



6

Capítulo

Discusiones Finales y Método Propuesto de Análisis

6 Discusiones Finales y Método Propuesto de Análisis

6.1 Discusiones finales

En este punto de la tesis se tratará de conjugar toda la experiencia ganada a lo largo del trabajo de investigación, tratando de dar respuesta a los interrogantes surgidos a lo largo del estudio, por lo que es necesario plantear algunas preguntas para poder encaminar las discusiones finales. A continuación se plantean las principales cuestiones mencionadas:

a. *¿Cuál fue el motivo por el cual no se presentó el despegue del FRP en la viga VD-TFC1?*

Uno de los fenómenos interesantes observados durante los ensayos experimentales, fue el ensayo realizado con la viga VD-TFC1, en donde no se presentó el fenómeno de “peeling”, aunque se alcanzó la carga máxima que se había planteado en el ensayo. Sin embargo, al realizar el segundo ensayo con las vigas de dovelas, se presentó el fenómeno de “peeling” en cuanto comenzaron a abrir las juntas centrales. Analizando detalladamente los datos registrados durante ambos ensayos, podemos concluir que la diferencia que marcó el desprendimiento del refuerzo fue la diferencia en apertura de juntas, ya que la deformación registrada en el FRP de la viga VD-TFC1 fue similar a la deformación de inicio de despegue registrada en la viga VD-TFC2, lo cual puede

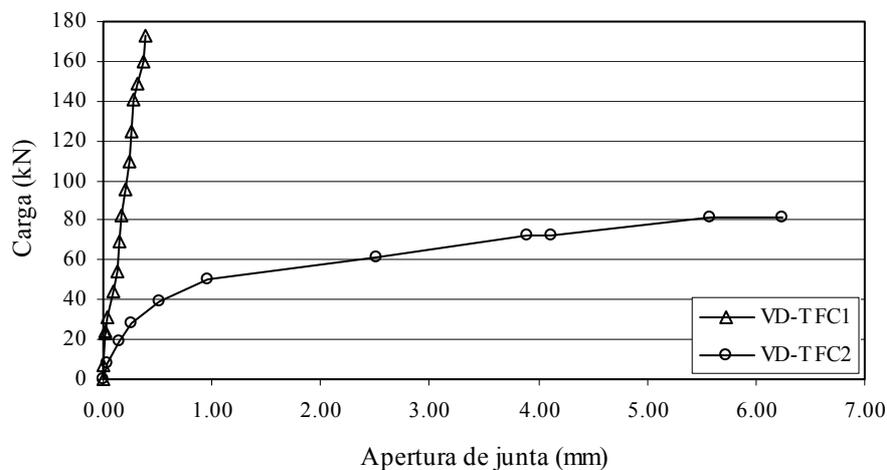


Figura 6.1. Gráfica comparativa Carga-Apertura de junta de las vigas VD-TFC1 v VD-TFC2.

visualizarse en la figura 6.1 donde se muestra la comparación entre apertura de una de las juntas centrales de la viga VD-TFC1 y VD-TFC2.

b. ¿En donde se inicia el desprendimiento del FRP?

El mecanismo de rotura en las vigas VD-TFC2 y VD-CFK1 se inició con una fisura diagonal localizada en la zona próxima a la junta de dovelas, propagándose a través de la interfaz Hormigón / CFRP, originando el despegue hacia ambos lados de la junta como lo demuestran las figuras 6.2 y 6.3, en donde se puede observar la deformación del FRP en la zona central de las vigas para distintos niveles de carga y la concentración de tensiones en el FRP en la zona de juntas.

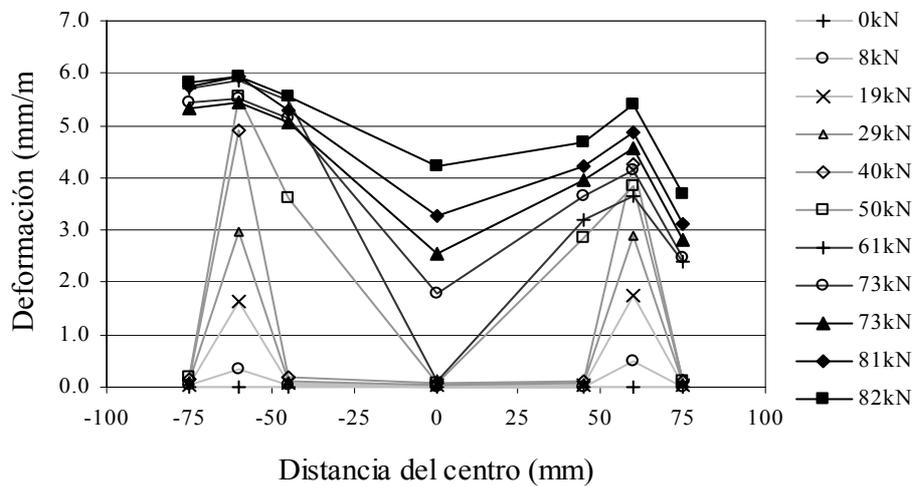


Figura 6.2. Deformación en FRP para distintos niveles de carga, viga VD-TFC2.

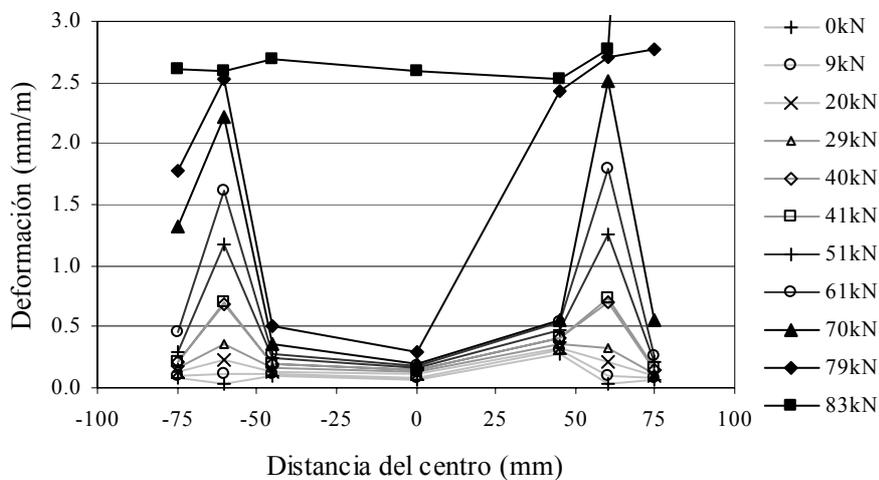


Figura 6.3. Deformación en FRP para distintos niveles de carga, viga VD-CFK1.

c. ¿Cómo se presenta el desprendimiento del FRP en la zona de juntas entre dovelas?

El desprendimiento del CFRP en estructuras formadas por dovelas comienza en la zona de juntas reforzada con el CFRP, ya que al abrir la junta se generan empujes del hormigón hacia el vacío, que origina tracciones diagonales en el hormigón causando la fisuración de éste en uno de los labios de la junta llegando hasta el acero longitudinal que detiene la fisura al soportar las tensiones generadas por el FRP. Inmediatamente después, se presenta la fisuración en el otro labio de la junta, comenzando la propagación de la fisura hacia ambos lados de ésta a través de la interfaz hormigón / FRP, continuando así hasta el desprendimiento del sistema de refuerzo.

En la figura 6.4 se muestran estas fases del desprendimiento del FRP, en la figura 6.4a se muestra el estado inicial de tensiones en la zona próxima a la junta, en donde las tensiones tangenciales τ de la fibra genera tracciones en el hormigón que producen su fisuración hasta el acero longitudinal (figura 6.4b), y poco después se propaga por la interfaz hasta el despegue global del refuerzo (figura 6.4c) manteniéndose prácticamente constante la deformación en el CFRP en la zona despegada y trasladándose el pico de tensiones tangenciales hacia la zona próxima no despegada.

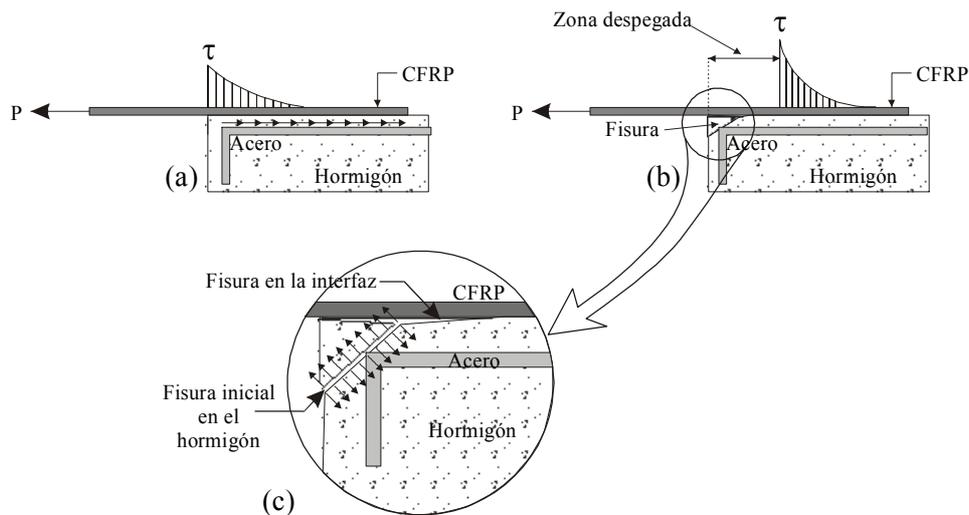


Figura 6.4. Mecanismo de despegue del FRP en la zona de juntas de dovelas.

En el caso del laminado de CFRP utilizado en este estudio (CFK), la fisuración en el hormigón originó un defecto puntual, el cual influyó de manera determinante en el despegue del laminado por la incapacidad de absorber la deformación originada en la superficie de soporte, debido a la rigidez transversal de la sección, lo que produce el despegue del laminado a través de la interfaz Resina / FRP. Este fenómeno no ocurrió en el tejido de CFRP utilizado (TFC), ya que la menor rigidez transversal de la sección permitió la absorción de este defecto puntual.

Al presentarse el fenómeno de “peeling”, la contribución a la resistencia del sistema del FRP se mantiene prácticamente constante hasta presentarse el despegue total del refuerzo actuando como un tirante sin adherencia, ya que después de originarse el despegue no se observaron incrementos significativos de deformación en las galgas extensométricas colocadas sobre las juntas. Por otra parte, la aportación de rigidez a la estructura se ve influenciada por el despegue debido a la desvinculación del FRP con el hormigón al presentarse el “peeling”, presentándose deformaciones en la estructura considerables sin incremento importante de deformación en el FRP.

d. ¿Cómo se puede determinar el momento en que sucederá el despegue del FRP?

La distribución de tensiones tangenciales del FRP en la zona próxima a la junta forma una parábola poco pronunciada, como se comprobó en los ensayos de adherencia realizados, aunque para fines prácticos es posible considerarla lineal, de cualquier forma un análisis lineal de la juntas reforzadas resulta inadecuado, ya que al presentarse la fisuración en el hormigón en la etapas iniciales del despegue, origina que el comportamiento sea mucho más complejo, por lo que la obtención de deformación última de diseño para éste tipo de estructuras a partir de ensayos experimentales se presenta como una alternativa bastante adecuada.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de adherencia, se puede predecir de manera aproximada la deformación de despegue de los FRP en estructuras con dovelas, ya que las deformaciones promedio obtenidas en el FRP en la zona de juntas de las vigas al inicio del despegue y las deformaciones últimas del CFRP registradas en las probetas de adherencia, muestran una similitud congruente. En caso del TFC el inicio

del despegue del FRP en la viga VD-TFC2 se presentó cuando la deformación en el TFC estaba entre 4500 y 5000 $\mu\epsilon$, lo cual corresponde con el promedio obtenido de las probetas de adherencia en la segunda serie correspondiente a 4500 $\mu\epsilon$. En el caso de la viga VD-CFK1 el inicio del despegue del FRP se presentó cuando el CFK presentaba deformaciones entre 2000 y 2500 $\mu\epsilon$, correspondiendo a la deformación registrada en las probetas de adherencia de la segunda serie, la cual fue de 2575 $\mu\epsilon$, además de presentarse un mecanismo de falla bastante similar. Por esto mismo, se propone utilizar la deformación última obtenida en el centro del FRP en las probetas de adherencia ϵ_{uf} como deformación última de diseño, considerándola en el análisis seccional de la estructura.

6.2 Método de Análisis Propuesto

A continuación se presenta una propuesta para realizar el análisis seccional de las estructuras de hormigón reforzadas con CFRP, tomando en cuenta la deformación última ϵ_{uf} obtenida experimentalmente en ensayos de adherencia.

6.2.1 Determinación de la deformación última de adherencia ϵ_{uf}

Para determinar el valor de la deformación última de adherencia de los FRPs se utilizarán probetas de adherencia (15 x 15 x 60cm), fabricadas de acuerdo a los ensayos de adherencia descritos en el punto 3.2.2. En la figura 6.5 se muestra un esquema del ensayo propuesto con sus dimensiones.

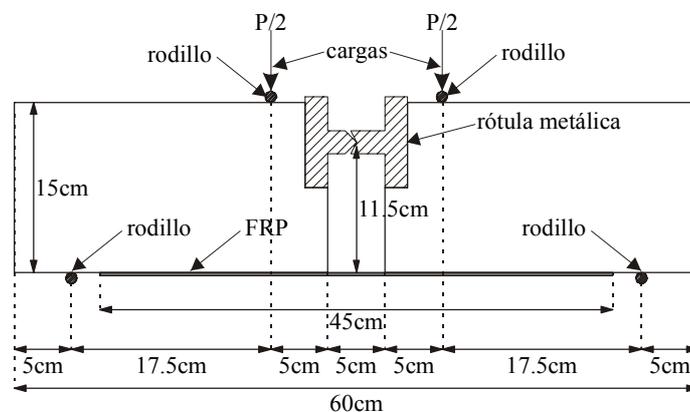


Figura 6.5. Dimensiones de las probetas de adherencia propuestas.

a. *Número de probetas.* Se ensayarán 5 probetas de adherencia por refuerzo de FRP como mínimo.

b. *Detalles del refuerzo de FRP.* La longitud de la probeta de FRP será de 450mm. La sección de los materiales a ensayar tendrá un espesor menor o igual a 1.5mm y un ancho máximo de 100mm con la finalidad de evitar alteraciones en los resultados producidas por la influencia del borde lateral del hormigón y la longitud de anclaje del FRP.

c. *Detalles del hormigón.* El hormigón utilizado para la fabricación de las probetas se diseñará de acuerdo a las características mecánicas de la estructura a reforzar, utilizando un tamaño máximo de árido de 14mm para prevenir la formación de coqueras en la zona circundante al acero de refuerzo.

d. *Detalles del refuerzo.* El refuerzo de acero utilizado en las probetas será igual al descrito en el apartado 3.2.2.2-c.

e. *Dispositivos de ensayo.* El control del ensayo se realizará por desplazamiento de pistón a una velocidad no superior a 0.1mm/seg debido a la naturaleza frágil de estos materiales. La probeta de FRP se instrumentará mediante dos galgas extensométricas colocadas al centro de ésta como lo muestra la figura 6.6.

f. *Mediciones.* Se registrará la deformación última promedio del refuerzo de FRP a partir de los datos obtenidos de las dos galgas extensométricas, debiéndose comprobar que:

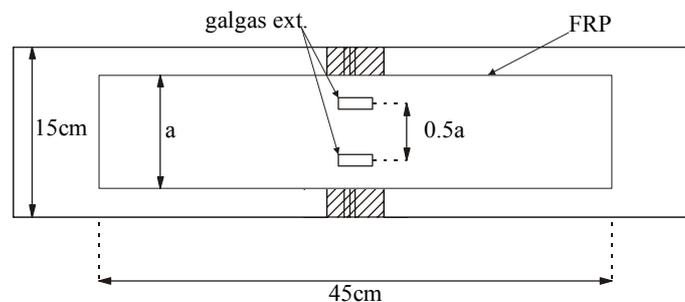


Figura 6.6. Posición de las galgas extensométricas en los ensayos de adherencia.

$$\frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{\varepsilon_1} \cdot 100\% \leq 10\% \quad (6.1)$$

donde ε_1 y ε_2 son las deformaciones últimas obtenidas en las galgas extensométricas.

Del mismo modo, se comprobará que el coeficiente de variación s de las deformaciones de rotura registradas en todas las probetas ensayadas sea menor o igual a 10% en el caso de laminados y de un 15% en mantas y tejidos debido a su forma de aplicación.

La deformación de diseño a utilizar estará dada entonces por:

$$\varepsilon_{uf} = \varepsilon_{umf} - 1.65 \cdot s \quad (6.2)$$

donde

- ε_{uf} : es la deformación última de diseño,
- ε_{umf} : es el promedio de deformaciones últimas obtenidas en las probetas de adherencia,
- s : es la desviación normal o desviación típica de las deformaciones obtenidas en los ensayos de adherencia.

6.2.2 Cálculo de secciones a flexión a partir de ε_{uf}

6.2.2.1 Estado límite de servicio (E.L.S.)

El momento M aplicado a una sección dada se descompone en:

- a. Un momento $M1$ antes del refuerzo y del pegado de FRP.
- b. Un momento $M2$ después del refuerzo.

Tenemos que $M = M1 + M2$

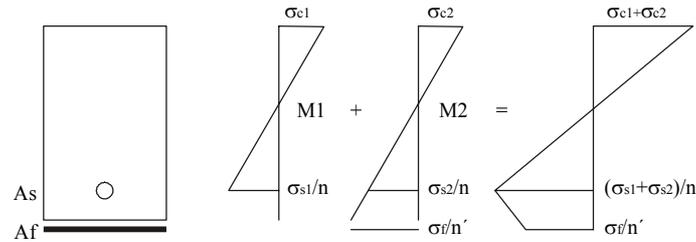


Figura 6.7. Diagrama de esfuerzos en la sección ELS.

El estado de tensión total en los materiales se muestra en la figura 6.7, y es el resultado de la combinación de las tensiones debidas a la sollicitación $M1$ sin el refuerzo de fibra de carbono y de las tensiones debidas a la sollicitación $M2$ con el refuerzo de FRP, en donde n y n' son los coeficientes de equivalencia, suponiendo hipotéticamente que existe adherencia perfecta entre el hormigón y el refuerzo de FRP.

Hay que comprobar que:

$$\sigma_{s1} + \sigma_{s2} \leq \sigma_s' \quad (6.3)$$

$$\sigma_{c1} + \sigma_{c2} \leq \sigma_c' \quad (6.4)$$

$$\sigma_f \leq \sigma_f' \quad (6.5)$$

donde

σ_s' : Tensión admisible en los aceros existentes según la norma EHE en función del estado de fisuración y limitada a $0.8 f_y$,

σ_c' : Tensión admisible en el hormigón igual a $0.6 f_{ck, j}$,

σ_f' : Tensión admisible del FRP, calculada a partir de la deformación obtenida en los ensayos de adherencia ε_{uf} (punto 6.2.1), $\sigma_f' = E_f \varepsilon_{uf}$.

En la figura 6.8 se muestran las tensiones para un caso general, en donde:

M : Momento solicitante

F_c : Resultante de las compresiones en el hormigón

F_f : Tensión en el FRP multiplicada por el área de la sección

F_s : Tensión en el acero traccionado multiplicada por el área de la sección

F_s' : Tensión en el acero comprimido multiplicada por el área de la sección

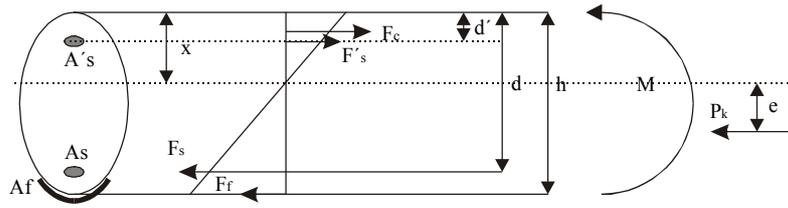


Figura 6.8. Diagrama de esfuerzos para el caso general ELS.

A_s : Sección del acero en la zona traccionada

A'_s : Sección del acero en la zona comprimida

A_f : Sección del FRP

x : Profundidad de la fibra neutra

Suponiendo que existe compatibilidad de deformaciones al considerar que la sección permanece plana después de la deformación, tenemos que la sección está en equilibrio cuando:

$$F_c = P_k - F'_s + F_s + F_f \quad (6.6)$$

con:

$$F_c = \int_0^x y \frac{\sigma_c}{x} \cdot b(y) \cdot dy \quad (6.7)$$

$$F_s = A_s \sigma_s \quad (6.8)$$

$$F_f = A_f \sigma_f \quad (6.9)$$

$$F'_s = A'_s \sigma'_s \quad (6.10)$$

$$\sigma_c = \frac{M \cdot x}{I} - \frac{P_k \cdot e}{I} + \frac{P_k}{A} \quad (6.11)$$

$$\sigma_s = n \cdot \left[(M - P_k \cdot e) \cdot \left(\frac{d - x}{I} \right) - \frac{P_k}{A} \right] \quad (6.12)$$

$$\sigma'_s = n \cdot \left[(M - P_k \cdot e) \cdot \left(\frac{x - d'}{I} \right) + \frac{P_k}{A} \right] \quad (6.13)$$

$$\sigma_f = n' \cdot \left[(M - P_k \cdot e) \cdot \left(\frac{h - x}{I} \right) - \frac{P_k}{A} \right] \quad (6.14)$$

donde:

σ'_s : tensión en el acero comprimido

σ_c : tensión en la fibra superior del hormigón

σ_s : tensión en el acero traccionado

σ_f : tensión de tracción en el FRP

n : coeficiente de equivalencia entre acero y hormigón

n' : coeficiente de equivalencia entre el FRP y el hormigón

y : distancia a la fibra neutra

I : Inercia total = I_c (hormigón) + I_s (acero) + I_f (FRP)

A : área de la sección homogeneizada

P_k : fuerza de pretensado

e : excentricidad del pretensado.

6.2.2.2 Estado límite último (E.L.U.)

La verificación se apoya en las hipótesis fundamentales del cálculo del hormigón armado, es decir:

- a. El hormigón a tracción no se tiene en cuenta en el equilibrio de las secciones.
- b. Las secciones planas permanecen planas después de la deformación.
- c. No hay deslizamiento del acero y del FRP respecto al hormigón (adherencia perfecta).

Las verificaciones y los cálculos deben respetar las reglas de los pivotes de la EHE.

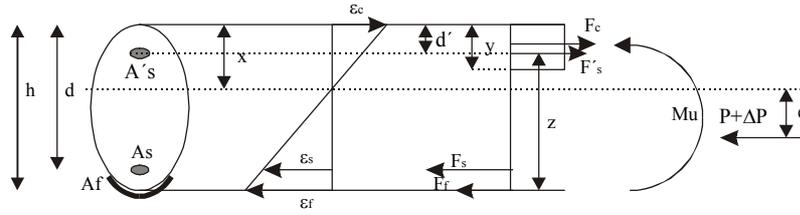


Figura 6.9. Diagrama de esfuerzos para el caso general ELU.

La deformación última del FRP será igual a la deformación última ϵ_{uf} , obtenida a partir de las probetas de adherencia (punto 6.2.1).

Las ecuaciones de equilibrio de acuerdo con la figura 6.9 son:

$$F_c = P_k + \Delta P - F'_s + F_s + F_f \quad (6.15)$$

$$M_u + (P_k + \Delta P) \cdot (h - e - x) = F_c \cdot z + F'_s \cdot (h - d') - F_s \cdot (h - d) \quad (6.16)$$

conociendo que:

$$F_c = f_{cd} \cdot b(y) \cdot y \quad (6.17)$$

$$z = h - \frac{y}{2} \quad (6.18)$$

donde

M_u : momento último,

ΔP : incremento de pretensado en rotura,

z : brazo mecánico de la sección,

y : profundidad del diagrama rectangular de tensiones.

El dimensionamiento frente al E.L.U., en caso de flexión simple, se obtiene dividiendo el momento flector de cálculo por el brazo z de la sección. La fuerza obtenida debe ser equilibrada con las armaduras existentes y el FRP:

$$F_c = \frac{M_u + (P_k + \Delta P) \cdot (h - e - x) + F_s \cdot (h - d) - F'_s \cdot (h - d')}{z} \quad (6.19)$$

Sustituyendo las ecuaciones 6.17 y 6.18 en 6.19 y resolviendo la ecuación cuadrática resultante es posible obtener el valor de y , con la que se obtendrá el valor de F_c a partir de la ecuación 6.17. Sustituyendo F_c en 6.15 y despejando, se obtiene el valor de F_f .

La sección necesaria para asegurar el equilibrio será:

$$A_f = \frac{F_f}{\sigma_{uf}} \quad (6.20)$$

donde:

σ_{uf} : Es la tensión última de despegue, calculada a partir de la deformación obtenida en los ensayos de adherencia (punto 6.2.1), $\sigma_{uf} = E_f \varepsilon_{uf}$,