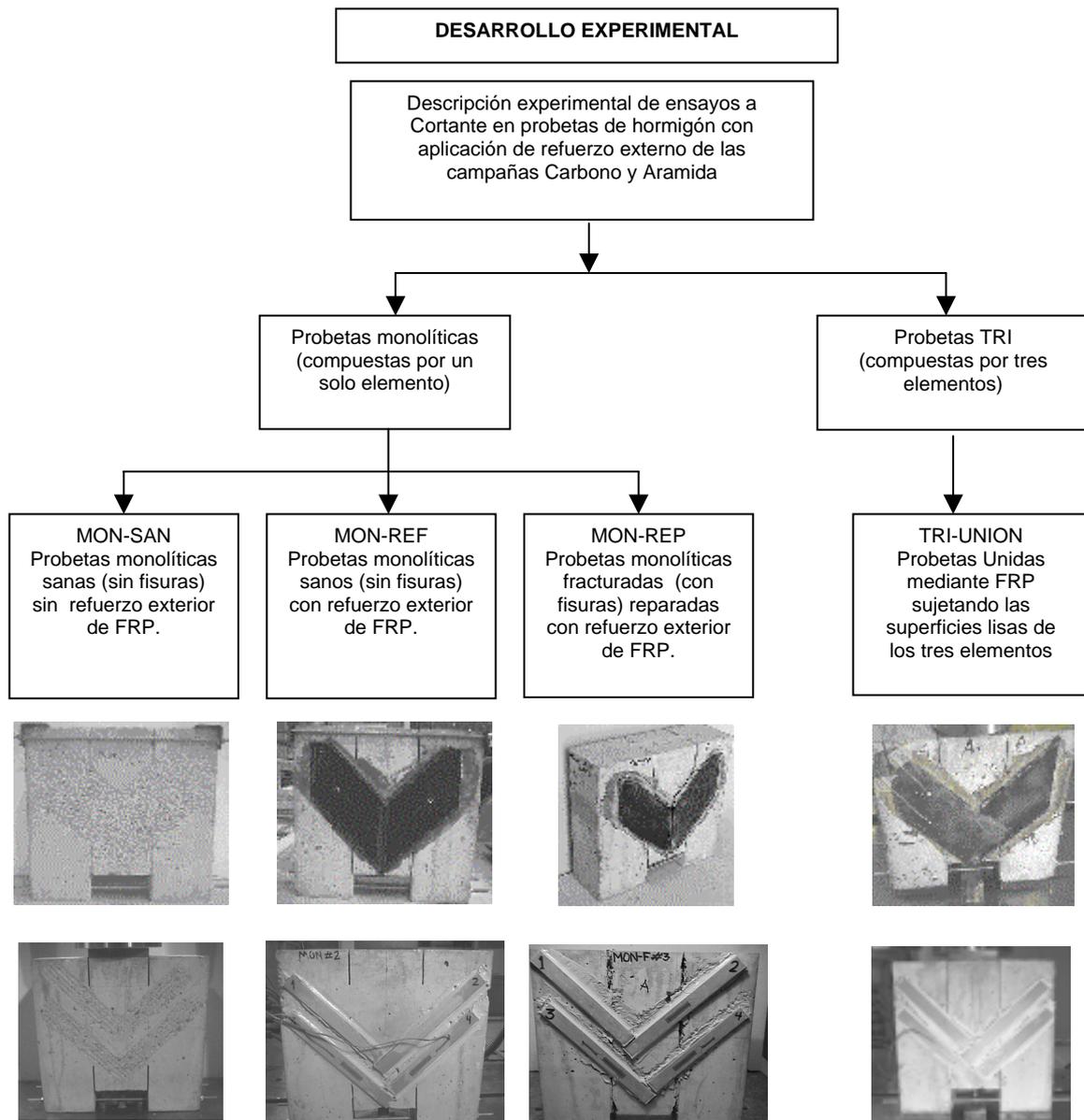


Diagrama 4.1 Descripción general de ensayos de la campaña experimental

En los diagramas 4.2 y 4.3 se describe como fueron subdivididos los ensayos Monolítico-Reparados (MON-REP) y TRI-Unión únicamente para la campaña experimental utilizando fibras de carbono, ya que las láminas de aramida sólo tienen un ancho fijo y no pueden adherirse una sobre otra.

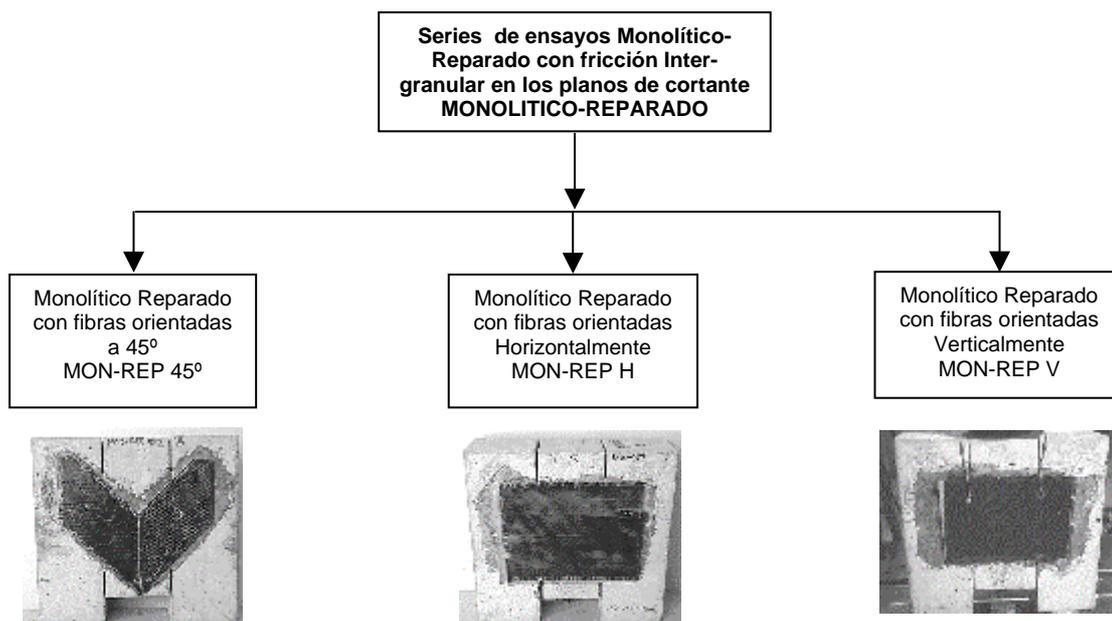


Diagrama 4.2 Descripción de ensayos las series Mon-Rep de la campaña experimental Carbono.

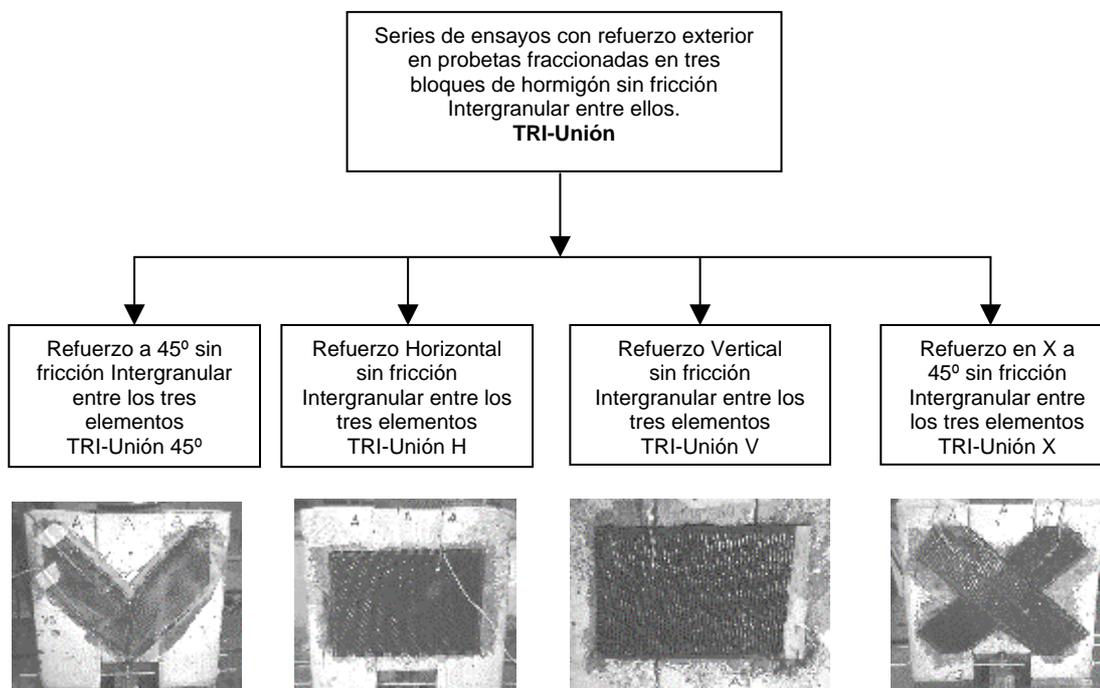


Diagrama 4.3 Descripción de ensayos de la serie TRI-Unión de la campaña experimental Carbono.

4.7 Definición de la geometría del prototipo óptimo.

Para poder definir las dimensiones de las probetas fue necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las probetas de cada serie o campaña experimental tenían que ser hormigonadas todas a la vez, para que todas cuenten con la misma dosificación.
- El número de probetas y cilindros-testigo estuvo en función de las dimensiones de la planta de hormigón, disponible en el laboratorio.
- Las dimensiones de las probetas fueron limitadas también teniendo en cuenta su peso, ya que cada una de ellas son transportadas y manipuladas durante:
 - El proceso de transporte del hormigón fresco en moldes de madera a la cámara climática para el curado de las probetas en nicho de aproximadamente de 40x40x40 cm³.
 - El refrentado de la superficie de contacto en las probetas.
 - La instrumentación de las probetas.
 - La manipulación en forma eficiente de la probeta en la prensa durante la instrumentación y el ensayo.

Las probetas debían tener unas mínimas dimensiones para poder pegar sobre las mismas las láminas de refuerzo y además que el tamaño de las superficies fisuradas a reparar fueran representativas de elementos reales, teniendo en cuenta también el tamaño del árido.

Teniendo en cuenta los factores anteriores se optó en un principio por elaborar probetas para los ensayos Monolíticos y Tri-Unión, como se muestra en las figuras 4.17 y 4.18

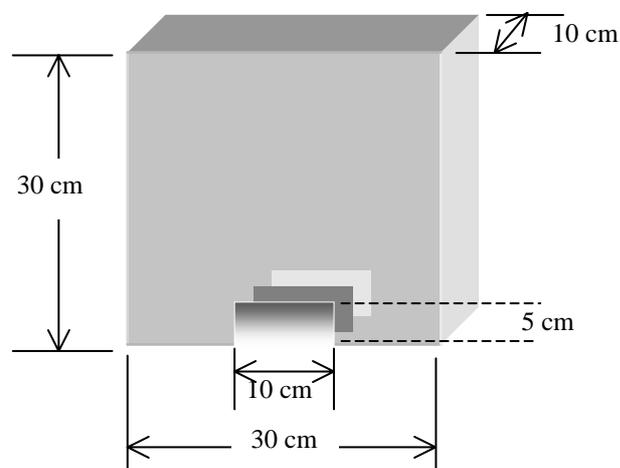


Fig. 4.17 Geometría inicial del prototipo de probeta Monolítica

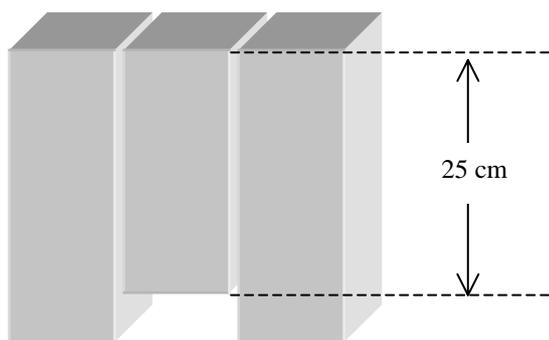


Figura 4.18 Geometría inicial del prototipo de probeta Tri-Unión para ensayos sin fricción (sin V_o)

4.7.1 Ensayos preliminares.

En los ensayos a cortante se buscó previamente generar una superficie de falla lo más lineal posible. Inicialmente se realizaron los primeros ensayos sobre probetas monolíticas aplicando una carga creciente sobre la superficie de la probeta, dando como resultado una fisuración desviada con respecto a la vertical, tal como se observa en las figuras 4.19 y 4.20. Para conseguir una fisuración más parecida a la real, se optó por realizar unas entallas superiores e inferiores en la probeta, definiendo el tamaño definitivo de las mismas (5cm) a partir de ensayos preliminares en una serie de probetas (figuras 4.21, 4.22 y 4.23)

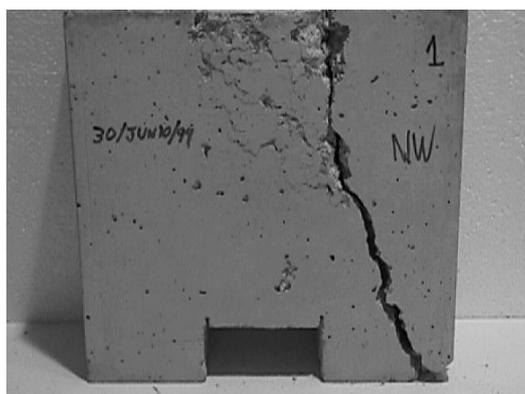


Figura 4.19 Ensayo preliminar en probeta monolítica sin pretensado en la base. Falla con fisuración desviada con una pequeña entalla.

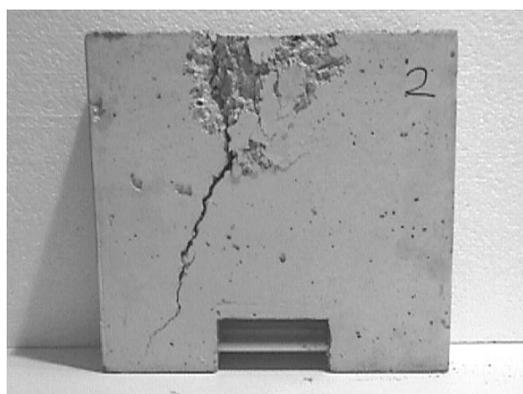


Figura 4.20 Probeta con pretensado inferior, sin entallas. La probeta presentó fisuración desviada, con aplastamiento en la zona de apoyo del pistón.

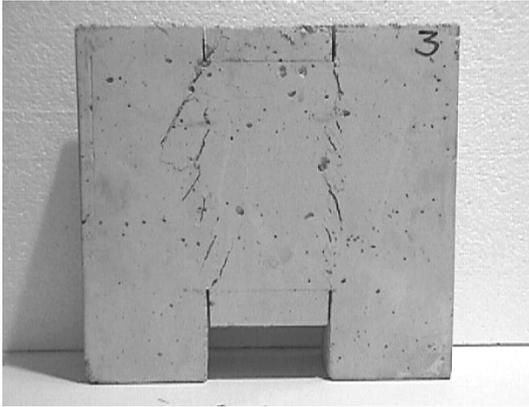


Figura 4.21 Probeta con pretensado inferior y con entallas superior e inferior de 3 cms. En esta probeta se pueden observar un conjunto de fisuras orientadas a lo largo del plano de cortante entre entallas. Dichas fisuras están orientadas con un ángulo de inclinación de 60° aproximadamente.

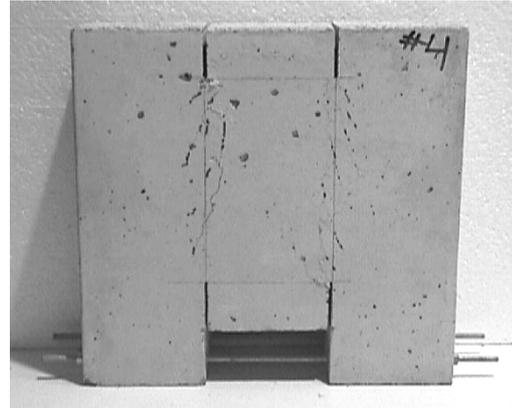


Figura 4.22 Probeta con pretensado y con entallas de 5 cms. En esta probeta, al igual que en la Fig. 4.21 se desarrollaron fisuras a lo largo del plano de cortante. Este tipo de probeta fue el que finalmente quedó definido para todos los ensayos en probetas monolíticas.

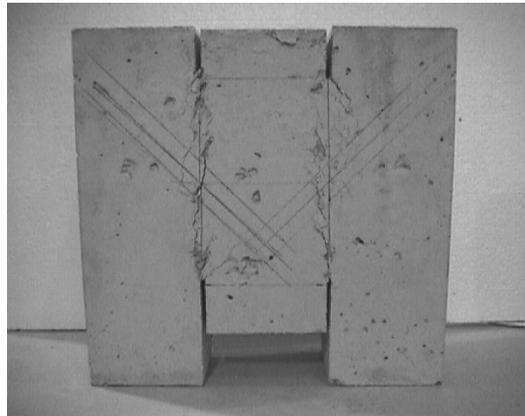


Figura 4.23 Preparación de probeta monolítica con entallas, fracturada, próxima a ser reparada.

4.7.2 Fase A: Pre-Ensayos

En esta fase, sólo se quiere verificar que los refuerzos en estructuras de hormigón con láminas de FRP adheridas a 45° , presentan deformaciones lineales y menores que aquellas con láminas adheridas a 90° (Ehsani 1997, Hutchinson 1997)

Para esta verificación, solo se experimentara con fibras de *aramida*, dada la facilidad de aplicación como refuerzo. Se realizaran tres pruebas por cada tipo de orientación de las láminas de FRP en esta fase. Los tipos de prueba se muestran en el cuadro de la Figura 4.24.

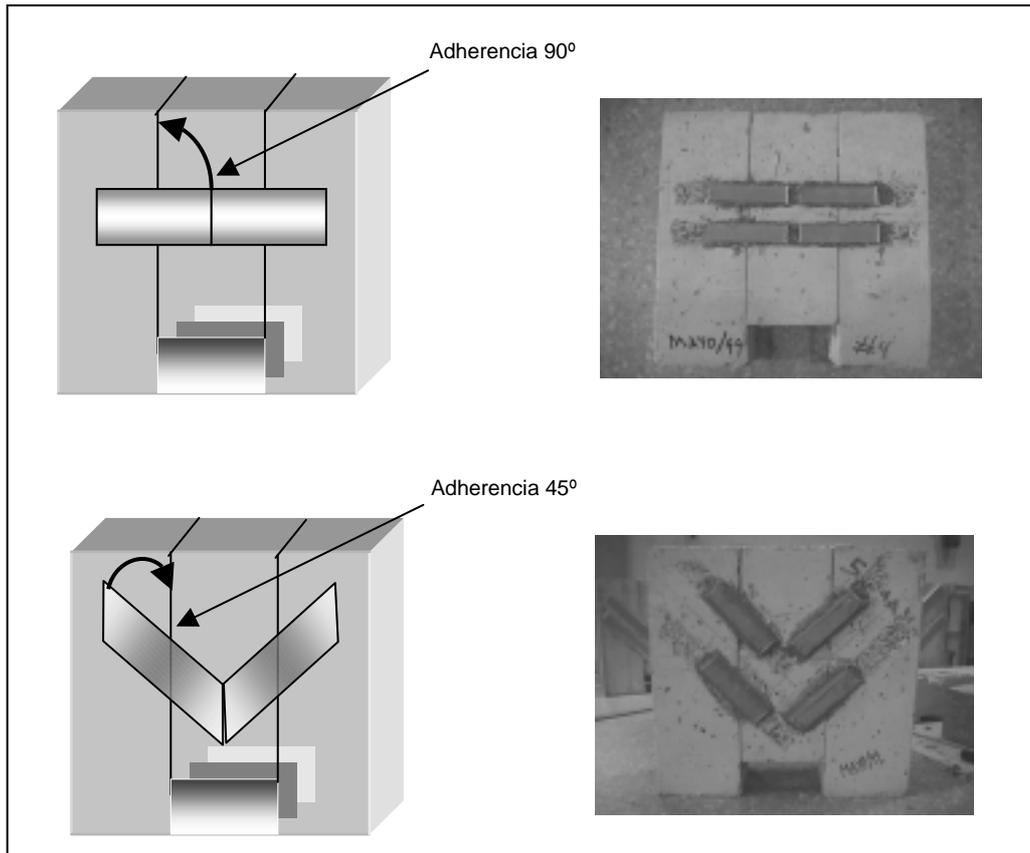
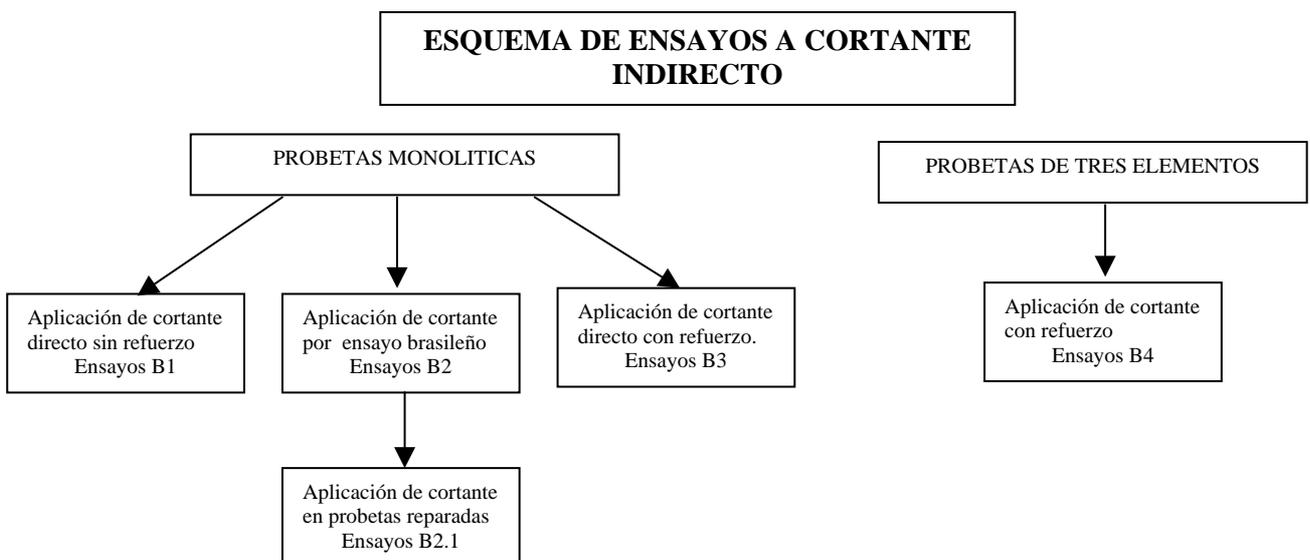


Figura 4.24 Ensayos Fase "A" (2da Etapa) pre-ensayos con adherencia de FRP a 90° y 45°.

4.7.3 Fase B: Preparación de probetas previamente fracturadas para reparación posterior

En La fase "B" de esta etapa experimental, se realizarán diversos ensayos a cortante, tal como se muestra en el esquema y posteriormente describiendo cada ensayo.



Los ensayos de la Fase "B" serán realizados, orientando y pegando las fibras de carbono de refuerzo a 45° y 135° de inclinación, con las variantes que se describen a continuación.

(Ensayo B1) Se ensayan tres probetas, sin la aplicación de láminas de fibra de refuerzo como ilustra la figura 4.25. El objetivo de los ensayos de la serie Mon-Sano es tener un parámetro de referencia, para las otras series de ensayos

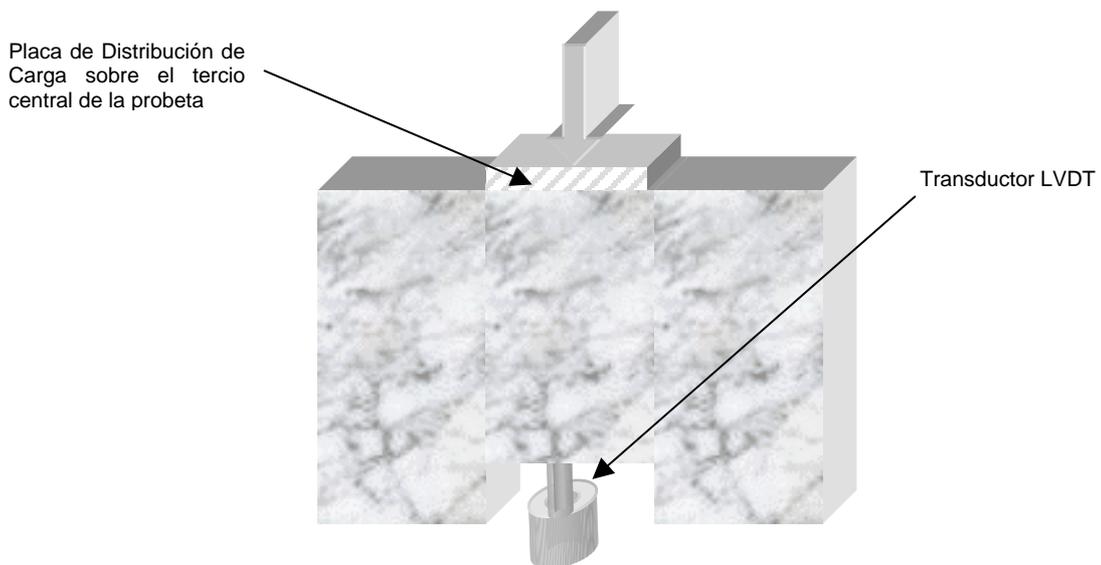


Figura. 4.25 Ensayo a cortante en probeta monolítica sana

(Ensayo B2 y B2.1) Se preparan tres probetas para este tipo de ensayo. Primeramente las probetas monolíticas se fraccionarán en tres, mediante la aplicación de un cortante, mediante tensión indirecta, apoyándose en el concepto del ensayo brasileño como se muestra en la figura 4.26. Las superficies generadas por dicho corte generaran una superficie con fricción granular.

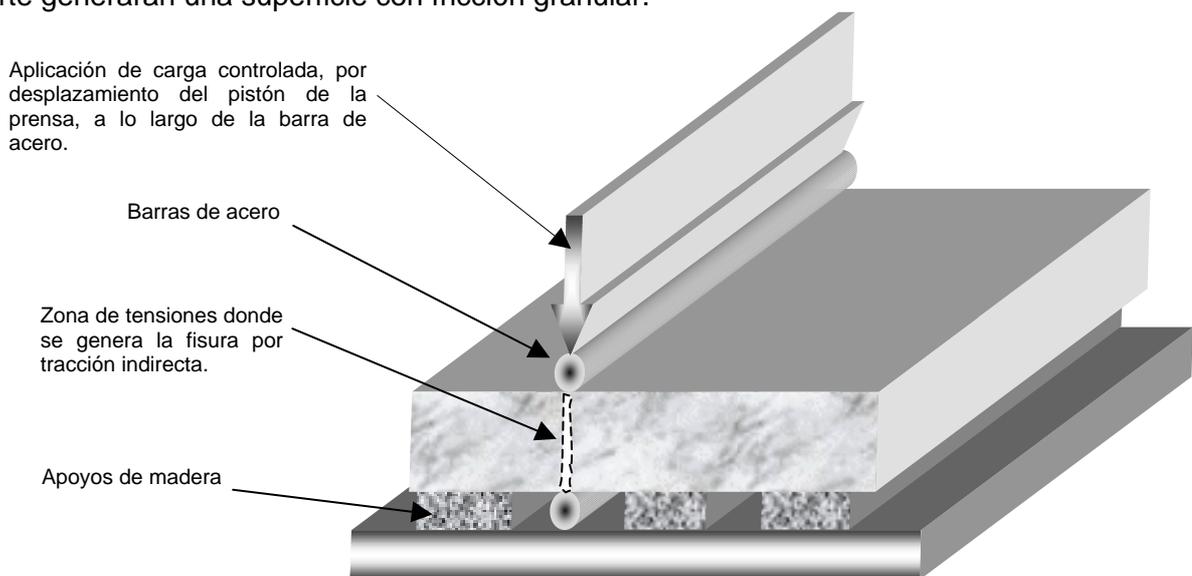


Figura. 4.26

Una vez generadas las superficies de fricción, se unen los tres elementos mediante las fibras de Carbono teniendo una reparación externa como si fuera una sección de una viga fisurada considerablemente. Posteriormente se le aplicará una carga en la parte central para medir el comportamiento de la probeta reparada, tal y como muestra la figura 4.27

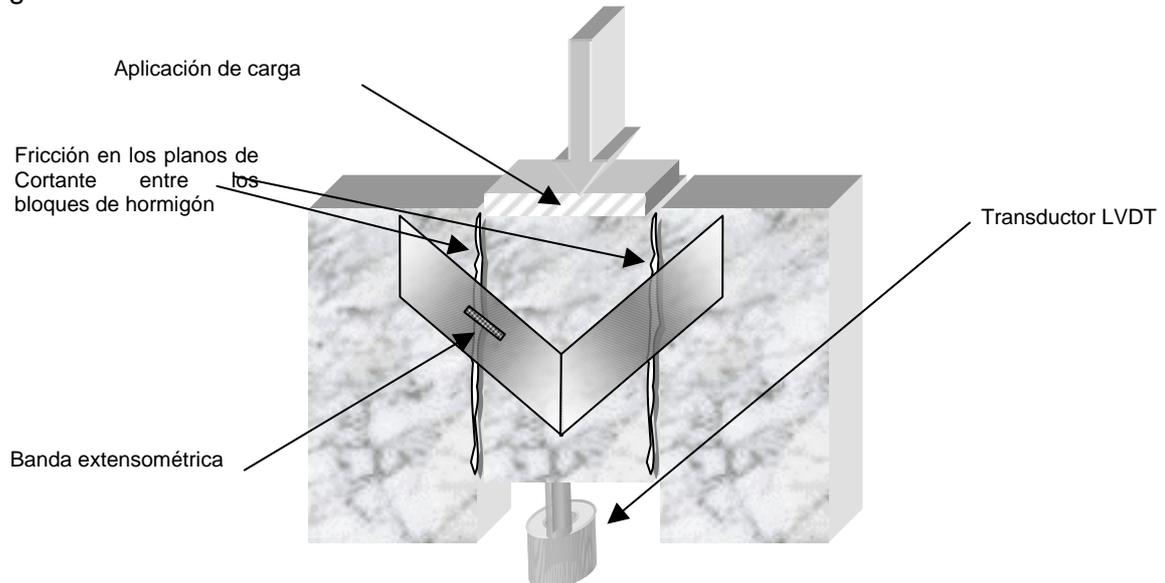


Figura. 4.27 Ensayo monolítico Reparado

(Ensayos B3) Se refuerzan tres probetas adhiriendo la fibra sobre la superficie de hormigón, actuando como estribos externos, de un único elemento monolítico. Estas probetas estarán sometidas al mismo esfuerzo cortante que los ensayos B1 y B2 mostrados en las figuras 4.25 y 4.26

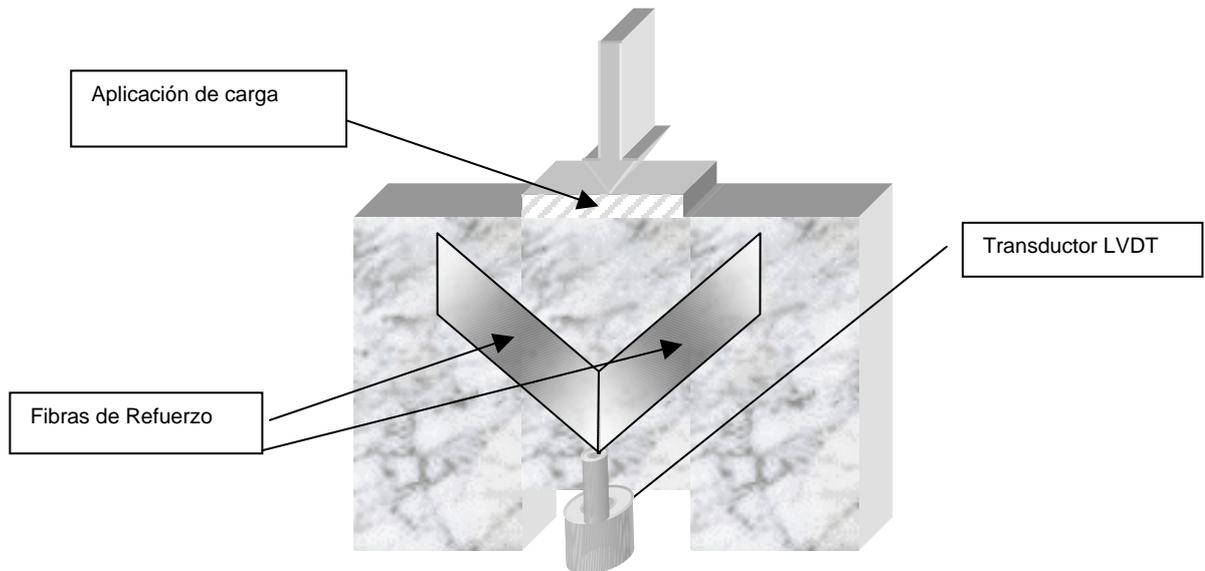


Figura. 4.28 Monolítico Sano

(Ensayos B4) Tres probetas conformadas por tres elementos, se ensayarán, adhiriendo la fibra sobre la superficie de hormigón uniendo los tres elementos, teniendo la superficie de contacto lisa para disminuir la fricción entre los elementos.

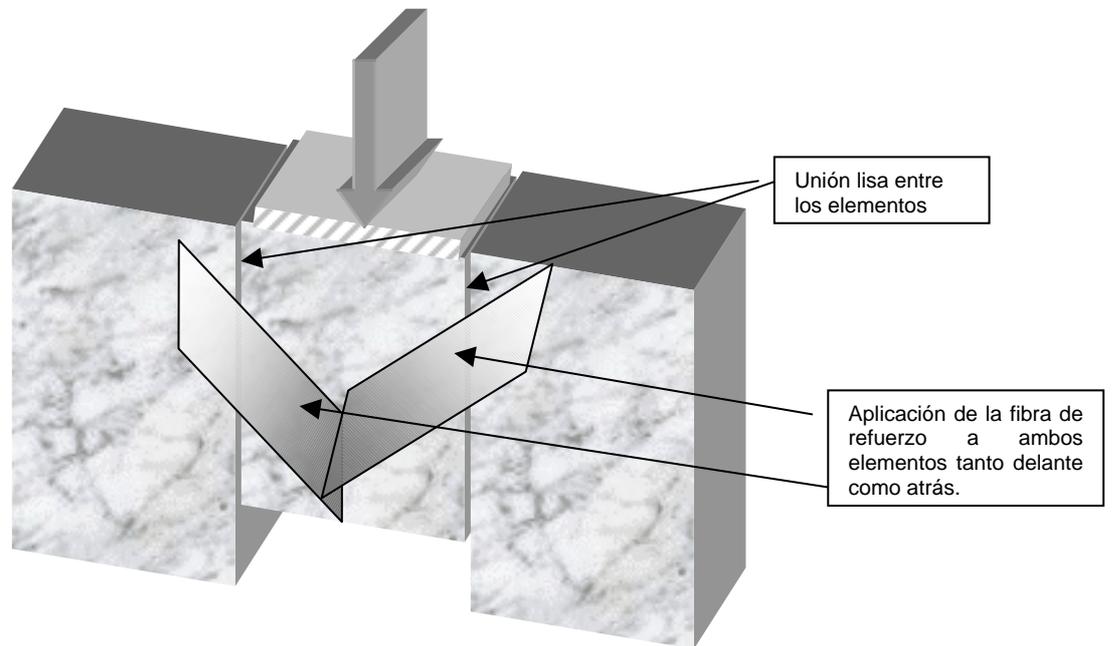


Figura. 4.29 Ensayos Tri-Unión

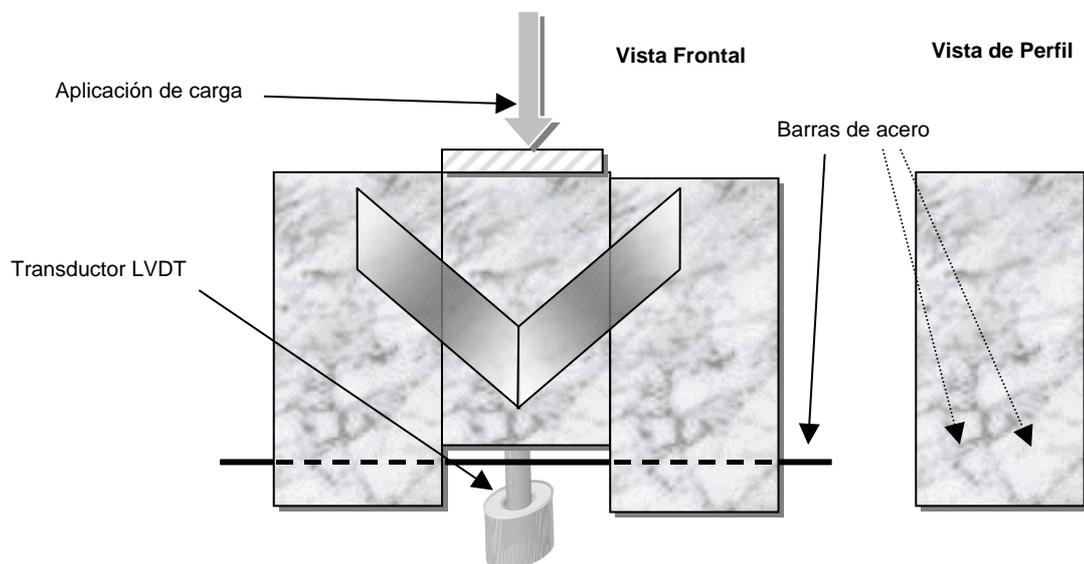


Figura. 4.30 Vista frontal y perfil de las probetas de la serie TRI-Unión.

