# Fallo estructural del concreto en diagramas de dominio (Parte II)

**Eduardo de J. Vidaud Quintana**

**Ingeniero Civil/Maestría en Ingeniería.**

Su correo electrónico es:
evidaud@mail.imcyc.com

**Ingrid N. Vidaud Quintana**

**Ingeniero Civil/Doctorado en Ciencia.**

Su correo electrónico es:
ingrid@fco.uo.edu.cu

**CONTINUAMOS CON LA SEGUNDA PARTE DEL TEMA SOBRE FALLAS ESTRUCTURALES DEL CONCRETO EN DIAGRAMAS DE DOMINIO.**

En la primera parte de este documento se comentó acerca de cómo una sección de concreto armado sometida a solicitaciones normales puede alcanzar, distintas situaciones que llevan a la pieza a la rotura, ya sea porque se excede la deformación a la compresión en el concreto o la deformación de fluencia del acero de refuerzo. Cada uno de dichos estados está asociado a una posición del plano de deformaciones, definida por la deformación en ciertas fibras características de la sección.

Fue conceptualizado el término línea o eje neutro de una sección como el correspondiente a la recta de deformación nula, y cuya distancia a la fibra más comprimida se designa por la letra X. Además, se definieron, de acuerdo a hipótesis preestablecidas, los tres niveles diferentes de deformación, que originan un "pivoteo" de los planos de deformación posibles alrededor de 3 puntos, creando diferentes zonas o dominios que se sintetizan en el denominado Diagrama de Dominios; cada uno de los cuales se detallan por separado a continuación.

El Dominio 1 corresponde al estado de tensión simple o compuesta, en la que toda la sección se encuentra bajo esfuerzos de tensión. En este caso la profundidad de la línea neutra varía entre 0 y el infinito (ver Fig. 1).

Este dominio "pivotea" alrededor del punto A, correspondiente a un alargamiento del acero más tensionado. Se puede identificar un comportamiento que va desde la

Figura 1

Dominio 1- Tensión simple y compuesta.

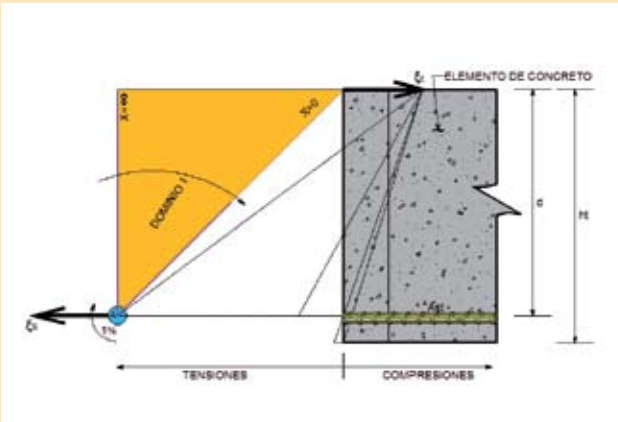
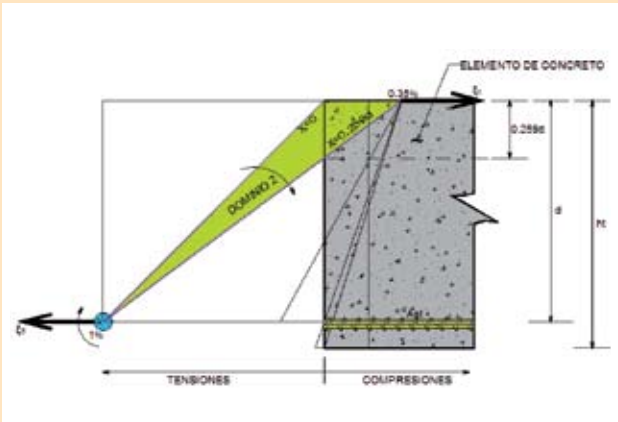



Figura 2

Dominio 2 - Flexión simple y compuesta.



tensión pura (caso de tensores), hasta la tensoflexión (caso de algunos elementos de armaduras de concreto); produciéndose el agotamiento debido a la deformación del acero de refuerzo ($\varepsilon s$=1 %).

En este caso el agotamiento se produce por deformación plástica excesiva, al alcanzar el acero en tensión su máxima deformación (1%). No existe contribución alguna del concreto, por lo que los estados límites se analizan sólo en las deformaciones del acero de refuerzo. La recta vertical que pasa por el punto A, corresponde al caso límite de la tensión centrada.

Respecto al Dominio 2, éste representa a la flexión simple o compuesta, donde el concreto no alcanza la deformación de rotura por flexión. En este dominio, que sigue pivoteando alrededor del punto A y existe predominio de la flexión, se considera que la línea neutra está ubicada íntegramente dentro de la sección, variando entre 0 y 0.259 veces su peralte útil (ver Fig. 2).

Ya en este caso, el concreto en compresión comienza a contribuir. Según se aprecia, los esfuerzos asociados a este dominio son de flexión simple o compuesta, y la deformación máxima del concreto ($\varepsilon_c$) puede variar entre 0 y 0.35%, mientras que la del acero sigue siendo 1% Por esta razón, el fallo ocurre cuando el concreto y el acero alcanzan sus deformaciones máximas, magnitud que corresponde con una profundidad de la línea neutra de 0.259 veces el peralte útil de la sección que se considere.

Dado que las líneas de deformación son rectas, debido al cumplimiento de la hipótesis de Bernoulli, es posible determinar por semejanza de triángulos la profundidad de la línea neutra en el extremo final del dominio 2(xDOMINIO-2). De acuerdo a lo anterior, y a partir de la Fig. 2, se tiene:

$$\frac{0.35\%}{x_{DOMINIO-2}} = \frac{1\%}{d - x_{DOMINIO-2}} \Rightarrow x_{DOMINIO-2} = 0.259d \qquad (1)$$

El estado de la recta que intercepta la deformación de 1% del acero con la de 0.35% de concreto (frontera entre los Dominios 2 y 3), es un estado límite simultáneo del acero y el concreto, y se le suele llamar en la literatura especializada como rotura de tipo "falla balanceada".

Figura 3

Dominio 1- Tensión simple y compuesta.

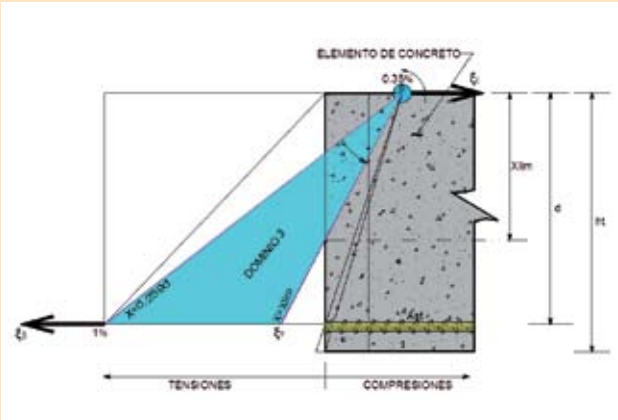
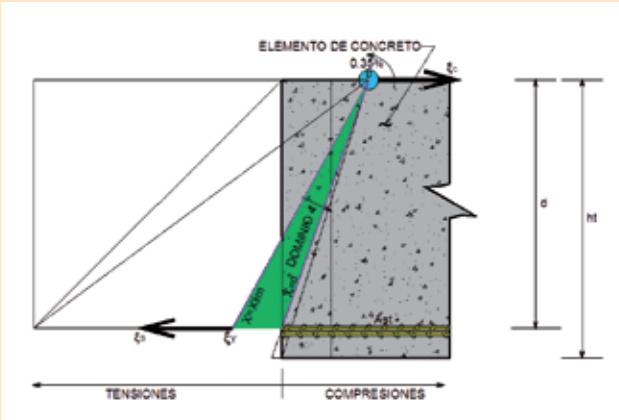



Figura 4

Dominio 2 - Flexión simple y compuesta.



En el Dominio 3 la profundidad de la línea neutra (ver Fig. 3), varía entre 0.259 veces el peralte útil y un valor límite definido (Xlim) por un nivel de esfuerzos en el acero de refuerzo, menor al máximo, y que se conoce como esfuerzo de fluencia ($\varepsilon_Y$). En el diagrama de comportamiento del acero de refuerzo $\varepsilon_Y$ se corresponde con el punto en donde la función deja de ser lineal y comienza a ser constante (comportamiento horizontal), y en donde las deformaciones se incrementan sin que se incrementen los esfuerzos normales.

En este caso, también se trata de esfuerzos de flexión simple o compuesta con predominio de la flexión; en la que al bajar más el eje neutro, las deformaciones ya no pueden girar respecto al punto de pivoteo A, cambiando entonces al punto B.

En general, se considera que este dominio abarca hasta que el acero alcanza la deformación correspondiente a su límite elástico, y que el agotamiento es por compresión del concreto en compresión; cuando éste alcanza su máxima magnitud (0.35%). De acuerdo a esto, el concreto en este dominio se encuentra en su máxima capacidad, en cambio el acero trabaja al límite elástico, con deformaciones variables. Análogo al Dominio 2, en este caso la profundidad de la línea neutra asociada al extremo final (frontera entre los dominios 3 y 4) puede ser estimada de acuerdo a la Fig. 3, como sigue:

$$\frac{0.35\%}{x_{DOMINIO-3}} = \frac{\varepsilon_Y}{d - x_{DOMINIO-3}} \Rightarrow x_{DOMINIO-3} = \frac{0.35\%}{\varepsilon_Y + 0.35\%} d \qquad (2)$$

Si se considera, de acuerdo a la Ley de Hooke, que existe una proporcionalidad directa entre esfuerzos y deformaciones, que incluye al módulo elástico del acero de refuerzo (ES), entonces:

$$\varepsilon_Y = \frac{f_y}{E_S} \qquad (3)$$

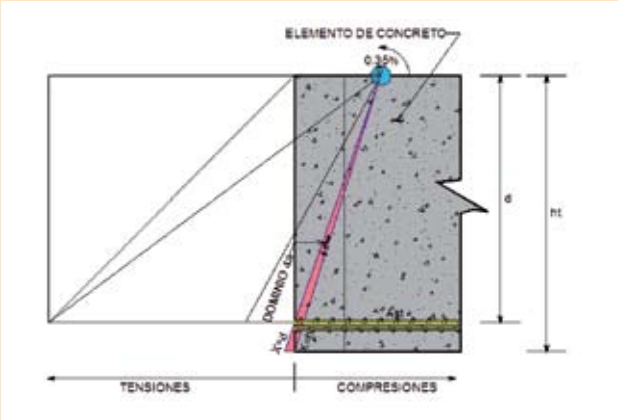
y,

$$x_{DOMINIO-3} = \frac{0.35\%}{\frac{f_Y}{E_S} + 0.35\%} d \qquad (4)$$

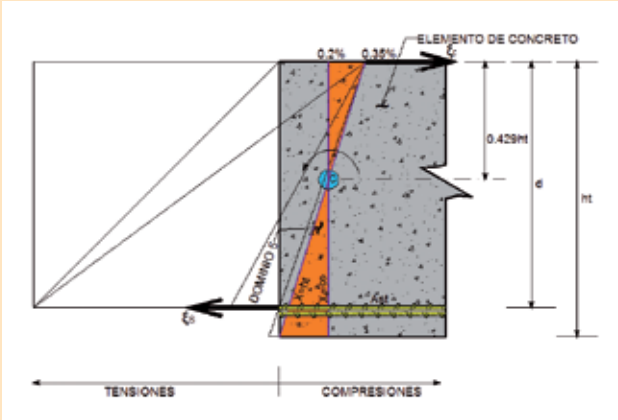
Figura 5

Figura 6

Dominio 4ª - Flexión simple y compuesta.

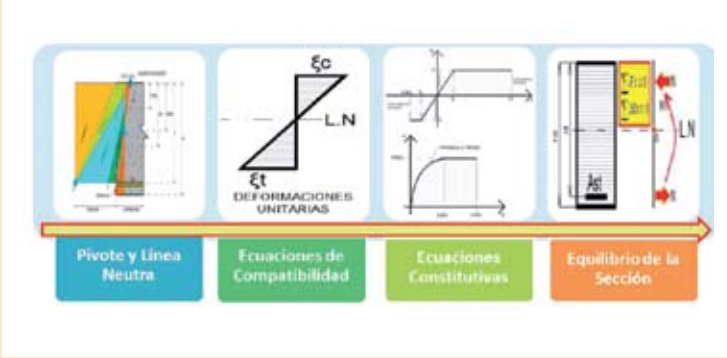



Dominio 5 - Compresión simple y compuesta.



## Figura 7

Resumen del proceso, que va desde la ubicación de la profundidad de la línea neutra y la determinación del dominio, hasta la obtención de las magnitudes resultantes que equilibran la sección.




De acuerdo a lo anterior, no es difícil darse cuenta que la profundidad de la línea neutra en la frontera entre los Dominios 3 y 4, es función del tipo de acero que se emplee (esfuerzo de fluencia, $f_y$). Por su parte, en el Dominio 4, la profundidad de la línea neutra se mueve entre el valor límite definido en el Dominio 3 (si se considera que la deformación del acero en la fluencia es del orden del 0.20%, entonces esta profundidad es aproximadamente igual a 0.63 veces el peralte útil de la sección), y la profundidad del peralte útil de la sección. En este caso, tal y como se aprecia en la Fig. 4, el punto de pivoteo sigue siendo el punto B; existiendo esfuerzos de flexión simple y de flexocompresión.

**"En general se trata de un dominio de flexión compuesta con predominio de la compresión".**

En este dominio el agotamiento es por compresión del concreto ($\varepsilon_c$=0.35%) y la contribución del acero de refuerzo en tensión es pequeña (menor al esfuerzo de fluencia). La deformación máxima del concreto a compresión vuelve a ser de 0.35 %, y la deformación del acero a tensión varía entre el valor de fluencia ($\varepsilon_Y$) y cero, por lo que se desempeña a valores menores que su resistencia de cálculo. Un caso particular de este dominio es el Dominio 4a (ver Fig. 5, la pequeña zona de la derecha coloreada de color rosa), en donde la profundidad de la línea neutra varía entre el peralte útil y el peralte total de la sección. En este dominio existen esfuerzos de flexión o compresión compuesta, estando la sección comprimida y el acero de refuerzo trabajando íntegramente en compresión (la única zona que puede estar trabajando en tensión está justo por debajo del acero de refuerzo en tensión. De acuerdo a las hipótesis definidas en la primera parte de este escrito, en esta zona se deprecia el aporte a la resistencia de la sección). Puede apreciarse en la Fig. 5 que existe una pequeña parte del concreto en tensión, y que las rectas de deformación continúan girando alrededor del punto B. En general se trata de un dominio de flexión compuesta con predominio de la compresión.

Por último en el Dominio 5 (Fig. 6), que pivotea alrededor de un nuevo punto C, sólo se manifiestan esfuerzos de compresión simple o compuesta (toda la sección está en compresión), variando la profundidad de la línea neutra entre el peralte total de la sección y el infinito. En este dominio, el concreto comienza a disminuir su deformación de rotura desde 0.35% hacia el valor $\varepsilon_c$=0.2%, que corresponde con la compresión simple, estando también el acero y toda la sección sometida a esfuerzos de compresión. El refuerzo en la zona menos comprimida o más tensionada aumenta su deformación de acortamiento, alcanzando un valor de 0.2% cuando la compresión es céntrica.

Es fácil entonces obtener de esta última figura la profundidad del punto de pivote C (XC), respecto al borde más comprimido, usando también elementales relaciones de triángulos; de acuerdo a lo que entonces:

$$\frac{0.35\% - 0.20\%}{x_C} = \frac{0.20\%}{h - x_C} \Rightarrow x_C = 0.429h \qquad (5)$$

Hasta aquí ha podido constatarse que los dominios de deformación corresponden a todas las solicitaciones normales de una manera continua, desde la tensión simple hasta la compresión simple; al variar la profundidad del eje neutro X desde -∞ a +∞. Puede resumirse que la profundidad de la línea neutra en cada dominio varía, tal y como se presenta a continuación en la Tabla 1.

De acuerdo a lo anterior, al ser los diagramas de dominio diagramas de deformaciones y al ser las condiciones de rotura condiciones de deformación, estos diagramas se convierten en una útil herramienta para el adecuado entendimiento de las distintas condiciones de falla que puede tener un elemento estructural sometido a efectos axiales y de flexión, y/o a la combinación de éstos.

En general, tal y como se conoce, los estados límites de deformación seccional dependen de la solicitación que se genera en la misma. Las diferentes solicitaciones que se presentan en una sección transversal pueden entenderse fácilmente considerando distintas posiciones del eje neutro; siempre respecto al borde en compresión de la sección.

En función de esto se tendrán entonces particularizados para cada dominio, los diagramas que definen la colocación del eje neutro al inicio y al final, así como la solicitación que es posible que se genere en la sección de estudio y el material que falla en cada caso; por lo que entonces se podría comenzar a tener un criterio respecto a la conveniencia de dimensionar la sección para trabajar en un dominio determinado u otro.

En resumen (Fig. 7), si se conoce el pivote se puede establecer la ecuación de compatibilidad que nos permite conocer la ubicación exacta de la línea neutra en el interior de la sección transversal. Conocida las ecuación de compatibilidad y las deformaciones relativas del concreto y del acero, a través de las ecuaciones constitutivas de los materiales (obtenidas en función de los diagramas de esfuerzo-deformación, previamente definidos en las figuras 2 y 3 de la primera parte de este documento), es posible a partir de las deformaciones, obtener los correspondientes niveles de esfuerzos a los que se encuentran sometidos ambos materiales (concreto y acero de refuerzo).

Por último, con los esfuerzos del concreto y del acero, haciendo un resumen de esfuerzos normales a la sección, se encuentran las resultantes del concreto y del acero, en compresión y en tensión, respectivamente, con lo cual es posible establecer el equilibrio de la sección a través de las leyes de Newton (ΣFx=0 y ΣMo=0), y con ello obtener las magnitudes resultantes; tanto del momento flector (M) como de la fuerza axial (N), que equilibran la magnitud que solicita la sección. **C**

## Tabla 1

Profundidad de la línea neutra.

| Dominio | Profundidad de línea neutra | |
|---|---|---|
| | **Desde** | **Hasta** |
| 1 | x=-∞ | x= 0 |
| 2 | (εs=εc=1%) | (εs=1%, εc=0) |
| 3 | x= 0 | x =0.259d |
| 4 | (εs=1%, εc= 0) | (εs=1% y εc=0.35%) |
| 4a | x=0.259d | x=xlim |
| 5 | (εs=1% y εc=0.35%) | (1% ≥εs≥ y εc=0.35%) |
| | x=xlim | x=d |
| | (εs= y εc=0.35%) | ( ≥ εs ≥ 0 y εc=0.35%) |
| | x=d | x=ht |
| | (εs= y εc=0.35%) | ( ≥ εs ≥ 0 y εc=0.35%) |
| | x=ht | x=+∞ |
| | (εs=0 y εc=0.35%) | ( ≥ εs y 0.35% ≤ εc ≤0.2%) |

**Fuente:** Adaptado de EHE-08.

## REFERENCIAS:


- **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, Gustavo Gili, Barcelona, España, 2000.**
- **Leonhardt, Fritz; Mönnig, Eduard, *Estructuras de hormigón armado. Bases para el dimensionamiento de estructuras de hormigón armado*, Tomo I, Segunda edición 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.**