

3. MODELOS DE CONFINAMIENTO

3.1. MODELOS DE CONFINAMIENTO PARA SECCIONES CIRCULARES.

Los modelos de confinamiento encontrados para sección circular en la bibliografía son bastantes, para el presente estudio se tomaron seis (Mander J. B. et al. 1988, Pilakoutas K. y Mortazavi A. 1997, Toutanji H. A. 1999, Spolestra M. R. y Monti G. 1999, Teng J. G. et al. 2009, Wu y Zhou 2010), considerando desde modelos antiguos hasta los últimos publicados. Una lista de más modelos de otros autores que se estudiaron pero que no están dentro nuestro análisis, se hace referencia en la parte de anexos punto C.

3.1.1. MODELO DE MANDER J. B. et al. (1988)

Mander y algunos investigadores más desarrollaron un modelo tensión-deformación para hormigón sujeto a compresión uniaxial y confinado con refuerzo transversal. La sección de hormigón debía contener cualquier tipo de acero que la confinase. Los ensayos mostraron que el confinamiento del hormigón con refuerzo transversal mediante una disposición adecuada resulta en un aumento significativo de resistencia y ductilidad del hormigón confinado.

Como se observará a continuación la ecuación y todo su desarrollo está hecha a partir del refuerzo mediante acero y no de FRP. Cada uno de los materiales se comporta de manera distinta al confinar al hormigón, por ello al final del desarrollo matemático se explicará su aplicación a los modelos con FRP y sus ventajas e inconvenientes.

Mander et al. (1984) propusieron un modelo unificado aproximado para hormigón confinado aplicable tanto a formas circulares como rectangulares con refuerzo transversal. El modelo tensión-deformación, ilustrado en la Fig.3.1 a continuación, está basado en una ecuación propuesta por Popovics (1973). La tensión de compresión longitudinal en el hormigón f_c viene dada por:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r}$$

Donde f'_{cc} = resistencia a compresión de hormigón confinado (definida a posteriori).

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$$

Donde ε_c = deformación longitudinal del hormigón a compresión.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$$

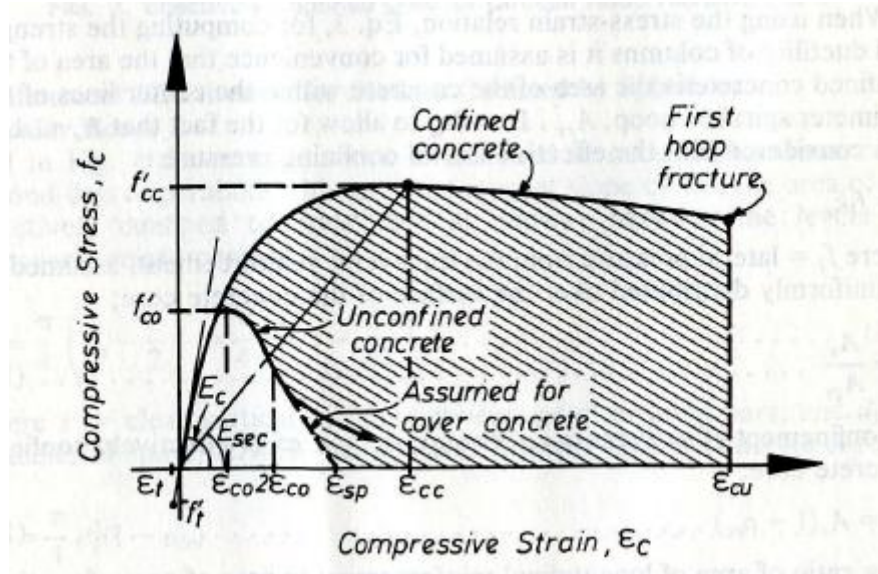


Fig. 3.1. Modelo tensión-deformación propuesto para hormigón confinado y no confinado

Como sugiere Richart et al. (1928), donde f'_{co} y ε_{co} = la resistencia no confinada de hormigón y su deformación correspondiente, respectivamente (generalmente $\varepsilon_{co} = 0.002$ puede asumirse), y

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

Donde:

$E_c = 5000\sqrt{f'_{co}}$ MPa es el módulo de elasticidad tangente del hormigón, y

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$$

Para determinar la resistencia a compresión del hormigón confinado f'_{cc} , se utiliza un modelo constitutivo que incluye una envolvente de resistencia última para tensiones a compresión multiaxiales. Se adopta la envolvente de fallo multiaxial de cinco parámetros descrita por William y Warnke (1975), debido a que proporciona una excelente concordancia con los datos de las muestras.

La solución general del criterio de rotura multiaxial cuando al hormigón se le aplican tensiones de confinamiento laterales iguales f'_l , se demuestra que la resistencia a compresión del hormigón confinado viene dado por la siguiente ecuación:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$$

Donde $f'_l = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh}$, con k_e = factor de forma (1 para forma circular y envoltura continua de refuerzo), ρ_s = relación del volumen del acero confinado con el volumen de hormigón confinado y f_{yh} = límite elástico del refuerzo transversal de acero.

Como se ha explicado antes, dicha ecuación matemática se desarrolló para el acero ya que en su momento apenas se había estudiado el FRP como refuerzo.

La ventaja del modelo es su sencillez tanto para modelos circulares como rectangulares, tanto es así que se puede substituir la expresión de presión de confinamiento f'_l por una que represente FRP en vez de acero y el modelo será aplicable. De hecho desde 2002 hasta 2008, en la normativa americana, *American Concrete Institute. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI.440.2R-02, se utilizaba la expresión de Mander et al., a partir de 2008, la ACI.440.2R-08 la substituyó por una expresión que se detallará en los siguientes temas (Lam and Teng, 2003).

La desventaja radica en lo expuesto anteriormente, las diferencias entre los refuerzos, acero y FRP. En el caso del acero, al llegar a una cierta resistencia a compresión del hormigón confinado f'_{cc} , el acero sigue deformándose con un descenso paulatino de su resistencia hasta una resistencia última f'_{cu} . En cambio en el FRP, la resistencia f'_{cc} sigue aumentando a la vez que lo hace su deformación ϵ_{cc} , hasta que rompe por rotura frágil del FRP.

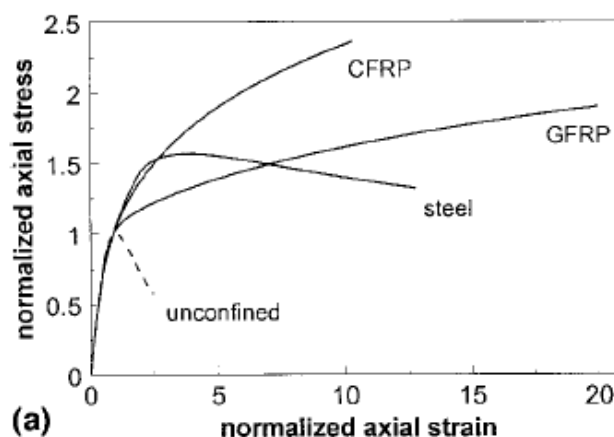


Fig. 3.2. Modelado del comportamiento de hormigón confinado con acero y con FRP (CFRP y GFRP)

3.1.2 MODELO DE PILAKOUTAS Y MORTAZAVI (1997)

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(1.125 + 2.5 \frac{f_{lfrp}}{f'_{co}} \right) \quad 2 \frac{f_{lfrp}}{f'_{co}} \geq 0.1$$

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 5 \frac{f_{lfrp}}{f'_{co}} \right) \quad 2 \frac{f_{lfrp}}{f'_{co}} \leq 0.1$$

3.1.3. MODELO DE TOUTANJI (1999)

El estudio que presentó Toutanji en 1999 también sigue la forma matemática de Richard et al. (1928) como en la mayoría de modelos.

La expresión citada es

$$f_{cc} = f'_c + k_1 f'_l$$

Donde f_{cc} , f'_c , k_1 y f'_l vuelven a ser la resistencia del hormigón confinado, la resistencia del hormigón sin confinar, el coeficiente de efectividad de confinamiento (constante a determinar por análisis de regresión) y la presión de confinamiento lateral, respectivamente. Toutanji determinó k_1 igual a

$$k_1 = 3.5 \left(\frac{f'_l}{f'_c} \right)^{-0.15}$$

Substituyendo queda

$$f_{cc} = f'_c \left[1 + 3.5 \left(\frac{f'_l}{f'_c} \right)^{0.85} \right]$$

3.1.4. MODELO DE SPOLESTRA Y MONTI (1999)

El modelo presentado por Spoelstra y Monti es válido para hormigón confinado con fibras reforzadas con polímeros (FRP), pero también con camisas de acero o refuerzo transversal convencional, como el de Mander et al (1988). El modelo se muestra explícitamente para la interacción continua con el dispositivo de confinamiento debido a la deformación lateral del hormigón, a través de una aproximación iterativa-incremental.

En este modelo la deformación última de la camisa ε_{ju} se refiere a una variable dependiente y evaluada como la relación entre la resistencia última f_{ju} y el módulo elástico E_j ; la cual considera que la camisa funciona hasta que parte desde el comportamiento lineal y también cumple con el comportamiento lineal asumido del material compuesto en el modelo desarrollado. El proceso, descrito aquí mismo, se deriva de la consideración que la

curva de Mander perteneciente al estado último puede conocerse directamente de la presión máxima de confinamiento que puede ser ejercida por la camisa en su último estado.

El procedimiento puede resumirse como sigue (Fig. 1):

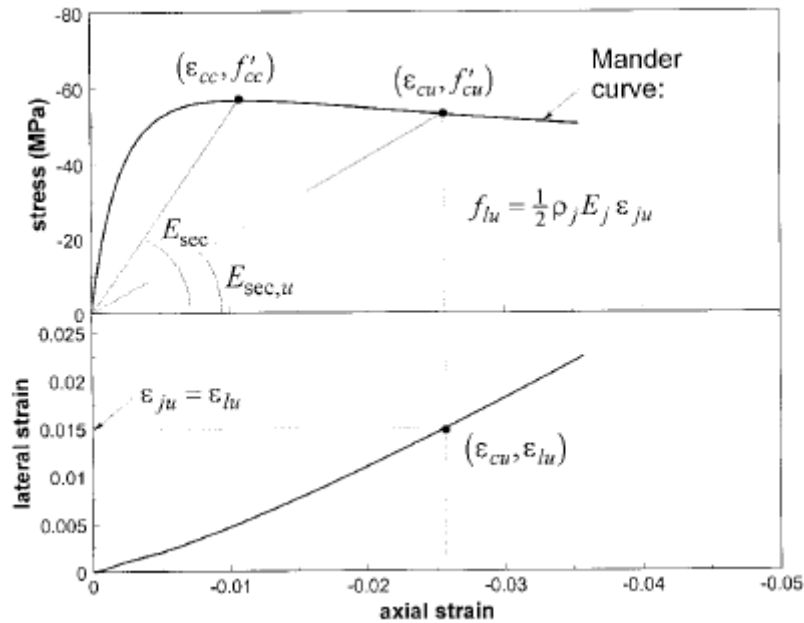


Fig. 3.3. Procedimiento de cálculo para la tensión y deformación última de compresión

- La presión última de confinamiento viene dada por

$$f_{lu} = \frac{2t f_{ju}}{D}$$

- Los parámetros de la curva tensión-deformación de Mander correspondientes a f_{lu} son entonces

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{lu}}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_{lu}}{f'_{co}} \right)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$$

- El módulo último secante de elasticidad $E_{sec,u}$ es también conocido

$$E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2\beta \varepsilon_{ju}}$$

Donde $\beta = \frac{E_c}{|f'_{co}|} - \frac{1}{|\epsilon_{co}|}$ y asumiendo $\epsilon_{co} = -0.002$ y $E_c = 5700\sqrt{|f'_{co}|}$ (MPa), obtenemos que se puede escribir $\beta = \frac{5700}{\sqrt{|f'_{co}|}} - 500$ (f'_{co} en MPa).

- La intersección de la línea recta con la pendiente $E_{sec,u}$ en la Fig. 1 con la curva de Mander en la rama descendente alcanza la tensión y deformación última de compresión

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} \left(\frac{E_{sec}(E_c - E_{sec,u})}{E_{sec,u}(E_c - E_{sec})} \right)^{1-E_{sec}/E_c}$$

Donde $E_{sec} = f'_{cc}/\epsilon_{cc}$

El modelo de Spoelstra y Monti también cuenta con una expresión aproximada de ambas expresiones de tensión y deformación para no incurrir en el proceso iterativo anterior. Por eso, al método “exacto” anterior se le ha formulado un método “aproximado” cuyas ecuaciones son:

$$f'_{cu} = f'_{co} \left(0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_{lu}}{f'_{co}}} \right)$$

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} \left(2 + 1.25 \frac{E_c}{f'_{co}} \epsilon_{ju} \sqrt{\frac{f_{lu}}{f'_{co}}} \right)$$

Tanto la versión “exacta” como la “aproximada” son las utilizadas en la normativa francesa, *fib - federation internationale du beton*.

3.1.5. MODELO DE TENG et al. (2009)

Teng, Lam, Yiang y otros investigadores han propuesto a lo largo de los años diversos modelos para representar la resistencia a compresión de hormigón confinado. Han introducido novedosas incorporaciones y a continuación explicaremos sin entrar en mucho detalle sus primeros modelos, Lam y Teng (2003, 2007) y profundizando algo más en el último modelo publicado hasta la fecha, Teng et al. (2009).

3.1.5.1. Modelos previos. Lam y Teng (2003, 2007)

El modelo de Lam y Teng, 2003, está basado en la forma matemática propuesta por Richart et al. (1928), pero modificando la presión de confinamiento hasta ahora utilizada en todos los otros modelos.

“El fallo más común del hormigón confinado con FRP es la rotura de la camisa de FRP debido a la tensión circunferencial”, hasta ahí todos los autores estaban de acuerdo, pero Lam y Teng observaron que, sin embargo, los resultados de experimentos mostraban que en la mayoría de casos, la resistencia a tracción de FRP no alcanzaba la rotura del material FRP en el hormigón confinado. Entonces, la presión de confinamiento máxima dada por la ecuación, anteriormente vista, $f_l = \frac{2E_{FRP}\epsilon_j t}{D}$ utilizada por el resto de modelos no era correcta. La presión de confinamiento máxima actual debería darse por:

$$f_{l,a} = \frac{2E_{FRP}\epsilon_{h,rupt} t}{D}$$

Donde $f_{l,a}$ es la presión de confinamiento máxima actual y $\epsilon_{h,rupt}$ es la deformación circunferencial en rotura de FRP, a diferencia de $\epsilon_j =$ deformación circunferencial a tracción de FRP. Para una fácil comprensión de ambos tipos de deformaciones y no confundirse con sus subíndices, ϵ_j es la deformación de una muestra ensayada por el fabricante, solo las fibras de FRP a tracción, y $\epsilon_{h,rupt}$ es la deformación hasta rotura de FRP cuando esta se encuentra envuelta en el pilar circular y se obtiene de resultados experimentales, se ha llegado a considerar que $\epsilon_{h,rupt}$ equivale a un 50-60 % del ϵ_j en CFRP (aunque no hay muchas investigaciones que aporten luz sobre este último tema, se pueden dar por aceptables estos órdenes de magnitud).

La diferencia entre la deformación a tracción de FRP o su deformación en rotura ha sido discutida en diferentes artículos. Se sugieren diversas causas para este fenómeno. Las dos principales consideran ser (a) una deformación localizada en el hormigón fracturado debido a una distribución de tensiones no uniformes en la chaqueta de FRP y una rotura prematura de esta, y (b) el efecto de la curvatura de la chaqueta de FRP en la resistencia a tracción del FRP.

Por lo tanto, si $\epsilon_{h,rupt} < \epsilon_j$, consecuentemente $f_{l,a} < f_l$, y su resistencia a compresión de hormigón confinado calculada mediante las expresiones de Lam y Teng nos darán valores inferiores a las calculadas con otras expresiones, donde estas últimas sobrevalorarán la verdadera resistencia a compresión confinada llevando a diseños erróneos y peligrosos.

Esta es la gran incorporación y ventaja añadida por Lam y Teng en los modelos tensión-deformación de hormigón confinado.

- En casos de confinamiento activo (la mayoría de casos estudian el confinamiento pasivo que trata la camisa de FRP sin ser sometida a tensión hasta que el hormigón se dilata y la hace entrar en carga) la respuesta de la curva tensión-deformación después de la resistencia a compresión sin confinar tiene una rama descendente en lugar de ascendente como en el caso pasivo. La expresión de Lam y Teng de 2003 genera esta rama de forma horizontal y no la ajusta a la realidad.

- El efecto de la rigidez de la chaqueta de FRP tiene un efecto importante en la respuesta tensión-deformación del hormigón confinado con FRP, particularmente la deformación axial última.

La primera desventaja se vería muy bien resuelta por las ecuaciones halladas por Lam y Teng (2007). Ecuaciones centradas en un confinamiento activo que grafica la rama descendente después de la resistencia a compresión no confinada. Y la segunda, es resuelta en este último modelo que se explica con algo más de detalle, en cuanto a su desarrollo.

3.1.5.2. Modelo de Teng et al. (2009)

Este es el último modelo presentado por Teng presenta los resultados de recientes estudios que han tratado de perfeccionar y refinar el diseño orientado a determinar el modelo tensión-deformación que originalmente presentaron Lam y Teng (2003, 2007) para hormigón confinado con FRP. Se proponen expresiones más precisas para el cálculo de la deformación axial última y la resistencia a compresión.

Para comprender estas nuevas variables incorporadas al nuevo modelo se han explicado anteriormente algunas desventajas y/o carencias que tenían los anteriores modelos de 2003 y 2007 y que han intentado subsanarse.

A partir de ahora hablaremos de 3 relaciones entre variables definidas como: la relación de confinamiento f_l/f'_{co} , relación de la rigidez de confinamiento ρ_K , y la relación de deformación ρ_ε . Las expresiones matemáticas de estas 3 relaciones son las siguientes:

$$\frac{f_l}{f'_{co}} = \frac{2E_{FRP}t\varepsilon_{h,rup}}{f'_{co}D} = \rho_K\rho_\varepsilon$$

$$\rho_K = \frac{2E_{FRP}t}{(f'_{co}/\varepsilon_{co})D}$$

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}$$

Donde f_l = presión de confinamiento proveniente de la camisa de FRP cuando falla por ruptura debido a las tensiones circunferenciales a tracción, E_{FRP} = módulo elástico de FRP en la dirección circunferencial; t = espesor de la camisa de FRP; $\varepsilon_{h,rup}$ = deformación circunferencial en rotura de la camisa de FRP; y D = diámetro del cilindro de hormigón confinado. La relación de confinamiento f_l/f'_{co} es un parámetro comúnmente usado en la literatura existente. La relación de la rigidez de confinamiento ρ_K representa la rigidez de la camisa de FRP relativa a esa del núcleo de hormigón. La relación de deformación ρ_ε es una medida de la capacidad de deformación de la camisa. La relación de confinamiento f_l/f'_{co} es igual al producto de las otras dos relaciones.

Continuando con la misma forma matemática que Richard et al. (1928), se puede escribir la expresión siguiente con las relaciones mencionadas

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = C_{\sigma} + F_{\sigma}(\rho_K)f_{\sigma}(\rho_{\varepsilon})$$

Donde $F_{\sigma}(\rho_K)$ y $f_{\sigma}(\rho_{\varepsilon})$ = funciones de relación de la rigidez de confinamiento y de la relación de deformación, respectivamente, y C_{σ} = constante.

La ecuación de resistencia a compresión fue refinada en base experimental y analítica. Modelos experimentales de multitud de ensayos muestran que las curvas tenso-deformacionales exhiben una forma bilineal, con las dos partes suavemente conectadas por una zona de transición cercana a la resistencia no confinada del hormigón. Tanto la forma de la primera como de la segunda parte son muy cercanas a una línea recta. Estas líneas rectas pueden representarse por:

$$\frac{\sigma_c}{f'_{co}} = 1 + K \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{co}}$$

Lo que significa que la constante C_{σ} se toma la unidad por la razón expuesta más arriba. K = pendiente de línea recta. Es obvio que la tensión axial σ_c alcanza f'_{cu} cuando $\varepsilon_l = -\varepsilon_{h,rup}$, y entonces surge la siguiente ecuación:

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 1 - K \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} = 1 - K\rho_{\varepsilon}$$

Donde $K = F_{\sigma}(\rho_K)$ se determina mediante estudio paramétrico y se encuentra que:

$$K = F_{\sigma}(\rho_K) = -3.2\rho_K^{0.9} + 0.06$$

Y sustituyendo en la ecuación superior obtenemos:

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 1 + (3.2\rho_K^{0.9} - 0.06)\rho_{\varepsilon}$$

Al ser un inconveniente para su uso en el diseño por su no linealidad, se propuso una aproximación lineal, obteniendo la ecuación definitiva de Teng et al. (2009) para el cálculo de la resistencia a compresión de hormigón confinado.

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 1 + 3.5(\rho_K - 0.01)\rho_{\varepsilon}$$

Debe apreciarse que la siguiente ecuación predice la tensión axial en la deformación axial última, pero no en la resistencia a compresión f'_{cc} de hormigón confinado con FRP, aunque son las mismas a menos que la curva tensión-deformación tenga una rama descendiente (Lam y Teng, 2007). Por ello esta expresión queda dividida en:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5(\rho_K - 0.01)\rho_{\varepsilon}, \quad \text{si } \rho_K \geq 0.01$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1, \quad \text{si } \rho_K < 0.01$$

3.1.6. MODELO DE WU Y ZHOU (2010).

Muchos de los modelos existentes de resistencia de pilares de hormigón confinado con fibra reforzada con polímeros (FRP) están basados en un trabajo previo. En este apartado que se explica a continuación se propone un nuevo modelo propuesto por Wu and Zhou, basado en el criterio de rotura de Hoek-Brown.

La mayoría de modelos resistentes observados en la literatura existente están basados en la forma matemática propuesta por Richart et al. (1928). Recientemente, una nueva forma matemática ha sido empleada para la modelización de la resistencia, basada en el criterio de rotura de Hoek-Brown. Hoek and Brown desarrollaron un criterio de rotura para materiales como la roca, y el hormigón se puede considerar como un tipo de roca.

Al menos dos ventajas existen al extender el modelo de Hoek-Brown al hormigón:

- Aplicación del criterio de rotura de Hoek-Brown a roca y hormigón con fisuras existentes o daño producido (tales como los causados por ciclos de congelación y descongelación, mojado y secado, corrosión, fuego, terremoto, etc.).
- El modelo tiene una forma unificada para pilares circulares y rectangulares, solo es modificado por un factor corrector de forma (ρ^α).
- El comportamiento a tracción del pilar de hormigón puede evaluarse de tal forma que la envolvente entera de rotura del hormigón confinado con FRP está disponible.

Eso sí, al menos una desventaja se le atribuye a este modelo:

- Falta de una ecuación que nos determine la deformación axial última como hacen el resto de modelos basados en la forma matemática propuesta por Richart et al. y poder así graficar la curva tenso-deformacional del hormigón al aplicarle una carga.

El hormigón dentro de un pilar envuelto con FRP es sometido a tensiones triaxiales de compresión, con una tensión a compresión principal mayor, σ_1 , en la dirección axial (longitudinal) y dos tensiones principales, σ_2 y σ_3 , en las direcciones radiales. Ambas tensiones laterales son iguales y constantes en toda la sección para pilares circulares por lo que la presión de confinamiento y su valor máximo que ocurre en el fallo de la envoltura de FRP, viene dada por:

$$f_l = \frac{2f_{FRP}t}{D} = \frac{2E_{FRP}\varepsilon_j t}{D}$$

Donde f_{FRP} y E_{FRP} = resistencia a tracción y módulo elástico de FRP en la dirección circunferencial, respectivamente; t =espesor total de la camisa de FRP; ε_j = deformación circunferencial a tracción del FRP; y D = diámetro del pilar.

Hoek y Brown (1980) desarrollaron un criterio de rotura para rocas

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}$$

Donde σ_1 = tensión principal mayor en rotura; σ_3 = tensión principal menor en rotura; y σ_c = resistencia a compresión uniaxial para la roca intacta. El valor de m , un parámetro del material, depende del tipo de roca, donde s refleja las discontinuidades en la roca y se encuentra en un rango del 0 al 1.

Desarrollando la expresión anterior para el caso particular de un pilar de hormigón sin fisuras y deficiencias, $s=1$, donde f'_{cc} y f'_{co} = resistencias a compresión de hormigón confinado y no confinado equivalentes a σ_1 y σ_c del modelo de Hoek-Brown, respectivamente, y f_l = presión de confinamiento lateral correspondiente a σ_3 y que se ha definido anteriormente; se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_l}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{f'_{co}{}^n}{C} - \frac{C}{f'_{co}{}^n}\right) \frac{f_l}{f'_{co}} + 1}$$

Donde los coeficientes C y n se pueden determinar por análisis de regresión lineal. Wu y Zhou utilizaron una base de datos actualizada y cuidadosamente seleccionada compuesta por 467 ensayos de los cuales, mediante análisis de regresión, encontraron valores para las constantes C y n iguales a -16.7 y 0.42, respectivamente.

Por lo tanto la forma finalmente hallada por Wu y Zhou para modelos resistentes para hormigón confinado con FRP es:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_l}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{16.7}{f'_{co}{}^{0.42}} - \frac{f'_{co}{}^{0.42}}{16.7}\right) \frac{f_l}{f'_{co}} + 1}$$

3.2. MODELOS DE CONFINAMIENTO PARA SECCIONES CUADRADAS.

De la misma manera que para los modelos de confinamiento encontrados para sección circular en la bibliografía, para las secciones cuadradas también se tienen varias, pero si son mucho menor con respecto a las circulares, para el presente estudio se tomaron tres (Mirmiran A. et al 1998, Al-Salloum Y. A. 2006, Wu y Zhou 2010.). Una lista de más modelos de otros autores que se estudiaron pero que no están dentro nuestro análisis, se hace referencia en la parte de anexos punto C.

3.2.1. MODELO DE MIRMIRAN et al. (1998).

El modelo propuesto por Mirmiran et al. 1998 esta dado por:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 k_s \frac{f_l}{f'_{co}}$$

Donde la k_s es el factor de forma que considera para el efecto de confinamiento no uniforme y es definido como:

$$k_s = \frac{2r}{D}$$

En el cual la D es el diámetro de una columna equivalente circular y fue comparada con la longitud de lado de una columna cuadrada o la longitud de lado más larga en el caso de una sección rectangular. El coeficiente de eficacia de confinamiento k_1 en este modelo es adoptado como:

$$k_1 = 6.0 f_l^{-0.3}$$

Por lo tanto, la primera ecuación puede ser expresado como:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6.0 \left(\frac{2r}{D} \right) \frac{f_l^{0.7}}{f'_{co}}$$

Este modelo de confinamiento puede ser usado para predecir la respuesta tensión-deformación del hormigón confinado en columnas rectangulares con un MCR que es no menos de 0.15.

3.2.2. MODELO DE AL-SALLOUM Y. A. (2006).

El modelo analítico propuesto por Al-Salloum (2006) es modificado de la expresión de Lam y Teng (2003b) para predecir la resistencia a compresión de columnas de hormigón

cuadradas y circulares confinadas con FRP. El factor de forma k_s puede ser expresado como una función de la dimensión de la sección b y radio de esquina r , así

$$k_s = 1 - \frac{2}{3} \left[\frac{(1 - 2r/b)^2}{1 - (4 - \pi)(r/b)^2} \right]$$

Como el factor de forma k_s ha sido incorporado para considerar el efecto del área confinada de la sección, es sugerido por Al-Salloum (2006) que la no uniformidad en la presión de confinamiento puede ser corregido usando un factor de modificación de b/D , donde su valor máximo es 1.0 para una sección circular en la cual la presión de confinamiento es uniforme, D es la longitud diagonal de la sección, y, para columnas cuadradas con esquinas dadas la vuelta, puede ser escrito como:

$$D = \sqrt{2}b - 2r(\sqrt{2} - 1)$$

El coeficiente de eficacia de confinamiento k_l es tomado como 3.14, que es el valor medio de 2.98 y 3.3 propuesto por Miyauchi et al. (1999) y Lam y Teng (2003b), respectivamente, basado en sus resultados experimentales sobre columnas de hormigón confinadas con CFRP. Por lo tanto, el modelo puede ser expresado como:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.14 \left(\frac{b}{D} \right) k_s \frac{f_l}{f'_{co}}$$

Los resultados predichos están de acuerdo con los resultados experimentales realizados por Al-Salloum (2006) tanto para los especímenes cuadrados como para circulares.

3.2.3. MODELO DE WU Y ZHOU (2010).

Como ya describió los principios en que se basan Wu y Zhou 2010, para la predicción de la resistencia a compresión en columnas circulares, también propone para columnas cuadradas confinadas con FRP, muchos parámetros afectan la eficacia de la resistencia. Sin embargo, cuando todos los factores son fijos, la única variable considerada es la relación del radio de esquina, la presión de confinamiento eficaz puede ser expresada como una función del radio de esquina, con lo cual obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_l}{f'_{co}} \rho^{0.85} + \sqrt{\left(\frac{16.7}{f'_{co}{}^{0.42}} - \frac{f'_{co}{}^{0.42}}{16.7} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} \rho^{0.85} + s}$$