

# **ANEJO 9**



## ANEJO 9

### DISEÑO DEL REFUERZO DE LAS BANDAS DE ARAPREE Y EL TEJIDO DE FIBRAS DE CARBONO

#### 9.1- INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los criterios de cálculo utilizados para el dimensionamiento del refuerzo de fibras sintéticas para los diferentes ensayos sobre los modelos de puente.

##### 11.1.1 DISEÑO DE BANDAS DE ARAPREE:

Para la sustitución de las barras de acero pasivo por bandas de aramidas, las dimensiones de las bandas son de: Largo:3000 mm., Ancho: 20 mm., espesor: 4mm. El monto total de las bandas pegadas corresponde a su equivalente mecánico de las barras de acero de refuerzo dañadas.

Cálculo para momentos flectores:

El total de la fuerza a tracción en el hormigón de  $T=270\text{kN}$ , se obtiene de una distribución lineal de tensiones a lo largo de la sección y una tensión de rotura del hormigón a tracción de 3.5 Mpa.

*Zona de Centro Luz:*

$$\text{Tensión admisible en la fibra aramida: } \tau_{\text{aramida}} = \frac{\tau_{\text{exp}}}{\gamma_a} = \frac{3.8\text{MPa}}{2} = 1.9\text{MPa}$$

$$\text{Área de contacto Hormigón – aramida: } A_c = \frac{270000\text{N}}{1.9\text{MPa}} = 0.142104\text{m}^2$$

$$\text{Longitud de contacto: } L_c = \frac{1421\text{cm}^2}{2\text{cm}} = 710.5\text{cm}$$

Resultando finalmente: **5 bandas de 3.0 m.**

*Zona de Apoyo intermedio:*

Con el mismo procedimiento se calcularon las bandas de refuerzo para momentos negativos, obteniéndose como resultado: **7 bandas de 3.0 m.**

*Refuerzo a cortante:*

$$\text{Sustitución de cercos dañados: } S_h = A_s \times f_{y\text{cortante}} \times n = 0.5 \times 10^{-4} \text{m}^2 \times 420\text{MPa} = 21000\text{N}$$

$$\text{Entonces: } A_{\text{aramida}} = \frac{21\text{kN}}{1.9\text{MPa}} = 0.0110\text{m}^2$$

$$\text{Finalmente se obtiene: } L_{\text{aramida}} = \frac{110\text{cm}^2}{2\text{cm}} = 55\text{cm}$$

## 11.1.2 DISEÑO DE BANDAS DE TEJIDOS DE FIBRA DE CARBONO:

### 11.1.2.1 Criterio 1:

Documentación utilizada:

B.A.E.L. 91  
Cahier des clauses Techniques “Renforcement du beton par collage de tissu de fibres de carbone.

Hipótesis sobre materiales:

Hormigón B25 = H250

Acero pasivo: Inexistente.

Cálculo en Estado Límite Último:

Coefficiente de seguridad:

$$1.35 \times G + 1.5 \times Q$$

Por ser cálculo para el ensayo en rotura se asumen como valores de los coeficientes de seguridad  $\gamma = 1$ .

Constantes de cálculo: Hormigón  $f_{ck} = \frac{0.85 \times f_c}{\theta \times \gamma_c}$

$$\theta = 1, \gamma_c = 1$$

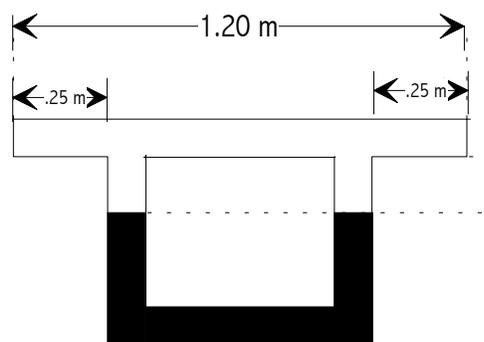
Diseño de refuerzo de bandas de fibra de carbono

$$f_{ck} = \frac{0.85 \times 2.5}{1 \times 1} = 21.25 MPa$$

$$E_{TFC} = 105000 MPa$$

$$\sigma_{uf} = \frac{\tau_u}{\gamma_f} = 1400 MPa$$

Dimensionamiento en zona de apoyo Intermedio:



$$M_u = 1.0 \times 22.95 \cdot 10^{-2} = 0.2295 MN.m$$

De donde en cada sección:  $M_u = 0.11475MN.m$

$$M_{Tu} = bh_o f_{ck} \times \left( d - \frac{h_o}{2} \right) = 0.35 \times 0.1 \times 21.25 \times \left( 0.9 \times 0.60 - \frac{0.1}{2} \right) = 0.364MN.m$$

$$M_u = M_{Tu}$$

$$d = 0.9 \times 0.6 = 0.54m.$$

$$\mu = \frac{M_u}{db^2 f_{bu}} = \frac{0.11475}{0.35 \times 0.54^2 \times 21.25} = 6.17 \times 10^{-2}$$

$$\zeta = 0.5 \times d \left( 1 + \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 0.5 \times 0.54 \times \left( 1 + \sqrt{1 - (2 \times 6.17 \times 10^{-2})} \right) = 0.5227m.$$

Entonces, la fuerza última queda definida por:

$$F_u = \frac{M_u}{\zeta} = \frac{0.11475}{0.523} = 0.219MN$$

A partir de estos datos se puede determinar el área de Tejido de Fibra de Carbono necesaria:

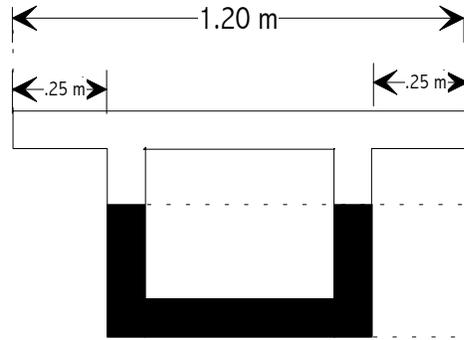
$$A_f = \gamma_f \times \frac{F_u}{\sigma_{uf}} = \frac{0.219}{1400} = 1.57cm^2$$

Siendo el espesor del TFC:  $e = 0.043cm$ .

Se obtiene el ancho mínimo necesario de la banda a utilizar:  $b = \frac{1.57cm^2}{0.043cm} = 36.46cm$ .

Por lo que son necesarias 2 bandas de 20 cm. Para cada lado de la sección equivalente, por lo que finalmente se utilizarán: **1 x 4 bandas de TFC de 20 cm.**

Dimensionamiento para la zona de Centro Luz:



Vano 1:

$$M_u = \frac{1}{2} 1.0 \times 20.9 \cdot 10^{-2} = 0.1045 MN.m$$

Vano 2:

$$M_u = \frac{1}{2} 1.0 \times 13.95 \cdot 10^{-2} = 0.06975 MN.m$$

$$M_{Tu} = bh_o f_{ck} \times \left( d - \frac{h_o}{2} \right) = 0.60 \times 0.1 \times 21.25 \times \left( 0.9 \times 0.60 - \frac{0.1}{2} \right) = 0.62475 MN.m$$

$$M_{u1} \dots M_{u2} \leq M_{Tu}$$

$$d = 0.9 \times 0.6 = 0.54 m.$$

**Vano 1:**

$$\mu_1 = \frac{M_u}{db^2 f_{bu}} = \frac{0.1045}{0.60 \times 0.54^2 \times 21.25} = 2.8 \times 10^{-2}$$

$$\zeta_1 = 0.5 \times d \left( 1 + \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 0.5 \times 0.54 \times \left( 1 + \sqrt{1 - (2 \times 2.8 \times 10^{-2})} \right) = 0.5323 m.$$

Entonces, la fuerza última queda definida por:

$$F_{u1} = \frac{M_u}{\zeta_1} = \frac{0.1045}{0.5323} = 0.1963 MN$$

A partir de estos datos se puede determinar el área de Tejido de Fibra de Carbono necesaria:

$$A_{f1} = \gamma_f \times \frac{F_u}{\sigma_{uf}} = \frac{0.1963}{1400} = 1.40 cm^2$$

Siendo el espesor del TFC:  $e = 0.043\text{cm}$ .

Se obtiene el ancho mínimo necesario de la banda a utilizar:  $b_1 = \frac{1.40\text{cm}^2}{0.043\text{cm}} = 32.61\text{cm}$ .

Por lo que son necesarias 2 bandas de 20 cm. Para cada lado de la sección equivalente, por lo que finalmente se utilizarán: **1 x 4 bandas de TFC de 20 cm.**

**Vano 2:**

$$\mu_2 = \frac{M_u}{db^2 f_{bu}} = \frac{0.06975}{0.60 \times 0.54^2 \times 21.25} = 1.876 \times 10^{-2}$$

$$\zeta_2 = 0.5 \times d \left( 1 + \sqrt{1 - 2\mu} \right) = 0.5 \times 0.54 \times \left( 1 + \sqrt{1 - (2 \times 1.876 \times 10^{-2})} \right) = 0.5348\text{m}$$

Entonces, la fuerza última queda definida por:

$$F_{u2} = \frac{M_u}{\zeta_2} = \frac{0.06975}{0.5348} = 0.1304\text{MN}$$

A partir de estos datos se puede determinar el área de Tejido de Fibra de Carbono necesaria:

$$A_{f2} = \gamma_f \times \frac{F_u}{\sigma_{uf}} = \frac{0.1304}{1400} = 0.93\text{cm}^2$$

Siendo el espesor del TFC:  $e = 0.043\text{cm}$ .

Se obtiene el ancho mínimo necesario de la banda a utilizar:  $b_2 = \frac{0.93\text{cm}^2}{0.043\text{cm}} = 21.66\text{cm}$ .

Por lo que son necesarias 1 banda de 20 cm. + 1 banda de 15 cm. Para cada lado de la sección equivalente, por lo que finalmente se utilizarán: **1 x 2 bandas de TFC de 20 cm.**  
**1 x 2 bandas de TFC de 15 cm.**

Verificación en zona Centro Luz:

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_f d} \cdot \frac{F_f}{F_f + F_s} < \tau_u \quad \text{donde } b_f \text{ es el ancho de banda adoptado,}$$

$F_f$  y  $F_s$  son las solicitaciones respectivas del TFC y el acero pasivo.

$$\text{Con } V_u = V_{u\text{max}} = \gamma \times 12.2 \times 10^{-2} = 0.122\text{MN}$$

$$b_f = 4 \times 0.2 = 0.8 \text{ m.}, F_s = 0, \tau = 1.4 \text{ MPa}$$

$$\tau_u = \frac{0.122}{0.8 \times 0.9 \times 0.6} = 0.2824 \text{ MPa} < \tau_u$$

Longitud de anclaje del Tejido de fibra de carbono,  
Longitud mínima de solape es de 10 cm.

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_f \ell} < \tau_u = 1.5 \text{ MPa}$$

Teniendo una configuración de ancho de bandas de  $b_f = 0.80 \text{ m}$  la longitud de las bandas de TFC está determinada por la fuerza límite  $F_u$ .

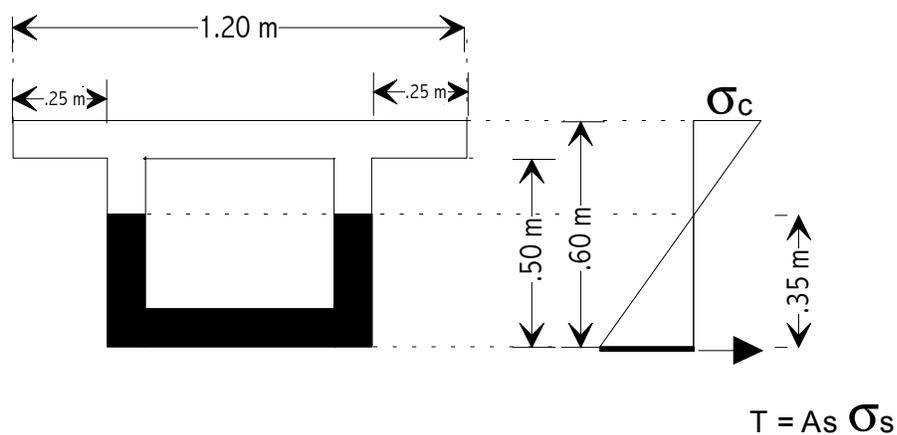
$$\Rightarrow \frac{F_u}{0.8 \times 0.1} \leq 1.5, \quad F_u \leq 0.12 \text{ MN}$$

$$M_u \leq 0.12 \times 0.8 \times 0.6 = 0.0576 \text{ MN.m}$$

$$M \leq \frac{0.0576}{1.00} = 5.8 \text{ t.m}$$

#### 11.1.2.1 Criterio 2:

##### En centro de luz vano



$$R = 2 \times \frac{1}{2} \times 0.35 \times 0.1 \times 350 \frac{T}{m^2} + \left( \frac{350 + 250}{2} \right) \times 0.1 \times 0.5 = 27.25 \text{ ton.}$$

Tensión admisible a tracción:

$$\tau_{fib} = \frac{\tau_{exp}}{\gamma_{fib}} = \frac{38 \frac{kp}{cm^2}}{2} = 19 \frac{kp}{cm^2}$$

Area de contacto:

$$A_{fib} = \frac{T_{sec}}{\tau_{fib}} = \frac{27250_{kp}}{19 \frac{kp}{cm^2}} = 1434.21 cm^2$$

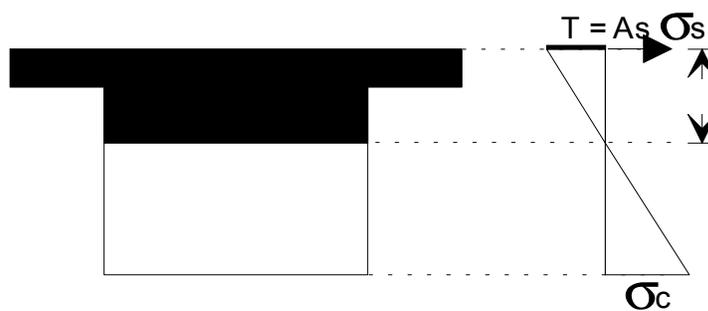
Longitud de contacto:

$$\ell_c = \frac{1434.21 cm^2}{20 cm} = 71.71 cm \approx 75 cm + 25 cm_{anclaje} = 100 cm \text{ a cada lado de la fisura.}$$

por lo que se hace necesario utilizar:

1 banda de 2.00 x 0.20 ó 2 bandas de 1.00 x 0.20

### En apoyo intermedio



Sección Apoyo

Escala: 1:20

$$\left(\frac{210+350}{2}\right) \times 0.1 \times 1.2 + 2 \times \frac{1}{2} \times 0.7 \times 0.15 \times 210 = 44.625 \text{Ton}$$

Tensión admisible a tracción:

$$\tau_{fib} = \frac{\tau_{exp}}{\gamma_{fib}} = \frac{38 \text{ kp/cm}^2}{2} = 19 \text{ kp/cm}^2$$

Area de contacto:

$$A_{fib} = \frac{T_{apoyo}}{\tau_{fib}} = \frac{44625 \text{ kp}}{19 \text{ kp/cm}^2} = 2348.68 \text{ cm}^2$$

Longitud de contacto:

$$\ell_c = \frac{2348.68 \text{ cm}^2}{20 \text{ cm}} = 117.43 \text{ cm} \approx 115 \text{ cm} + 25 \text{ cm}_{\text{anclaje}} \approx 140 \text{ cm} \text{ a cada lado de la fisura}$$

por lo que se hace necesario utilizar:

1 banda de 2.80 x 0.20 ó 2 bandas de 1.40 x 0.20

Asumiendo una distribución lineal a lo largo de la sección y un hormigón con resistencia a tracción de 35 kp/cm<sup>2</sup>.

Para **centro de luz vano 1**, con 12 Ø 8 mm ( $A_s = 6.03 \text{ cm}^2$ ) con una fuerza de tracción en acero de:

$$T = \sigma_s \times A_s = f_{yk} \times A_s = 5100 \text{ kp/cm}^2 \times 6.03 \text{ cm}^2 = 30753 \text{ kp}$$

Tensión admisible a tracción: 
$$\tau_{fib} = \frac{\tau_{exp}}{\gamma_{fib}} = \frac{38 \text{ kp/cm}^2}{2} = 19 \text{ kp/cm}^2$$

Area de contacto: 
$$A_{fib} = \frac{f_{yk} \times A_s}{\tau_{fib}} = \frac{30753 \text{ kp}}{19 \text{ kp/cm}^2} = 1618.58 \text{ cm}^2$$

Longitud de contacto:

$$\ell_c = \frac{1618.58 \text{ cm}^2}{20 \text{ cm}} = 80.93 \text{ cm} \approx 80 \text{ cm} + 25 \text{ cm}_{\text{anclaje}} = 105 \text{ cm} \text{ a cada lado de la fisura.}$$

por lo que se hace necesario utilizar: 1 banda de 2.10 x 0.20 ó 2 bandas de 1.05 x 0.20

Para **apoyo intermedio**, con 8 Ø 10 mm ( $A_s = 6.28 \text{ cm}^2$ ) con una fuerza de tracción en acero de

$$T = \sigma_s \times A_s = f_{yk} \times A_s = 5100 \text{ kp/cm}^2 \times 6.28 \text{ cm}^2 = 32028 \text{ kp}$$

Tensión admisible a tracción: 
$$\tau_{fib} = \frac{\tau_{exp}}{\gamma_{fib}} = \frac{38 \text{ kp/cm}^2}{2} = 19 \text{ kp/cm}^2$$

Area de contacto: 
$$A_{fib} = \frac{f_{yk} \times A_s}{\tau_{fib}} = \frac{32028 \text{ kp}}{19 \text{ kp/cm}^2} = 1685.68 \text{ cm}^2$$

Longitud de contacto:

$$\ell_c = \frac{1685.68 \text{ cm}^2}{20 \text{ cm}} = 84.28 \text{ cm} \approx 85 \text{ cm} + 25 \text{ cm}_{\text{anclaje}} = 110 \text{ cm} \text{ a cada lado de la fisura.}$$

por lo que se hace necesario utilizar: 1 banda de 2.20 x 0.20 ó 2 bandas de 1.10 x 0.20

Tomando los resultados del ensayo, se tienen:

Para **centro de luz vano 1**, con una fuerza de tracción en acero de

$$T = \frac{M}{z} = \frac{24.84_{mtm}}{0.55_m} = 45.16tm$$

Tensión admisible a tracción: 
$$\tau_{fib} = \frac{\tau_{exp}}{\gamma_{fib}} = \frac{38_{kp/cm^2}}{2} = 19_{kp/cm^2}$$

Area de contacto: 
$$A_{fib} = \frac{\frac{24.84}{0.55} \times 1000}{\tau_{fib}} = \frac{45160_{kp}}{19_{kp/cm^2}} = 2376.84cm^2$$

Longitud de contacto:

$$\ell_c = \frac{2376.84cm^2}{20cm} = 118.84cm \approx 1.20cm + 25cm_{anclaje} = 145cm \text{ a cada lado de la fisura.}$$

por lo que se hace necesario utilizar: 1 banda de 2.90 x 0.20 ó 2 bandas de 1.45 x 0.20

Para **apoyo intermedio**, con una fuerza de tracción en acero de

$$T = \frac{M}{z} = \frac{22.33_{mtm}}{0.55_m} = 40.6tm$$

Tensión admisible a tracción: 
$$\tau_{fib} = \frac{\tau_{exp}}{\gamma_{fib}} = \frac{38_{kp/cm^2}}{2} = 19_{kp/cm^2}$$

Area de contacto: 
$$A_{fib} = \frac{\frac{40.60}{0.55} \times 1000}{\tau_{fib}} = \frac{40600_{kp}}{19_{kp/cm^2}} = 2136.84cm^2$$

Longitud de contacto:

$$\ell_c = \frac{2136.84cm^2}{20cm} = 106.84cm \approx 110cm + 25cm_{anclaje} = 135cm \text{ a cada lado de la fisura.}$$

por lo que se hace necesario utilizar: 1 banda de 2.70 x 0.20 ó 2 bandas de 1.35 x 0.20

