

## Análisis de secciones mixtas

### 5.1. Introducción

Este capítulo tiene una filosofía similar al capítulo 4, aunque dirigido al análisis de secciones mixtas hormigón – acero. Se pretende verificar, mediante el modelo desarrollado, que se pueden capturar determinados fenómenos genuinos de las secciones metálicas como puede ser la inestabilidad por abolladura de un elemento comprimido o el efecto de la liberación a tracción de las fibras de acero que trabajen en este régimen de tensiones. Ambos fenómenos bien conocidos, pero debido a las limitaciones del cálculo manual deben emplearse formulaciones sencillas del lado de la seguridad que no permiten el desarrollo total de la resistencia del material, y por consiguiente, un desaprovechamiento y uso poco económico del mismo. Es en este ámbito donde el software desarrollado, por rapidez de entrada de datos y la generalidad con la que trata cualquier tipo de sección, tiene su más clara e importante aplicación.

Para ello, se han elegido una serie de secciones que por sus características geométricas y su especial interés tanto práctico como teórico, merecen ser incluidas en este trabajo para describir los fenómenos que se pretenden analizar con el programa. En este contexto, las secciones empleadas en los apartados 5.2 y 5.3 se emplean frecuentemente tanto en edificación (5.2) y en la construcción de puentes (5.3).

En cambio, la sección presentada en el apartado 5.4, patentada bajo la marca NEX-TEN, se usa en casos muy específicos (entradas de parking en los que no hay pilares que soporten el forjado y éste deba soportar la totalidad de las cargas sin apoyos intermedios) cuya concepción es por etapas con, al menos, dos procesos de pretensado distintos. Con esta sección se pretende realizar un cálculo rutinario de las pérdidas de pretensado, estado tenso – deformacional de las fibras extremas, respuesta última en rotura y algunas comprobaciones de interés que por las características de la sección acarrearían un volumen de cálculos y de tiempo incompatibles con el disponible en la mayoría de oficinas de proyectos, las cuáles deben invertir un porcentaje muy bajo del tiempo total destinado a la concepción del proyecto para no quedar fuera de la oferta del mercado.

## 5.2. Comportamiento frente a momentos negativos y positivos de una sección mixta con alas metálicas clase III

### 5.2.1. Comportamiento frente a momentos negativos

Se emplea el programa para estudiar la influencia de la abolladura y la capacidad de liberar tracción del acero estructural en la ductilidad de una sección sometida a momentos negativos. La sección estudiada se presenta en la figura 5.1 y consta de una sección parcial metálica soldada en taller y de una losa de hormigón con una capa de acero pasivo. Se considera que el ala inferior de la sección metálica es un elemento sensible a sufrir problemas de abolladura por se de clase III, según la clasificación que establece la RPX-95 para elementos de acero estructural comprimidos.

La sección metálica se compone de un alma soldada a dos alas cuyas características geométricas son:

	<i>Ala inferior</i>	<i>Alma</i>	<i>Ala superior</i>
<i>Ancho (mm)</i>	400	1000	200
<i>Espesor (mm)</i>	10	10	10

Tabla 5.1. Dimensiones de las secciones parciales que conforman el perfil metálico

El acero empleado para el perfil es un S-355 JR con un módulo elástico de 210 GPa. La losa de hormigón es rectangular 1,50x0,25 m<sup>2</sup> en calidad 30 MPa. El baricentro de la capa de acero se sitúa a 1,25 m de la fibra inferior de la sección y está formada por 12 $\Phi$  20 de acero corrugado de alta ductilidad  $f_{yk} = 500$  MPa y 200 GPa de módulo elástico.

Una representación de la geometría de la sección es la siguiente:

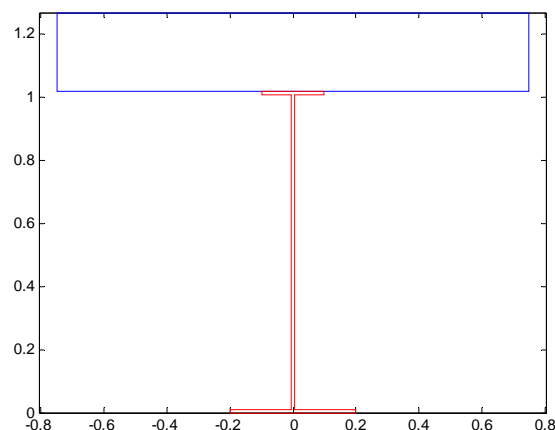
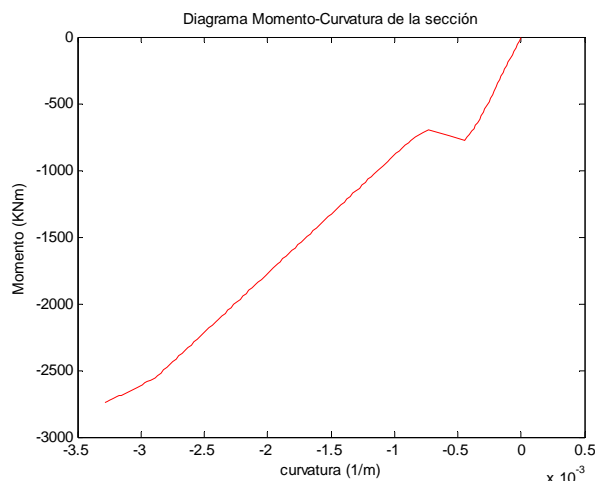


Figura 5.1. Sección mixta hormigón – acero con perfil soldado en taller

Si se analiza la sección aceptando que el acero estructural puede recoger tracciones (las fibras traccionadas de acero aceptan tensiones de tracción) se tiene un comportamiento frágil de la sección debido a un fallo prematuro de la misma por abolladura del ala inferior de la sección metálica.



**Figura 5.2. Diagrama momento – curvatura de la sección 5.1 aceptando que el acero absorbe tensiones de tracción**

Nótese el fenómeno del *snap-through*<sup>1</sup> que se da cuando la sección parcial de hormigón fisura. En realidad, el comportamiento de la sección al fisurar no es tan brusco porque se activan los mecanismos de adherencia hormigón-acero que hacen que se suavice este fenómeno. No obstante, a efectos de diseño y de cálculo de la sección no tiene mayor interés un estudio más detallado como puede encontrarse en otros trabajos como [8].

La sección agota debido a que en la fibra más comprimida del ala inferior se alcanza la deformación máxima permitida para elementos de acero comprimidos clase III ( $1,20\varepsilon_{yk}$ ). De este modo, se da una rotura frágil de la sección con un mal aprovechamiento del resto de los materiales de la sección.

$M_{\text{último}}$ (KNm)	$\chi_{\text{última}}$ (m <sup>-1</sup> )
2739,90	0,00328

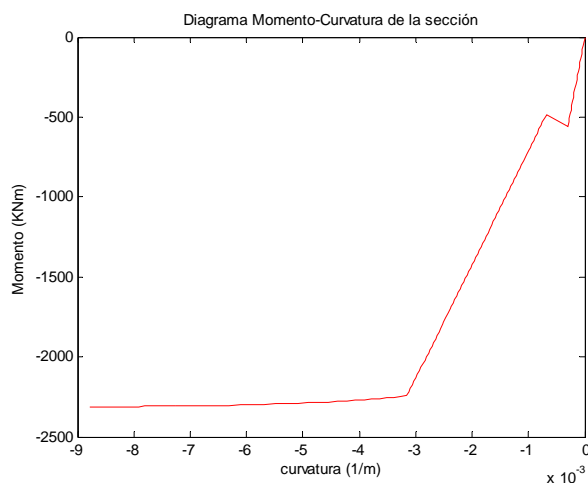
**Tabla 5.2. Capacidad resistente y deformacional de la sección en rotura aceptando que el acero absorbe tracciones**

El siguiente análisis se efectúa sobre la misma sección pero suponiendo que el acero estructural no puede absorber tracciones. Este comportamiento se puede lograr conectando los materiales adecuadamente y se emplea a menudo en uniones viga – pilar

<sup>1</sup> En la literatura inglesa se le atribuye este nombre a la disminución de rigidez instantánea que sufre el hormigón al fisurar y que puede ser capturada en los diagramas de Momento-Curvatura que se calculan con control de deformaciones, tal como se ha implementado en este programa.

a las que se quiere proporcionar en dicha unión la ductilidad necesaria para evitar las roturas frágiles bajo la acción de un posible sismo...

Para ver el comportamiento en rotura considerando esta salvedad se ha reproducido el diagrama momento – curvatura representado en la figura 5.3.



**Figura 5.3. Diagrama momento – curvatura de la sección 5.1 aceptando que el acero no absorbe tracciones**

$M_{\text{último}}$ (KNm)	$\chi_{\text{última}}$ (m <sup>-1</sup> )
2311,20	0,00878

**Tabla 5.3. Capacidad resistente y deformacional de la sección en rotura aceptando que el acero no absorbe tracciones**

El comportamiento de la sección bajo estas circunstancias proporciona una ganancia de un 62,64% en ductilidad respecto al caso anterior a costa de una pérdida del 15,62% de la capacidad última, lo que puede resultar interesante en casos en los que la ductilidad y el preaviso del fallo prevalecen frente a una mayor resistencia global de la sección.

Puede concluirse de este análisis que el mismo material empleado de distintas formas conduce a soluciones estructurales completamente distintas en su comportamiento. El detalle con tensiones de tracción liberadas resulta además sencillo de ejecutar (debido a que no deben coserse las tensiones transmitidas por el acero tras la placa de anclaje en el pilar, por ejemplo) y con un comportamiento más dúctil (lo que siempre es deseable).

Podrían haberse tenido en cuenta las tensiones residuales del acero estructural, que habrían penalizado fundamentalmente el caso de unión capaz de transmitir momentos; donde se hubiese reducido tanto el momento último como la curvatura, no así en el segundo caso. La inclusión de este fenómeno puede realizarse haciendo una ligera modificación de la ecuación constitutiva del acero estructural y que queda como trabajo pendiente para futuras revisiones y mejoras del programa.

### 5.2.2. Comportamiento frente a momentos positivos

El comportamiento frente a momentos positivos de la sección 5.1 en simple acción mixta es también interesante de analizar sobre todo desde el punto de vista de la construcción evolutiva. Se va a estudiar el comportamiento de la sección presentada para el análisis anterior comparando los diagramas momento – curvatura teniendo en cuenta la construcción apeada y distintos casos de presolicitación de la sección parcial metálica en el caso de construcción no apeada.

En el caso de construcción apeada se obtiene un diagrama en el que ninguno de los materiales se halla presolicitado y constituye la curva de máxima resistencia que puede alcanzar la sección. La construcción no apeada induce un estado tenso – deformacional previo que solo afecta a la sección de acero estructural y que puede ser beneficioso para la sección mixta si se goza de la ductilidad suficiente en rotura, aunque este efecto si tiene una gran influencia en servicio dado que las deformaciones de la estructura son mayores. No obstante, solicitar en exceso la sección de acero (provocando plastificaciones o abolladuras en la misma) sí puede mermar sensiblemente la capacidad última de la sección, cambiando el modo de rotura incluso (por compresión en el acero en vez de por tracción del mismo).

- Sección exclusivamente metálica (sin existir la losa de hormigón) donde puede observarse el comportamiento frágil de la misma.
- Sección mixta en el caso de construcción apeada donde el comportamiento cambia drásticamente pasando a ser de una ductilidad elevada respecto a).
- Sección mixta construida no apeada la cual la sección metálica se ve sometida a un momento final del proceso constructivo igual al 30% de su momento último.
- Sección mixta construida no apeada la cual la sección metálica se ve sometida a un momento final del proceso constructivo igual al 45% de su momento último.
- Sección mixta construida no apeada la cual la sección metálica se ve sometida a un momento final del proceso constructivo igual al 55% de su momento último.

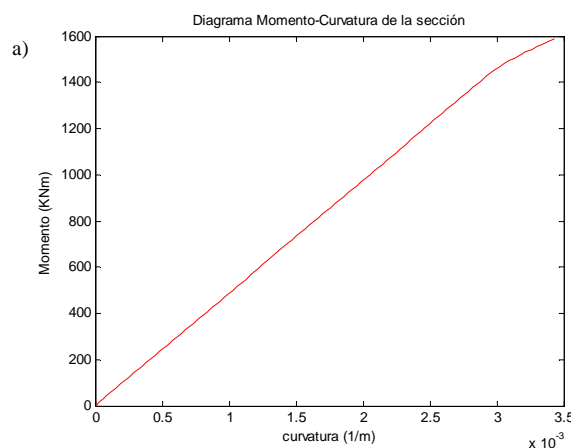


Figura 5.4. Diagrama Momento-Curvatura de la sección metálica

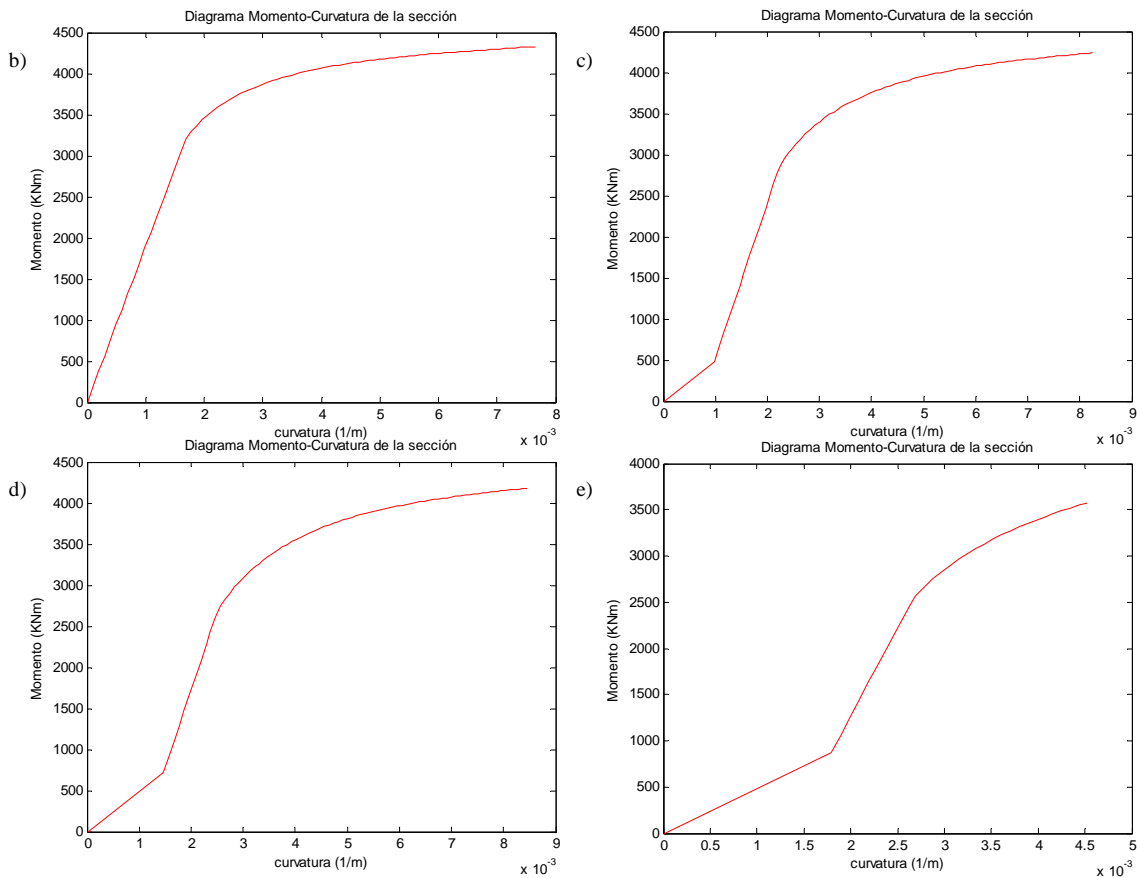


Figura 5.5. Diagramas Momento-Curvatura para la sección mixta según el proceso constructivo

	Momento último (kNm)	Curvatura última (m <sup>-1</sup> )
<i>Apeado</i>	4326,76	0,0065
30% $M_{su}$	4237,33	0,0083
45% $M_{su}$	4179,52	0,0085
55% $M_{su}$	3573,71	0,0045

Tabla 5.4. Momentos y Curvaturas de la sección según el proceso constructivo

Donde  $M_{su}$  es el momento de agotamiento de la sección metálica aislada y que sirve de referencia para los demás casos, pues para ésta la rotura es frágil debido a un mecanismo de abolladura por compresión del ala superior alcanzando un momento de 1589,76 kNm y una curvatura de 0,0034 m<sup>-1</sup>.

Se desprende de la tabla 5.4 que la sección mixta analizada ofrece su máxima capacidad resistente cuando la estructura se construye de forma apeada ya que no existe presolicitación de la sección parcial de acero estructural. En el caso de la construcción no apeada, con una sollicitación no superior del 50% de  $M_{su}$  al acabar el proceso constructivo, la reducción del momento último de la sección mixta no supera el 4% a costa de un aumento de la ductilidad global de la pieza de un 30%; en cambio, a partir

de una presolicitación del 50% de  $M_{su}$ , la rotura se da de forma prematura reduciéndose la resistencia última y la ductilidad global de la pieza. No obstante, en todos estos mecanismos analizados, el fallo de la sección es debido a la deformación de tracción excesiva ( $5\varepsilon_{yk}$ ) del ala inferior del perfil metálico, pues al estar el ala superior conectada con la losa de hormigón la posibilidad de rotura por abolladura no se contempla a no ser que la presolicitación sea del 100% de  $M_{su}$ .

### 5.2.3. Conclusiones:

1. Las uniones de vigas mixtas a pilares realizadas con liberación de tracciones en el acero estructural resultan de una ductilidad muy superior al caso en que se recojan dichas tracciones. Este detalle es por lo tanto preferible al ser más sencillo de ejecutar y presentar un mejor comportamiento.
2. Las secciones mixtas construidas de manera no apeada presentan curvaturas superiores a las de secciones apeadas aunque su momento último apenas varía siempre y cuando la sección metálica no haya sido presolicitada en exceso durante la construcción (abolladuras y plastificaciones). Luego este tipo de presolicitación de la sección parcial de acero estructural es beneficiosa en estado límite último si se realiza de forma acotada a cambio de sufrir unas mayores deformaciones en servicio que podrán aceptarse según el nivel de prestaciones y requerimientos estéticos para los que se proyecta la estructura.

### 5.3. Doble acción mixta

El aumento de la ductilidad de la sección sometida a momentos negativos puede lograrse mediante una solución en doble acción mixta donde se emplea una cabeza de compresión formada por una losa inferior de hormigón. El incremento logrado en la capacidad a compresión, junto con la anulación de la inestabilidad en la chapa comprimida, permite alcanzar momentos negativo superiores a los de una sección en simple acción mixta con un coste muy inferior y, todavía más importante, con una transformación del comportamiento frágil de la sección a un comportamiento dúctil.

Se pretende estudiar dicho comportamiento en una sección compuesta cuya sección metálica tiene la siguiente geometría:

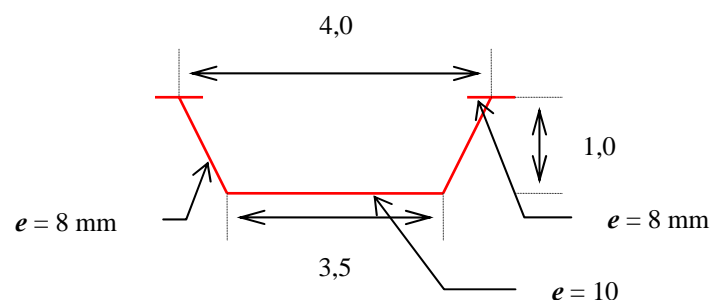


Figura 5.6. Dimensiones sección parcial metálica

En la figura 5.7 se representan las secciones mixtas que se van a analizar. La primera, que trabaja en simple acción mixta, se completa *in situ* con una losa superior de 9,5 metros de ancho y 0,25 metros de espesor de hormigón HA – 30 más una capa de  $\Phi 16$  a 20 centímetros de acero B500SD a 1,20 metros de la fibra inferior. A la segunda, además de estos complementos, se le añade otra losa de baso con el mismo hormigón y de 3,5 metros de anchura y 0,25 de espesor.

En ambos casos la losa inferior metálica es de clase III, luego es potencialmente inestable frente a tensiones de compresión elevadas. Sin más preámbulos se presentan los resultados obtenidos de este análisis.

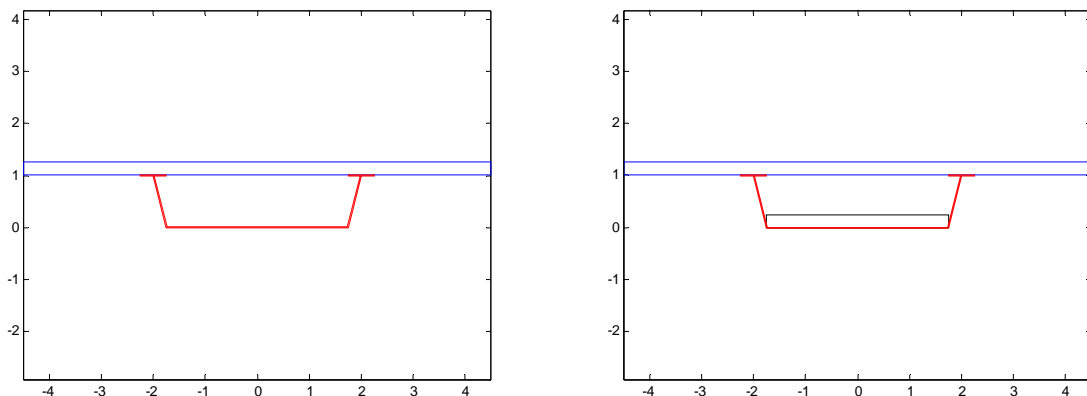


Figura 5.7. Secciones aptas para el trabajo en simple y doble acción mixta

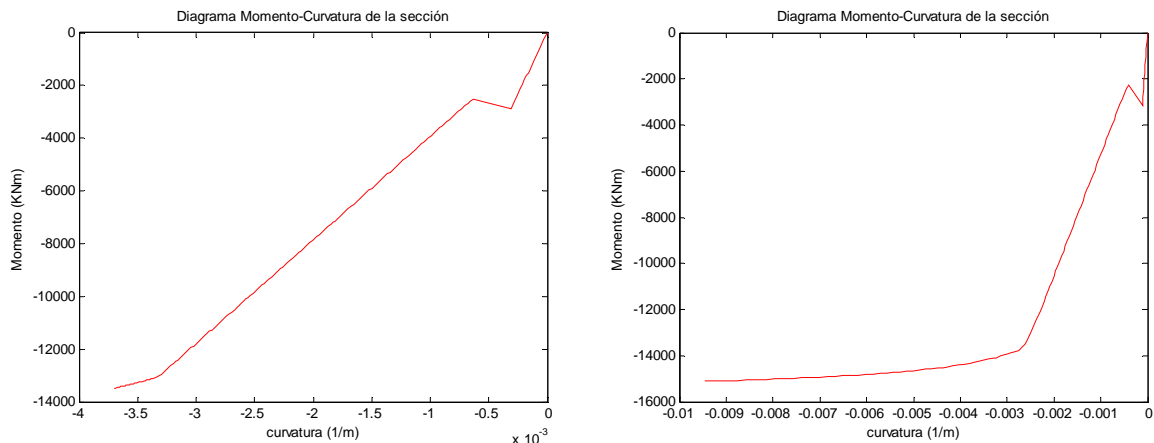


Figura 5.8. Diagramas Momento-Curvatura para la simple y doble acción mixta

	Momento último (KNm)	Curvatura última (m-1)
<i>Simple acción mixta</i>	13789,32	-0,0037
<i>Doble acción mixta</i>	15281,53	-0,0096

Tabla 5.5. Respuesta resistente y deformacional de las dos secciones en rotura



El mecanismo de rotura para la sección en simple acción mixta es frágil y por inestabilidad local de la chapa comprimida; en cambio, para la sección en doble acción mixta es dúctil con fallo por tracción excesiva (1%) de la capa de acero embebida en la losa superior de hormigón.

## **Conclusión**

Las secciones en doble acción mixta empleadas en zonas de momentos negativos muestran un comportamiento superior al de secciones en simple acción mixta, transformando además el comportamiento de la sección, frágil en simple acción mixta, a un comportamiento con una elevada ductilidad. La sección en simple acción mixta agota prematuramente por compresión excesiva y abolladura del panel comprimido, en cambio, la otra sección supera la inestabilidad gracias al trabajo conjunto con el hormigón de la losa inferior que recoge las compresiones y evita el fenómeno de la inestabilidad dándose la rotura por tracción excesiva del acero pasivo de la losa superior.

## **5.4. Presolicitud en taller mediante pretensado. Análisis de una sección fabricada con el sistema NEX – TEN**

### **5.4.1. Introducción**

El sistema NEX – TEN es un procedimiento de pretensado en taller mediante cables, barras, o alambres, de elementos mixtos constituidos por un perfil metálico de alas relativamente reducidas respecto al conjunto y que incluye como refuerzos armaduras pasivas, soldadas o no a dicho perfil .

La cabeza superior y eventualmente, el alma, se hormigonan posteriormente in situ para formar la sección mixta completa. Puede completarse en ocasiones la presolicitud con un postesado, normalmente introducido después de la aplicación de cargas permanentes al conjunto. Todo ello da lugar a una gran capacidad portante; operatividad y flexibilidad, en cuanto a dimensiones, empleo de secciones híbridas...

### **5.4.2. Definición de la sección y objetivos**

En la figura 5.9 se propone un ejemplo de sección mixta concebida bajo el sistema NEX – TEN con la que se quiere realizar un análisis, empleando el modelo implementado, de la influencia de la presolicitud en taller mediante el pretensado, del hecho de considerar el apeo o no apeo de la estructura en fase constructiva, las mejoras frente a fisuración mediante la introducción de un postesado “in situ” y las pérdidas de pretensado teniendo en cuenta ambos procedimientos constructivos. También se quiere

conocer la respuesta última y estado tenso – deformacional a la que se ve sometida la sección bajo estas consideraciones.

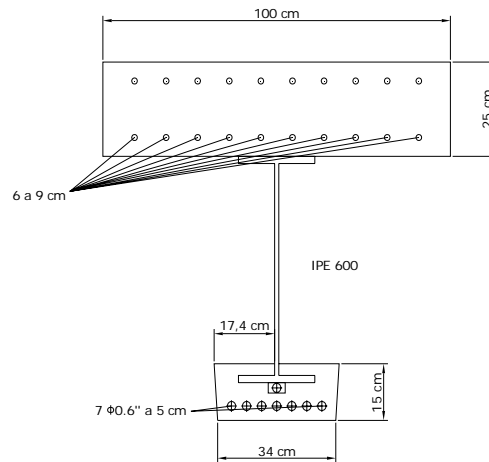


Figura 5.9 Sección mixta pretensada en taller con losa de compresión *in situ*

Los materiales empleados, la historia de cargas y tiempos característicos se detallan a continuación:

Materiales	
<i>Hormigón viga</i>	$f_{ck} = 40$ MPa
<i>Hormigón losa</i>	$f_{ck} = 25$ MPa
<i>Acero pasivo</i>	$f_{yk} = 355$ MPa
<i>Módulo de Young</i>	$E = 210$ GPa
<i>Acero pretensado</i>	1700/1900 MPa
<i>Tensión de tesado</i>	1400 MPa
<i>Acero postesado</i>	1700/1900 MPa
<i>Tensión de postesado</i>	1400 MPa
<i>Módulo elástico cordones</i>	$2 \cdot 10^5$ MPa
<i>Relajación a las 1000 h</i>	2%
<i>Relajación a 50000 días</i>	6%
<i>Humedad relativa</i>	70%

Tabla 5.6. Materiales y variables reológicas

El armado de la sección se distribuye de la siguiente forma:

<i>Capa superior losa</i>	10 $\Phi$ 16 a 75 cm
<i>Capa inferior losa</i>	10 $\Phi$ 16 a 90 cm

Tabla 5.7. Armado pasivo de la losa

<i>Pretesa viga</i>	7 $\Phi$ 0,6" a 5 cm
<i>Postesa viga</i>	3 $\Phi$ 0,6" a 11 cm

Tabla 5.8. Armadura activa de la viga

Los tiempos característicos y las cargas:

	Tiempos característicos (días)	
	Sin apeo	Con apeo
<i>Destesado</i>	7	7
<i>Hormigonado losa</i>	28	28
<i>Fraguado losa</i>	31	31
<i>Cargas muertas</i>	48	48
<i>Descimbrado</i>	-	50
<i>Tesado armadura postesa</i>	54	54
<i>Sobrecarga a corto plazo</i>	90	90
<i>Sobrecarga a largo plazo</i>	50000	50000

Tabla 5.9. Tiempos característicos en los que aparecen las cargas o cambian las condiciones de contorno

	Cargas
$M_p$ propio viga	100 KNm
$M_p$ propio losa	150 KNm
$M_{cargas\ muertas}$	200 KNm
<i>Sobrecarga a corto plazo</i>	300 KNm
<i>Sobrecarga a largo plazo</i>	300 KNm

Tabla 5.10. Historia de cargas que solicita a la sección

### 5.4.3. Presentación de los resultados

Con el valor propuesto para los parámetros que intervienen en este análisis y las condiciones de vinculación consideradas en cada caso se han obtenido los siguientes resultados:

#### 5.4.3.1. Estados tensionales para la sección no apeada

Hormigón viga	Tiempo (días)					
	7-28	28-48	48-54	54-50000	Sob. a corto	Sob a largo
<i>Fibra inf.</i>	13,0/7,6	1,8/2,3	0,1/0,3	5,8/-0,6	-0,1	-1,7
<i>Fibra sup.</i>	10,1/5,4	3,0/2,5	0,8/1,0	5,5/-0,0	0,3	-2,1

Tabla 511. Tensiones (MPa) en el hormigón prefabricado

Hormigón losa	Tiempo (días)					
	7-28	28-48	48-54	54-50000	Sob. a corto	Sob. a largo
<i>Fibra inf.</i>	-	-/-0,4	-0,1/-0,1	0,5/-1,5	0,7	-1,3
<i>Fibra sup.</i>	-	-/-0,2	0,9/0,7	-0,1/-1,1	2,2	1,7

Tabla 5.12. Tensiones (MPa) en el hormigón *in situ* de la losa de compresión

Perfil	Tiempo (días)					
	7-28	28-48	48-54	54-50000	Sob. a corto	Sob. a largo
<i>Fibra inf</i>	83,0/114,5	90,4/88,3	75,7/73,9	107/123,3	91,2	87,2
<i>Fibra sup</i>	-3,3/-13,4	57,4/66,0	68,4/71,5	76,9/117,8	87,6	120,9

Tabla 5.13. Tensiones (MPa) en el perfil laminado

Nótese que, en la situación de no apeo de la estructura, la introducción del postesado mejora sensiblemente el estado tensional de la sección prefabricada de hormigón ya que se pasa de un estado próximo a la descompresión a otro en el que esta sección parcial se halla totalmente comprimida. No obstante, tras el tesado de los cables de postesado, las tensiones de tracción en la fibra superior de la losa se ven incrementadas pero el cumplimiento de los requisitos de fisuración se ven sobradamente cumplidos.

#### 5.4.3.2. Estados tensionales para la sección apeada

Hormigón viga	Tiempo (días)						
	7-28	28-48	48-50	50-54	54-50000	Sob. a corto	Sob. a largo
<i>Fibra inf.</i>	13,0/7,6	7,6/6,3	6,3/6,2	0,1/1,6	7,1/-0,2	0,6	-2,0
<i>Fibra sup.</i>	10,1/5,4	5,4/4,4	4,4/4,4	0,5/1,0	5,5/-0,3	0,5	-2,2

Tabla 5.14. Tensiones (MPa) en el hormigón prefabricado

Hormigón losa	Tiempo (días)						
	7-28	28-48	48-50	50-54	54-50000	Sob. a corto	Sob. a largo
<i>Fibra inf.</i>	-	-/-0,4	-0,4/-0,4	0,4/0,4	1,0/-1,1	1,2	-0,8
<i>Fibra sup.</i>	-	-/-0,2	-0,2/-0,2	2,3/2,0	1,2/-0,2	3,3	2,5

Tabla 5.15. Tensiones (MPa) en el hormigón *in situ* de la losa de compresión

Perfil	Tiempo (días)					
	7-28	28-48	48-54	54-50000	Sob. a corto	Sob. a largo
<i>Fibra inf</i>	83,0/114,5	114,5/119,6	119,6/120,0	90,8/86,3	102,8	103,1
<i>Fibra sup</i>	-3,3/-13,4	-13,4/-6,1	-6,2/-5,7	0,1/4,8	23,2	60,3

Tabla 5.16. Tensiones (MPa) en el perfil laminado

En esta situación las condiciones tensionales y deformacionales mejoran respecto al caso no apeado, ya que excepto el peso propio de la viga y la fuerza del pretensado, las demás cargas se ven soportadas por la sección completa, razón por la cual, las condiciones de servicio se ven mejoradas en comparación con la situación no apeada. Por ejemplo: la tensión en la fibra inferior de la sección prefabricada de hormigón se descomprime tras la aparición de la primera sobrecarga en el caso de no apeo mientras que para la situación apeada se mantiene comprimida.

### 5.4.3.3. Pérdidas de pretensado

En las siguientes tablas se resumen las pérdidas de fuerza de pretensado y postesado que se obtienen tras el análisis evolutivo de la sección según las siguientes consideraciones:

- El valor de la tensión en los cables se ha tomado con un coeficiente de mayoración igual a la unidad<sup>2</sup>.
- Las pérdidas que se obtienen son debidas al acortamiento elástico al transferir “*instantáneas*”, la relajación del mismo acero y las producidas por la retracción y fluencia de los hormigones que forman parte de la sección.
- Las pérdidas se conciben como un valor integrado de las que se dan en cada capa de pretensado. El programa analiza la sección fibra a fibra por lo que se obtiene una deformación de origen atensional en cada capa de pretensado lo que implica que cada unidad de pretensado tiene su propia pérdida pero esta no es una forma clara de presentar los resultados.

	Instantáneas	Corto plazo	Largo plazo
<i>Armadura pretesa</i>	8,6%	11,9%	15,1%
<i>Armadura postesa</i>	3,3%	5,6%	9,3%

Tabla 5.17. Pérdidas de pretensado bajo la configuración sin apeada de la estructura

	Instantáneas	Corto plazo	Largo plazo
<i>Armadura pretesa</i>	8,6%	12,4%	15,5%
<i>Armadura postesa</i>	3,3%	5,5%	9,4%

Tabla 5.18. Pérdidas de pretensado bajo la configuración apeada de la estructura

<sup>2</sup> El mismo programa puede rehacer el análisis con los coeficientes de seguridad adecuados para comprobar los estados límite de servicio referentes a la fisuración y a la microfisuración.

Obsérvese que las pérdidas instantáneas<sup>3</sup> debidas a la transferencia del pretensado son idénticas<sup>4</sup> debido a que la configuración de cargas y de materiales en ambas secciones es igual en ese instante. En cambio las pérdidas a corto y a largo plazo son distintas ya que incorporan en su valor el efecto de la construcción por etapas. Para la situación apeada son mayores en todos los casos debido a que la deformación por fluencia asociada a la transferencia del pretensado no se ve contrarrestada por la aplicación del peso propio de la losa del mismo modo que en la situación no apeada, donde las deformaciones de tracción son mayores debido a que dicha carga es asimilada por menor sección resistente que en el caso totalmente apeado.

#### 5.4.3.4. Capacidad resistente

Haciendo uso del diagrama de pivotes específico para esta sección y utilizando las ecuaciones constitutivas correspondientes para la verificación de los ELU y con el pretensado a largo plazo se obtiene el diagrama de interacción de la sección Fig. 5.10. Todos los pares de esfuerzos ( $N$ ,  $M$ ) que están dentro de la superficie de interacción pueden ser resistidos por la sección pero para este caso concreto interesa conocer un punto singular, el que corresponde a la flexión pura  $N_{ext} = 0$  con el que se obtiene el  $M_u$  que puede ser resistido por la sección atendiendo a un cálculo anelástico con control de deformaciones máximas de los materiales.

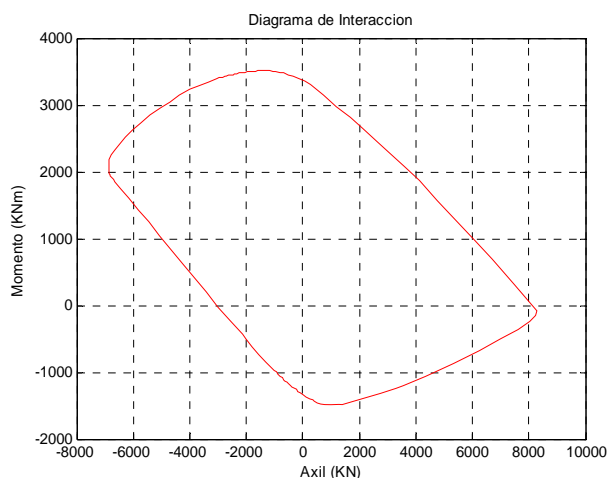


Figura 5.10. Diagrama de interacción de la sección

Se ha representado únicamente uno de los diagramas de interacción porque ambos son iguales en forma y valores excepto la pequeña diferencia que hay en la predeformación inducida debida al efecto del pretensado a largo plazo entre ambas secciones.

<sup>3</sup> El programa integra las pérdidas diferidas por relajación y penetración de cuñas en el valor de las pérdidas instantáneas. Para conocer el valor de cada uno de estos sumandos basta con ejecutar el programa y consultar el listado de resultados donde se hace un análisis más detallado de cada pérdida.

<sup>4</sup> Las pérdidas instantáneas de postesado no tienen porque coincidir ya que la evolución de las secciones es distinta, pero para este caso a parecido ser insensible, con la precisión decimal tomada, a este hecho.

Respuesta última con la viga no apeada:

	Hormigón viga	Hormigón losa
<i>Fibra inf.</i>	2,4 mm/m	-1,2 mm/m
<i>Fibra sup.</i>	1,6 mm/m	-2,6 mm/m

Tabla 5.19. Deformaciones en rotura para la sección no apeada

$$M_{\text{último}} = 3368,03 \text{ KNm.}$$

$$\chi_u = 0,00533 \text{ m}^{-1}.$$

Respuesta última con la viga apeada:

	Hormigón viga	Hormigón losa
<i>Fibra inf.</i>	2.3 mm/m	-1.1 mm/m
<i>Fibra sup.</i>	1.5 mm/m	-2.5 mm/m

Tabla 5.20. Deformaciones en rotura para la sección apeada

$$M_{\text{último}} = 3353.48 \text{ KNm.}$$

$$\chi_u = 0.00501 \text{ m}^{-1}.$$

Véase que los resultados son poco sensibles a la variación de la fuerza de pretensado existente entre ambos casos, de hecho la rotura se produce por flexocompresión excesiva en la losa de hormigón en las dos situaciones constructivas y la capacidad resistente no difiere en más de un 0,4%.

#### 5.4.4. Conclusiones

- Se ha visto un método de presolicitación en taller de la sección parcial metálica y de la sección parcial de hormigón mediante cables de pretensado con el fin de mejorar las condiciones de fisuración del hormigón y deformación del perfil.
- Se ha podido comprobar que las condiciones de vinculación en construcción bajo la forma de apeo o no apeo de la estructura tienen una influencia considerable en servicio pero que a largo plazo desaparecen sus efectos. Las pérdidas de pretensado han resultado ser mayores para el caso apeado debido al mayor efecto de las deformaciones por fluencia.

- Se ha hecho uso del método de los ELU como técnica de análisis en rotura y se ha visto que no es sensible al proceso constructivo<sup>5</sup>, salvo en el valor de la fuerza de pretensado<sup>6</sup>. Por este motivo no se pueden capturar fenómenos<sup>7</sup> como el aumento de ductilidad o fallos prematuros por abolladura como puede hacerse en un cálculo no lineal mediante diagramas momento – curvatura, no obstante, este método de análisis es el que se recoge en todos los códigos y normativas de los distintos países como método para abordar el cálculo en rotura de la sección obviándose de este modo los efectos que induce la construcción por etapas.

---

<sup>5</sup> Esto es debido al método de cálculo que conlleva de forma inherente este método. No se tienen en cuenta las solicitaciones que haya tenido cada sección parcial por separado salvo el pretensado.

<sup>6</sup> En rotura los efectos del pretensado como tal desaparecen pero se tienen en cuenta la predeformación que queda en los cables tras el proceso constructivo de la sección hasta largo plazo.

<sup>7</sup> Pero si se capta la poca diferencia que existe entre los valores de las capacidades últimas seccionales porque, de hecho, para este análisis lo único que difiere es el valor de la predeformación del acero de pretensar a largo plazo entre ambos casos.