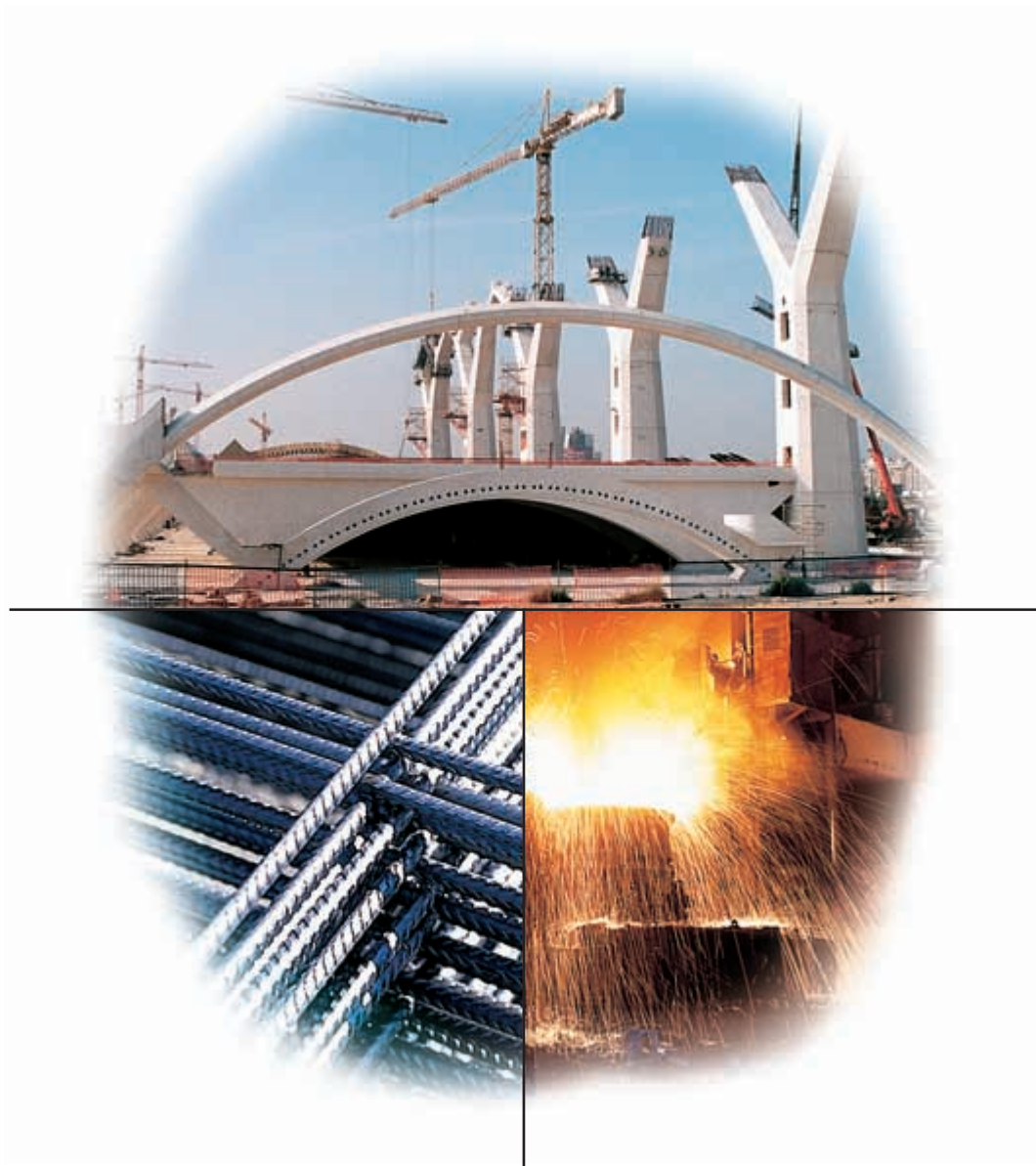


DUCTILIDAD CELSA

GARANTÍA DE SEGURIDAD



LA DUCTILIDAD

INTRODUCCIÓN

Cuando el término **ductilidad** se aplica al campo del hormigón armado, define un conjunto complejo de conceptos.

En el caso particular de los aceros para armaduras pasivas, la **ductilidad** se podría definir de una manera sencilla como la capacidad del acero para admitir deformaciones importantes una vez superado el límite elástico, manteniendo al mismo tiempo su capacidad mecánica.

INVESTIGACIÓN:

+ CALIDAD
+ TECNOLOGÍA

Este concepto, está pues, directamente relacionado con el comportamiento "**no lineal**" de las estructuras, en el cual la ductilidad desempeña un papel importante.

Hace ya mucho tiempo, se observó que la capacidad resistente real de los elementos hiperestáticos de acero era muy superior en relación con la obtenida mediante el cálculo basado en los principios de la **teoría lineal**. También se pudo detectar que, en este tipo de estructuras hiperestáticas, a partir de un momento dado y en las proximidades de su colapso, se manifestaban deformaciones muy importantes para incrementos pequeños de las cargas, apartándose, por tanto, del comportamiento lineal previsto teóricamente. Para justificar esta respuesta del acero,

comprobada en la práctica y distinta de la esperada, se pensó ya, que en el seno de ese material debía producirse un cierto fenómeno de **fluencia o plastificación**.

Posteriormente, con estudios más profundos de las relaciones tensión/deformación en los aceros, se constató este comportamiento no lineal de los mismos bajo ciertas condiciones.

En 1965 se publica el Boletín nº 52 del CEB donde se recogen los principios básicos del cálculo no lineal.

En la actualidad, esta problemática vuelve a estar en primer plano debido a la posibilidad de abordar determinados cálculos plásticos gracias a los conocimientos sobre el tema, a las prestaciones de los ordenadores actuales y a la inclusión, en casi todas las normas, de métodos indirectos de cálculo plástico en base a criterios de redistribución de los esfuerzos obtenidos mediante el cálculo lineal.



NECESIDAD DE LA DUCTILIDAD

La **resistencia** es una característica de los aceros requerida por el cálculo y recogida en la Instrucción EHE, dado que el acero colabora de una forma importante en el comportamiento mecánico del hormigón armado.

Desde el punto de vista de resistencia la Instrucción refleja sus exigencias sobre dos parámetros: el **límite elástico**, cuyo valor se emplea en este tipo de aceros para designarlos, y la **carga unitaria de rotura**.

Ahora bien, la resistencia es una característica necesaria pero no suficiente para que el comportamiento de los aceros para hormigón armado sea adecuado, ya que se requieren además unos requisitos de ductilidad. Esto es así, porque el hormigón es un material frágil (**no tiene ductilidad**) y no puede emplearse sin la participación del acero en aplicaciones estructurales. Esta es una de las razones del origen del hormigón armado o de la utilización conjunta del hormigón y el acero.

La exigencia de ductilidad en la estructura, que el hormigón no es capaz de cubrir, tiene que satisfacerla el acero, y por tanto, tiene que tener la ductilidad suficiente para que cada sección de hormigón armado tenga una capacidad de deformación adecuada, y para que los elementos estructurales dispongan de esta propiedad.

La poca ductilidad de que dispone el hormigón lo llevó a ser considerado desde el principio como el limitador de las rotaciones plásticas. Por el contrario, hasta hace poco tiempo se consideraba que la capacidad de rotación plástica era independiente del tipo de acero empleado, ya que se suponía que sólo el hormigón la limitaba y se atribuía suficiente ductilidad al acero para no limitar dichas rotaciones. La explicación a esto puede deberse a que, con anterioridad, los aceros empleados eran de baja resistencia y con unas características de ductilidad altas, producto de su composición química y de su proceso de fabricación. Más tarde, se introdujeron otros aceros muy poco dúctiles y con resistencias superiores, como los denominados **aceros laminados en frío**, (trefilados, tipo "T").

La ductilidad de un acero sometido a tracción es la capacidad para deformarse bajo carga sin romperse, una vez superado el límite elástico.

Después de una serie de estudios, se ha puesto de manifiesto que el nivel de ductilidad del acero influye y limita la rotación de las rótulas plásticas.

Además de los requisitos de resistencia y ductilidad, el hormigón armado precisa de unas características de adherencia para que el hormigón y el acero puedan trabajar solidariamente y la fisuración esté controlada.



La ductilidad es, por tanto, una característica del acero para hormigón armado muy deseable en todos los casos e imprescindible en las situaciones de estructuras sometidas a determinadas solicitaciones (sísmicas, dinámicas, de impacto, etc.), o en las que, por las hipótesis de cálculo, se han previsto redistribuciones de esfuerzos o no se pueden valorar las solicitaciones con la necesaria precisión, bien sea por la naturaleza de dichas acciones o por el insuficiente conocimiento sobre sus efectos en la estructura de que se trate.

En el caso particular de una estructura de hormigón armado sometida a solicitaciones sísmicas, su comportamiento está íntimamente relacionado con la ductilidad del acero ya que, en esta situación más que en ninguna otra, es fundamental la capacidad de adaptación de la estructura frente a solicitaciones excepcionales de esta índole, en las que, con mucha probabilidad se sobrepasan las fases elásticas del acero y se precisa de la máxima reserva posible de energía, proporcionada por una elevada ductilidad del acero.

De igual manera, en los casos apuntados anteriormente en donde las acciones son difíciles de cuantificar, es deseable proyectar estructuras con capacidad de resistir solicitaciones que, de manera excepcional, puedan superar ampliamente los valores adoptados en el cálculo sin que provoquen su colapso antes de alcanzar una deformación y fisuración importantes.

Una de las razones que ejemplifican la necesidad de la ductilidad es la posibilidad de efectuar la redistribución de momentos en

elementos continuos a flexión como vigas y forjados, lo cual permite un mayor aprovechamiento del hormigón y el acero, puesto que las zonas más solicitadas son capaces de transferir el esfuerzo a zonas colindantes menos solicitadas.

Cuando una estructura dúctil está próxima al colapso advierte de su situación experimentando grandes deformaciones e importante fisuración.

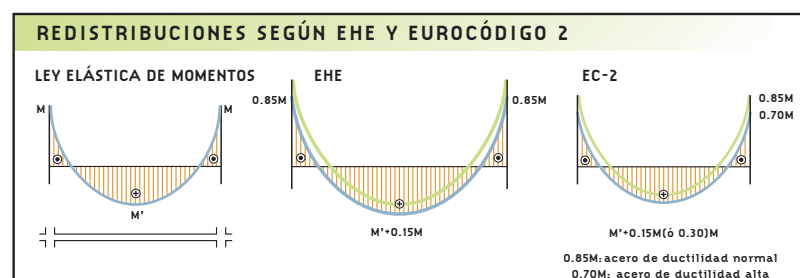
Si la estructura es frágil el colapso se alcanza sin previo aviso, con pequeñas deformaciones y fisuración reducida

La redistribución de momentos significa poder transferir momentos negativos a momentos positivos o viceversa, y está contemplada en nuestra Instrucción EHE y en la mayoría de los códigos (ACI, Eurocódigo 2, Código Modelo, etc).

Las redistribuciones importantes sólo pueden alcanzarse si el acero dispone de una elevada ductilidad.

El Eurocódigo determina la redistribución en función del grado de ductilidad del acero. (dos grados)

En cambio, en nuestra Instrucción EHE sólo se emplea un grado de ductilidad sin relacionarlo con el tipo de acero empleado.



PARÁMETROS QUE DEFINEN LA DUCTILIDAD

El comportamiento de los aceros está caracterizado por su diagrama de tensión/deformación correspondiente al ensayo de tracción, en el cual se manifiestan las variaciones de deformación en función de los incrementos de carga.

Si se analiza una curva típica tensión/deformación de un acero se pueden observar dos comportamientos:

fase elástica

Las deformaciones son proporcionales a las cargas aplicadas (rama recta) hasta alcanzar el **límite elástico** (f_y). Las deformaciones son recuperables si se descarga.

fase plástica

Una vez superado el límite elástico, las deformaciones no son proporcionales a las cargas y van aumentando con la carga unitaria hasta alcanzar el valor de la **carga máxima** (rama curva).

A partir de este momento, la deformación continúa con incrementos de carga muy pequeños, hasta que se produce la rotura de la probeta.

Las deformaciones son remanentes, es decir, no son recuperables.

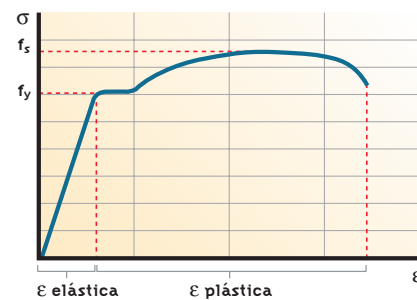
Durante el transcurso del ensayo, la sección inicial de la probeta disminuye hasta alcanzar el mínimo, cuando se rompe (estricción).

En los **aceros laminados en caliente**, la identificación del límite elástico en el diagrama es muy clara, dada la existencia del "escalón de cedencia", el cual es un tramo sensiblemente horizontal que marca el cambio entre el comportamiento elástico y el plástico.

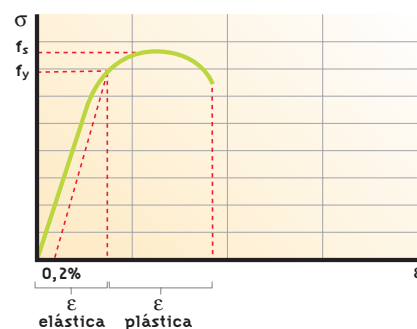
En cambio, los diagramas tensión/deformación de los aceros laminados en frío (trefilados) carecen de dicho escalón, lo cual dificulta la determinación del límite elástico. Por esta razón, la Instrucción EHE considera un límite elástico convencional correspondiente al valor de la tensión que produce una deformación remanente del 0.2 %. Su determinación sobre el diagrama se realiza trazando una paralela a la rama elástica desde este valor de deformación, y el punto de corte de esta recta con la curva tendrá por ordenada la tensión correspondiente al límite elástico.

Habitualmente, la ductilidad del acero se ha definido mediante dos parámetros obtenidos de la citada curva σ - ϵ y que son recogidos en la siguiente Instrucción EHE.

DIAGRAMA TENSIÓN/DEFORMACIÓN DE UN ACERO LAMINADO EN CALIENTE B 500 SD



GRÁFICA TENSIÓN/DEFORMACIÓN DE UN ACERO LAMINADO EN FRÍO B 500 T



Relación tensión de rotura-límite elástico (f_s / f_y).

Es un parámetro que relaciona la tensión de colapso del acero, que suele ser la tensión de rotura o máxima (f_s), con la tensión correspondiente al límite del comportamiento elástico real, siendo la más empleada el límite elástico del acero (f_y).

Este parámetro nos indica la reserva de resistencia que tiene el acero una vez iniciada su plastificación, y es llamado en ocasiones, endurecimiento.

Alargamiento de rotura sobre la base de 5 diámetros (A_5).

Este es el parámetro que indica la capacidad de deformación del acero y que, hasta ahora, se adoptaba como el alargamiento después de la rotura, medido sobre una longitud inicial de probeta igual a $5 \varnothing$. En otras normas la base de referencia es de $10 \varnothing$.

El modo de determinar el valor del parámetro A_5 es:

Una vez realizado el ensayo de tracción del acero y después de alcanzar la rotura, se juntan los dos trozos de la probeta para medir el alargamiento experimentado por el acero, considerando la zona de rotura dentro de la medición.

En la actualidad, se emplea otro parámetro de deformación alternativo al A_5 para definir la ductilidad, el cual no es recogido en la Instrucción EHE pero sí que lo está en múltiples

normas y códigos (Eurocódigo, Código Modelo, etc.), se denomina $\epsilon_{m\acute{a}x}$ y en terminología siderúrgica "AGT".

Se define por " $\epsilon_{m\acute{a}x}$ " o "AGT", al alargamiento uniforme experimentado con la carga máxima, o la deformación en tanto por ciento correspondiente a la tensión máxima f_s , en el diagrama (σ - ϵ).

Se mide en el gráfico tensión/deformación trazando la tangente horizontal a la curva, el punto obtenido tiene por ordenada la tensión máxima (f_s) y por abscisa el valor del "AGT".

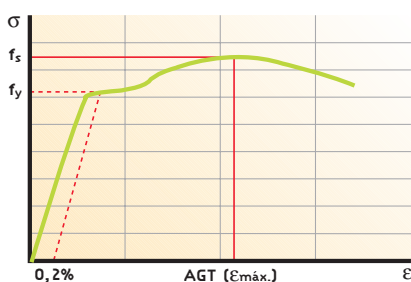
Así, tanto el Eurocódigo como nuestra Instrucción EHE exigen unos valores mínimos de los dos parámetros (f_s / f_y y A_5 respectivamente) que deben verificarse simultáneamente.

Actualmente se está estudiando el cuantificar la ductilidad mediante un único parámetro que permita la graduación de los aceros respecto a esta característica y la introducción del concepto de aceros de ductilidad equivalente.

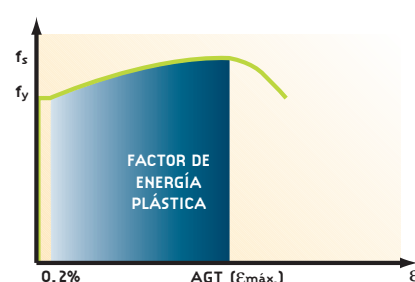
La ductilidad del acero está relacionada con el área limitada bajo la zona plástica de la curva tensión/deformación, área que representa la energía que dispone el acero para deformarse en régimen plástico hasta la rotura.

Este área o "factor de energía plástica" representa la resistencia y deformación que le resta al material después de alcanzar su límite elástico, y por lo tanto, es una medida de la energía disponible una vez ha plastificado el material.

DETERMINACIÓN DEL AGT SOBRE LA GRÁFICA (σ - ϵ)



GRÁFICA DEL "FACTOR DE ENERGÍA PLÁSTICA"



COMPARACIÓN DE DUCTILIDADES SEGÚN

LA CALIDAD DEL ACERO. GRADOS DE DUCTILIDAD

La Instrucción EHE no distingue explícitamente aceros de distintas ductilidades, aunque sí exige requisitos diferentes según el tipo de acero e independientemente de su empleo.

La Instrucción EHE contempla tres tipos de aceros:

Aceros trefilados obtenidos por laminación en frío (alambres corrugados), de acuerdo con la Norma UNE 36099:96, empleados exclusivamente en la fabricación de mallas electrosoldadas y armaduras básicas electrosoldadas.

Para este tipo de acero hay una única calidad, B 500 T, y las exigencias de ductilidad son netamente inferiores:

B 500 T:	$f_s / f_y \geq 1.03$	$A_5 \geq 8\%$
-----------------	-----------------------	----------------

Aceros soldables obtenidos por laminación en caliente, de acuerdo con la Norma UNE 36068:94.

En este grupo se contemplan dos calidades: B 500 S y B 400 S, y para cada una de ellas se exigen unos valores mínimos de los parámetros f_s / f_y y A_5 :

B 500 S:	$f_s / f_y \geq 1.05$	$A_5 \geq 12\%$
-----------------	-----------------------	-----------------

B 400 S:	$f_s / f_y \geq 1.05$	$A_5 \geq 14\%$
-----------------	-----------------------	-----------------

TIPO DE ACERO	GRADO DUCTILIDAD
TIPO T (B 500 T)	MUY REDUCIDA
TIPO S (B 400 S y B 500 S)	NORMAL
TIPO SD (B 400 SD y B 500 SD)	ESPECIAL O ALTA

Aceros soldables de especial ductilidad

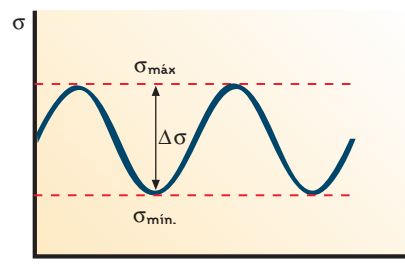
como novedad se recogen estos tipos de aceros soldables con características especiales de ductilidad, denominados B 400 SD y B 500 SD, definidos en la Norma UNE 36065 EX:1999, a los que se les exigen las siguientes características básicas:

B 500 SD:	$1.35 \geq f_s / f_y \geq 1.15$	$A_5 \geq 16\%$
	$f_{y(\text{real})} / f_{y(\text{nominal})} \leq 1.25$	
B 400 SD:	$1.35 \geq f_s / f_y \geq 1.20$	$A_5 \geq 20\%$
	$f_{y(\text{real})} / f_{y(\text{nominal})} \leq 1.20$	

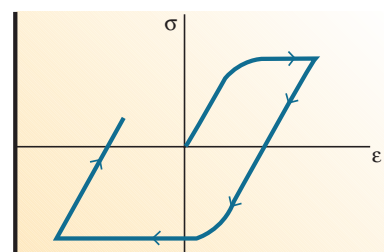
A estos aceros se les exigen además, un determinado comportamiento frente a las sollicitaciones de ciclo completo (**histéresis**), que les relaciona con el tipo de sollicitación generada en los sismos.

Además, todos los aceros deben superar un ensayo tipo de fatiga.

GRÁFICA DEL CICLO DE FATIGA



GRÁFICA DEL CICLO DE HISTÉRESIS



Cuanto mayor sea la relación f_s / f_y y el valor de $\epsilon_{m\acute{a}x}$ (AGT), mayor será la ductilidad del acero.

El **Eurocódigo 2** ("Proyecto de estructuras de hormigón"), sin embargo, sí clasifica los aceros en dos tipos según su ductilidad e independientemente de su origen o proceso de fabricación:

Aceros de alta ductilidad

$$f_s / f_y \geq 1.08 \quad \epsilon_{m\acute{a}x} \geq 5,0\% \quad (\text{valores característicos})$$

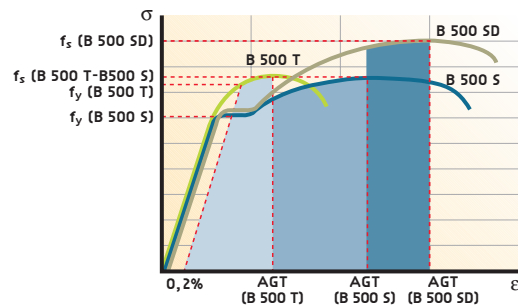
Aceros de ductilidad normal:

$$f_s / f_y \geq 1.05 \quad \epsilon_{m\acute{a}x} \geq 2,5\% \quad (\text{valores característicos})$$

El "factor de energía plástica" está asociado al área encerrada bajo la curva de tensión/deformación, permite comparar los niveles de ductilidad de distintos aceros de igual límite elástico.

A la vista de este diagrama, se puede observar la gran diferencia de ductilidades que hay entre un acero trefilado en frío, un acero laminado en caliente B 500 S y un acero B 500 SD de alta ductilidad.

GRÁFICA DEL FACTOR DE "ENERGÍA PLÁSTICA" DE UN ACERO TREFILADO EN FRÍO, LAMINADO EN CALIENTE Y DE ALTA DUCTILIDAD.



El Factor de energía plástica de un acero laminado en caliente TIPO SD es mayor que el de un acero laminado en caliente TIPO S y mucho mayor que el de un acero trefilado en frío TIPO T.





GRUPO CELSA Polígono Industrial San Vicente, s/n. - 08755 CASTELLBISBAL (Barcelona) España
Tel. +34 93 773 05 00 - Fax +34 93 773 05 02 | E-mail: sales@gcelsa.com | <http://www.gcelsa.com>