

4. Refuerzo a cortante

La adhesión del Sistema MBrace en elementos tales como vigas, permite el incremento de su resistencia a cortante, al aportar cuantía resistente a tracción en las almas y tirantes traccionados.

4.1. Configuración

El método más eficaz de aplicar refuerzo a cortante con el Sistema MBrace es envolver toda la sección transversal de la viga con MBrace. Habitualmente esta configuración no es práctica desde el punto de vista de construcción; frecuentemente, la presencia de losas monolíticas u otros elementos empotrados impiden envolver la lámina alrededor de la parte superior de la sección. Una opción podría ser la de perforar agujeros en la losa y envolver tiras o bandas de MBrace alrededor de la sección, pero este método es frecuentemente demasiado complicado y costoso.

El método más común consiste en envolver los lados y la parte inferior de la sección. Esta configuración es conocida como la envoltura en “U”. La envoltura en “U” es práctica y eficaz para aumentar la resistencia al esfuerzo cortante de la sección.

En ciertas situaciones puede que no sea posible envolver la parte superior o la inferior de la sección. Sin embargo, es todavía posible reforzar a cortante si se coloca el refuerzo en ambos lados de la sección. No obstante, la eficacia de esta configuración está limitada debido al deficiente anclaje de la lámina de MBrace.

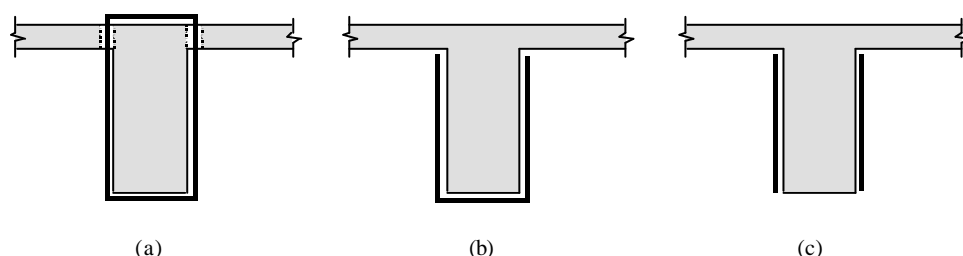


Ilustración 1.- Disposición del refuerzo a cortante en elementos lineales.

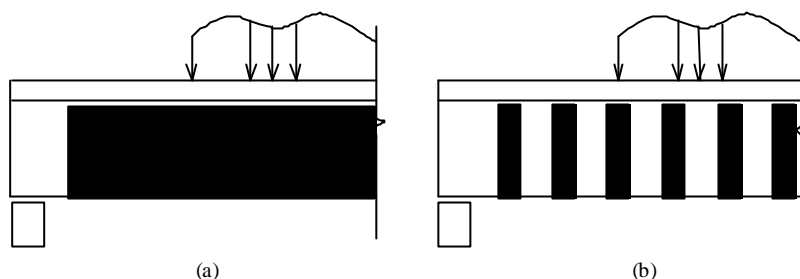


Ilustración 2.- Disposición del refuerzo continuo o discontinuo.

4.2. Filosofía de diseño.

Los modelos propuestos utilizan los mecanismos análogos al cálculo de secciones armadas, limitando la colaboración del Sistema MBrace de acuerdo a los siguientes condicionantes:

- pérdida del agregado del hormigón
- rotura MBrace
- delaminación del MBrace respecto el soporte de hormigón.

El refuerzo a cortante mediante adhesión externa de MBrace, idénticamente al acero, se basa en el cosido, disponiendo la orientación de la fibra en paralelo a la dirección principal a coser, para optimizar el rendimiento del refuerzo.

Para el caso de cargas perpendiculares al eje del elemento (vigas bajo cargas de gravedad, pilares ante sismo), la disposición será entre 90° y 45° respecto al eje del elemento.

La mayoría de modelos de diseño propuestos, para uso de MBrace a cortante se basan, idénticamente al estribo de acero, en una analogía de cosido de los tirantes traccionados en el alma de la viga. A diferencia del estribo interno, la tensión asumible en la fibra depende de la capacidad de ésta de entrar en carga por adhesión externa. De este modo, la eficiencia del refuerzo dependerá de: la geometría del elemento (canto disponible, p.e.), calidad y resistencia del hormigón soporte, tipo y módulo elástico del material compuesto, número de capas dispuestas.

Debido a la importante aportación de resistencia a cortante aportada por el agregado de hormigón en masa (50% aprox.), que se opone a las fisuras oblicuas, es necesario limitar la contribución de la fibra hasta el límite en que se pierde este agregado. Esta limitación impuesta a la fibra supone no sobrepasa valores en elongación última de 0.004 (0.4%)

Con objeto de evitar roturas puntuales es preciso redondear aristas salientes, evitando la formación de puntos débiles.



Ilustración 3.- Disposición a cortante, colaborando en el anclaje longitudinal del refuerzo a flexión.

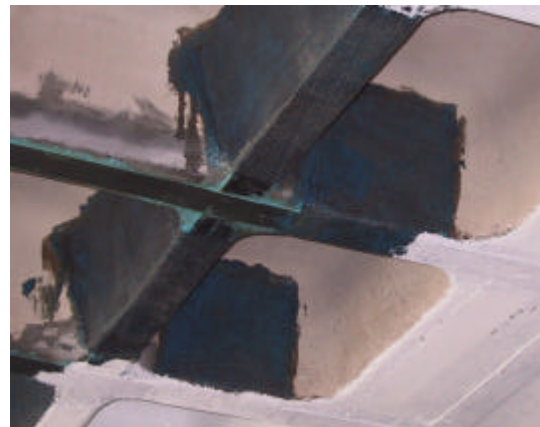


Ilustración 4.- Disposición a cortante, colaborando en el anclaje longitudinal del refuerzo a flexión, vista general.



Ilustración 5.- Refuerzo discontinuo a cortante por adhesión de hojas.



Ilustración 6.- Refuerzo por cosido recto, en zona de biela comprimida en apoyo.

La elongación, y/o la tensión de diseño a considerar a en la contribución de refuerzo a cortante, definida analíticamente y mediante ensayos, corresponde

al punto de agotamiento por desgranamiento de árido y fisuración en biela comprimida.

La elongación de diseño a considerar incluye, de forma implícita, eventuales despegues localizados en la interfase hormigón MBrace, aún no siendo este despegue local el modo de agotamiento final del refuerzo. La limitación final en rotura, viene dada, por la compatibilización de deformaciones entre el soporte fisurado y el material compuesto adherido.

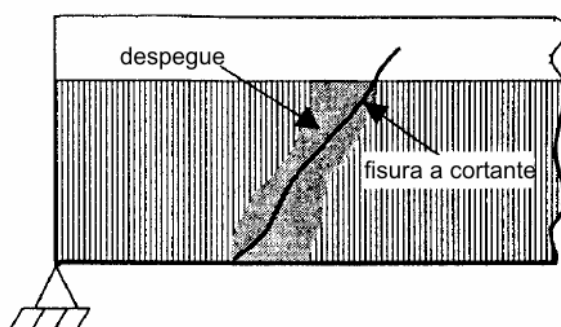


Ilustración 7- Refuerzo continuo por fallo en zona próxima a fisura, por despegue, inicialmente local y posteriormente general.

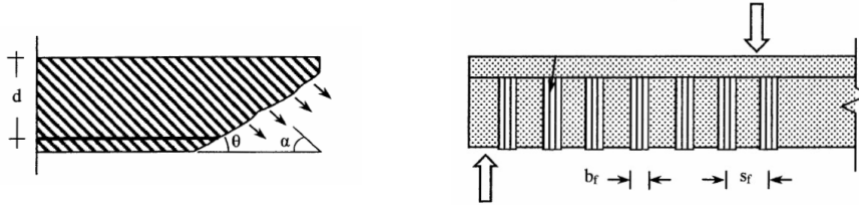
4.3. Modelos

Los modelos asumen la contribución de la fibra a cortante, idénticamente al comportamiento del estribo de armadura interna. Exclusivamente se asume absorción de esfuerzos normales a la dirección principal de la fibra. La elongación asumida de fallo ϵ_{fde} , es, para el Sistema MBrace, inferior a la elongación de rotura de la fibra en la dirección principal.

A continuación se exponen, a título indicativo los modelos propuestos por FIB y ACI, y en bibliografía Cheng et al, con objeto de ilustrar el modo de limitación de elongación última de contribución; todos ellos a partir del modelo idénticamente empleado a tracción. El comportamiento adherente se modeliza a partir de una longitud efectiva de anclaje, que de anclarse longitudes superiores no desarrolla más fuerza última.

El modelo más conservador es el último, publicado por Cheng et al.

4.3.1. Modelo FIB.



Contribución a cortante, por hormigón, acero y fibra o agotamiento de hormigón.

$$V_{rd} = \min(V_d + V_w + V_{fd}, V_{rd2}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Contribución a cortante de la adhesión de MC: con módulo elástico E_u (GPa), rotura última unitaria ϵ_{fu} (‰) y espesor t_f (mm), y orientación de las fibras respecto a la directriz del elemento α . El elemento tiene geometría: ancho de la sección b_w (mm), y canto d (mm), ángulo de inclinación de bielas comprimidas $\theta=45^\circ$ y calidad de hormigón f_{cm} (MPa).

$$V_{fd} := 0.9 \cdot \epsilon_{fde} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Ecuación 2}$$

Elongación de diseño obtenida, no superior a 0.006.

$$\epsilon_{fde} := \frac{\min(\epsilon_{fe} \cdot k, 0.006)}{\gamma_f}$$

Estimación de la elongación característica.

$$k := 0.80$$

Ecuación 3

Coefficiente de seguridad parcial por adherencia.

$$\gamma_f := 1.30$$

Elongación admisible en la fibra en el momento de despegue

$$\epsilon_{fe} := \begin{cases} 0.17 \cdot \left(\frac{\frac{2}{3} f_{cm}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0.30} \cdot \epsilon_{fu} & \text{if } E = 0 \\ \min \left[\left(\frac{\frac{2}{3} f_{cm}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0.56} \cdot 1 \cdot 10^{-3}, 0.17 \cdot \left(\frac{\frac{2}{3} f_{cm}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0.30} \cdot \epsilon_{fu} \right] & \text{if } E = \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Zunchado completo} \\ \text{Disposición en U} \end{matrix} \quad \text{Ecuación 4}$$

Cuantía de fibra con adhesión continua

$$\rho_f := \frac{2 \cdot t_f \cdot \sin(\alpha)}{b_w}$$

Ecuación 5

Cuantía de fibra con adhesión en bandas discontinuas, de ancho b_w (mm) y separación entre ejes s_f (mm).

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot \sin(\alpha)}{b_w} \cdot \frac{b_f}{s_f} \quad \text{Ecuación 6}$$

Máxima separación entre bandas s_f (mm).

$$s_f < 0.9 \cdot d - \frac{b_f}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

4.3.2. Modelo ACI 440.2R-02.

Contribución a cortante, por hormigón, acero y fibra o agotamiento de hormigón.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad \text{Ecuación 8} \quad \psi_f = \begin{cases} 0.85 & \text{if agotamiento adherente} \\ 0.95 & \text{if agotamiento en fibra} \end{cases}$$

Contribución a cortante de la adhesión de MC: con módulo elástico E_f (MPa), rotura última unitaria ϵ_{fu} (‰) y espesor t_f (mm), orientación de las fibras respecto la directriz del elemento α y n número de capas dispuestas. El elemento tiene geometría: ancho de la sección b_w (mm), y canto d (mm), ángulo de inclinación del MC α y calidad de hormigón f_c (MPa).

$$V_f := \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin(\alpha) + \cos(\alpha)) \cdot d_f}{s_f} \quad \text{Ecuación 9}$$

Área de fibra aportada

$$A_{fv} := 2n \cdot t_f \cdot w_f$$

Ecuación 10

Tensión de diseño para la fibra

$$f_{fe} := \epsilon_{fe} \cdot E_f$$

Ecuación 11

Elongación máxima permitida en la fibra, no superior a 0.004.

Zunchado completo

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \cdot \epsilon_{fu}$$

Ecuación 12

Adhesión lateral

$$\epsilon_{fe} := \min(k_v \cdot \epsilon_{fu}, 0.004)$$

Ecuación 13

$$k_v := \min\left(\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \epsilon_{fu}}, 0.75\right)$$

Ecuación 15

$$k_1 := \left(\frac{f_c}{27}\right)^2$$

Ecuación 14

$$L_e := \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0.58}}$$

Ecuación 17

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & \text{if } E = 1 \\ \frac{d_f - 2 \cdot L_e}{d_f} & \text{if } E = 2 \end{cases}$$

Disposición en U

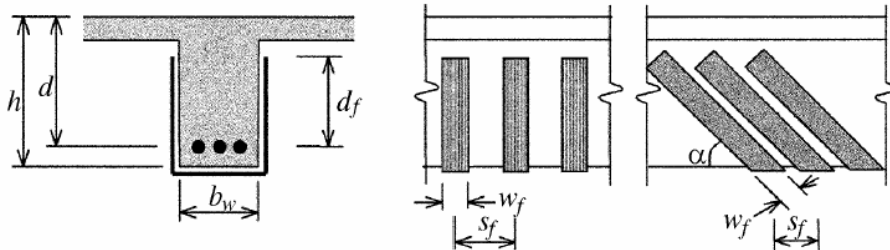
Ecuación 16

Adhesión lateral

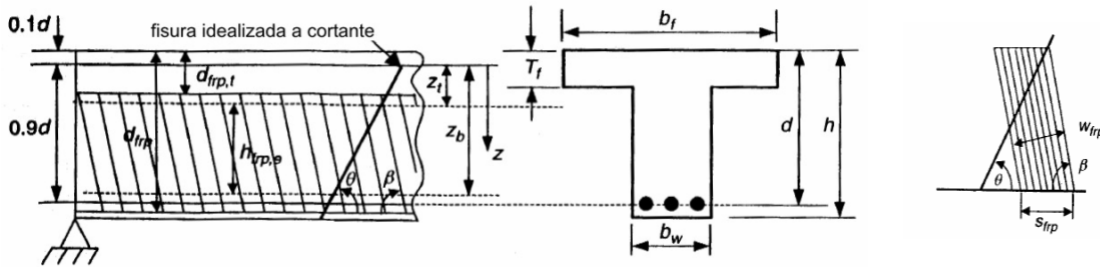
Ecuación 18

Máxima separación s_f (mm) entre bandas de ancho w_f (mm).

$$s_f \leq \frac{d}{4} + w_f$$



4.3.3. Modelo Cheng et al.



Contribución a cortante de la adhesión de MC: con módulo elástico E_{frp} (MPa), tensión ultima f_{frp} (MPa) y espesor t_{frp} (mm), y orientación de las fibras respecto la directriz del elemento β .
El elemento tiene geometría: ancho de la sección b_w (mm), y canto d (mm), ángulo de inclinación de bielas comprimidas $\alpha=45^\circ$ y calidad de hormigón f_{cu} (MPa).

$$V_{frp} := 2 \cdot f_{frpe} \cdot t_{frp} \cdot w_{frp} \cdot \frac{h_{frpe} \cdot (\sin(\beta) + \cos(\beta))}{s_{frp}}$$

$$h_{frpe} := z_b - z_t$$

Ecuación 19

Zunchado completo

$$f_{frpe} := D_{frp} \cdot \sigma_{frpmax}$$

$$\theta := \frac{\pi}{4}$$

$$\beta := \frac{\pi}{2}$$

Ecuación 20

$$z_b := d_{frp} - h + 0.9 \cdot d$$

$$z_t := d_{frpt}$$

Adhesión lateral

$$D_{frp} := \frac{1 + \xi}{2}$$

$$\xi := \frac{z_t}{z_b}$$

Ecuación 21

$$\sigma_{frpmax} := \begin{cases} \left(0.8 \cdot \frac{f_{frp}}{\gamma_{frp}} \right) & \text{if } \frac{f_{frp}}{E_{frp}} \leq \epsilon_{max} \\ \left(0.8 \cdot \epsilon_{max} \cdot \frac{E_{frp}}{\gamma_{frp}} \right) & \text{if } \frac{f_{frp}}{E_{frp}} > \epsilon_{max} \end{cases}$$

$$\epsilon_{max} := \frac{1.5}{100}$$

Ecuación 22

$$f_{frpe} := D_{frp} \cdot \sigma_{frpmax}$$

Ecuación 23

$$D_{frp} := \begin{cases} \left(\frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \lambda}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \lambda} \right) & \text{if } \lambda \leq 1 \\ \left(1 - \frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda} \right) & \text{if } \lambda > 1 \end{cases}$$

$$\lambda := \frac{L_{max}}{L_e}$$

$$L_e := \sqrt{\frac{E_{frp} \cdot t_{frp}}{\sqrt{0.8 \cdot f_{cu}}}}$$

Ecuación 24

$$L_{\max} := \begin{cases} \frac{h_{\text{frpe}}}{\sin(\beta)} & \text{if } E = 1 & \text{Adhesión en U} \\ \frac{h_{\text{frpe}}}{2 \cdot \sin(\beta)} & \text{if } E = 2 & \text{Adhesión lateral} \end{cases}$$

Ecuación 25

$$\beta_L := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda \geq 1 \\ \sin\left(\frac{\pi \cdot \lambda}{2}\right) & \text{if } \lambda < 1 \end{cases}$$

Máxima separación s_f (mm) entre bandas de ancho w_f (mm).

$$s_{\text{frp}} \leq s_{\text{frpmax}} = \frac{h_{\text{frpe}} \cdot (\sin(\beta) + \cos(\beta))}{2}$$

4.3.3.1. Elongación de diseño en MBrace según la calidad de hormigón.

Empleando la formulación propuesta en el apartado, se fijan las variables, para los formatos comerciales disponibles y se obtiene la elongación de diseño de la fibra.

El análisis permite a nivel cualitativo estimar la eficiencia del refuerzo.

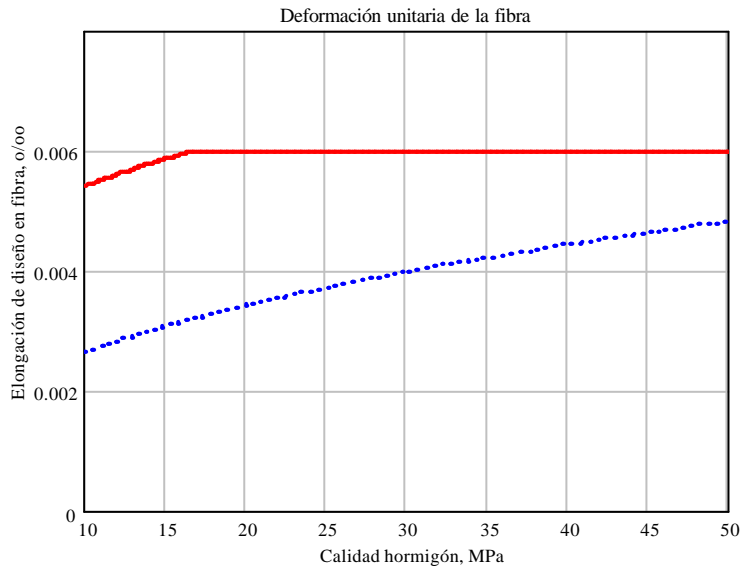


Ilustración 8.- Elongación de diseño en MBrace, en función de la calidad del hormigón soporte y la disposición: zunchado completo y disposición en U.

4.3.3.2. Elongación de diseño en MBrace según módulo elástico E_{frp}

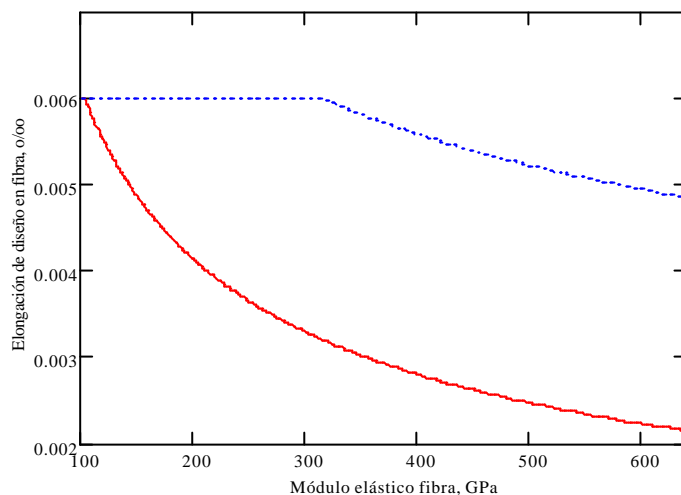


Ilustración 9.- Elongación de diseño en MBrace a cortante, según el módulo elástico y la disposición: **disposición en U** y **zunchado completo**.

4.3.3.3. Elongación de diseño en según capas de MBrace.

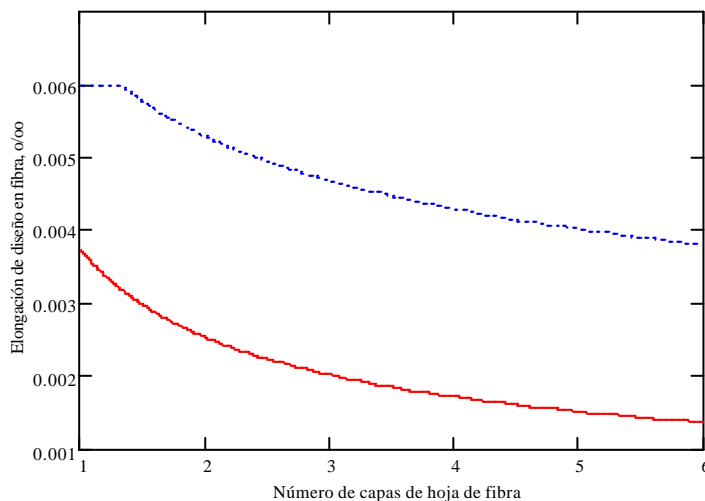


Ilustración 10.- Elongación de diseño en M a cortante, según el número de capas laminadas in situ: **disposición en U** y **zunchado completo**.