

# Fallo estructural del concreto en diagramas de dominio

(Parte I)

### E. e I. Vidaud

Hablemos de los diagramas de dominios también conocidos como diagrama de los tres pivotes.

l diagrama de dominios indica las posibles ubicaciones que adoptan las secciones planas con su correspon-

diente línea neutra, luego de que en la sección hayan ocurrido deformaciones provocadas por combinaciones de fuerzas axiales con momentos flectores (esfuerzos normales); de forma tal que provoquen una situación determinada de agotamiento resistente en los materiales componentes del concreto armado (acero y concreto); razón por la que las situaciones de servicio quedan excluidas de su alcance. En otras palabras, con el diagrama de dominios es posible visualizar en el estado límite último, las leyes que regulan las posiciones de las secciones transversales sometidas a solicitaciones que provocan esfuerzos normales; las que pueden ir desde la tensión hasta la compresión pura, pasando por los esfuerzos de flexotensión y la flexocompresión.

En otras geografías también se le conoce como Diagrama de los tres pivotes o Diagrama de deformaciones. Está basado en hipótesis generales y según lo anteriormente explicado, refleja los estados de deformaciones últimos que provocan el fallo por resistencia o deformación plástica excesiva de la sección.

El entendimiento de los diagramas de dominio y de las hipótesis que rigen su comportamiento está muy relacionado con los conceptos: profundidad de la línea neutra (L.N) y peralte útil

(d), por lo que a continuación se presenta una conceptualización de dichas variables.

La línea neutra (con profundidad "x", respecto a la fibra más comprimida) es la línea que une todos los puntos de la sección transversal del elemento, en donde la magnitud de los esfuerzos normales es nula. Es decir, que en estos puntos en particular existe una inversión de esfuerzos normales; que va de las compresiones a las tensiones, o viceversa (Ver Fig. 1).

Fig. 1: Diagrama de esfuerzos normales ( $\sigma c$  y  $\sigma t$ : Esfuerzos normales de compresión y de tensión, respectivamente) y deformaciones unitarias ( $\varepsilon c$  y  $\varepsilon t$ : Deformaciones unitarias de compresión o de acortamiento y de tensión o alargamiento, respectivamente) asociadas a un nivel de Momento Flector (Mf) determinado.

En la Fig. 1 puede apreciarse el peralte útil (d), definido como

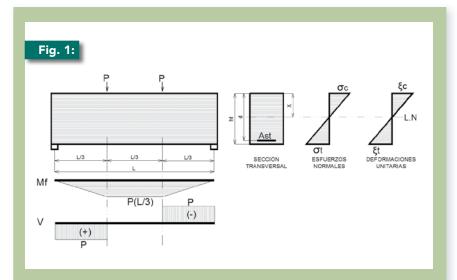


Diagrama de esfuerzos normales ( $\sigma c$  y  $\sigma t$ : Esfuerzos normales de compresión y de tensión, respectivamente) y deformaciones unitarias ( $\varepsilon c$  y arepsilon t: Deformaciones unitarias de compresión o de acortamiento y de tensión o alargamiento, respectivamente) asociadas a un nivel de Momento Flector (Mf) determinado.

la distancia entre el centro de gravedad del acero en tensión (As) y la fibra en compresión más alejada. Dicho de otra manera, es la zona del peralte total (ht) de la sección, que no incluye la parte del peralte restante, en este caso definida por el recubrimiento del acero en tensión.

Como ya se dijo, el diagrama de dominios se sustenta en determinadas hipótesis generales que rigen su desarrollo. En general, son hipótesis basadas en el estudio de las secciones de concreto sometidas a solicitaciones que generan esfuerzos normales sobre la sección transversal, en el estado límite último de agotamiento resistente de un determinado elemento; en este caso, se desprecian las solicitaciones paralelas a la sección transversal (solicitaciones de cortante). De acuerdo a esto, los aspectos que se definirán en el presente escrito están asociados estrictamente a la parte central de la trabe que se presenta en la Fig. 1 (zona con momento flector, sin esfuerzo cortante). A continuación se referirán en detalle algunas de las principales hipótesis a considerar.

#### Hipótesis 1:

Existe adherencia perfecta entre el concreto y el acero de refuerzo ya que ambos materiales (concreto y acero) actúan de conjunto. El suponer esta hipótesis significa que a nivel del centro de gravedad del acero de refuerzo, tanto el acero como el concreto circundante se encuentran ubicados en fibras que están a una misma separación de la línea neutra; experimentando así una misma deformación unitaria bajo la acción de cualquier solicitación. Esta es precisamente la razón de ser del concreto armado.

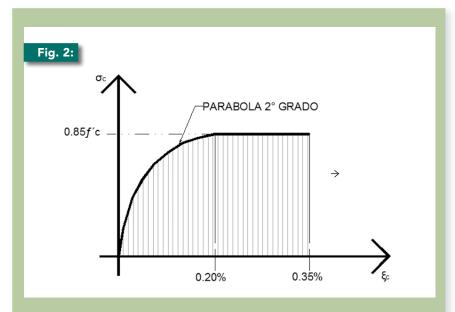


Diagrama "Esfuerzo-Deformación", en forma de Parábola-Rectángulo, usado comúnmente para caracterizar el concreto. Fuente: Adaptado de EHE-08 (2010).

## Hipótesis 2:

Se considera válida la hipótesis de Bernoulli, que plantea que durante la deformación, las secciones normales a la directriz se mantienen planas y normales a la directriz deformada. Lo anterior conduce a que las deformaciones de las fibras de la sección concreto-acero son proporcionales a sus distancias a una recta de deformación nula, que antes quedó definida como línea neutra. La validez de esta hipótesis depende de que exista un comportamiento lineal entre esfuerzos y deformaciones; pudiéndose expresar mediante las ecuaciones de compatibilidad, deducidas por semejanza de triángulos. Esto es válido para comportamientos lineales, en donde la relación entre la distancia de los puntos de momento nulo y el peralte efectivo de la sección, sea mayor o igual a 2, ya que en estos casos las deformaciones producidas

por el esfuerzo cortante no son representativas. En caso que no se cumpla lo anterior, una alternativa es la Teoría de la "Viga-Pared".

## Hipótesis 3:

Al realizar el equilibrio de fuerzas en la sección y dado que la magnitud de la resistencia a la tensión del concreto es relativamente pequeña y poco confiable, no se considera su aporte o contribución a la resistencia última. En otras palabras, se desprecia toda contribución del concreto sometido a esfuerzos de tensión.

#### Hipótesis 4:

La deformación en una fibra de concreto o de acero de refuerzo, define el valor del esfuerzo en dicha fibra; en función de lo que se lee en diagramas de relación entre esfuerzos y deformaciones apropiados para cada uno de los materiales de referencia.

Para el caso del concreto, es común que se adopte un diagrama de parábola y rectángulo, que va desde una deformación unitaria de compresión nula hasta una de 0.35 % en flexión simple o compuesta. La relación de referencia se grafica a continuación en la Fig. 2. Asimismo se considera un valor de 0.2 % en compresión centrada.

Vale la pena hacer un alto en dos aspectos medulares de esta hipótesis en particular. El primero refiere a que en la zona de tensión (a la izquierda del eje vertical), de acuerdo a una de las hipótesis definidas (hipótesis #3), no existe diagrama de comportamiento. El otro aspecto atiende al 0.85 marcado para definir el esfuerzo de compresión máximo en la curva de comportamiento del concreto; valor que se define para considerar el fenómeno comúnmente denominado "cansancio". Éste tiene en cuenta el hecho de que los valores de la resistencia del concreto se estiman mediante ensayos de carga rápida en especímenes concebidos para este fin; sin embargo, las acciones actúan constantemente durante toda la vida útil de las estructuras.

En lo que respecta al acero de refuerzo, es común que se adopte un diagrama simplificado bilineal compuesto, que incluye el desempeño del acero, tanto en tensión como en compresión. Se trata de un tramo inclinado que se rige por un comportamiento proporcional entre esfuerzos y deformaciones (en donde se cumple la Ley de Hooke), y un tramo horizontal, paralelo al eje de las abscisas, en donde hay un incremento de las deformaciones sin que exista incremento alguno de los esfuerzos normales. La tendencia de referencia se aprecia en la Fig. 3.

Respecto a la Fig. 3, es importante mencionar que estando en compresión se limitan las deformaciones a 0.35%, correspondiente con el nivel máximo que se consideró en el comportamiento en compresión del concreto sometido a solicitaciones de

flexión simple o compuesta. Por otra parte, otros modelos para el acero de refuerzo, un tanto más sofisticados, consideran un desarrollo lineal creciente entre la deformación de fluencia y la máxima deformación.

## Hipótesis 5:

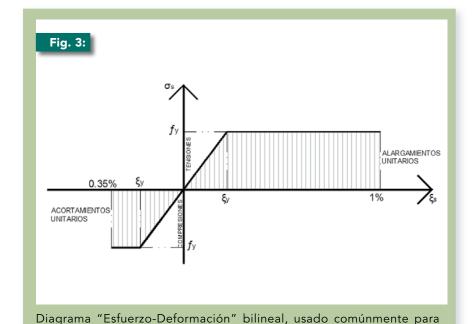
En general, se considera que una sección de concreto armado se encuentra en estado límite último de agotamiento resistente, cuando se alcanzan ciertos niveles de deformaciones en las fibras características de la sección. Estos niveles, asociados a las fibras de referencia, con base en lo definido en las figuras 2 y 3, se relacionan a continuación:

a) La deformación máxima en el acero en tensión (ɛs), está relacionada con un estado de deformación plástico excesivo; caso en donde se considera que ɛs es del 1% Esta situación es típica de secciones con la existencia de cuantías de acero de refuerzo menores a las necesarias; tendiéndose a inducir así, a un fallo de tipo frágil.

b) La deformación máxima del concreto en las fibras en compresión ( $\varepsilon c$ ) en flexión simple, está relacionada con una falla o rotura en flexión (por lo general de tipo dúctil); en donde la magnitud de  $\varepsilon c$  puede ser considerada de 0.35 %

c) La deformación máxima del concreto en las fibras en compresión ( $\varepsilon c$ ) ante solicitaciones de compresión simple, está relacionada con una falla en compresión (por lo general de tipo dúctil), en donde la magnitud de  $\varepsilon c$  puede ser considerada de 0.20 %

Las hipótesis anteriormente descritas conducen a obtener una familia de estados de deformaciones últimos que provocan la falla por resistencia o deforma-



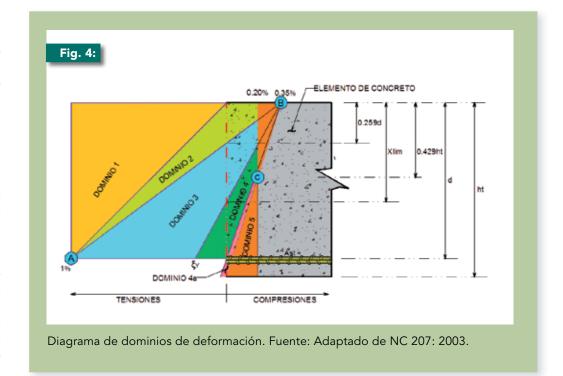
caracterizar el acero de refuerzo. Fuente: Adaptado de EHE-08 (2010).

ción plástica excesiva de la sección. Son precisamente estos estados de deformaciones últimos, los que se representan gráficamente según el Diagrama de deformaciones o dominios.

Siguiendo esta idea es posible evaluar un número finito de combinaciones de deformaciones en el concreto y en el acero de refuerzo, entre la tensión y la compresión pura. Esto se realiza de forma tal que posteriormente puede ser posible evaluar condiciones intermedias de comportamiento (en lo

que a deformaciones unitarias se refiere), que permitan caracterizar el agotamiento resistente debido al acero, al concreto, o debido a ambos de manera simultánea. Es con este propósito que surgen los denominados diagramas de dominios (Fig. 4).

En general, la definición de Diagrama de dominios parte de aplicar una carga axial N de manera sucesiva y en varias posiciones, en la dirección del peralte de una determinada sección. De acuerdo a la posición que se adopte, es posible representar en las abscisas las deformaciones unitarias de las fibras en cada dominio y en las ordenadas correspondientes, la profundidad 'x' del eje neutro; medida a partir de la fibra de concreto más comprimida. Son precisamente estas posiciones límites del eje neutro, cuando alguno de los dos materiales se encuentra en agotamiento, las que nos definen los denominados dominios según la naturaleza de la solicitación.



Como puede constatarse en la Fig. 4, el diagrama se subdivide en 6 dominios (1, 2, 3, 4, 4a y 5) que se caracterizan por las deformaciones del concreto en la fibra más comprimida, y del acero en la menos comprimida. También puede definirse mediante la posición relativa de la línea neutra según la magnitud del término k, que ente caso se define como el cociente entre x y d; y en donde, como ya se ha definido, x es el valor de dicha profundidad y d es el peralte efectivo de la sección.

En el caso de la flexión se supone que el elemento se cargará de manera gravitacional; es decir, tendrá fibras tensionadas en la parte inferior, y comprimidas en la superior. Esta es la razón por la que la sección se considera con armado simple, distribuido en este caso en el lecho inferior de la sección transversal. En el supuesto de considerar secciones transversales doblemente

armadas, se llegaría a las mismas conclusiones ya que de acuerdo a las hipótesis que se definen, el acero ubicado en la zona de compresión se comportará igual que su concreto circundante.

En la segunda parte de este documento serán descritos en detalles cada uno de los dominios que componen estos diagramas. c

#### Referencia

- EHE-08, "Instrucción del Hormigón Estructural: Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón", Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento, España, 2010.
- Jiménez Montoya, Pedro; García Meseguer, Álvaro; Morán Cabré, Francisco, "Hormigón armado", 14a edición basada en la EHE, Ajustada al Código Modelo y al Eurocódigo. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, España, 2000.
- Leonhardt, Fritz; Mönnig, Eduard, "Estructuras de hormigón armado. Bases para el dimensionamiento de estructuras de hormigón armado". tomo I, Segunda emisión revisada, Librería "El Ateneo" Editorial, Buenos Aires, 1988.
- NC 207: 2003, "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón", Oficina Nacional de Normalización, Cuba.