

Anejo III

Herramienta de cálculo seccional

ÍNDICE

1.-	INTRODUCCIÓN	2
2.-	BASES DE CÁLCULO	2
	2.1.- HIPÓTESIS BÁSICAS	2
	2.2.- CÁLCULO DEL DIAGRAMA DE INTERACCIÓN	2
3.-	ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES	3
	3.1.- ECUACIÓN CONSTITUTIVA UHPFRC: COMPRESIÓN	3
	3.2.- ECUACIÓN CONSTITUTIVA UHPFRC: COMPRESIÓN	4
	3.3.- ECUACIÓN CONSTITUTIVA ACERO PARA ARMADURAS PASIVAS	4
	3.4.- ECUACIÓN CONSTITUTIVA ACERO PARA ARMADURAS ACTIVAS	5
4.-	DOMINIOS DE DEFORMACIÓN DE LAS SECCIONES	5
	4.1.- SECCIÓN CON ARMADURA PASIVA	6
	4.2.- SECCIÓN CON ARMADURA ACTIVA ADHERENTE	6
	4.3.- SECCIÓN CON ARMADURA PASIVA + ARMADURA ACTIVA	6
	4.4.- SECCIÓN SIN ARMADURA	6
	4.5.- SECCIÓN CON ARMADURA ACTIVA NO ADHERENTE	7
	4.6.- SECCIÓN CON DOBLE PRETENSADO: ACTIVA ADHERENTE + NO ADHERENTE	7
5.-	IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO SECCIONAL	7
	5.1.- DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA	8
	5.2.- DATOS DE ENTRADA	9
	5.2.1.- Geometría	9
	5.2.2.- Armado	9
	5.2.3.- Pretensado	9
	5.2.4.- Ecuaciones constitutivas de los materiales	9
	5.3.- CÁLCULO: DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS UTILIZADOS	9
	5.3.1.- Cálculo de las bandas y características geométricas de la sección	9
	5.3.2.- Introducción de la armadura	10
	5.3.3.- Introducción del pretensado	10
	5.3.4.- Definición de pivotes	10
	5.3.5.- Obtención del diagrama de interacción N-M	10
6.-	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	11
	6.1.- SECCIÓN RECTANGULAR 30x50: ARMADURA SIMÉTRICA	12
	6.2.- SECCIÓN RECTANGULAR 30x50: ARMADURA ASIMÉTRICA	12
	6.3.- SECCIÓN EN T SIN ARMADO	13
	6.4.- SECCIÓN EN T CON ARMADURA PASIVA	13
	6.5.- SECCIÓN EN T CON ARMADURA PASIVA + ACTIVA	14
	6.6.- SECCIÓN RECTANGULAR EN UHPFRC	14
	6.7.- SECCIÓN EN T EN UHPFRC	15
7.-	REFERENCIAS	15

1.- INTRODUCCIÓN

El proceso de cálculo y dimensionamiento de una estructura formada por elementos lineales de hormigón, como la pasarela objeto de este proyecto, presenta en general dos grandes partes. La primera de ellas corresponde a la obtención de los esfuerzos que solicitan a los distintos elementos. Si se acepta un cálculo elástico lineal, esta primera parte puede realizarse con un software convencional de cálculo de estructuras. En segundo lugar, una vez conocidos los esfuerzos actuantes, debe realizarse el dimensionamiento de los distintos elementos a partir del dimensionamiento de las secciones críticas que forman los mismos. Para ello, se requiere un cálculo mecánicamente no lineal mediante herramientas que agilicen el proceso de dimensionamiento seccional. Sin embargo, las herramientas informáticas comerciales disponibles en la actualidad a menudo cuentan con una aplicabilidad limitada a casos convencionales, ya sea por la geometría de las secciones o por los materiales que la constituyen.

El dimensionamiento de una estructura de UHPFRC requiere de una herramienta de cálculo seccional basada en el comportamiento del material, permitiendo adaptar la misma a distintas ecuaciones constitutivas. Por otro lado, las altas prestaciones del material provocan que las geometrías habituales de los elementos de hormigón resulten excesivas a la hora de aplicarlas, debiendo buscar geometrías más parecidas a las estructuras metálicas (secciones huecas, secciones en doble T, etc). Para ello, la herramienta a utilizar en el dimensionamiento debe adaptarse a cualquier geometría posible.

En este anejo se presenta la *HERRAMIENTA DE CÁLCULO SECCIONAL* desarrollada para la realización de este proyecto. Mediante esta herramienta informática es posible obtener el diagrama de interacción axil-flector de una sección con cualquier geometría y formada por cualquier material del que se conozca su ecuación constitutiva. Además, esta herramienta permite la introducción de secciones armadas con armadura pasiva, armadura activa pretesa, armadura activa postesa y armadas con armadura activa pretesa y postesa, solución conocida como doble pretensado, habitual en elementos prefabricados.

En primer lugar se presentan las bases de cálculo consideradas, donde se describen las hipótesis básicas adoptadas y se describe el proceso de cálculo de un diagrama de interacción axil-flector. A continuación se presentan las ecuaciones constitutivas de los distintos materiales empleados en el cálculo: UHPFRC, acero para armaduras pasivas (B500S) y acero para armaduras activas (Y 1860 S7). Posteriormente, se definen los distintos dominios de deformación considerados en función del tipo de armado dispuesto en la sección. Luego se describe en profundidad el proceso de implementación del programa de cálculo seccional, presentando el diagrama de flujo del programa, describiendo los distintos datos de entrada a introducir en el mismo y detallando los algoritmos utilizados. Por último se muestran una serie de ejemplos de aplicación, validando los resultados obtenidos con programas informáticos de reconocida fiabilidad como el *PRONTUARIO INFORMÁTICO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL* o los laboratorios virtuales desarrollados por el profesor Pedro Miguel Sosa de la Universidad Politécnica de Valencia.

2.- BASES DE CÁLCULO

2.1.- Hipótesis básicas

El cálculo de secciones sometidas a solicitaciones normales se realiza partiendo de las siguientes hipótesis:

- Se admite la hipótesis de Navier-Bernoulli según la cual la sección transversal permanece plana, indeformada y normal a la directriz durante el movimiento.
- Existe adherencia perfecta entre hormigón y acero, lo que genera que gracias a la compatibilidad de deformaciones, bajo la acción de las solicitaciones las armaduras pasivas y las armaduras activas adherentes sufren un incremento de deformación igual al incremento sufrido por el hormigón que las envuelve.
- El alargamiento inicial de las armaduras activa se considera al evaluar sus tensiones.
- Se admiten las ecuaciones constitutivas del UHPFRC, armadura pasiva y armadura activa recogidas en el Apartado nº 3: "Ecuaciones constitutivas de los materiales".
- El agotamiento de la sección se produce cuando se alcanza una deformación límite en determinados puntos de la sección, a partir de los dominios de deformación recogidos en el Apartado nº4: "Dominios de deformación de las secciones".

2.2.- Cálculo del diagrama de interacción

Los diagramas de interacción axil – flector (diagrama de interacción N-M) son ábacos planos que representan la totalidad de pares de valores axil último – flector último ($N_U - M_U$) que agotan una determinada sección, conocidos el tipo de material, geometría, cuantía y distribución de armado.

La principal ventaja de los diagramas de interacción es que permiten dimensionar o comprobar una sección sometida a unas determinadas solicitaciones normales de forma sencilla, directa y precisa, ya que parten de las leyes constitutivas de los materiales y se ajustan a las hipótesis de comportamiento de los mismos. Este último aspecto resulta fundamental cuando se trata del diseño con materiales no convencionales, donde a menudo se carece de formulaciones empíricas para el dimensionamiento o comprobación y únicamente se cuenta con las ecuaciones constitutivas de los mismos obtenidas en laboratorio. Además de dichas ecuaciones, para elaborar el diagrama es necesario fijar unos dominios de deformación que variarán según el material empleado.

Los dominios de deformación definen todas las solicitaciones normales de manera continua, desde la tracción pura hasta la compresión pura, a partir de la deformación límite de una determinada fibra (pivote) y de la posición de la fibra neutra (FN), la cual varía entre $-\infty$ y $+\infty$. Dentro de cada dominio de deformación, la posición y deformación límite del pivote correspondiente y cada una de las posiciones de la fibra neutra definen dos puntos de paso de distintos planos de rotura, cada uno de los cuales está asociado a un par de esfuerzos ($N_U - M_U$) que agotan la sección. Una explicación más detallada de los dominios de deformación se recoge en el Apartado nº4: "Dominios de deformación de las secciones".

Partiendo de un determinado plano de rotura, la ley de deformaciones origina una ley de tensiones según las ecuaciones constitutivas de cada material. Planteando las ecuaciones de equilibrio seccional, se obtienen el axil y momento resultante, los cuales constituyen las solicitaciones resistidas. La figura 1 sintetiza el proceso:

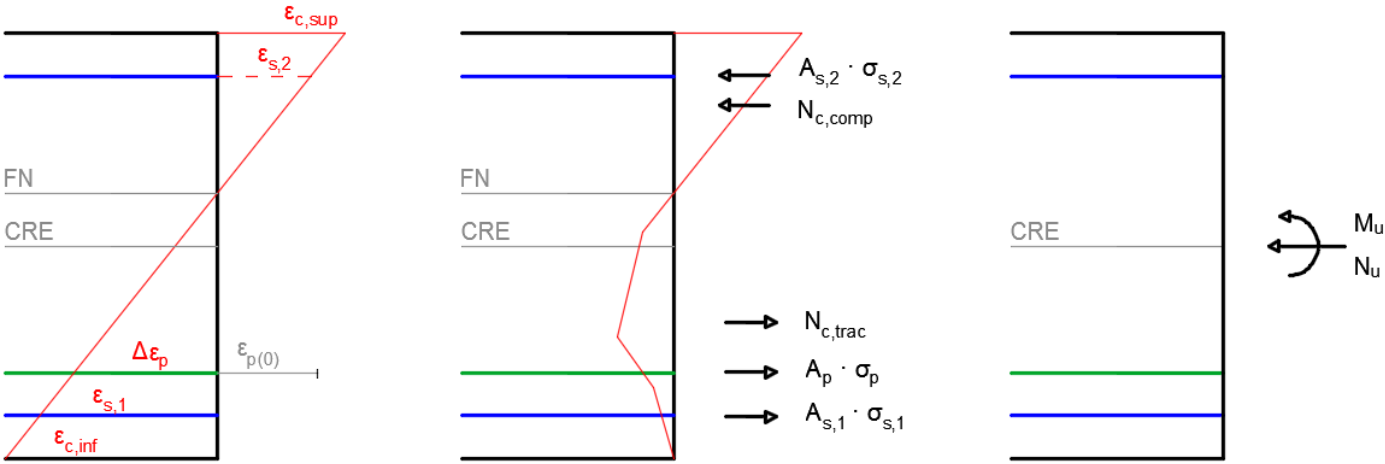


Figura 1 Tensiones y esfuerzos correspondientes a un plano de deformación límite

Las ecuaciones que describen el equilibrio seccional para una determinada fibra de referencia se muestran a continuación:

$$N_u = \int_0^h \sigma_c(y) \cdot b(y) \cdot dy + \sum_{i=1}^{ns} A_{si} \cdot \sigma_{si}(y) + \sum_{i=1}^{np} A_{pi} \cdot \sigma_{pi}(y)$$
$$M_u = \int_0^h \sigma_c(y) \cdot b(y) \cdot (y-y_0) \cdot dy + \sum_{i=1}^{ns} A_{si} \cdot \sigma_{si}(y) \cdot y_{si} + \sum_{i=1}^{np} A_{pi} \cdot \sigma_{pi}(y) \cdot y_{pi}$$

La obtención de la totalidad de puntos del diagrama es un proceso iterativo en el cual se van recorriendo cada uno de los dominios de deformación, pivotando en la fibra correspondiente y variando la posición de la fibra neutra hasta que se alcanza la deformación límite en el pivote correspondiente al siguiente dominio, momento en el cual se cambia de dominio de deformación. El proceso a seguir para la obtención de un par de puntos del diagrama de interacción N-M correspondiente a un determinado plano de deformación se resume en la siguiente figura:

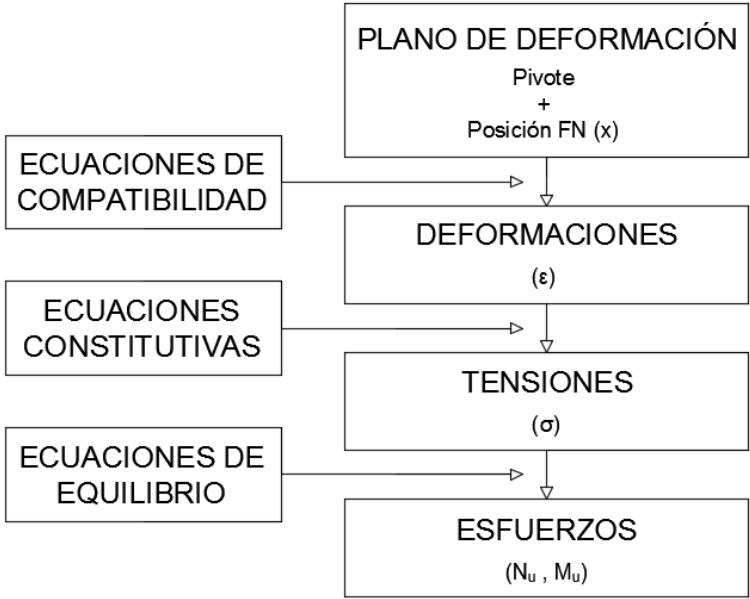


Figura 2 Proceso de obtención del axil y momento flector últimos correspondientes a un plano de deformación límite

Una vez obtenido el diagrama, basta con representar en él las solicitaciones de cálculo ($N_d - M_d$). Cualquier punto interior al diagrama de interacción representa un plano de deformación en el que no agota ningún material por lo que, en caso de que los esfuerzos de cálculo se encuentren en el interior del mismo, éstos corresponden a una solicitación resistida por la sección.

3.- ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES

En este apartado se exponen las ecuaciones constitutivas de los distintos materiales (UHPFRC, acero para armaduras pasivas y acero para armaduras activas) incorporadas en la HERRAMIENTA DE CÁLCULO SECCIONAL y por lo tanto utilizadas en el cálculo.

3.1.- Ecuación constitutiva UHPFRC: Compresión

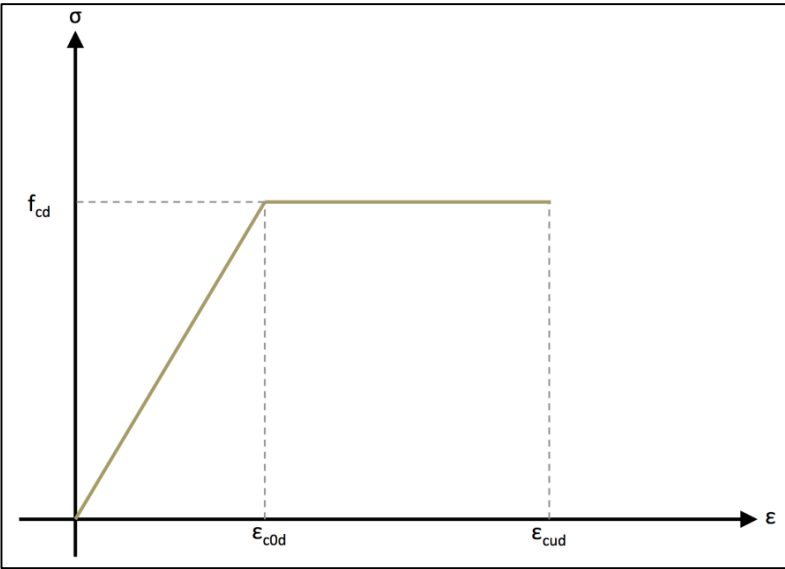


Figura 3 Ley constitutiva UHPFRC: Compresión

DEFORMACIÓN	TENSIÓN (MPa)
$\epsilon_{c0d} = f_{cd} / E_{cm}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$
$\epsilon_{cud} = 3'5 \text{ ‰}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$

Tabla 1 Puntos característicos ecuación constitutiva UHPFRC: Compresión

Siendo $\alpha_{cc} = 0'85$, $f_{ck} = 150 \text{ MPa}$ y $E_{cm} = 48 \text{ GPa}$.

3.2.- Ecuación constitutiva UHPFRC: Compresión

Tal y como se detalla en el Anejo I: "Estado del Arte", existen numerosas propuestas para la caracterización a tracción del UHPFRC en función de las distintas recomendaciones existentes. En este trabajo académico se han utilizado las ecuaciones constitutivas obtenidas por el grupo de investigación del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia.

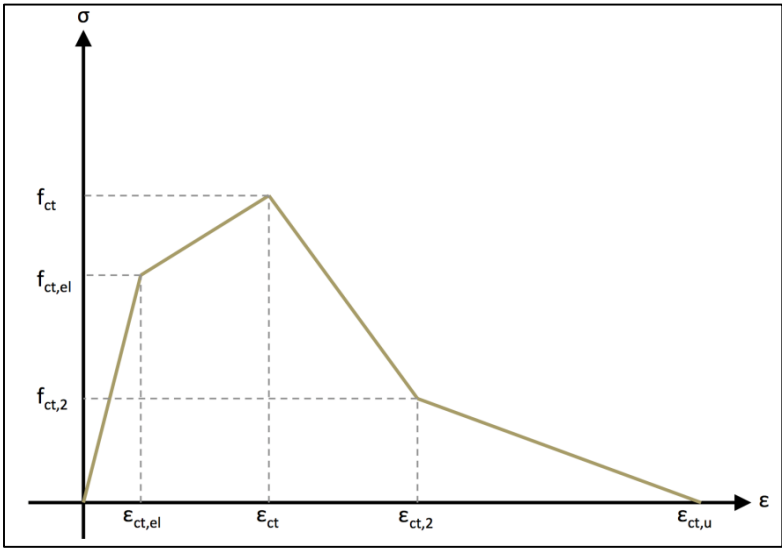


Figura 4 Ley constitutiva UHPFRC: Tracción

DEFORMACIÓN	TENSIÓN (MPa)
$\epsilon_{ct,el} = 0'125 \text{ ‰}$	$f_{ct,el} = -8 / \gamma_c$
$\epsilon_{ct} = 2 \text{ ‰}$	$f_{ct} = -8 / \gamma_c$
$\epsilon_{ct,2} = 12 \text{ ‰}$	$f_{ct,2} = -2'7 / \gamma_c$
$\epsilon_{ct,u} = 25 \text{ ‰}$	$f_{ctu} = 0$

Tabla 2 Puntos característicos ecuación constitutiva UHPFRC: Tracción

3.3.- Ecuación constitutiva acero para armaduras pasivas

Se ha utilizado la ecuación constitutiva propuesta en el artículo 3.2 del Eurocódigo 2, siendo ésta simétrica tanto para tracción como para compresión.

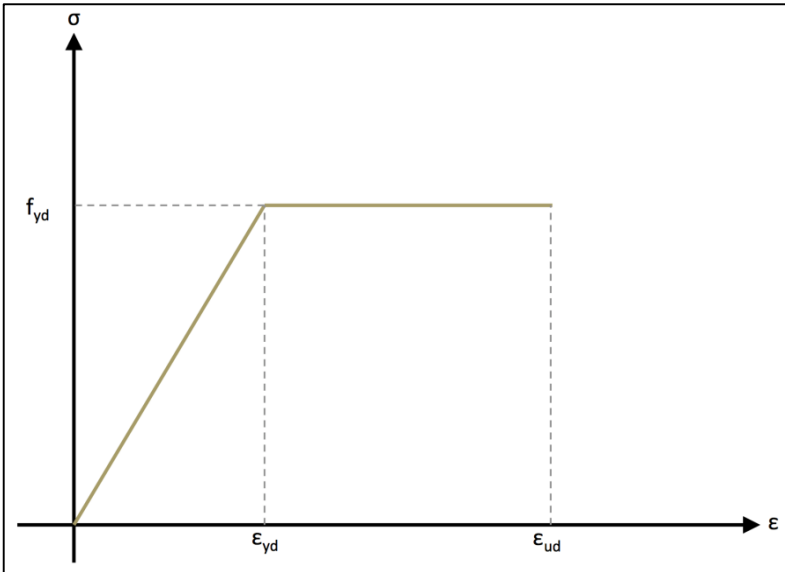


Figura 5 Ley constitutiva acero pasivo: Compresión-Tracción

DEFORMACIÓN	TENSIÓN (MPa)
$\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$
$\epsilon_{ud} = 10 \text{ ‰}$	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$

Tabla 3 Puntos característicos ecuación constitutiva acero pasivo: Compresión-Tracción

Siendo $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ y $E_s = 200 \text{ GPa}$.

3.4.- Ecuación constitutiva acero para armaduras activas

Se ha utilizado la ecuación constitutiva propuesta en el artículo 3.3 del Eurocódigo 2, siendo ésta simétrica tanto para tracción como para compresión.

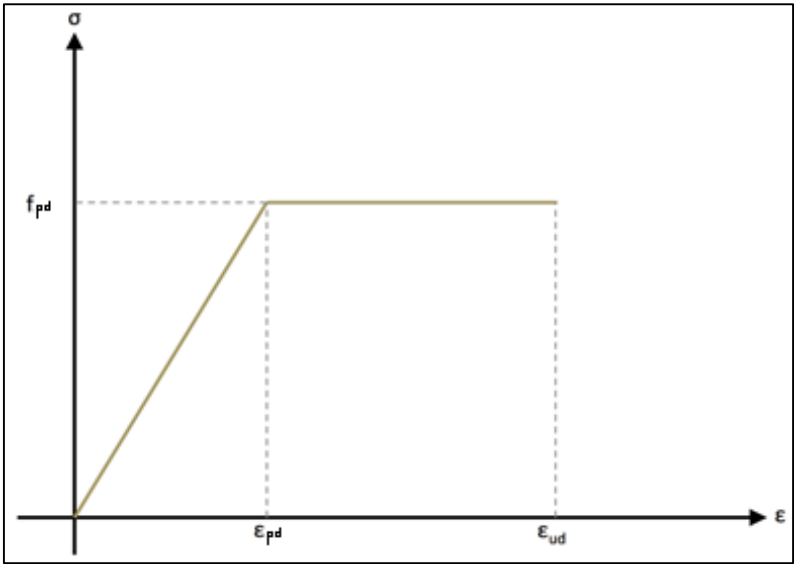


Figura 6 Ley constitutiva acero activo: Compresión-Tracción

DEFORMACIÓN	TENSIÓN (MPa)
$\epsilon_{pd} = f_{pd} / E_p$	$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_p$
$\epsilon_{ud} = 20 \text{ ‰}$	$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_p$

Tabla 4 Puntos característicos ecuación constitutiva acero activo: Compresión-Tracción

Siendo $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ $f_{p0,1k} = 1700 \text{ MPa}$ y $E_p = 195 \text{ GPa}$.

4.- DOMINIOS DE DEFORMACIÓN DE LAS SECCIONES

Tal y como se ha indicado en el Apartado nº2: “Bases de cálculo”, se considera que se produce el agotamiento de una determinada sección cuando una de sus fibras (pivote) alcanza una deformación límite. Para la definición de dichos pivotes se han seguido las recomendaciones francesas SETRA-AFGC, la cual constituye una adaptación del Eurocódigo 2 para el UHPFRC. Al igual que el Eurocódigo, las recomendaciones proponen 3 pivotes para curvaturas positivas y 3 pivotes para curvaturas negativas. Los pivotes considerados, así como su posición y deformación límite son:

- **Pivote A** – Límite de alargamiento por tracción de la armadura pasiva
 - Posición: Armadura más traccionada
 - Deformación límite: 10 ‰
- **Pivote B** – Límite de deformación unitaria del UHPFRC a compresión
 - Posición: Fibra de la sección más comprimida
 - Deformación límite: 3'5 ‰
- **Pivote C** – Límite de deformación unitaria del UHPFRC a compresión pura
 - Posición: $(1 - 1000 \cdot f_{cd} / 3 \cdot E_{cm}) \cdot h$
 - Deformación límite: f_{cd} / E_{cm}

La siguiente figura muestra la definición de los pivotes recogida en las recomendaciones francesas:

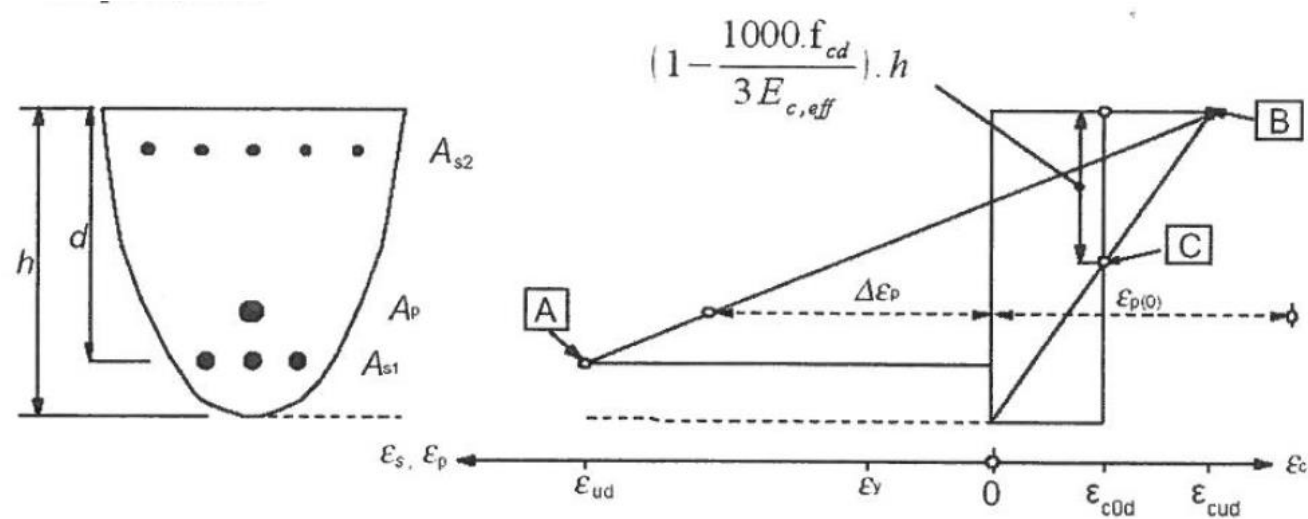


Figura 7 Pivotes de deformación para secciones de UHPFRC [SETRA 2013]

Los pivotes indicados definen 3 dominios de deformación para cada tipo de curvatura, por lo que el diagrama N-M estará constituido por 6 tramos correspondientes a los 6 dominios de deformación existentes. Para el caso de curvaturas positivas se han considerado los siguientes dominios de deformación (siendo igual su definición para el caso de curvaturas negativas):

- **Dominio 1** – Tracción pura + Flexión compuesta pivotando en A
- **Dominio 2** – Flexión compuesta pivotando en B
- **Dominio 3** – Compresión pura + Flexión compuesta pivotando en C

Dado que en la herramienta informática se han considerado distintas posibilidades de armado, ha sido necesario adaptar la posición del pivote A así como su deformación límite. Por ello, a continuación se recogen los distintos dominios de deformación según las características consideradas.

4.1.- Sección con armadura pasiva

En el caso de una sección armada únicamente con armadura pasiva, el pivote A es el definido en el apartado anterior y se sitúa en la armadura pasiva más traccionada con una deformación límite igual a la deformación límite del acero para armadura pasiva, es decir, el 10 ‰.

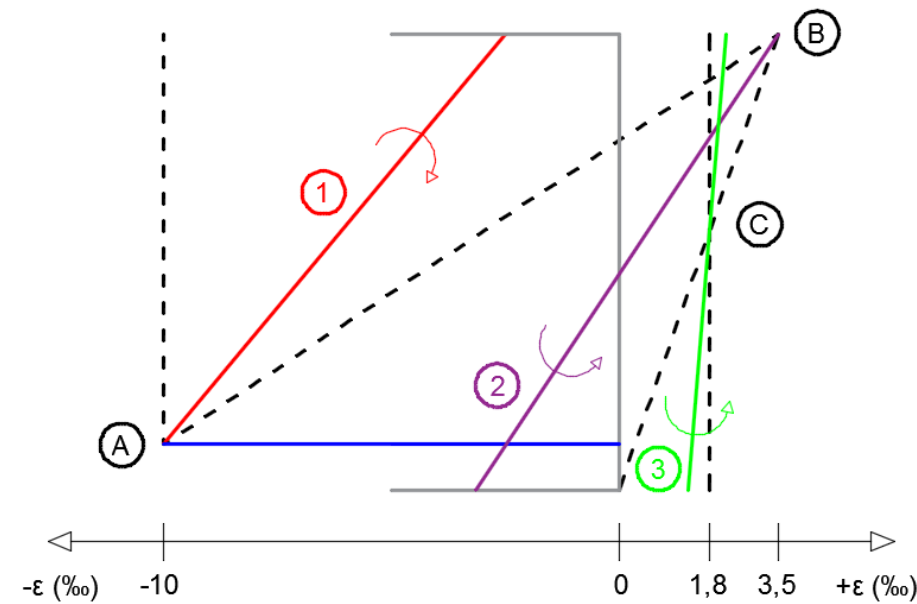


Figura 8 Dominios de deformación para una sección con armadura pasiva

4.2.- Sección con armadura activa adherente

En el caso de una sección armada únicamente con armadura activa adherente (pretesa o postesa adherente), el pivote A se sitúa en la armadura activa adherente más traccionada con una deformación límite igual a la deformación límite del acero para armadura activa, es decir, el 20 ‰ menos el alargamiento inicial de la misma.

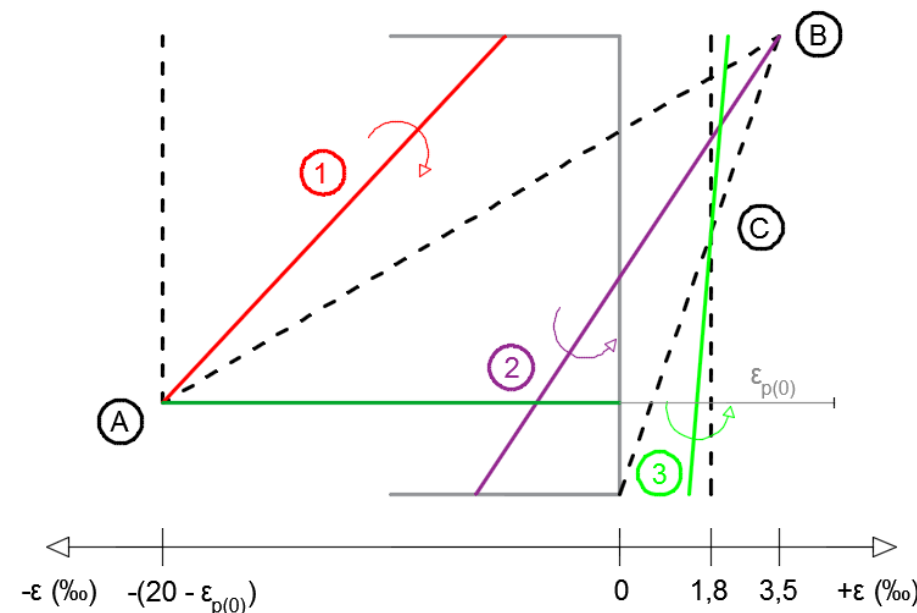


Figura 9 Dominios de deformación para una sección con armadura activa adherente

4.3.- Sección con armadura pasiva + armadura activa

En el caso de una sección armada con armadura pasiva y armadura activa (adherente o no), el pivote A es idéntico al pivote A del caso con armadura pasiva únicamente. Con las limitaciones existentes en la normativa para la fuerza de tesado máxima, se ha asegurado que la predeformación de la armadura activa junto a la deformación límite correspondiente al pivote A no supera en ningún caso la deformación límite del acero para armadura activa.

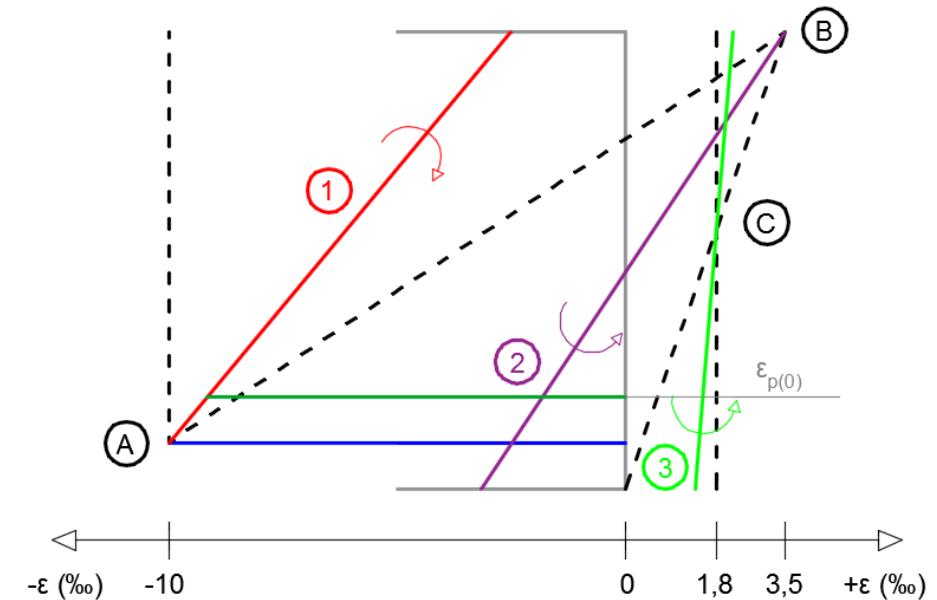


Figura 10 Dominios de deformación para una sección con armadura pasiva + armadura activa

4.4.- Sección sin armadura

En el caso de una sección no armada, el pivote A se sitúa en la fibra más traccionada de la sección con una deformación límite igual a la deformación correspondiente a la máxima tensión a tracción, ϵ_{ct} .

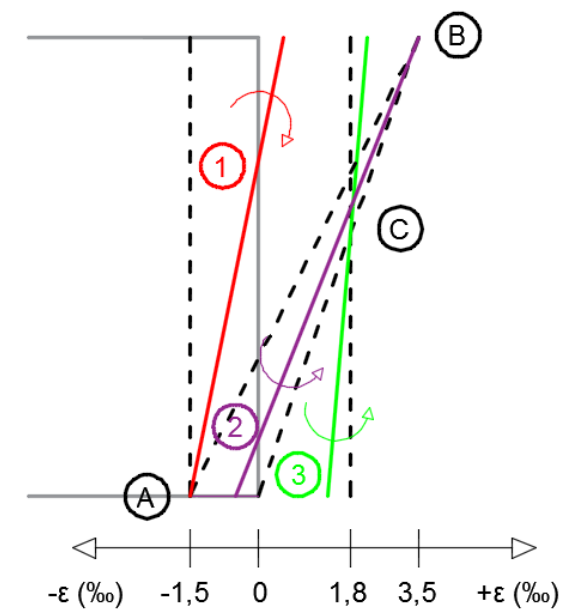


Figura 11 Dominios de deformación para una sección sin armadura

4.5.- Sección con armadura activa no adherente

En el caso de una sección armada únicamente con armadura activa no adherente, el pivote A es idéntico al pivote A del caso sin armadura dado que al no existir adherencia entre la armadura activa y la sección, no existe compatibilidad de deformaciones y por tanto la deformación de la armadura no se ve incrementada por la deformación de la sección.

4.6.- Sección con doble pretensado: activa adherente + no adherente

Se ha considerado una tipología de armado muy común en elementos prefabricados y que permite ahorrar gran cantidad de costes en fase constructiva: el doble pretensado. Aunque se detalla con más profundidad en otros capítulos de esta tesina, básicamente se resume en elementos pretensados con armadura pretesa en planta de prefabricación a los que posteriormente se les aplica un pretensado con armadura postesa no adherente en obra.

En el caso de este tipo de secciones, el pivote A es idéntico al caso de la sección con armadura activa adherente, pues el pretensado transmitido por la armadura activa no adherente se introduce únicamente como una fuerza y esta armadura no tiene compatibilidad de deformaciones con el resto de la sección.

5.- IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO SECCIONAL

En el Apartado nº2.2: "Cálculo del diagrama de interacción" se ha descrito el procedimiento para obtener el diagrama de interacción N-M de una determinada sección: dado un plano de deformación definido por la deformación límite de un pivote y por la posición de la fibra neutra se tiene la deformación en cada punto de la sección; mediante la ecuación constitutiva del material pertinente se obtiene la tensión en cada punto de la sección y mediante ecuaciones de equilibrio, integrando dichas tensiones, se obtiene el valor Nu-Mu correspondiente al plano de deformación considerado. Definiendo ese par de esfuerzos para todo plano de deformación según los dominios descritos en el Apartado nº4: "Dominios de deformación de las secciones" puede obtenerse un diagrama de interacción de la sección dentro del cual cualquier sollicitación es resistida.

El programa de cálculo seccional que se plantea permite obtener el diagrama de interacción de secciones con al menos un plano de simetría sometidas a un axil y a una flexión recta de eje horizontal. En base a ello, para poder implementar el proceso descrito en el párrafo anterior en el programa informático, es necesario discretizar la sección en un número suficiente de bandas horizontales. Dado un plano de deformación, cada una de las bandas estará sometida a una determinada deformación. Conocida la deformación de cada banda, podrá obtenerse la tensión a la que está sometida. Conocida la deformación de cada banda, podrá obtenerse la tensión a la que está sometida. En función de la geometría de la sección y del espesor de banda considerado, cada una de ellas tendrá un área que multiplicada por la tensión correspondiente dará el axil en cada banda. El axil de cada banda multiplicado por la distancia al centro de referencia de esfuerzos de la sección (normalmente el centro de gravedad de la sección bruta) dará el momento flector en cada banda. La suma de la totalidad de axiles de cada banda junto a la suma de la totalidad de flectores de cada banda proporcionará el par de esfuerzos Nu-Mu resistidos por la sección para el plano de deformación considerado.

La siguiente figura muestra la división en bandas de una sección en la cual se observa como la banda i genera un axil N_i en función de su tensión y de su área. A su vez, el axil N_i multiplicado por la distancia y_i del centro de gravedad de la banda al centro de referencia de esfuerzos de la sección proporciona un momento flector M_i . Ese proceso repetido para cada banda en la que se divide la sección proporciona el par de esfuerzos Nu-Mu para un plano de deformación dado.

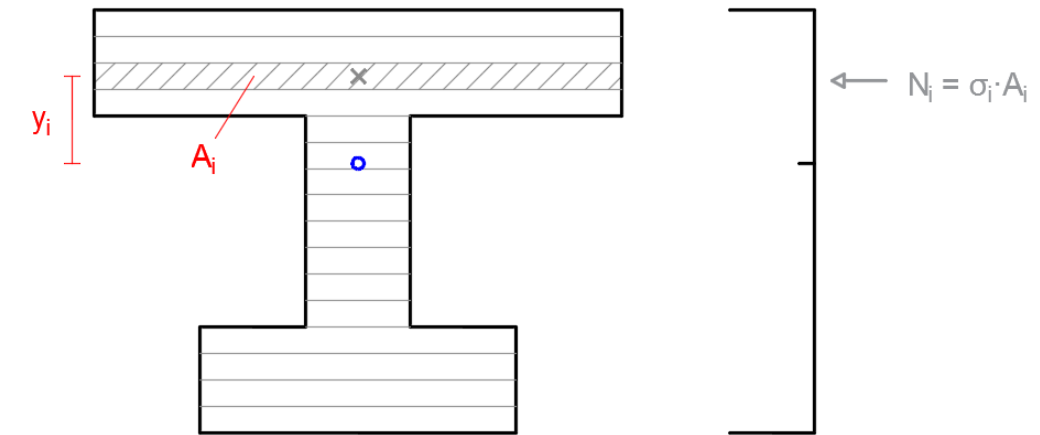


Figura 12 División en bandas de una sección para su posterior integración

Tras esta breve descripción del funcionamiento del programa de cálculo seccional, este apartado pretende describir detalladamente el funcionamiento de cada uno de los algoritmos que permiten obtener el diagrama de interacción de la sección a partir de unos determinados datos. Además se describirá como se han tenido en cuenta los distintos tipos de armados posibles de la sección.

5.1.- Diagrama de flujo del programa

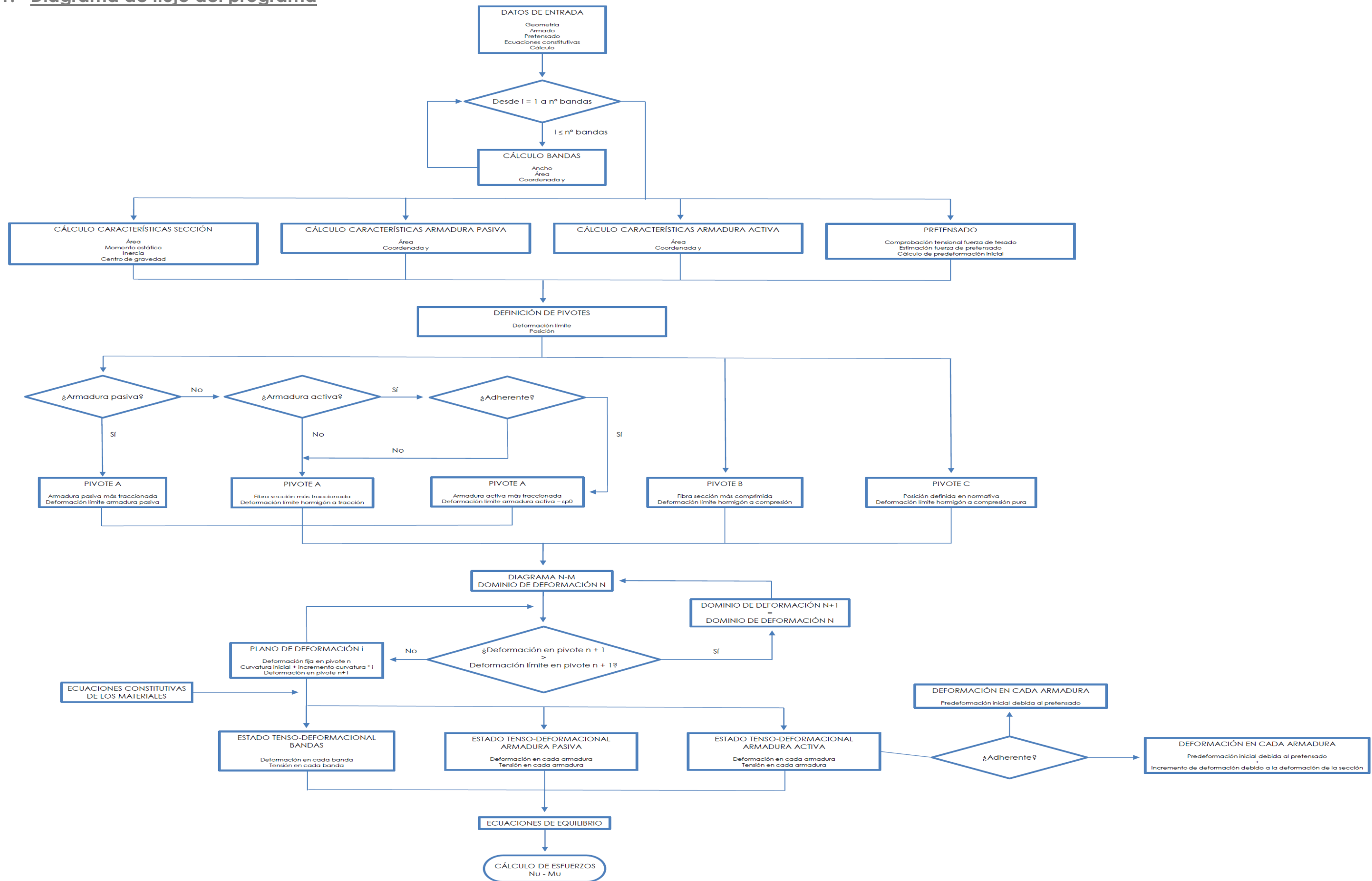


Figura 13 Diagrama de flujo del programa

5.2.- Datos de entrada

5.2.1.- Geometría

El programa de cálculo seccional permite obtener los diagramas de interacción de cualquier sección con al menos un plano de simetría, maciza o con un único hueco.

La introducción de la geometría de la sección se hace por vértices, de modo que se definen en primer lugar los vértices de la sección en el sentido de las agujas del reloj y posteriormente se definen los vértices del hueco (en caso de haberlo) también en el sentido de las agujas del reloj. Por último también se define el espesor de banda en el que se dividirá la sección.

5.2.2.- Armado

El programa de cálculo seccional permite considerar secciones no armadas, armadas con armadura pasiva, armadas con armadura activa pretesa, armadas con armadura activa postesa (adherente o no adherente) y cualquier combinación de ambas (excepto pretesa + postesa adherente). A la combinación de armadura pretesa y armadura postesa no adherente, muy común en elementos prefabricados, se le ha denominado "doble pretensado".

En cuanto a la armadura pasiva, es necesario introducir la distancia de las distintas filas de armado a la fibra superior de la sección, el número de redondos que forman cada una de las filas y el diámetro de los mismos.

Respecto a la armadura activa, en primer lugar es necesario definir si existe doble pretensado.

Posteriormente se define la armadura activa pretesa: se introduce la distancia de las distintas filas de armado a la fibra superior de la sección, el número de cordones por fila de armado y el área de los cordones.

Con respecto a la armadura activa postesa, previamente a la introducción de la misma debe definirse si se trata de armadura postesa adherente o no adherente. Una vez indicado, los valores necesarios son similares a los anteriores: se introduce la distancia de las vainas a la fibra superior de la sección, el número de vainas por fila de armado, el número de cordones por vaina y el área de cada cordón.

5.2.3.- Pretensado

Para poder estimar la deformación de neutralización de las armaduras activas así como comprobar las distintas limitaciones tensionales en las mismas, es necesario introducir el valor de la fuerza de tesado por cordón o por vaina según sea pretesa o postesa. En caso de haber doble pretensado, también debe indicarse la fuerza de tesado por vaina en segunda fase.

Por último, también debe introducirse el valor estimado de pérdidas (instantáneas + diferidas) que se producirán en las armaduras.

5.2.4.- Ecuaciones constitutivas de los materiales

Respecto a las ecuaciones constitutivas de los materiales deben definirse los valores recogidos en el Apartado nº3 de este anejo, relativos a los distintos materiales.

5.3.- Cálculo: descripción de los algoritmos utilizados

Por último, es necesario definir los esfuerzos de cálculo a representar en el diagrama así como la precisión deseada a la hora de obtener los distintos puntos del mismo. Esa precisión representa el incremento de curvatura que se produce en cada iteración, tal y como se expone en los siguientes apartados.

5.3.1.- Cálculo de las bandas y características geométricas de la sección

El algoritmo de cálculo del programa se inicia determinando el canto y el número de bandas a partir de las coordenadas de los distintos puntos de la sección y del espesor de banda introducidos.

A partir de esos dos valores, se inicia un bucle en el que se generan todas las bandas, formando dos vectores con tantas componentes como bandas existentes. En ellos se recoge la coordenada y del centro de gravedad de cada una de las bandas y el ancho de las mismas, respectivamente. El ancho de banda se obtiene a partir de los puntos de intersección de la banda con los contornos de la sección. Dichos puntos se obtienen mediante la función "polyxpoly" que incorpora MATLAB. En función de si la banda atraviesa una parte hueca de la sección o no, los puntos de intersección serán 4 o 2, respectivamente. El ancho de la sección se ha obtenido teniendo en cuenta este aspecto, para que el ancho de la banda corresponda con el ancho real de sección.

Es destacable el hecho de que cuando se representa un hueco interior en una sección, aparece una línea que une el primer vértice de ambos contornos. Este aspecto resulta problemático dado que en esos casos, los puntos de intersección son 3 y no 2 o 4. Naturalmente, también se ha tenido en cuenta en el algoritmo. La figura 14 muestra ese problema.

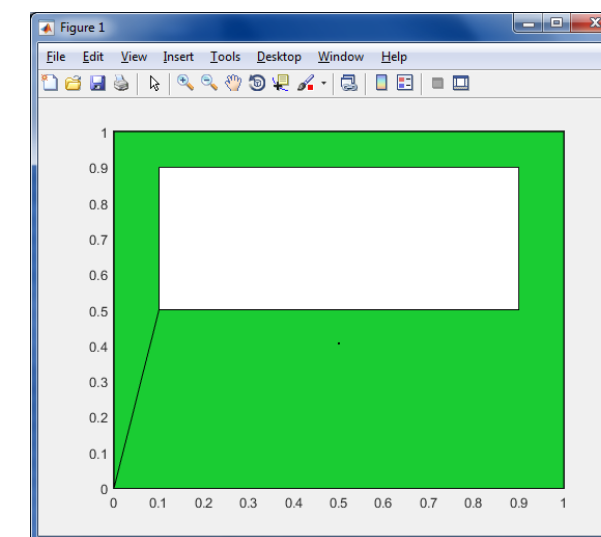


Figura 14 Línea interior que aparece al disponer un hueco en la sección

Una vez obtenidos el vector con las coordenadas y del centro de gravedad de cada banda y el vector con el ancho de cada banda, se procede a estimar las propiedades geométricas de la sección. En primer lugar se forma un vector con el área de cada banda, multiplicando el vector de anchos por el espesor de cada banda indicado como dato de entrada. Una vez se tiene el vector de áreas, se procede a obtener el momento estático de cada banda respecto al eje $y = 0$. Llegados a este punto, sumando el vector de áreas y el vector de momentos estáticos de banda se obtiene el área y el momento estático de la sección respecto al eje $y = 0$. Dividiendo estos dos valores se obtiene la coordenada y del centro de gravedad de la sección bruta. Este punto es de gran importancia pues va a constituir el centro de referencia de esfuerzos de la sección, siendo éste consistente con los centros de referencia empleados por programas de cálculo elástico lineal como el SAP2000. En la figura 14 puede verse representado el centro de gravedad de la sección bruta. Por último, a partir de la distancia de cada banda al centro de gravedad de la sección se obtiene el vector de inercias de cada una de las bandas. Realizando la suma de todas las componentes de dicho vector se obtiene la inercia bruta de la sección.

5.3.2.- Introducción de la armadura

En función de la coordenada y máxima de la sección y del vector de distancias de cada fila de armado a la fibra superior de la misma, se obtiene un vector de coordenadas y de las distintas filas de armado. Por otro lado, en función de si se trata de redondos, cordones o vainas, se calcula el área de armado dispuesto en cada una de las filas. Por último, en función de si se trata de una sección con armadura activa pretesa, postesa adherente, postesa no adherente o con doble pretensado, se definen una serie de vectores que más adelante se utilizarán para el cálculo.

Debe destacarse que, para tener en cuenta el área neta de la sección y no computar la parte de la banda de hormigón ocupada por las armaduras pasivas, activas pretesas y activas postesas adherentes, se forman pseudo-capas de armado constituidas por hormigón, con el mismo área y deformación que las capas de armado dispuestas, obteniendo de ese modo unos esfuerzos que se restan del cómputo global.

5.3.3.- Introducción del pretensado

En primer lugar, se realiza la comprobación tensional de las armaduras activas sometidas a la fuerza de tesado, según los límites indicados en el artículo 5.10.2.1 del Eurocódigo-2. En caso de haber doble pretensado, se comprueba que las tensiones en la armadura pretesa no superan los límites para la fuerza de tesado introducida en la planta de prefabricación y posteriormente se comprueba que las tensiones en la armadura postesa no adherente no superan los límites para la fuerza de tesado introducida en obra. En caso de cumplir los requisitos tensionales, el programa informa con el mensaje "Fuerza de tesado en primera fase: correcta" y de haberla, "Fuerza de tesado en segunda fase: correcta". En caso de no cumplir, muestra el mismo mensaje pero indicando "excesiva" en vez de "correcta". En caso de no disponer armadura activa muestra "No hay armadura activa".

Una vez comprobadas las limitaciones tensionales, el programa obtiene la fuerza de pretensado actuante en las armaduras activas en el momento de comprobación. En función de la fase que se quiera comprobar, el porcentaje de pérdidas estimadas será distinto y por tanto la fuerza de pretensado también lo será. Dicha fuerza de pretensado se introducirá como una acción interna, mediante una predeformación inicial de la armadura activa. Existe la posibilidad de introducir la fuerza de pretensado como una acción externa en el modelo estructural y considerar, en el caso de armaduras adherentes, su contribución a partir de la predeformación inicial, considerando ésta de cara a la ecuación constitutiva pero no como originadora de esfuerzos. Se ha preferido considerar el pretensado como una fuerza interna dada su mayor facilidad de introducción en el programa de cálculo seccional, si bien sobre este aspecto se abordará con más detalle en los capítulos correspondientes al cálculo estructural.

5.3.4.- Definición de pivotes

La definición de pivotes se ha realizado siguiendo los aspectos recogidos en el Apartado nº4: "Dominios de deformación de las secciones". Dado que el programa de cálculo seccional considera tanto los dominios de deformación para curvaturas positivas como los dominios de deformación para curvaturas negativas, ha sido necesario definir una versión positiva y negativa de cada uno de los pivotes. Como se ha indicado anteriormente, definir un pivote consiste en definir su posición y su deformación límite. En el caso de los pivotes B y C, su definición ha sido sencilla. En el caso de los pivotes A (positivo y negativo), ha sido necesario recurrir a una serie de condicionales de modo que se contemplen todas las posibilidades descritas en los distintos subapartados del Apartado nº4.

5.3.5.- Obtención del diagrama de interacción N-M

En este subapartado se describe el algoritmo que se ha utilizado para obtener los puntos del diagrama de interacción correspondientes a un dominio de deformación. La obtención del resto de puntos correspondientes a los dominios restantes no supone una diferencia cualitativa en cuanto al algoritmo por lo que se generaliza la explicación con el dominio de deformación 1.

El dominio de deformación 1 empieza con el plano de deformación correspondiente a la tracción pura, esto es, toda la sección sometida a una deformación constante de valor igual a la deformación límite del pivote A y con una curvatura nula del plano de deformación. Bajo esta condición inicial, se calcula la deformación en la fibra correspondiente al siguiente pivote (en este caso, el pivote B). Para recorrer la totalidad del dominio de deformación, se establece un bucle "while" que seguirá ejecutándose hasta que la deformación correspondiente a la fibra donde se sitúa el siguiente pivote alcance la deformación límite del mismo, momento en el cual se produce el cambio de dominio de deformación y por tanto se cambia de pivote.

El bucle "while" recorre cada dominio mediante planos de deformación definidos por su curvatura y dos puntos del mismo. Estos puntos son distintos para cada dominio y corresponden a la deformación en el pivote actual y la deformación en el siguiente pivote, la cual a su vez sirve como deformación de control del bucle. En cada iteración, la curvatura del plano de deformación varía un valor igual al definido en la entrada de datos, aumentando o decreciendo en función del dominio de deformación en el que se encuentre el programa. En el caso del dominio de deformación 1 en curvaturas positivas, la curvatura aumenta en cada iteración. La variación de curvatura según el dominio de deformación puede observarse en el Apartado nº4: "Dominios de deformación de las secciones".

En cada iteración pueden describirse dos grandes bloques, uno destinado al estado tenso-deformacional de cada material y otro destinado a la obtención del par de esfuerzos normales de agotamiento correspondiente al plano de deformación en cuestión.

En el caso del estado tenso-deformacional de las bandas, se obtiene la deformación de cada banda a partir de los dos puntos del plano de deformación, de su curvatura y de la posición de cada banda respecto a uno de dichos puntos. En este apartado juegan un papel muy importante parámetros como el canto de la pieza, las coordenadas de los pivotes o las coordenadas de cada una de las bandas. Tal y como se describe en la introducción de este apartado, una vez conocida la deformación de cada una de las bandas, se obtiene la tensión a la que están sometidas las mismas a partir de la ecuación constitutiva del UHPFRC (o del material base considerado). Multiplicando el área de cada banda por su tensión se obtiene un vector de axiles, el cual si se multiplica por la distancia de cada banda al centro de referencias de esfuerzos de la sección (centro de gravedad de la sección bruta) permite obtener un vector de momentos flectores.

En cuanto al estado tenso-deformacional de las armaduras pasivas, el procedimiento es similar al descrito en el párrafo anterior. A partir de la posición de las armaduras respecto a uno de los dos puntos conocidos del plano de deformación, se obtiene la deformación de las mismas. Conocida la ecuación constitutiva del acero para armaduras pasivas, se obtiene la tensión en cada una de las armaduras. Multiplicando el área de las mismas por la tensión se obtiene el axil que proporciona cada fila de armado. Por último, multiplicando dicho axil por la distancia de cada fila al centro de gravedad de la sección se obtiene el vector de momentos flectores proporcionado por las armaduras pasivas.

Por último, el estado tenso-deformacional de las armaduras activas posee una serie de peculiaridades que deben ser explicadas. En primer lugar, tal y como recogen todas las normativas mencionadas anteriormente, las armaduras activas tienen una predeformación inicial ε_{p0} correspondiente a la deformación originada por la fuerza de pretensado. Si se multiplicase esa predeformación por el módulo de elasticidad del acero para armaduras activas se obtendría una tensión en la armadura, la cual si se multiplicase por el área de la misma originaría un axil igual a la fuerza de pretensado considerada, que multiplicada por la distancia de la armadura al centro de gravedad daría el momento flector oportuno. En el caso de armaduras activas no adherentes, ésta sería su única contribución a la sección dado que al no existir adherencia, no existe compatibilidad de deformaciones y la deformación de la armadura no se ve alterada por la deformación de la sección. Sin embargo, en el caso de armaduras activas adherentes sí que se produce una compatibilidad de deformaciones, bien gracias a la lechada de cemento que se inyecta en la vaina en el caso de armaduras postesas o bien gracias a que la propia armadura se encuentra

embebida en el hormigón en el caso de armaduras pretesas. En estos casos, debe estimarse el incremento de deformación que se produce en las armaduras activas del mismo modo que se ha hecho en las armaduras pasivas. Por tanto, la deformación correspondiente a las armaduras activas será igual a la deformación de la fibra de la sección situada a la altura de la fila de armado más la predeformación inicial. Debe indicarse que en el caso de armaduras activas adherentes en ELU el valor de la fuerza de pretensado es en la mayoría de casos irrelevante, puesto en gran cantidad de puntos del diagrama la armadura se encontrará plastificada. El valor de la fuerza de pretensado sí que es de gran relevancia en armaduras postesas no adherentes puesto que esa es su única contribución o bien en ambos tipos de armadura para comprobaciones en ELS. Hecho este inciso debe indicarse que, para tener en cuenta o no el incremento de deformación en la armadura activa, se define como dato de entrada si la armadura es adherente o no lo es. Conocida la deformación de las armaduras, dada su ecuación constitutiva se obtiene la tensión de las mismas, conocida su área se obtiene el axil y conocida la distancia al centro de gravedad se obtiene el momento flector.

Una vez conocido el estado tenso-deformacional de cada uno de los materiales y conocidos los vectores de axiles y momentos flectores transmitidos por cada uno de ellos, se procede a sumar las componentes de los distintos vectores de modo que se obtenga el axil último y el momento flector último para el plano de deformación considerado en esa iteración. Como se ha comentado, en cada iteración varía la curvatura del plano de deformación hasta que se alcanza la deformación límite en la fibra correspondiente al siguiente pivote, momento en el cual se cambia de dominio de deformación y se empieza a obtener los pares de esfuerzos correspondientes a dicho dominio.

Los valores particulares varían para cada dominio de deformación pero la explicación general realizada es extrapolable a todos ellos. Por último, en el siguiente apartado se incluyen una serie de ejemplos de diagramas de interacción.

6.- EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Este apartado recoge una serie de ejemplos de aplicación realizados para verificar el correcto funcionamiento de la HERRAMIENTA DE CÁLCULO SECCIONAL. Para ello, se han utilizado herramientas informáticas de reconocida fiabilidad, como el programa informático *PRONTUARIO INFORMÁTICO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL* en su versión 3.1 así como una serie de laboratorios virtuales desarrollados por el profesor Pedro Miguel Sosa, de la Universidad Politécnica de Valencia, y disponibles en el repositorio de esta misma universidad.

En primer lugar, se calcula el diagrama de interacción de una sección rectangular de hormigón armado, de 30 cm de ancho y 50 cm de canto, armada simétricamente con 4 redondos de 20 mm de diámetro, con un recubrimiento nominal de 6 cm. A continuación se realiza una variación del cálculo anterior manteniendo el armado en la cara inferior pero reduciendo a 2 redondos de 20 mm de diámetro el armado de la cara superior. Los resultados obtenidos para ambos casos son: un diagrama de interacción para la sección armada y sin armar (Prontuario informático) y dos diagramas de interacción, uno para la sección sin armar y otro para la sección armada (Herramienta propia).

Una vez validado el programa desarrollado para secciones rectangulares armadas, se decide obtener el diagrama de interacción de secciones más complejas, introduciendo además el pretensado. A modo de ejemplo, se estudia el diagrama de interacción de una sección en T pretensada, con un ancho de cabeza superior de 0,80 m, un canto de cabeza superior de 0,30 m, un canto total de 1,00 m y un ancho de alma de 0,30 m. Como armadura pasiva se disponen 2 redondos de 20 mm de diámetro en la cara superior y 4 redondos de 20 mm de diámetro en la cara inferior, con un recubrimiento nominal de 5 cm. Como armadura activa pretesa se disponen 3 cordones de 0,5" ($A_p=3 \text{ cm}^2$), pretensados con una fuerza de tesado de 130 kN cada uno. La armadura activa se dispone a 10 cm de la cara inferior de la sección.

Dadas las limitaciones del *PRONTUARIO INFORMÁTICO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL*, tanto para el caso de la sección rectangular con armadura asimétrica como para el caso de la sección en T pretensada se recurre a los laboratorios virtuales citados. En concreto, se utiliza los programas "Diagrama de interacción axil-momento de una sección rectangular de hormigón armado" y "Diagrama de interacción axil-momento de rotura de una sección en T de hormigón pretensado" desarrollados por el profesor Pedro Miguel Sosa en

2008. Los resultados obtenidos son: un diagrama de interacción para la sección sin armar, armada con armadura pasiva y armada con armadura pasiva y activa (Laboratorio virtual) y tres diagramas de interacción, uno para la sección sin armar, otro para la sección armada con armadura pasiva y otro para la sección armada con armadura pasiva y activa (Herramienta propia).

Los materiales empleados en todos los casos han sido hormigón HA-30, acero pasivo B500S y armadura activa Y 1860 S7. No se han considerado las pérdidas instantáneas del pretensado.

Por último, se presentan los diagramas de interacción de los ejemplos anteriores aplicados a UHPFRC.

6.1.- Sección rectangular 30x50: Armadura simétrica

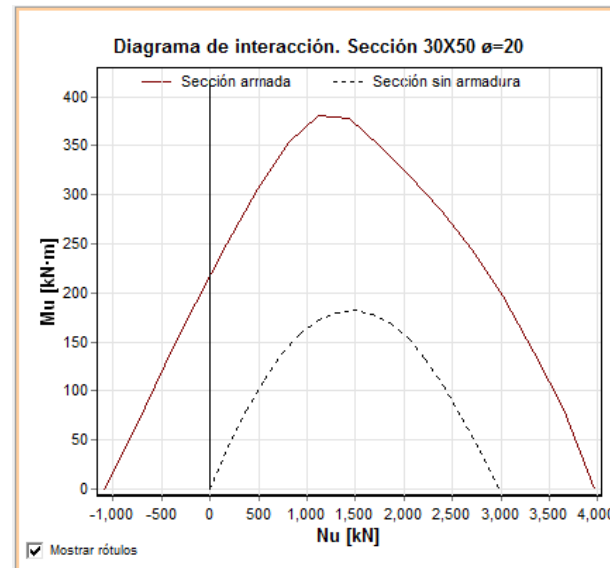


Figura 15 Diagrama interacción sección rectangular 30x50 armada y sin armar – Prontuario informático

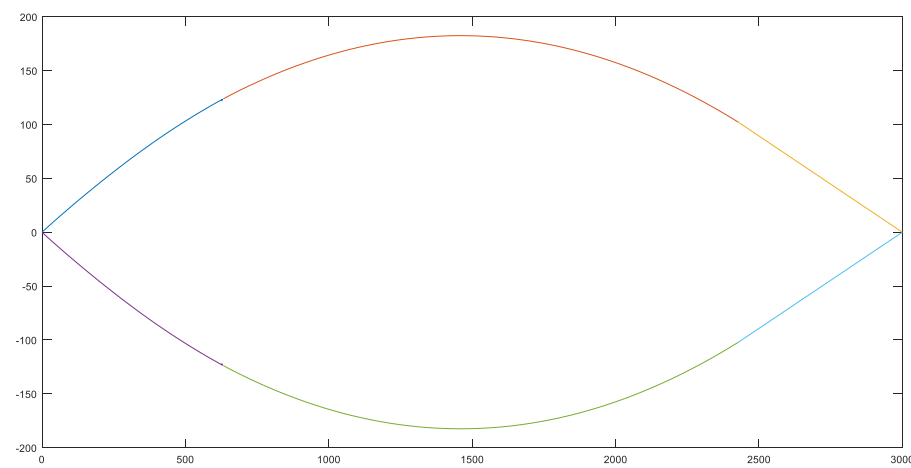


Figura 16 Diagrama interacción sección rectangular 30x50 sin armadura – Herramienta propia

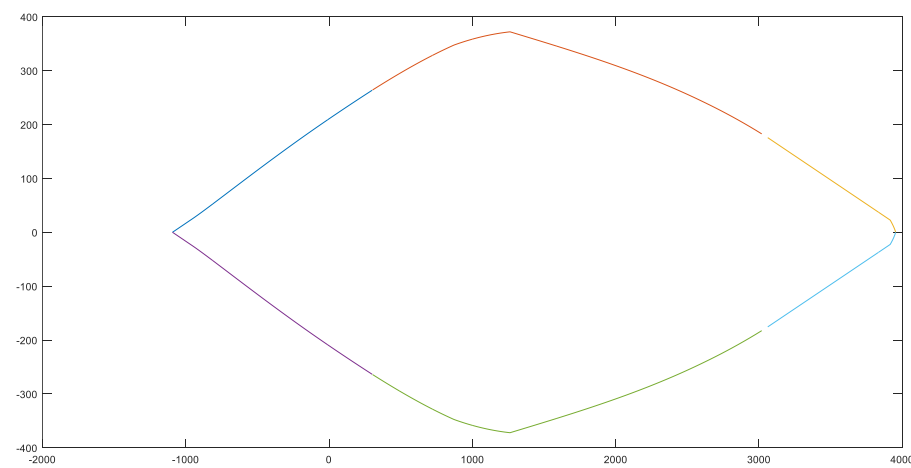


Figura 17 Diagrama interacción sección rectangular 30x50 con armadura simétrica – Herramienta propia

6.2.- Sección rectangular 30x50: Armadura asimétrica

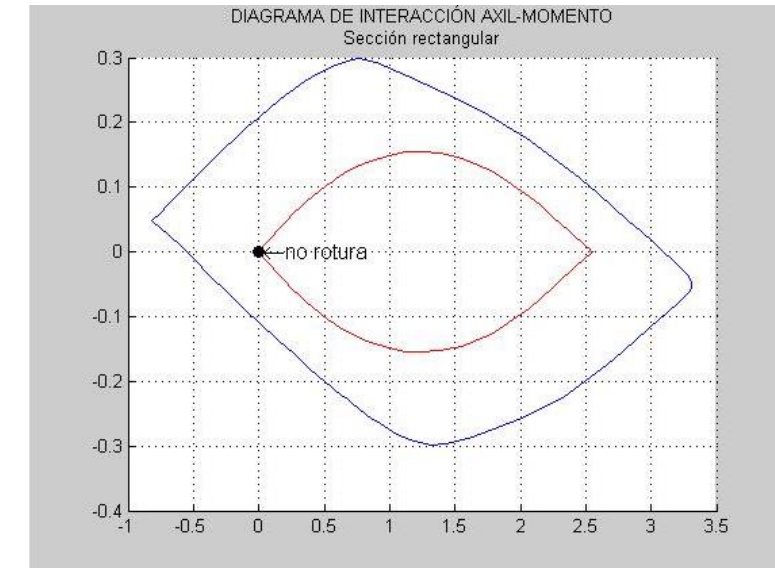


Figura 18 Diagrama interacción sección rectangular 30x50 armada y sin armar – Laboratorio virtual

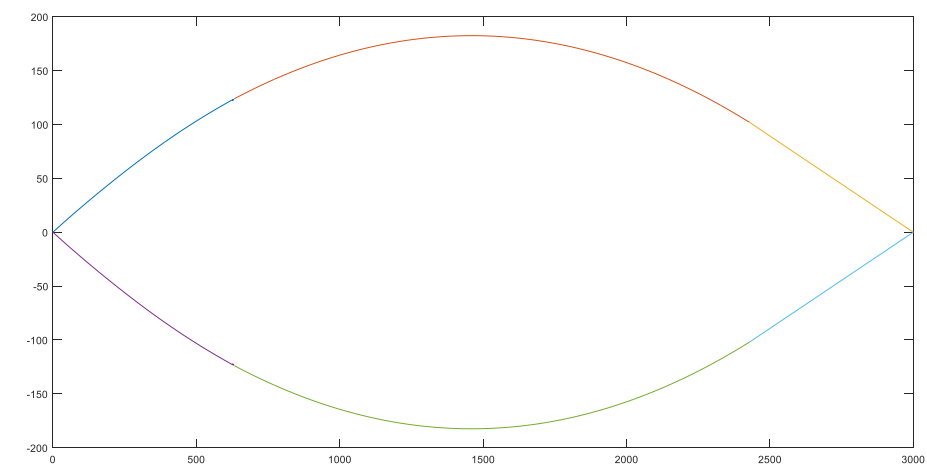


Figura 19 Diagrama interacción sección rectangular 30x50 sin armadura – Herramienta propia

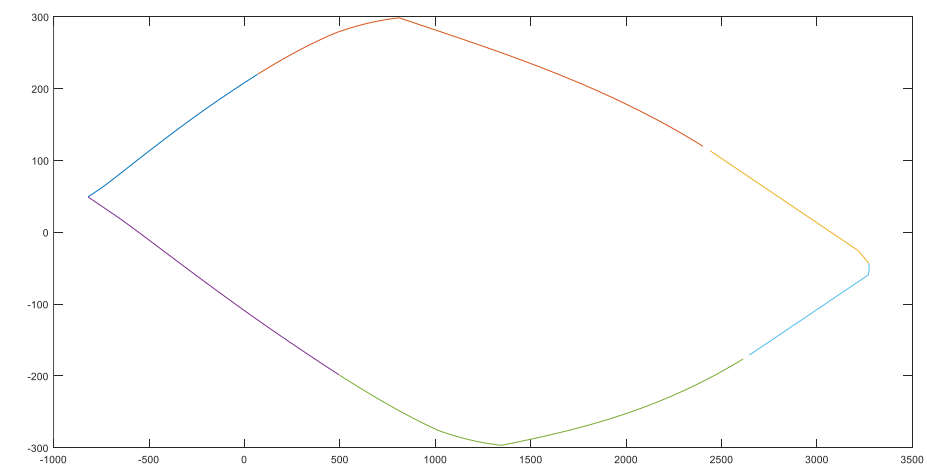


Figura 20 Diagrama interacción sección rectangular 30x50 con armadura asimétrica – Herramienta propia

6.3.- Sección en T sin armado

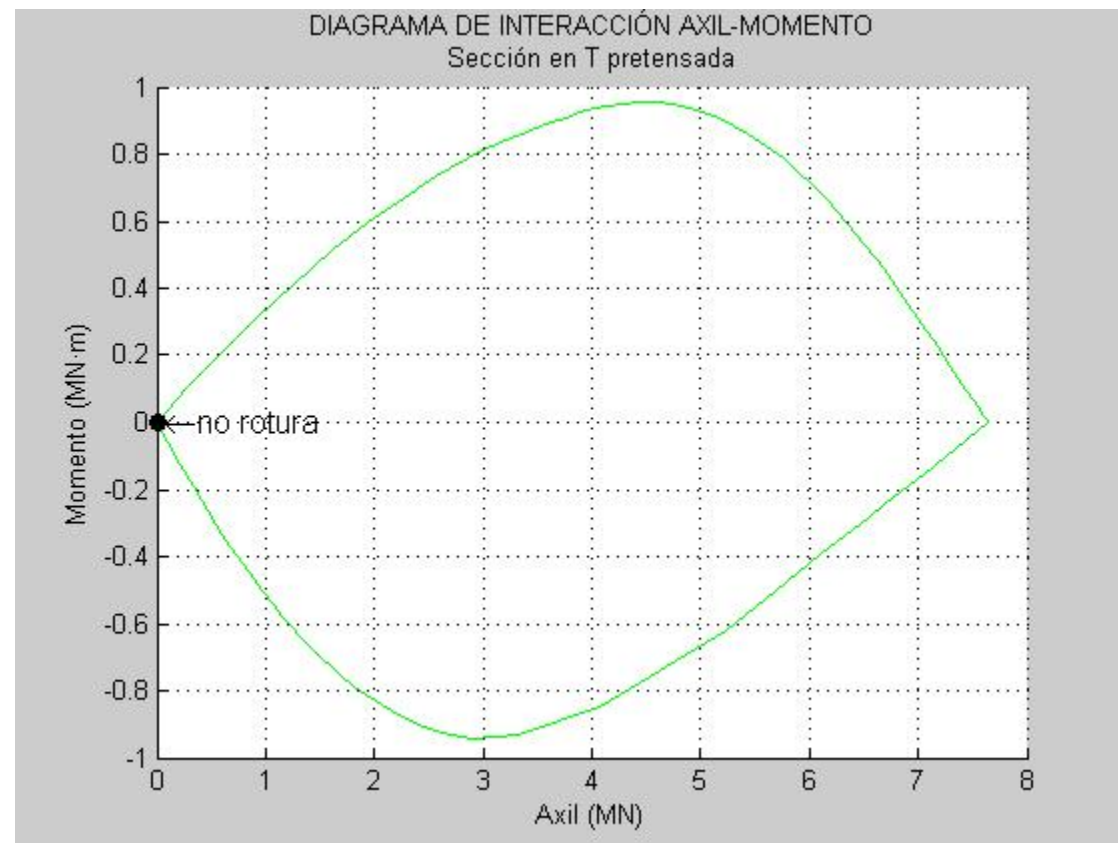


Figura 21 Diagrama interacción en T sin armar – Laboratorio virtual

6.4.- Sección en T con armadura pasiva

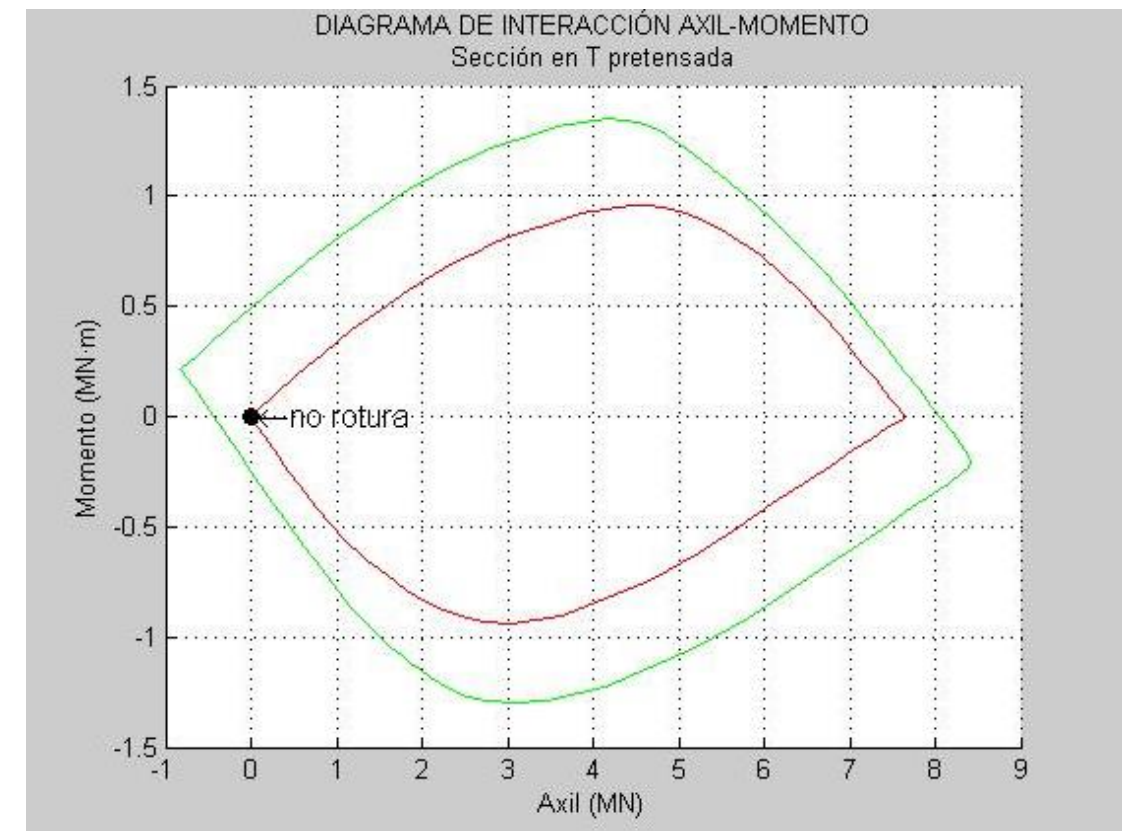


Figura 23 Diagrama interacción en T con armadura pasiva – Laboratorio virtual

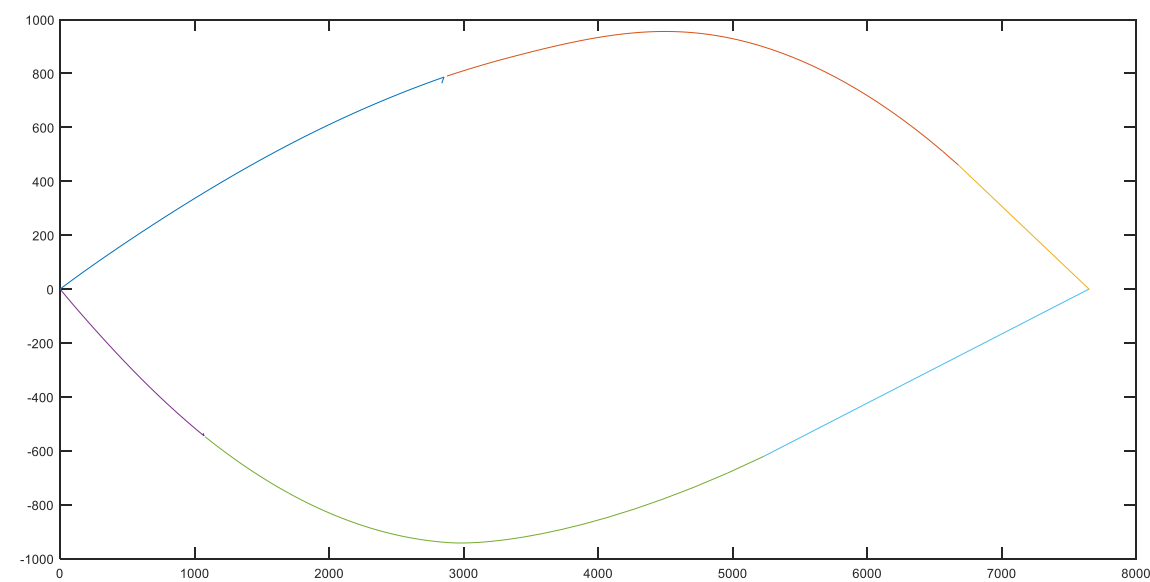


Figura 22 Diagrama interacción en T sin armar – Herramienta propia

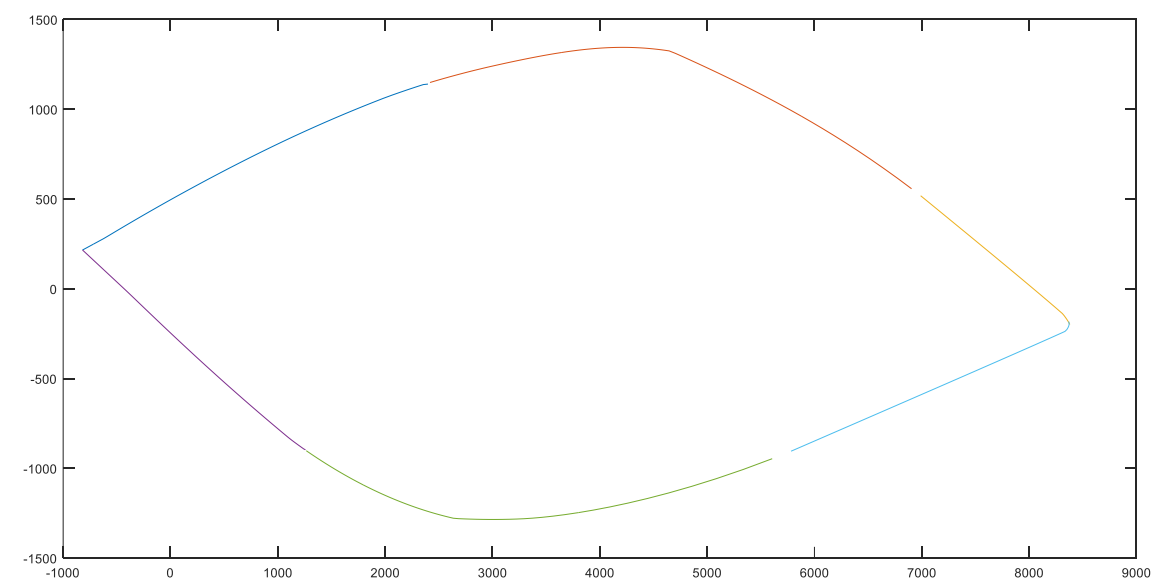


Figura 24 Diagrama interacción en T con armadura pasiva – Herramienta propia

6.5.- Sección en T con armadura pasiva + activa

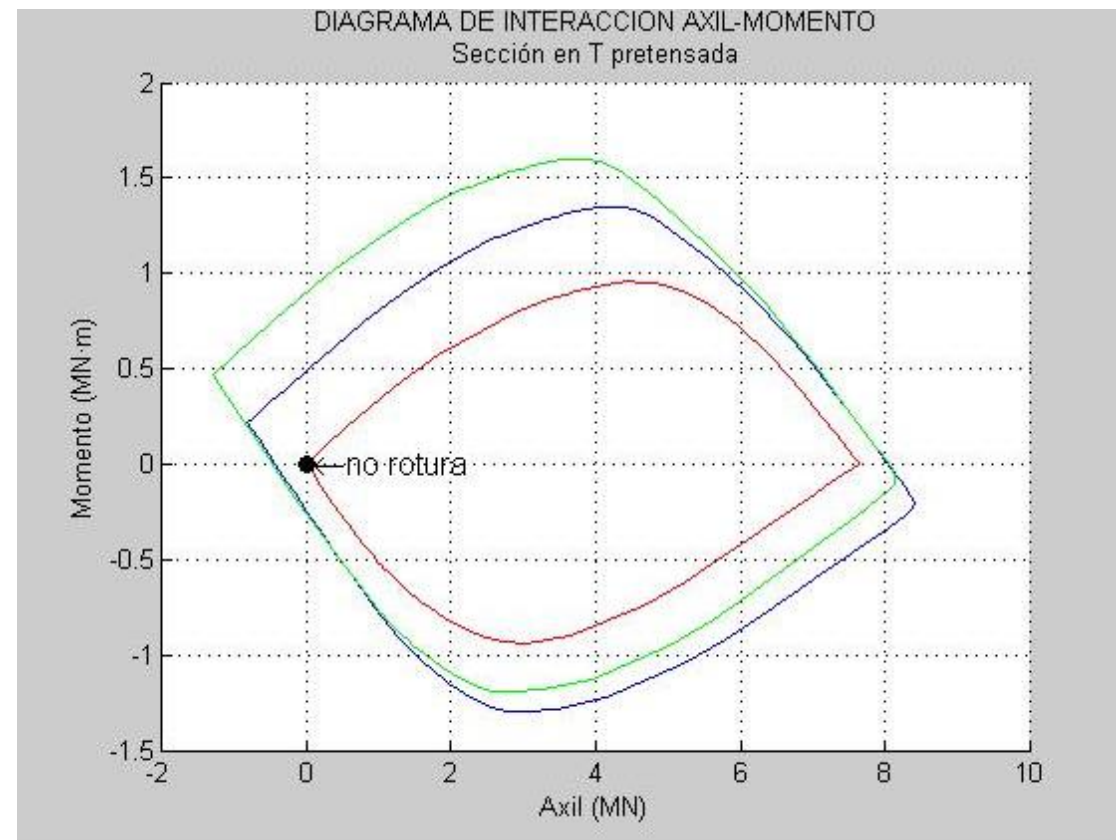


Figura 25 Diagrama interacción en T con armadura activa – Laboratorio virtual

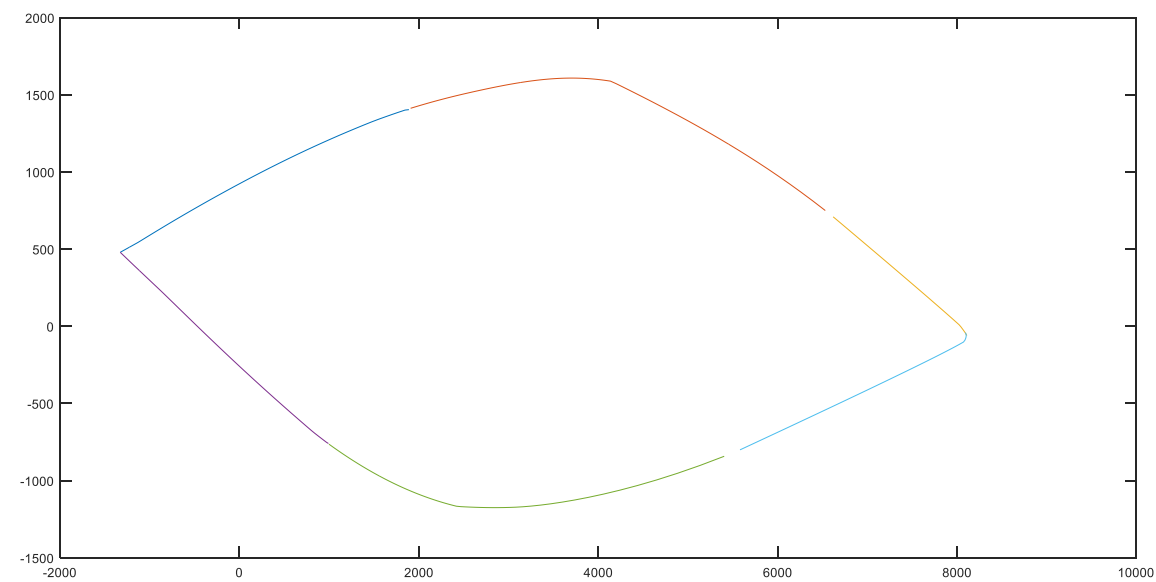


Figura 26 Diagrama interacción en T con armadura activa – Herramienta propia

6.6.- Sección rectangular en UHPFRC

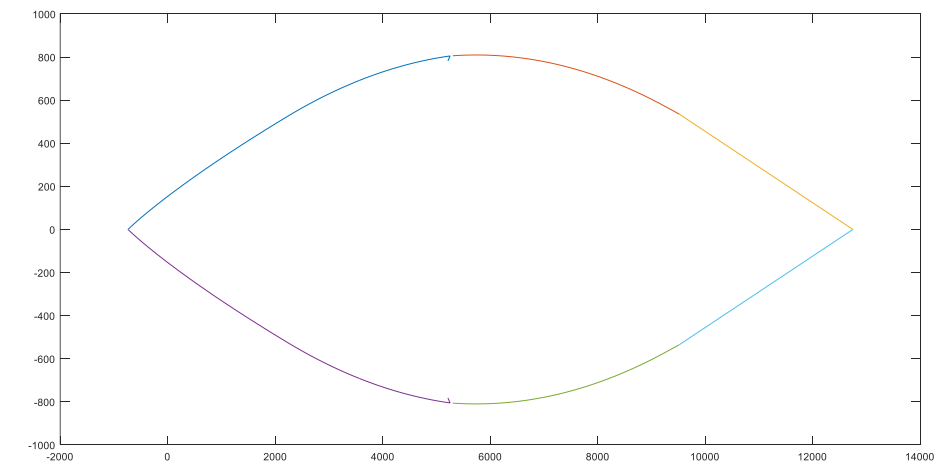


Figura 27 Diagrama interacción sección UHPFRC rectangular 30x50 sin armadura – Herramienta propia

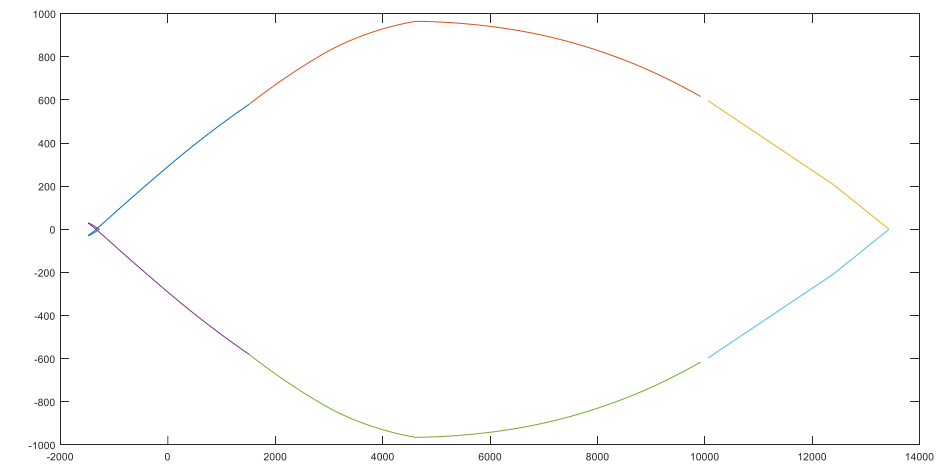


Figura 28 Diagrama interacción sección UHPFRC rectangular 30x50 con armadura simétrica – Herramienta propia

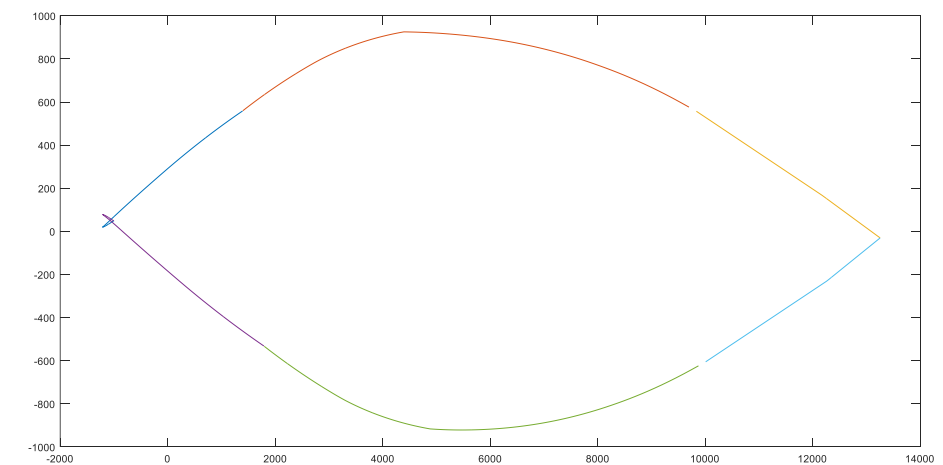


Figura 29 Diagrama interacción sección UHPFRC rectangular 30x50 con armadura asimétrica – Herramienta propia

6.7.- Sección en T en UHPFRC

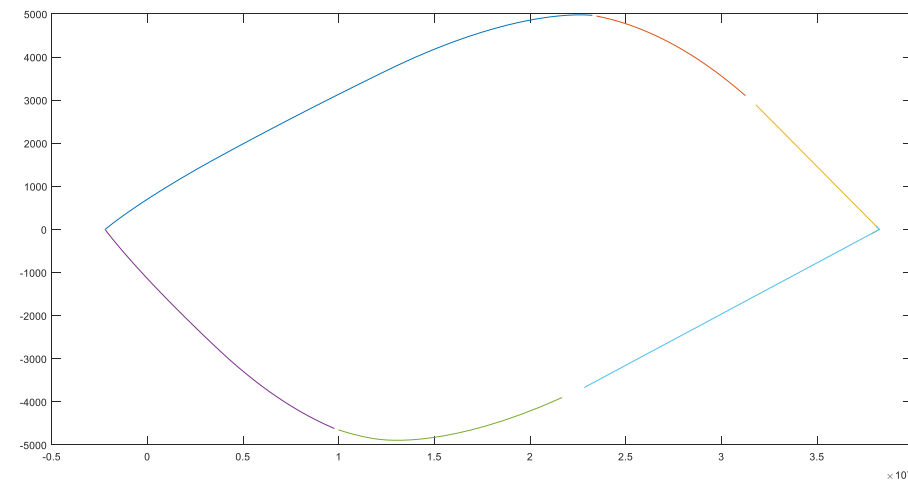


Figura 30 Diagrama interacción sección en T sin armadura – Herramienta propia

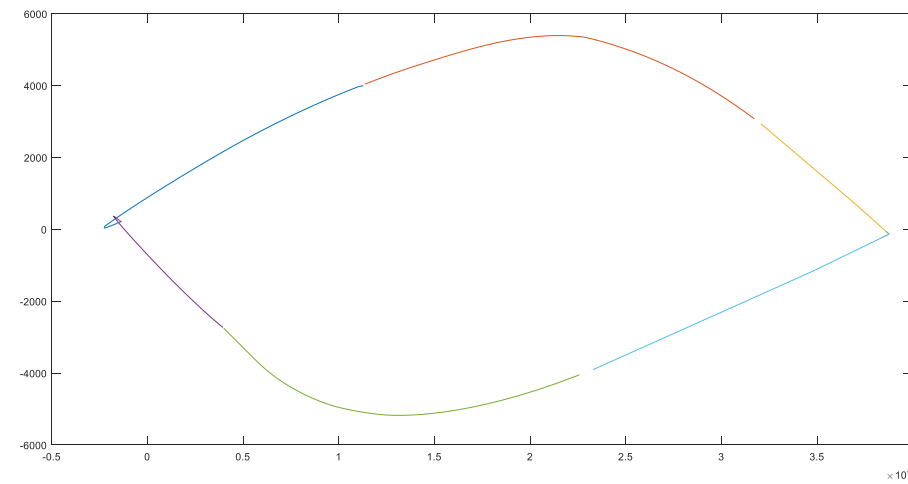


Figura 31 Diagrama interacción sección UHPFRC en T con armadura pasiva – Herramienta propia

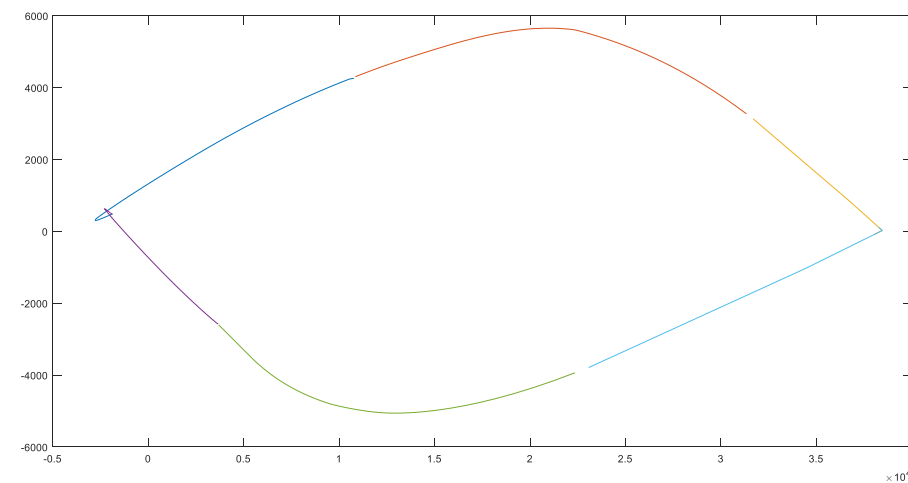


Figura 32 Diagrama interacción sección UHPFRC en T con armadura pasiva + activa – Herramienta propia

7.- REFERENCIAS

AENOR (2013). *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación*. UNE-EN 1992-1-1. Madrid: AENOR.

MIGUEL SOSA, P. (2008). *Diagrama de interacción axil momento de rotura de una sección rectangular*. <<http://hdl.handle.net/10251/2069>> [Consulta: 18 de Enero de 2016]

MIGUEL SOSA, P. (2008). *Diagrama de interacción axil momento de rotura de una sección en T de hormigón pretensado*. <<http://hdl.handle.net/10251/2074>> [Consulta: 18 de Enero de 2016]

SETRA/AFGC (2013). *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete. Recommendations*. París: SETRA.