

NOTA PRELIMINAR

Estos apuntes se han elaborado con el propósito de servir de ayuda a los estudiantes de la asignatura Diseño Avanzado de Estructuras de Hormigón del primer curso del máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alicante.

La materia que aborda la asignatura constituye una ampliación y profundización de la asignatura de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado que los alumnos han superado en el Grado en Ingeniería Civil. Se supone, por tanto, que los alumnos tienen ya un cierto conocimiento de los procedimientos y normativa de diseño, así como un buen conocimiento de resistencia de materiales (análisis de estructuras). En la asignatura que aquí se contempla se pretende que los alumnos no solamente adquieran los conocimientos básicos para abordar problemas estructurales más avanzados de construcciones de hormigón (en particular el cálculo en régimen plástico, la consideración de las deformaciones y el cálculo de estructuras de hormigón pretensado isostáticas e hiperestáticas, preferentemente con tipologías de puentes), sino que profundicen en la interpretación de la normativa existente y dispongan de mayor y mejor criterio para su aplicación.

Los apuntes se redactan de forma que han de ser leídos conjuntamente con los textos de las normas oficiales, a los que hacen continuas referencias, evitando, siempre que sea posible, repetir textualmente su contenido. Con ello se pretende que los alumnos se familiaricen aún más con la normativa y hagan una lectura a la vez comprensiva y crítica de ella. Por tanto, más que un texto completo de la materia, estos apuntes constituyen una guía cuyo fin es aportar el carácter didáctico del que, en buena medida, la normativa carece por su propia naturaleza.

Alicante, junio de 2018

LOS AUTORES

1. CÁLCULO PLÁSTICO EN HORMIGÓN ARMADO

1.1. FUNDAMENTOS DEL CÁLCULO PLÁSTICO

1.1.1. Comportamiento plástico uniaxial

El cálculo plástico de estructuras se basa en la propiedad de algunos materiales de deformarse plásticamente, es decir, de asumir importantes deformaciones, mas allá de su comportamiento elástico, en un proceso que permite una gran absorción de energía de deformación, antes de alcanzarse la rotura final. Esta propiedad (ductilidad) da lugar a deformaciones permanentes y es particularmente importante en los aceros de construcción.

El comportamiento mecánico de un material dúctil como el acero se define a partir de un diagrama “tensión-elongación” (deformación unitaria), obtenido en ensayos de tracción uniaxial.

En la *Fig. 1-1* se indican los diversos diagramas σ - ε (\mathbf{f} - ε) típicos de un acero y sus simplificaciones. En general, dado que la tensión σ es difícil de conocer en cada instante del ensayo a consecuencia del efecto Poisson, se sustituye su valor en el diagrama por la fuerza unitaria \mathbf{f} , o relación entre la fuerza aplicada y la sección inicial. Es frecuente que los valores de \mathbf{f} sean citados como tensiones por simplificación semántica.

El comportamiento plástico de estructuras de barras se puede estudiar a nivel de elemento diferencial, de rebanada, de elemento lineal (barra) o de estructura. A nivel de elemento diferencial se admite, en principio, un diagrama \mathbf{f} - ε bilineal, como indica la *Fig. 1-1d*, válido para tensiones de tracción y de compresión. Posteriores variantes permiten considerar diagramas más complejos, pero más parecidos a la realidad: diagramas trilineales (*Fig. 1-1e*) y bilineales con endurecimiento en la región plástica (*Fig. 1-1f*), y así como variaciones para acciones de compresión en función de la posible inestabilidad del elemento.

1.1.2. Comportamiento plástico de la rebanada en flexión pura

El caso más ilustrativo del comportamiento plástico de estructuras de barras es el correspondiente a una rebanada en flexión pura. Requiere, en principio, tres hipótesis:

- a) Diagrama $\mathbf{f}\text{-}\varepsilon$ bilineal puro, en tracción y compresión.
- b) Hipótesis de Navier-Bernouilli, las secciones planas permanecen planas a lo largo del proceso de deformación, incluso en la región plástica.
- c) Ausencia de inestabilidades en las zonas comprimidas.

Los diferentes esquemas de los volúmenes de tensiones se indican en la Fig. 1-2.

El régimen elástico (proporcional y reversible) acaba en el estado de la Fig. 1-2b, cuando la fibra más tendida alcanza el “límite elástico” \mathbf{f}_y del material, con un momento de *agotamiento elástico* de valor:

$$\mathbf{M}_y = \frac{\mathbf{f}_y \mathbf{I}_g}{h} = \mathbf{W}_y \cdot \mathbf{f}_y$$

Con momentos de flexión mayores que \mathbf{M}_y , cierta parte de las fibras entran en la rama plástica del diagrama $\mathbf{f}\text{-}\varepsilon$ (Fig. 1-2c). La fibra neutra cambia de posición. En el límite se alcanza el estado tensional de la Fig. 1-2d, con deformaciones muy grandes (en comparación con ε_y) en las fibras extremas de la sección. Toda la sección trabaja con un valor de la tensión igual a \mathbf{f}_y , en compresión y en tracción. La necesidad de una resultante axial nula requiere que las áreas de tracción y de compresión (\mathbf{A}_1 y \mathbf{A}_2) sean iguales, es decir $\mathbf{A}/2$ cada una. La posición de la *fibra neutra plástica* (f.n.p.) es la que divide a la superficie total de la sección en dos áreas iguales. El momento flector *plástico* en esta situación vale:

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{f}_y \int_0^{b_1} \mathbf{a}_z \cdot \mathbf{z} \cdot dz + \mathbf{f}_y \int_0^{b_2} \mathbf{a}_z \cdot \mathbf{z} \cdot dz = \frac{\mathbf{A}}{2} (\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2) \mathbf{f}_y = \mathbf{W}_{pl} \cdot \mathbf{f}_y$$

siendo \mathbf{z}_1 y \mathbf{z}_2 las distancias a la f.n.p. de los centros de gravedad de las áreas de compresión (\mathbf{A}_1) y de tracción (\mathbf{A}_2).

Las tensiones en la sección ya no pueden incrementar este momento plástico que agota la capacidad de respuesta a flexión de la rebanada, mientras que las deformaciones ε de sus fibras pueden crecer indefinidamente. La sección gira alrededor de la fibra neutra plástica de forma indefinida, a momento constante \mathbf{M}_p . Esta situación se describe como la formación de una *rótula plástica*. Es frecuente la utilización de un parámetro geométrico defi-

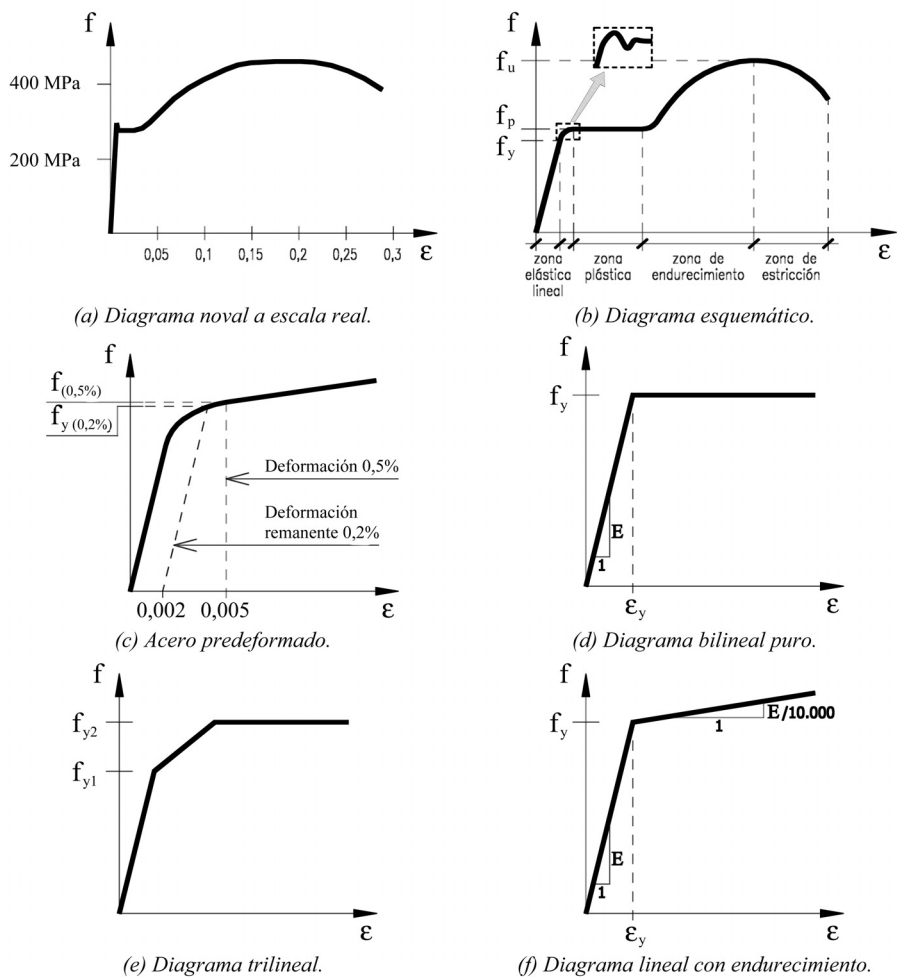


Fig. 1-1. Diagramas σ - ϵ típicos de un acero y sus simplificaciones.

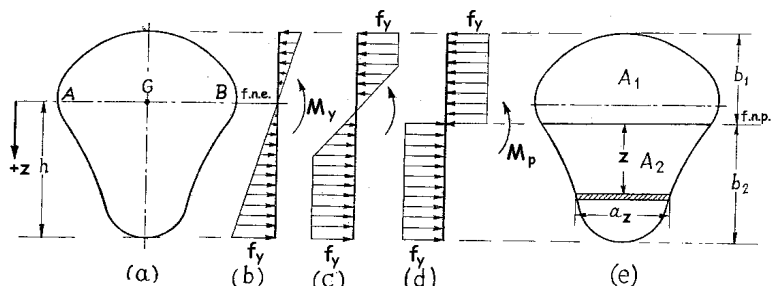


Fig. 1-2. Comportamiento plástico de una rebanada en flexión pura.

nido como la relación $\lambda = \mathbf{M}_p/\mathbf{M}_y$ ($\equiv \mathbf{W}_{pl}/\mathbf{W}_y$) que depende únicamente de la forma de la sección (recordemos que estamos en flexión pura), por lo que se denomina “factor de forma”.

La variación de los momentos flectores en el proceso de deformación de la rebanada puede representarse frente al valor de la curvatura χ que va adquiriendo la misma. La Fig. 1-3 representa el diagrama $\mathbf{M}-\chi$ de una sección rectangular de anchura unidad y canto \mathbf{h} .

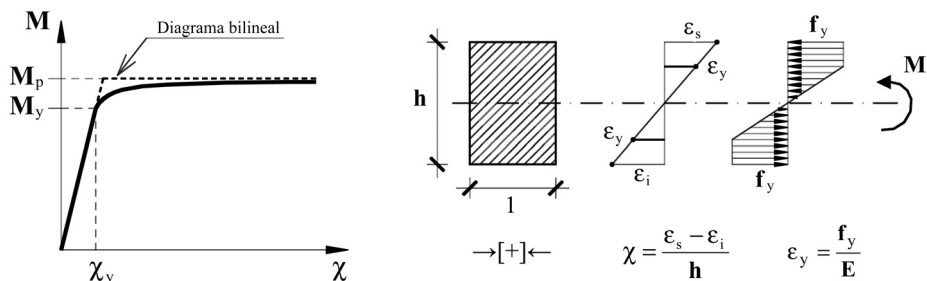


Fig. 1-3. Diagrama momento-curvatura de una sección rectangular.

Los momentos en la zona elástica valen $\mathbf{M} = \frac{\mathbf{h}^3}{12} \mathbf{E} \chi$ con $\chi \leq \chi_y$ siendo $\chi_y = \frac{2\epsilon_y}{\mathbf{h}}$.

Y en la zona plástica $\mathbf{M} = \left(3 - \frac{\chi_y^2}{\chi^2} \right) \frac{\mathbf{h}^2 \mathbf{f}_y}{12}$, expresión que tiende a $\mathbf{M} = \mathbf{M}_p = \frac{\mathbf{h}^2 \mathbf{f}_y}{4}$ para $\chi = \infty$.

El diagrama momento-curvatura así construido caracteriza el comportamiento a flexión de la sección. Para cada forma de sección puede determinarse un diagrama $\mathbf{M}-\chi$ que, en flexión pura, depende exclusivamente de la geometría de la misma. Los valores límites en el caso anterior, para $\chi = \infty$ son $\mathbf{M}_p = \lambda \mathbf{M}_y$, siendo en este caso $\lambda = 1,5$. Los valores de λ para distintas secciones pueden deducirse de la tabla 1.