

ALGUNAS SIMPLIFICACIONES AL TRATAMIENTO DE LOS MODELOS BIELA-TENSOR EN EL CIRSOC 201-2005

Ingeniero Civil Juan Francisco Bissio

Quasdam Ingeniería – Departamento de Construcciones de la Facultad de
Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata

RESUMEN: El nuevo Reglamento CIRSOC 201-2005 incluye, como todos los reglamentos modernos, a los llamados Modelos Biela-Tensor para el tratamiento de los elementos y zonas en los que no se verifica la hipótesis de Bernoulli. Esta inclusión constituye un avance importante en tanto el CIRSOC 201-82 no incluía en absoluto este aspecto ineludible de la Teoría del Hormigón Estructural. Sin embargo, el tratamiento de algunos aspectos operativos se presenta de manera un tanto engorrosa y poco práctica, lo que puede desalentar la aplicación por parte de los profesionales no familiarizados. El presente trabajo presenta algunas simplificaciones que permiten clarificar la aplicación del método y mantener el carácter conceptual que el mismo ha mostrado desde su más temprano desarrollo.

Abstract: New CIRSOC 201-2005 includes Strut-and-Tie models (STM), a major step forward since CIRSOC 201-82 does not include any text about that theory, used to solve structural elements (or a portion of them) where the Bernoulli hypothesis does not comply. Nevertheless, some operative aspects, mainly related with the verification of concrete compression in struts and nodes, are pretty difficult to apply. In order to allow an easy understanding and applicability of the method, this paper deals with some conservative simplifications that can be applied, recovering the traditional simplicity of STM implementation.

INTRODUCCIÓN

Los modelos Biela-Tensor (MBT), si bien tienen antecedentes que se remontan a los orígenes de las primeras teorías del hormigón armado (el reticulado de Ritter-Mörsch) fueron desarrollados, de manera consistente y como teoría general, hacia 1982, principalmente por parte de Jörg Schlaich. Esta teoría ha sido utilizada exitosamente para el tratamiento de los elementos y zonas en los que no se verifica la hipótesis de Bernoulli, también llamados regiones D en el ámbito de esa teoría, en contraposición a las regiones en las que se cumple el mantenimiento de las secciones planas, denominadas regiones B, para las que son aplicables las teorías desarrolladas a lo largo del siglo pasado.

Con anterioridad al desarrollo de la teoría, las regiones D fueron tratadas principalmente mediante recetas empíricas, de aplicación restringida a las condiciones de ensayo que las originaban. La teoría de los MBT surgió desde el primer momento como un cuerpo coherente, racional, deductivo pero por sobre todo, de fácil aplicación para resolver los problemas de las regiones D. A nadie escapa que la teoría de los MBT no es, ni por lejos, un enfoque “exacto” del problema, para el cual sería necesario –una vez que la elasticidad lineal no aproxima ni siquiera groseramente el comportamiento real- recurrir a teorías complejas de la mecánica del continuo, con relaciones constitutivas que consideren la fisuración del hormigón, modelos fractomecánicos, etc. Sin embargo, representa de manera adecuada el comportamiento experimental de las regiones D, con un costo operacional que se cuenta en milésimos del que demandarían los modelos “exactos”.

Sin embargo, a lo largo de los años, algunos aspectos de la metodología - concretamente la relacionada con la verificación de los campos comprimidos de hormigón- ha ido complicándose hasta un punto en que su aplicación se ha vuelto muy engorrosa para la mayoría de los ingenieros involucrados en cálculos estructurales normales.

Basta echar un vistazo a cualquier ejemplo resuelto, ya sea sobre la base del CIRSOC 201-2005 (ACI 318), o el CEB90, para encontrar rápidamente una maraña de zonas nodales, subzonas, y demás artilugios geométricos que complican hasta lo indecible la operatoria. Nada más lejos del espíritu original del concepto de los MBT.

En el presente trabajo se intenta un acercamiento a formas más simples de verificación de las compresiones en las bielas y nudos de los MBT, tratando de resolver el conjunto a partir de las tensiones en los puntos de aplicación de las cargas exteriores (acciones o reacciones), en los que las secciones de contacto están definidas, y por sobre todo, promoviendo un acercamiento al espíritu original de los MBT: resolver de manera simple, elegante y adecuada los problemas de las regiones D.

VERIFICACIÓN DE PUNTALES Y ZONAS NODALES SEGÚN CIRSOC 201-2005

La condición general de seguridad se expresa, en estos caso, se la siguiente manera:

$$F_u \leq \phi F_n \quad (1)$$

Donde:

F_u = solicitación en un puntal, o cara de una zona nodal calculada para cargas mayoradas

F_n = resistencia nominal de un puntal, tensor o cara de una zona nodal

ϕ = coeficiente de reducción de resistencia = 0.75 para todos los casos.

F_{nn} : Resistencia de las Zonas Nodales

$$F_{nn} = 0.85 \beta_n f'_c A_n \quad (2)$$

Con:

$\beta_n = 1.0$ en zonas nodales tipo **CCC** limitadas por puntales, áreas de apoyo o ambas

$\beta_n = 0.8$ en zonas nodales que anclan un tensor (**CCT**)

$\beta_n = 0.6$ en zonas nodales que anclan dos o más tensores (CTT o similares)

A_n = Area de la cara de la zona nodal sobre la cual actúa F_u

F_{ns} : Resistencia de los Puntales de Hormigón

La siguiente expresión debe evaluarse en ambos extremos de un puntal.

$$F_{ns} = \beta_s 0.85 f'_c A_c + A'_s f'_s \quad (3)$$

donde

A_c = sección transversal en el extremo en estudio

A'_s = armadura de compresión, en caso de que exista. Debe ser paralela al eje del puntal y debe estar encerrada por estribos o zunchos que verifiquen los requerimientos exigidos para columnas.

$f'_s = f_{yv}$ pero no mayor que 420 MPa.

$\beta_s = 1.00$ Puntales sin tracciones transversales.

$\beta_s = 0.75$ En puntales con forma de botella con armadura suficiente como para tomar las tracciones transversales.

- $\beta_s = 0.60$ En puntales con forma de botella sin armadura suficiente como para tomar las tracciones transversales.
- $\beta_s = 0.40$ En puntales que se encuentren en elementos traccionados.
- $\beta_s = 0.60$ En cualquier otro caso.

Todas estas condiciones se simplificarán de manera considerable a partir de algunas consideraciones que se detallan a continuación.

En primer término, se analiza el equilibrio general de un nudo típico CCT, al que concurre un puntal interno, un tensor y una carga externa (Fig 01). Esta situación es la típica de un apoyo de viga de gran altura, por ejemplo, y puede ser extendida a una gran proporción de nudos en MBT. b_s es la altura de la sección cobaricéntrica con las armaduras representadas por F_{nt} .

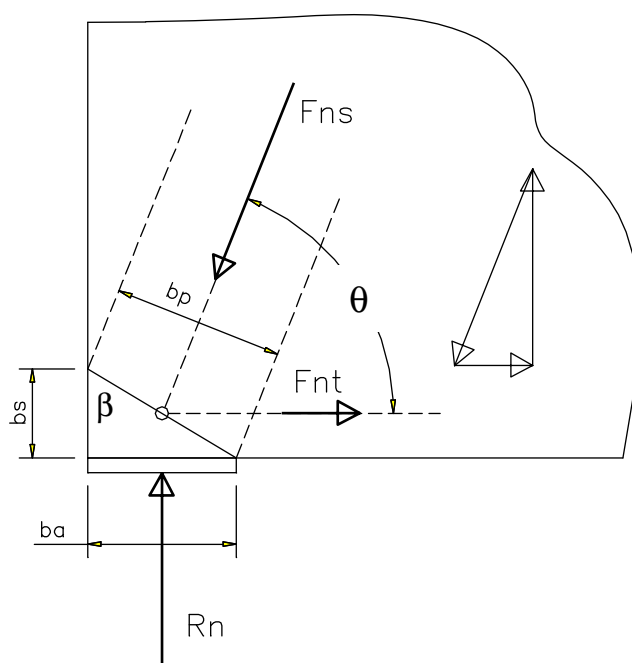


Figura 1

Definiendo las tensiones de compresión directa para el caso del apoyo (R_n) y el puntal inclinado (F_{ns}), y de compresión equivalente para el tensor (F_{nt}), se pueden expresar las siguientes tensiones, para un espesor " t " del elemento:

$$\sigma_{ns} = F_{ns} / (t \cdot b_p) \quad (4)$$

$$\sigma_t = F_{nt} / (t \cdot b_s) \quad (5)$$

$$\sigma_R = R_n / (t \cdot b_a) \quad (6)$$

El esquema planteado es válido aún cuando existan cargas horizontales ya que la misma puede ser transferida a la fuerza F_{nt} . Del equilibrio de las fuerzas que concurren al nudo, y las relaciones geométricas entre los lados del triángulo y la dimensión b_p , se obtienen las siguientes relaciones:

$$\sigma_{ns} / \sigma_t = \cos\beta / [\cos(\beta-\theta) \cdot \cos\theta] \quad (7)$$

$$\sigma_{ns} / \sigma_R = \sin\beta / [\cos(\beta-\theta) \cdot \sin\theta] \quad (8)$$

$$\sigma_t / \sigma_R = \tan\beta / \tan\theta \quad (9)$$

Considerando que el ángulo θ varía normalmente entre 30° y 67° (30° es de hecho el valor mínimo permitido por el Reglamento), se estudia paramétricamente la variación del máximo entre σ_{ns} / σ_t y σ_{ns} / σ_R , obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 02:

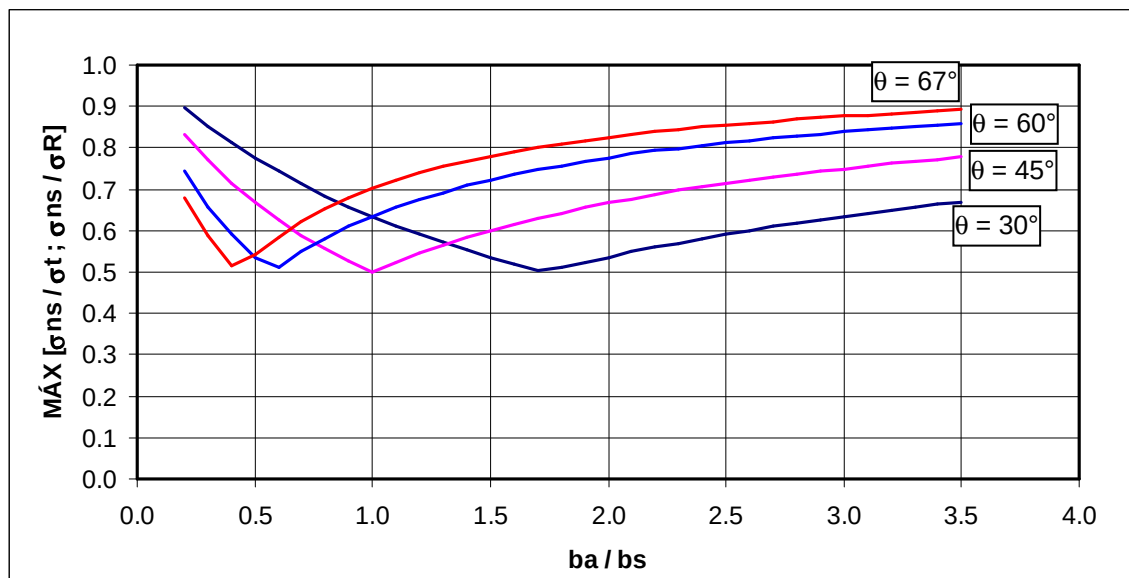


Figura 02

Resulta evidente que las compresiones en el puntal, y por lo tanto en la cara correspondiente del nudo, quedan limitadas por los valores obtenidos en el apoyo (σ_R) y la compresión equivalente por el tensor (σ_t). Si adicionalmente se supone que los puntales tienen forma de botella, con armadura transversal (lo cual está asegurado por la armadura mínima de piel estipulada por el reglamento), se pueden definir las siguientes condiciones que verifican simultáneamente las compresiones en el nudo y el puntal:

$$\text{MÁX} [F_{nt} / (b s t) ; R_n / (b a t)] \leq 0.75 \text{ a } 0.85 f'_c = 0.64 f'_c \quad \text{nudos CCT} \quad (10)$$

$$\text{MÁX} [F_{nt} / (b s t) ; R_n / (b a t)] \leq 0.60 \text{ a } 0.85 f'_c = 0.51 f'_c \quad \text{nudos CTT} \quad (11)$$

La ventaja de esta formulación consiste en verificar las condiciones de compresión a través de cargas conocidas (R_n se obtiene del equilibrio global, y obviamente F_{nt} debe ser obtenida para calcular la armadura a ser dispuesta), y con magnitudes geométricas también directas y que pueden ser identificadas fácilmente, ya que **ba** es el ancho de apoyo, y **bs** es la altura en la cual se dispone la armadura que representa F_{nt} . De esta manera se evita el cálculo de la fuerza en el puntal (F_{ns}), y no es necesario inferir un ancho de puntal para verificar las compresiones.

Nótese además que la condición tensional σ_{sn} puede ser transformada fácilmente en una condición de cuantía geométrica ρ en el “tirante virtual” definido por la armadura y su área cobaricéntrica de hormigón. En efecto, por ejemplo para nudos **CCT**:

$$F_{nt} / (b_s t) = A_s f_y \leq 0.64 f'_c \Rightarrow A_s / (b_s t) = \rho \leq 0.64 f'_c / f_y \quad (12)$$

Que para nudos CTT queda, obviamente:

$$F_{nt} / (b_s t) = A_s f_y \leq 0.51 f'_c \Rightarrow A_s / (b_s t) = \rho \leq 0.51 f'_c / f_y \quad (13)$$

Cumpliendo esta cuantía mínima se podría verificar solamente la compresión en el apoyo (σ_R).

Por otra parte, existen en las estructuras con mucha frecuencia nudos del tipo **CCC**, como por ejemplo el punto de aplicación de una carga activa superior, que es equilibrada internamente por dos puntales comprimidos. Se puede verificar fácilmente que el nudo está sometido a un estado “hidrostático” de tensiones, por lo que hay un valor único de tensión de compresión, que se puede calcular de manera directa en la placa de apoyo. Por lo tanto si la misma tiene un ancho **ba** y la carga nominal aplicada en la misma es **Pn**, resultaría, considerando una vez más que las bielas son tipo botella, pero que existe armadura de alma mayor o igual que la mínima:

$$P_n / (b_a t) \leq 0.75 \text{ a } 0.85 f'_c = 0.64 f'_c \quad \text{nudos } \mathbf{CCC} \quad (14)$$

CONCLUSIONES

En la práctica es muy poco frecuente que en un elemento o zona de elemento donde no se verifique el mantenimiento de las secciones planas resulte determinante la verificación de las compresiones sin embargo, demostrarlo según la metodología indicada en el CIRSOC 201-05 resulta extremadamente engorroso.

La metodología desarrollada en el presente trabajo permite, bajos ciertas hipótesis conservadoras, verificar en forma sencilla y rápida las condiciones de compresión en puntales y nudos a través de las condiciones tensionales existentes en los puntos de aplicación de las cargas externas. Si bien las hipótesis realizadas son conservadoras, esto rara vez conducirá a secciones mayores que las que resultarían de un cálculo más afinado, pero también mucho más engorroso. Eventualmente, dicho cálculo siempre estará disponible para una verificación más detallada. La sencillez de la metodología propuesta intenta recuperar la simplicidad original de la teoría de los MBT y puede ser una buena base para aplicaciones simplificadas del cuerpo reglamentario.