



Universidad  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

# DISEÑO Y CÁLCULO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE PASARELA PEATONAL MIXTA PARA RUTA MEDIOAMBIENTAL, ZUBIRI (NAVARRA)

Autor:

M<sup>a</sup> ARMINDA CALVES AZNAR

Director/es:

M<sup>a</sup> JOSÉ GÓMEZ BENITO  
ÓSCAR PASETA MARTÍNEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
SEPTIEMBRE 2014

## **RESUMEN**

El objeto de este proyecto fin de grado es la realización del diseño y cálculo de una pasarela peatonal mixta, hecha de acero y hormigón para ruta medioambiental en el término municipal de Zubiri (Navarra).

El proyecto se basa en la reconstrucción de un puente que cruza un pequeño barranco mediante la conservación de la cimentación existente y sobre ésta diseñar y calcular una pasarela de uso exclusivo peatonal para la reconversión de la pista forestal que lo atraviesa en una ruta medioambiental.

El diseño se ha planteado como una solución lo menos agresiva al entorno pero garantizando la seguridad de los viandantes.

Se inicia con un prediseño y cálculo a mano para establecer las secciones, procediendo a comprobar y verificar lo establecido en las normativas vigentes, estudiando las distintas hipótesis de carga mediante el modelo de elementos finitos empleando el programa comercial ABAQUS

El análisis de cada uno de los resultados se comprueba mediante hojas de cálculo Excel siguiendo la normativa vigente.

## TABLA DE CONTENIDOS

### **MEMORIA (TOMO 1/2):**

1. CARACTERISTICAS DE LA PASARELA
2. MODELO DE CÁLCULO
3. ACCIONES E HIPÓTESIS DE CARGA
  - 3.1. COMBINACIÓN DE ACCIONES(ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)
  - 3.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)
4. RESULTADOS Y COMPROBACIONES
  - 4.1. VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)
  - 4.2. VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO(ELS)
  - 4.3. CÁLCULO DE LOSA DE HORMIGÓN
  - 4.4. UNIONES Y CONEXIONES
5. CONCLUSIONES
6. BIBLIOGRAFIA

### **ANEXOS( TOMO 2/2):**

#### **ANEXO I: MEMORIA DE CÁLCULO**

1. MODELO DE CÁLCULO
2. ACCIONES
  - 2.1. ACCIONES PERMANENTES
  - 2.2. ACCIONES VARIABLES
  - 2.3. ACCIONES ACCIDENTALES
3. COMBINACIÓN DE ACCIONES
  - 3.1. COMBINACIÓN DE ACCIONES(ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)
  - 3.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)
4. COMPROBACIÓN DE RESULTADOS
  - 4.1. VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)
  - 4.2. VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO(ELS)
5. CÁLCULO DE LOSA DE HORMIGÓN

#### **ANEXO II: HOJAS DE CÁLCULOS Y RESULTADOS**

#### **ANEXO III: PLANOS**

1. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO
2. ALZADOS Y SECCIONES
3. ESTRUCTURA
4. TABLERO PASARELA
5. DETALLE BARANDILLA



Universidad  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y CÁLCULO MEDIANTE EL  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE  
PASARELA PEATONAL MIXTA PARA RUTA  
MEDIOAMBIENTAL, ZUBIRI (NAVARRA)

MEMORIA  
TOMO 1/2

Autor:

M<sup>a</sup> ARMINDA CALVES AZNAR

Director/es:

M<sup>a</sup> JOSÉ GÓMEZ BENITO  
ÓSCAR PASETA MARTÍNEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
SEPTIEMBRE 2014

## TABLA DE CONTENIDOS

### **MEMORIA (TOMO 1/2):**

1. CARACTERISTICAS DE LA PASARELA
2. MODELO DE CÁLCULO
3. ACCIONES E HIPÓTESIS DE CARGA
  - 3.1. COMBINACIÓN DE ACCIONES(ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)
  - 3.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)
4. RESULTADOS Y COMPROBACIONES
  - 4.1. VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)
  - 4.2. VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO(ELS)
  - 4.3. CÁLCULO DE LOSA DE HORMIGÓN
  - 4.4. UNIONES Y CONEXIONES
5. CONCLUSIONES
6. BIBLIOGRAFIA



# MEMORIA

---

## DISEÑO Y CÁLCULO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE PASARELA PEATONAL MIXTA PARA RUTA MEDIOAMBIENTAL, ZUBIRI (NAVARRA)

AUTOR: M<sup>a</sup> ARMINDA CALVES AZNAR

DIRECTORES: M<sup>a</sup> JOSÉ GÓMEZ BENITO  
ÓSCAR PASETA MARTÍNEZ

SEPTIEMBRE 2014



## INDICE:

1.	CARACTERISTICAS DE LA PASARELA .....	3
2.	MODELO DE CÁLCULO.....	4
2.1	ACCIONES E HIPÓTESIS DE CARGA .....	6
2.2	COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO): .....	8
2.3	COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO): .....	10
3.	RESULTADOS Y COMPROBACIONES .....	12
3.1	VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU):.....	12
3.2	VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS):.....	22
3.3	CÁLCULO LOSA DE HORMIGÓN.....	23
3.4	UNIONES Y CONEXIONES.....	26
4.	CONCLUSIONES .....	27
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	28
6.	ANEXOS: .....	29

Anexo I: Memoria de cálculo

Anexo II: Hojas de cálculos y resultados

Anexo III: Planos

## 1. ANTECEDENTES

La zona de Zubiri (Navarra) cuenta con una amplia red de caminos. Son pistas forestales y ganaderas, que salen de los cascos urbanos de los pueblos y a menudo unen dos localidades entre sí. Son de acceso y recorrido fácil, y constituyen una excelente manera de disfrutar del medio natural y obtener bellas vistas panorámicas.

Zubiri se encuentra en el valle de Esteribar (Figura 1 y 2), antiguamente llamado “El valle de los cazadores”, une la comarca de Pamplona con el norte de Navarra además en dicho municipio se encuentra el Hospital de Peregrinos ya que es zona de paso del Camino de Santiago.

En particular el caso que nos ocupa se centra en una de estas pistas forestales con el deseo de reconvertirla en una ruta medioambiental para fomentar un turismo ecológico en la zona. Dicha ruta medioambiental une las localidades de Saigots con Zubiri.

La intención es el uso exclusivo de dicha pista forestal de uso peatonal para unir dichas localidades reconstruyendo el puente que cruza el Barranco.

El presente proyecto pretende dar una solución con el menor impacto ambiental en el entorno garantizando la seguridad de los viandantes en su uso.

Se ha optado por la comprobación y diseño de la pasarela mixta mediante el modelo de elementos finitos empleando el programa informático ABAQUS<sup>1</sup> para tal fin.



Figura 1. Plano de situación.

<sup>1</sup> Programa comercial ABAQUS de cálculo por el Método de Elementos Finitos.

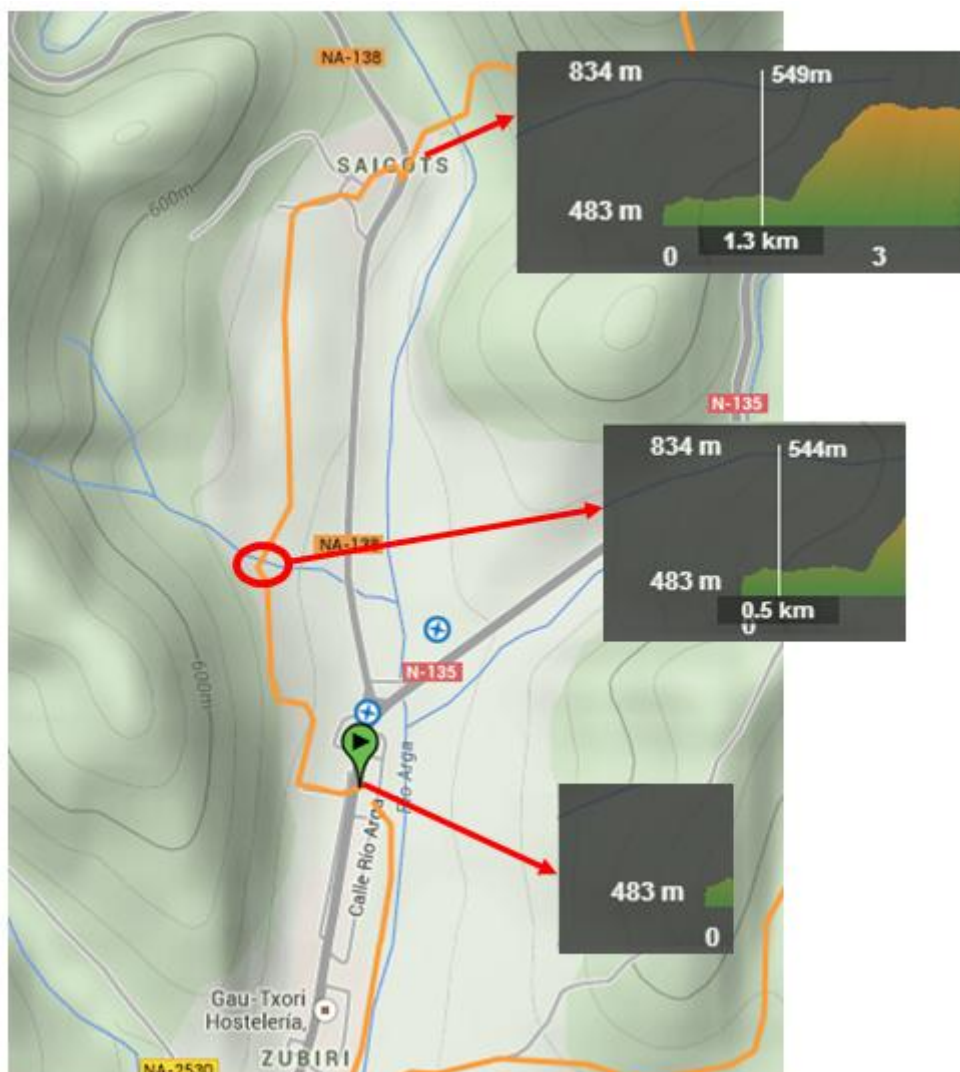


Figura 2. Plano de emplazamiento.

## 1. CARACTERÍSTICAS DE LA PASARELA

La pasarela mixta está constituida por una estructura soporte metálica mediante un entramado de celosía de tubos circulares huecos formando una pequeña curvatura en el cordón inferior y sobre ella descansa un tablero de hormigón armado de 5 m de ancho y de 25 cm de espesor con una inclinación del 1% desde el centro hacia los laterales. La longitud de la pasarela es de 35 m y salva una altura media de 12 m sobre un barranco de riachuelos que desembocan en el río Arga.

En las Figuras 3 y 4 se ve las distintas perspectivas de la pasarela objeto de este proyecto.

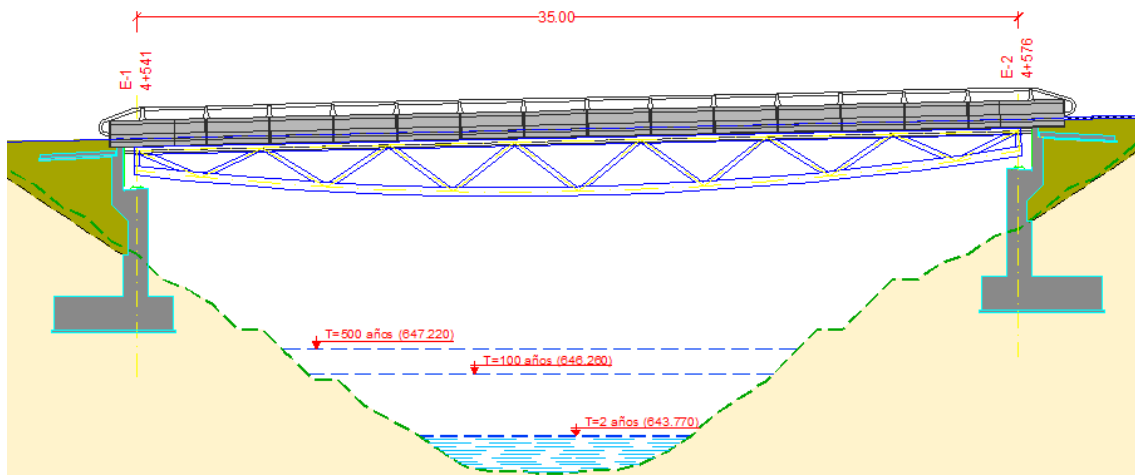


Figura 3. Alzado de pasarela.

En los extremos de la losa de hormigón irán atornillados unos postes metálicos cada 1,5m, los cuales formaran la estructura soporte para una barandilla según la figura 4.

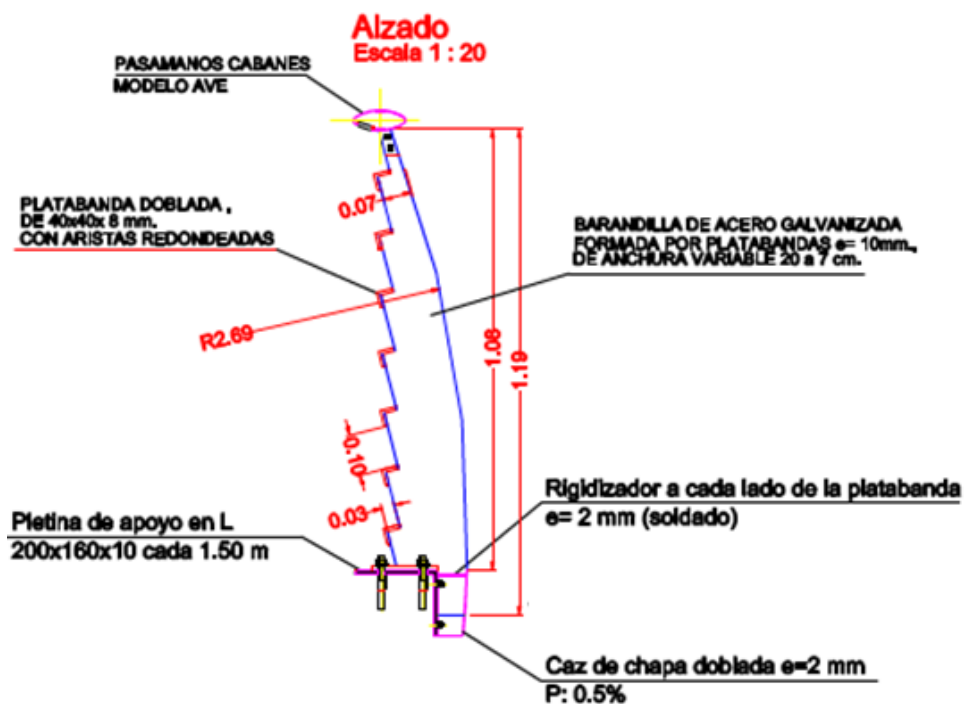


Figura 4. Detalle de barandilla pasarela.

## 2. MODELO DE CÁLCULO

El método de cálculo escogido es mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), éste es una de las herramientas más potentes usadas en la actualidad para la resolución numérica de un gran número de problemas de ingeniería. Este método es aplicable en una gran variedad de problemas, como pueden ser análisis estructurales, comportamiento mecánico de automóviles, problemas de transferencia de calor, electromagnéticos, etc.



En este proyecto se usará el programa comercial de cálculo por Elementos Finitos ABAQUS<sup>2</sup> con el módulo de Abaqus/CAE .

La estructura ha sido introducida en el programa comercial ABAQUS. La estructura metálica se discretiza con elementos unidimensionales tipo barra y la losa de hormigón por medio de elementos bidimensionales tipo placa. El número total de elementos es 1.282 y de nodos 2.212.

Los materiales utilizados son hormigón y acero para el cálculo se han considerado elástico lineales, con módulo elásticos 28.576,79 MPa y 210.000MPa respectivamente, coeficiente de Poisson 0,2 y 0,3 , coeficiente de dilatación térmica  $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  y  $10 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  por último de peso específico 25,0 kN/m<sup>3</sup> y 78,5 kN/m<sup>3</sup>.

Dada la complejidad del arco y la poca versatilidad del programa a la hora de girar elementos y unir partes en el modulo de Ensamblaje se opta por dibujar la estructura en Autocad 3D y exportar el archivo en formato .dxf al programa comercial en su versión gratuita de (IGES) para convertirlo en formato .igs y exportar en dicho formato a Abaqus/CAE como parte para análisis de resultados. En el Anexo I: Memoria de Cálculo viene detallado cada uno de los pasos para la creación del modelo así como los sucesivos.

Con las dos partes de la estructura dibujadas procedemos a la selección de materiales y dimensionado de las secciones correspondientes a cada uno de los elementos que componen la estructura.

Las secciones que compondrán la pasarela serán tres para el acero y una para el hormigón, las de acero se agruparan en:

- Cordón Inferior (CHS 355,6x25)
- Cordón Superior (CHS 273x16)
- Diagonales y Montantes (CHS 193,7x12,5)

En la sección del hormigón es donde se define el espesor de la losa o tablero. Cada una de ellas se asigna a sus elementos correspondientes en cada una de las partes. Hay que resaltar la importancia en cuanto a la estructura metálica de definir la orientación del material una vez definida la sección para evitar errores posteriores en el cálculo.

Seguidamente procedemos a la unión o ensamblaje de ambas partes, en esta fase tendremos en cuenta que las partes que hemos introducido corresponden a ejes en la estructura metálica y capa intermedia de la losa por lo que para la unión de ambas deberemos calcular la distancia que hay entre el eje del cordón superior y la capa intermedia de la losa. En esta última parte es donde definiremos las condiciones de contorno, condiciones iniciales, interacciones o cargas y las hipótesis de cálculo.

---

<sup>2</sup> Programa comercial ABAQUS basado en el Método de Elementos Finitos.

En cuanto a condiciones de contorno se han definido las siguientes:

- Un apoyo tendrá los desplazamientos impedidos.
- Dos apoyos tendrán el desplazamiento en el eje X impedidos; uno en cada extremo de la pasarela y en el mismo plano.
- Y el último tendrá impedidos los desplazamientos en X e Y, en Z libre.

En la Figura 5 se ven detalladamente las condiciones de contorno y la estructura metálica que será la portante de la pasarela.

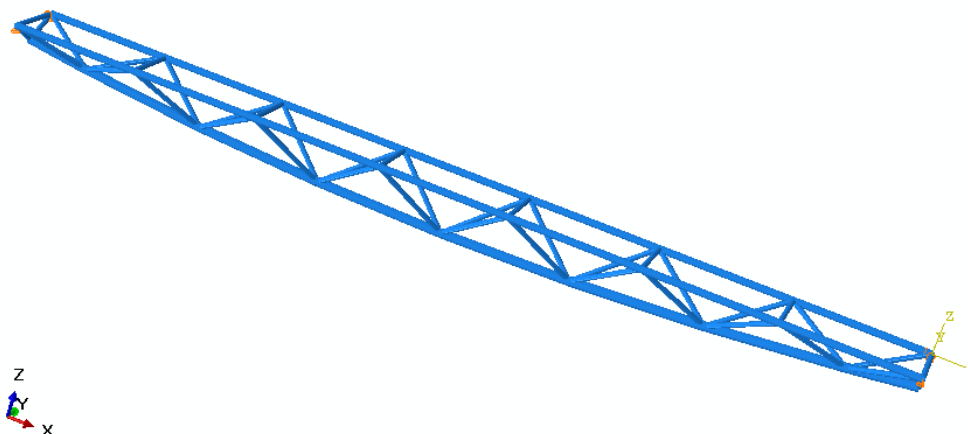


Figura 5. Perspectiva estructura metálica.

Además de las definidas anteriormente hay que definir la unión entre la estructura de hormigón y la estructura metálica para ello indicaremos que los grados de libertad en el cordón superior son solidarios a los de la losa de hormigón (Constraints→ Tie), de modo que los cordones superiores reciben los mismos grados de libertad que los puntos análogos en la losa de hormigón.

## 2.1 ACCIONES E HIPÓTESIS DE CARGA

A continuación se procederá a la distribución de todas las cargas a las que estará sometida para la comprobación de los cálculos.

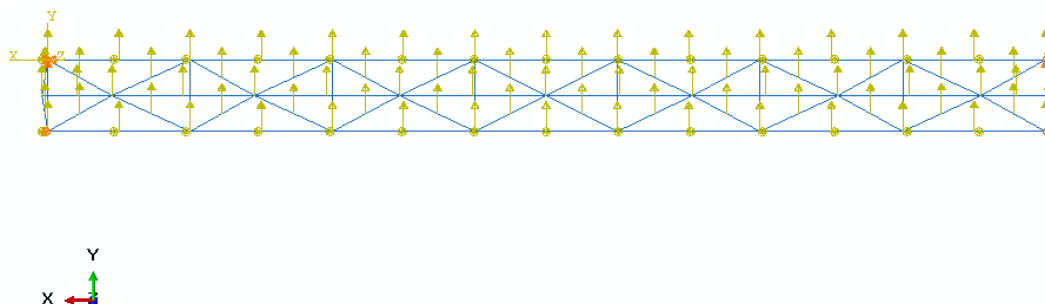
Se ha optado como solución más idóneas hacer dos partes en el cálculo, en un primer lugar el cálculo solo de la estructura metálica que será la portante de la pasarela ya que será la que soporte todos los esfuerzos y luego un cálculo posterior de la estructura mixta.

Esta solución es la más idónea debido a que será la estructura metálica la que soporte todo el esfuerzo del peso de la losa de hormigón, ya que durante la fase de construcción no sería correcto considerar la estructura portante como la unión de las dos, ya que para que dicha situación fuera posible es necesario que durante su construcción se habiliten un encofrado especial mediante puntales portantes durante el fraguado de la losa y por lo tanto el mayor encarecimiento de la estructura por personal especializado y mayor costo de materiales empleados.

Por lo tanto, tendremos dos situaciones de cálculo: en construcción y en servicio. Para ello se han distribuido las cargas a las que estará sometida la estructura en cada una de ellas y las hipótesis posibles y cuál es la más desfavorable para su diseño y cálculo.

En la hipótesis de construcción solo nos influye la estructura metálica (Figura 5). En ella tendremos las siguientes cargas:

- Peso propio de la estructura metálica: Se introduce como carga de gravedad.
- Peso propio de la losa de hormigón: Se introduce como carga lineal en los cordones superiores de la estructura.
- Viento estructura metálica: viene definida dicha acción en el Anexo I: Memoria de Cálculo e influye en cordones superiores, inferiores y diagonales; su componente será únicamente Y (ver Figura 6 para sistema de referencia).
- Viento proveniente de Losa de Hormigón: solo influyen en los cordones superiores y tendrá dos componentes una vertical y otra horizontal, debido a la componente vertical y horizontal del viento sobre el Tablero.
- Sobrecarga de Construcción que influyen en los cordones superiores y tendrá componente Z exclusivamente (ver Figura 6).



*Figura 6. Acciones en estructura metálica.*

La siguiente hipótesis contendrá la estructura mixta y las acciones que debemos tener en cuenta para el cálculo son las siguientes:

- Peso Propio de estructura metálica.
- Peso Propio de losa de hormigón.
- Carga Muerta: Peso propio de barandilla metálica, se introduce como carga lineal longitudinalmente en los extremos de la losa.
- Sobrecarga de Uso 1: la mitad longitudinal del tablero está cargada.
- Sobrecarga de Uso 2: la otra mitad longitudinal del tablero está cargada.
- Sobrecarga de Uso 1+2: todo el tablero está cargado.
- Viento sobre estructura metálica: viene definida dicha acción en el Anexo I: Memoria de Cálculo e influye en cordones superiores, inferiores y diagonales; su componente será únicamente Y (ver figura 6).
- Viento proveniente de Losa de Hormigón: tendrá dos componentes una vertical en toda la superficie de la losa y otra horizontal en el canto de la losa.
- Carga térmica de calentamiento: Debido a que la estructura metálica está más caliente que la de hormigón, debido a los cambios de temperatura en el acero son más rápidos que en el hormigón.
- Carga térmica de enfriamiento: proceso opuesto al anterior.
- Retracción y fluencia.

Los valores de cada una de las cargas esta desarrollado en el Anexo I : Memoria de Cálculo.

De las dos situaciones de cálculo tendremos que mirar la combinación de acciones más desfavorable para el diseño y cálculo de la pasarela.

## 2.2 COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO):

A la hora de determinar cada una de las hipótesis es necesario en primer lugar determinar que acciones actúan como acción principal y cual secundaria y a su vez aplicar el factor de simultaneidad.

Siguiendo la normativa de Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11) la fórmula que nos indicará la hipótesis es la siguiente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde:

$G_{k,j}$  valor característico de cada acción permanente.

$G_{k,m}^*$  valor característico de cada acción permanente de valor no constante.

$Q_{k,1}$  valor característico de la acción variable dominante.

$\psi_{0,i} Q_{k,i}$  valor de combinación de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante.

$\gamma_G, \gamma_Q$  coeficientes parciales.

En las tablas 1 y 2 podemos obtener los diferentes valores de los coeficientes parciales y de las acciones concomitantes.

Tabla 1. Coeficientes parciales para las acciones  $\gamma_F$ <sup>3</sup>

Acción		Efecto	
		Favorable	Desfavorable
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,35
	Carga muerta	1,0	1,35
Permanente de valor no constante (G*)	Pretensado $P_1$	1,0	1,0 / 1,2 <sup>(1)</sup> / 1,3 <sup>(2)</sup>
	Pretensado $P_2$	1,0	1,35
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,35
	Empuje del terreno	1,0	1,5
	Asientos	0	1,2 / 1,35 <sup>(3)</sup>
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,35
Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0	1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5
	Acciones climáticas	0	1,5
	Empuje hidrostático	0	1,5
	Empuje hidrodinámico	0	1,5
	Sobrecargas de construcción	0	1,35

(1) El coeficiente  $\gamma_{G^*} = 1,2$  será de aplicación al pretensado  $P_1$  en el caso de verificaciones locales tales como la transmisión de la fuerza de pretensado al hormigón en zonas de anclajes, cuando se toma como valor de la acción el que corresponde a la carga máxima (tensión de rotura) del elemento a tesar.

(2) El coeficiente  $\gamma_{G^*} = 1,3$  se aplicará al pretensado  $P_1$  en casos de inestabilidad (pandeo) cuando ésta pueda ser inducida por el axil debido a un pretensado exterior.

(3) El coeficiente  $\gamma_{G^*} = 1,35$  corresponde a una evaluación de los efectos de los asientos mediante un cálculo elasto-plástico, mientras que el valor  $\gamma_{G^*} = 1,2$  corresponde a un cálculo elástico de esfuerzos.

<sup>3</sup> Tabla 6.2-b. Coeficientes parciales para las acciones  $\gamma_F$  de la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Pág.47.

Tabla 2. Factores de simultaneidad  $\psi^4$

Acción			$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Sobrecarga de uso	gr 1, Cargas verticales	Vehículos pesados	0,75	0,75	0
		Sobrecarga uniforme	0,4	0,4	0 / 0,2
		Carga en aceras	0,4	0,4	0
	gr 2, Fuerzas horizontales		0	0	0
	gr 3, Peatones		0	0	0
	gr 4, Aglomeraciones		0	0	0
	Sobrecarga de uso en pasarelas		0,4	0,4	0
Viento	$F_{wk}$	En situación persistente	0,6	0,2	0
		En construcción	0,8	0	0
		En pasarelas	0,3	0,2	0
Acción térmica	$T_k$		0,6	0,6	0,5
Nieve	$Q_{Sn,k}$	En construcción	0,8	0	0
Acción del agua	$W_k$	Empuje hidrostático	1,0	1,0	1,0
		Empuje hidrodinámico	1,0	1,0	1,0
Sobrecargas de construcción	$Q_c$		1,0	0	1,0

(1) El factor de simultaneidad  $\psi_2$  correspondiente a la sobrecarga uniforme se tomará igual a 0, salvo en el caso de la combinación de acciones en situación sísmica (apartado 6.3.1.3), para la cual se tomará igual a 0,2.

Por lo tanto la hipótesis en fase de construcción quedará de la siguiente forma:

**HIPÓTESIS 1 CONSTRUCCIÓN:**

1,35 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN) + 1,5 x VIENTO + 1,35 x 1,0 x SO CONSTRUCCIÓN

Otra hipótesis correspondería a que la sobrecarga fuera la acción dominante y el viento la concomitante pero si nos fijamos en los coeficientes de simultaneidad el valor sería siempre menor por lo que no es necesario considerarla ya que siempre será más desfavorable la anterior hipótesis.

Una vez planteada la fase de construcción continuamos con las hipótesis que corresponden a la fase de servicio en la cual ya tenemos en cuenta la estructura mixta de la losa de hormigón y la estructura portante metálica.

En primer lugar enumeramos las acciones que tenemos según sean acciones permanentes o variables (ver Tabla 3).

PERMANENTE	VARIABLES
PESO PROPIO ESTRUCTURA METALICA	SOBRECARGA 1 ó 2 MITAD DE TABLERO
PESO PROPIO LOSA HORMIGÓN	SOBRECARGA 1+2 : TODO EL TABLERO
CARGA MUERTA (PESO BARANDILLA)	VIENTO (ESTR. METÁLICA Y LOSA HORMIGÓN)
RETRACCIÓN Y FLUENCIA HORMIGÓN	ACCIÓN TÉRMICA ENFRIAMIENTO
	ACCIÓN TÉRMICA CALENTAMIENTO

Tabla 3. Clasificación de acciones según tipología.

<sup>4</sup> Tabla 6.1-a. Factores de simultaneidad  $\psi$  de la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Pág.47.

En primer lugar podemos descartar la acción debida al enfriamiento ya que siempre será favorable y lo que buscamos es lo desfavorable.

En resumen de todas las hipótesis posibles obtenemos las tres más desfavorables para el cálculo de la pasarela y según los valores de la tabla 1 y 2 :

**HIPÓTESIS 1 CONJUNTO:**

1,35 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN + CM BARANDILLA+ RETRACCIÓN/FLUENCIA)  
+ 1,35 x SC1 (MITAD TABLERO) + 1,5 x 0,3 VIENTO + 1,5 x 0,6 x AT CALENTAMIENTO

**HIPÓTESIS 2 CONJUNTO:**

1,35 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN + CM BARANDILLA+ RETRACCIÓN/FLUENCIA)  
+ 1,35 x (SC1+SC2) + 1,5 x 0,3 VIENTO + 1,5 x 0,6 x AT CALENTAMIENTO

**HIPÓTESIS 3 CONJUNTO:**

1,35 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN + CM BARANDILLA+ RETRACCIÓN/FLUENCIA)  
+ 1,35 x 0,4 x (SC1+SC2) + 1,5 x 0,3 VIENTO + 1,5 x AT CALENTAMIENTO

### **2.3 COMBINACIÓN DE ACCIONES (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO):**

El planteamiento es similar al anterior la diferencia que existe es que las hipótesis que planteamos son con el conjunto mixto de la pasarela pero en este caso haremos dos distinciones una en el caso de que la combinación sea característica (poco probable o rara) y en el caso de que sea frecuente. Cada una de ellas seguirá las siguientes fórmulas:

- Combinación característica (poco probable o rara):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Combinación frecuente.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Los valores de los coeficientes vendrán definidos por las Tabla 2 y 4.

Tabla 4. Coeficientes parciales para las acciones  $\gamma_F$ <sup>5</sup>

Acción		Efecto	
		Favorable	Desfavorable
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,0
	Carga muerta	1,0	1,0
Permanente de valor no constante (G')	Pretensado $P_1$	0,9 <sup>(1)</sup>	1,1 <sup>(1)</sup>
	Pretensado $P_2$	1,0	1,0
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,0
	Empuje del terreno	1,0	1,0
	Asientos	0	1,0
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,0
Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0	1,0
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,0
	Acciones climáticas	0	1,0
	Empuje hidrostático	0	1,0
	Empuje hidrodinámico	0	1,0
	Sobrecargas de construcción	0	1,0

(1) Para la acción del pretensado se tomarán los coeficientes que indique la EHE-08 o normativa que la sustituya. En la tabla figuran los valores que la EHE-08 recoge para el caso de estructuras postesas. En el caso de estructuras pretensas, los coeficientes parciales son 0,95 y 1,05 para efecto favorable y desfavorable, respectivamente.

Por lo tanto según lo anterior descrito tendremos las siguientes hipótesis:

#### COMBINACIÓN CARACTERÍSTICA (POCO PROBABLE O RARA)

##### HIPÓTESIS 1:

1,0 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN + CM BARANDILLA + RETRACCIÓN/FLUENCIA)  
+ 1,0 x (SC1+ SC2) + 1,0 x 0,3 VIENTO + 1,0 x 0,6 x AT CALENTAMIENTO

##### HIPÓTESIS 2:

1,0 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN + CM BARANDILLA + RETRACCIÓN/FLUENCIA)  
+ 1,0 x 0,4 x (SC1+ SC2) + 1,0 x 0,3 VIENTO + 1,0 x AT CALENTAMIENTO

#### COMBINACIÓN FRECUENTE

##### HIPÓTESIS 1:

1,0 x (PP METÁLICA + PP HORMIGÓN + CM BARANDILLA + RETRACCIÓN/FLUENCIA)  
+ 0,4 x (SC1+ SC2) + 1,0 x 0,0 VIENTO + 1,0 x 0,5x AT CALENTAMIENTO

<sup>5</sup> Tabla 6.2-c. Coeficientes parciales para las acciones  $\gamma_F$  (ELS) de la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Pág.47.

### 3. RESULTADOS Y COMPROBACIONES

Para justificar la seguridad de la pasarela y su aptitud en servicio emplearemos para su verificación las Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras (RPM-95) y las Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras (RPX-95).

Debido a la parte portante de la pasarela y a las similitudes en cuanto a las comprobaciones del cálculo de ambas guías nos basaremos principalmente en la RPM-95. Debido a que la estructura metálica es la que tendrá mayores esfuerzos.

Como ocurre con las hipótesis diferenciaremos entre Estado Límite Último y Estado Límite de Servicio para hacer las comprobaciones pertinentes de cada una de las secciones que forman la estructura.

#### 3.1 VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU):

Siguiendo lo indicado en el Capítulo 6 de las Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras (RPM-95) se comprueba que para todas las hipótesis planteadas en el apartado 2.1. de la presente memoria de cálculo deben cumplir las siguientes condiciones:

- **Estado Límite de Rotura:**  $E_{d, dst} \leq E_{d, stb}$   
 $S_d$  valor de cálculo de la sollicitación que actúa sobre cada sección.  
 $R_d$  valor de cálculo de la resistencia última de dicha sección.
- **Estado Límite de Pandeo Lateral:**  $M_{LT, Rd} = \chi_{LT} M_{Rd}$

En primer lugar para comprobar la seguridad estructural de la pasarela nos basaremos en evaluar los esfuerzos últimos de las secciones  $R_d$ , teniendo en cuenta como coeficiente parcial de seguridad para la resistencia de:

$$\gamma_M = 1,10$$

Para ello calcularemos los esfuerzos últimos que soportaran cada una de las secciones y se compararán con los esfuerzos en cada una de los elementos que se han formado al realizar el mallado de la estructura. Los esfuerzos a calcular son:

- Momento flector último.
- Esfuerzo cortante último.
- Esfuerzo de compresión último.
- Esfuerzo de tracción último.
- Momento torsor último.
- Momento flector último con pandeo lateral.

#### Momento Flector Último:

Partiremos de que el tipo de secciones que forman la estructura metálica serán secciones compactas, que en momento resistente corresponde a una plastificación completa de la sección. Este momento se calculará con la fórmula siguiente:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_M} W_{pl} f_y$$

donde:  $W_{pl}$  es el modulo resistente plástico de la sección.

Tenemos tres tipos de secciones: Cordón Inferior, Cordón superior y Diagonales y Montantes. Todas ellas son secciones circulares calcularemos cada uno de sus esfuerzos en la componente X e Y. En las tablas 5, 6 y 7 podemos ver los valores de cálculo y su resultado realizados con hojas de cálculo Excel.

### Esfuerzo Cortante Último:

Según el apartado 6.3.3.2.3 del RPM-95, consideramos las secciones sin rigidizadores intermedios por lo que el cálculo del cortante se realiza con la misma fórmula que indica para paneles extremos de vigas con rigidizadores intermedios que viene definida por las siguientes expresiones:

$$V_{Rd} = \frac{1}{\gamma_M} V_{cr}$$

siendo:

$V_{cr}$  esfuerzo cortante que provoca el abollamiento, viene definido por la siguiente expresión:

$$V_{cr} = d t_w \tau_t$$

siendo:

d altura total del alma (consideraremos el radio del tubo)

$t_w$  espesor del alma

$$\tau_t = \chi \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{con: } \chi = 1 - 0,8 (\bar{\lambda}_w - 0,8) \geq 1 \quad \bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_{yw}/\sqrt{3}}{\tau_{cr}}} \quad \tau_{cr} = k_r 0,9 E \left( \frac{t_w}{d} \right)^2$$

En las tablas 8, 9 y 10 se pueden ver las hojas de cálculo Excel con los valores de cada una de las variables y el valor del cortante último.

### Esfuerzo de Compresión Último:

Para la estimación de este esfuerzo es necesario tener en cuenta el pandeo y viene definida por la siguiente expresión:

$$N_{p,Rd} = \frac{1}{\gamma_M} \chi f_y A_r \geq A_{net} f_y$$

El valor del coeficiente de pandeo se obtiene con la siguiente expresión:  $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{1/2}} \geq 1$

$$\text{siendo: } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_E} \frac{A_r}{A}}$$

A área bruta de la sección

$\sigma_E$  tensión crítica de Euler

$\lambda = l_p/i$  esbeltez mecánica.

$l_p$  longitud de pandeo

i radio de giro sección bruta

$$\phi = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$\alpha = 0,49$  factor de imperfección.

En las tablas 5, 6 y 7 se muestran las hojas de cálculo Excel con los valores de las variables para la estimación del esfuerzo de compresión último con pandeo lateral.

### **Esfuerzo de Tracción Último:**

El esfuerzo de tracción último de cálculo de una sección viene definido por la siguiente expresión:

$$N_{Rd} = \frac{1}{\gamma_M} f_y A$$

En las tablas 5, 6 y 7 se muestran las hojas de cálculo Excel con la estimación del esfuerzo de tracción último.

### **Momento Torsor Último:**

La expresión para el cálculo del Momento torsor último viene definido por la siguiente expresión:

$$T_{Rd} = 2 A_\phi \left( \frac{V_{Rd,i}}{h_i} \right)_{\min}$$

Debido a los valores obtenidos en cada una de las hipótesis como se puede observar en las tablas 11, 12 y 13; consideramos que dichos valores son de valor mucho menor respecto al resto de esfuerzos, por lo que su efecto sobre la estructura se considerará despreciable frente al resto de esfuerzos.

### **Momento Flector Último con pandeo lateral:**

Si existe la posibilidad de que una viga pandee lateralmente, el momento último de cálculo de pandeo lateral tiene el valor:

$$M_{LT,Rd} = \chi_{LT} M_{Rd}$$

Siendo  $M_{Rd}$  el momento flector último de cálculo de la sección calculado anteriormente y el coeficiente de reducción  $\chi_{LT}$  se obtiene:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{1/2}} \geq 1$$

donde:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\alpha_{LT} = 0,21 \quad \text{para perfiles laminados}$$

$$\alpha_{LT} = 0,49 \quad \text{para elementos armados}$$

El valor de la esbeltez relativa frente al pandeo lateral, viene definido con la siguiente expresión:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[ \frac{\gamma_M M_{Rd}}{M_{cr}} \right]^{1/2}$$

Si el valor de la esbeltez relativa es menor que 0,4 como ocurre en nuestro caso según las tablas 8, 9 y 10 se puede considerar que no existe riesgo de pandeo lateral por lo que emplearemos solamente el Momento flector último calculado en las tablas 5, 6 y 7.

### Interacción de Esfuerzos para una sección:

Según los resultados observables de todas las hipótesis reflejados en las tablas 17, 18 y 19; así como los cálculos anteriores llegamos a la conclusión que  $V_x/V_{xRD}$  son inferiores a 0,5 de valor por lo que nos encontramos en el dominio de seguridad representado por la línea recta C-D según la Figura 7. Como consecuencia no es necesario dicha interacción, solo se comprueban las relaciones de esfuerzos cortante último y esfuerzo cortante de la sección en X e Y.

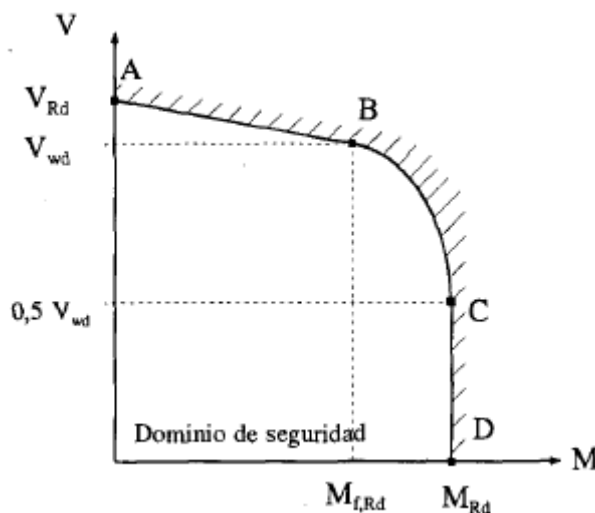


Figura 7 Representación Dominio de Seguridad en Interacción momento flector y esfuerzo cortante<sup>6</sup>

Por lo tanto, la comprobación que realizamos y que vemos en las tres últimas columnas de las tablas 17, 18 y 19 corresponden con la iteración de momento flector y esfuerzo de compresión que en las tablas 17, 18 y 19 se llama coeficiente axil momento y la expresión que debe cumplir es la siguiente:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

Observamos que en todas cumple la relación  $\leq 1$  por lo que verificamos que las secciones escogidas son correctas y cumplen con lo indicado en la normativa vigente.

<sup>6</sup> Figura 6.3.5.a) Representación Dominio de Seguridad en Interacción momento flector y esfuerzo cortante

CORDONES SUPERIORES	
SECCIÓN CIRCULAR CHS 273X16	
Longitud de la barra (mm)	5000
Espesor (mm)	16
Área (mm <sup>2</sup> )	12900
I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	107000000,00
I <sub>y</sub> (mm <sup>4</sup> )	107000000,00
I <sub>t</sub> (mm <sup>4</sup> )	214000000,00
i <sub>x</sub> (mm)	91,00
i <sub>y</sub> (mm)	91,00
W <sub>x</sub> (mm <sup>3</sup> )	784000,00
W <sub>y</sub> (mm <sup>3</sup> )	784000,00
W <sub>P,x</sub> (mm <sup>3</sup> )	1060000,00
W <sub>P,y</sub> (mm <sup>3</sup> )	1060000,00
f <sub>y</sub> (Mpa)	355
γ <sub>M</sub>	1,1
β <sub>x</sub>	1
β <sub>y</sub>	1
I <sub>px</sub> (mm)	5000
I <sub>py</sub> (mm)	5000

Tabla 5. Hoja de cálculo propiedades y  $M_{Rd}(CS)$  para el cordón superior.

Momento último (secciones compactas)	
$M_{Rdx}$ (m Tn)	34,209
$M_{Rdy}$ (m Tn)	34,209

CORDÓN INFERIOR	
SECCIÓN CIRCULAR CHS355,6X25	
Longitud de la barra (mm)	5023
Espesor (mm)	25
Área (mm <sup>2</sup> )	26000
I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	357000000,00
I <sub>y</sub> (mm <sup>4</sup> )	357000000,00
I <sub>t</sub> (mm <sup>4</sup> )	714000000,00
i <sub>x</sub> (mm)	117,00
i <sub>y</sub> (mm)	117,00
W <sub>x</sub> (mm <sup>3</sup> )	2010000,00
W <sub>y</sub> (mm <sup>3</sup> )	2010000,00
W <sub>P,x</sub> (mm <sup>3</sup> )	2740000,00
W <sub>P,y</sub> (mm <sup>3</sup> )	2740000,00
f <sub>y</sub> (Mpa)	355
γ <sub>M</sub>	1,1
β <sub>x</sub>	1
β <sub>y</sub>	1
I <sub>px</sub> (mm)	5023
I <sub>py</sub> (mm)	5023

Tabla 6. Hoja de cálculo propiedades y  $M_{Rd}(CI)$  para el cordón inferior.

Momento último (secciones compactas)	
$M_{Rdx}$ (m Tn)	88,427
$M_{Rdy}$ (m Tn)	88,427

DIAGONALES Y MONTANTES	
SECCIÓN CIRCULAR CHS 193,7X12,5	
Longitud de la barra (mm)	3437
Espesor (mm)	12,5
Área (mm <sup>2</sup> )	7120
I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	29300000,00
I <sub>y</sub> (mm <sup>4</sup> )	29300000,00
I <sub>t</sub> (mm <sup>4</sup> )	58700000,00
i <sub>x</sub> (mm)	64,20
i <sub>y</sub> (mm)	64,20
W <sub>x</sub> (mm <sup>3</sup> )	303000,00
W <sub>y</sub> (mm <sup>3</sup> )	303000,00
W <sub>P,x</sub> (mm <sup>3</sup> )	411000,00
W <sub>P,y</sub> (mm <sup>3</sup> )	411000,00
f <sub>y</sub> (Mpa)	355
γ <sub>M</sub>	1,1
β <sub>x</sub>	1
β <sub>y</sub>	1
I <sub>px</sub> (mm)	3437
I <sub>py</sub> (mm)	3437

Tabla 7. Hoja de cálculo propiedades y  $M_{Rd}(D \text{ y } M)$  para diagonales y montantes

Momento último (secciones compactas)	
$M_{Rdx}$ (m Tn)	13,264
$M_{Rdy}$ (m Tn)	13,264

CORDONES SUPERIORES	
SECCIÓN CIRCULAR CHS 273X16	
Cortante último	
$k_r$	5,34
E (Mpa)	210000
Dir x	
d (mm)	136,5
$\tau_{cr}$ (MPa)	13866,847
$\lambda_w$	0,12
$\chi_{aux}$	1,54
$\chi$	1
$\tau_t$ (Mpa)	204,959
<b><math>V_{crx}</math> (Tn)</b>	<b>89,526</b>
Dir y	
d (mm)	136,5
$\tau_{cr}$ (MPa)	13866,847
$\lambda_w$	0,122
$\chi_{aux}$	1,543
$\chi$	1
$\tau_t$ (Mpa)	204,959
<b><math>V_{cry}</math> (Tn)</b>	<b>89,526</b>

Tabla 8.Hoja de cálculo cortante  $V_{Rd}(CS)$  para el cordón superior.

CORDÓN INFERIOR	
SECCIÓN CIRCULAR CHS355,6X25	
Cortante último	
$k_r$	5,34
E (Mpa)	210000
Dir x	
d (mm)	177,8
$\tau_{cr}$ (MPa)	19953,52205
$\lambda_w$	0,10
$\chi_{aux}$	1,56
$\chi$	1
$\tau_t$ (Mpa)	204,959
<b><math>V_{crx}</math> (Tn)</b>	<b>182,209</b>
Dir y	
d (mm)	177,8
$\tau_{cr}$ (MPa)	19953,522
$\lambda_w$	0,101
$\chi_{aux}$	1,559
$\chi$	1
$\tau_t$ (Mpa)	204,959
<b><math>V_{cry}</math> (Tn)</b>	<b>182,209</b>

Tabla 9.Hoja de cálculo cortante  $V_{Rd}(CI)$  para el cordón inferior.

DIAGONALES Y MONTANTES	
SECCIÓN CIRCULAR CHS 193,7X12,5	
Cortante último	
$k_r$	5,34
E (Mpa)	210000
Dir x	
d (mm)	96,85
$\tau_{cr}$ (MPa)	16812,17249
$\lambda_w$	0,11
$\chi_{aux}$	1,55
$\chi$	1
$\tau_t$ (Mpa)	204,959
<b><math>V_{crx}</math> (Tn)</b>	<b>49,626</b>
Dir y	
d (mm)	96,85
$\tau_{cr}$ (MPa)	16812,172
$\lambda_w$	0,110
$\chi_{aux}$	1,552
$\chi$	1
$\tau_t$ (Mpa)	204,959
<b><math>V_{cry}</math> (Tn)</b>	<b>49,626</b>

Tabla 10.Hoja de cálculo cortante  $V_{Rd}(D \text{ y } M)$  para diagonales y montantes.

CORDONES SUPERIORES	
SECCIÓN CIRCULAR CHS 273X16	
Esfuerzo compresión último considerando pandeo	
En dirección X	
$\lambda$	54,945
E (MPa)	210000
$\sigma_E$ (Mpa)	686,537
$\alpha$	0,49
$\lambda^*$	0,719
$\Phi$	0,886
$\chi$	0,713
$N_{p,Rd}$ (Tn)	296,768
En dirección Y	
$\lambda$	54,945
E (MPa)	210000,000
$\sigma_E$ (Mpa)	686,537
$\alpha$	0,49
$\lambda^*$	0,719
$\Phi$	0,886
$\chi$	0,713
$N_{p,Rd}$ (Tn)	296,768
Axil compresión último (Tn)	
296,768	

Tabla 11.Hoja de cálculo esfuerzo de compresión y tracción(CS) para el cordón superior

Esfuerzo de tracción último	
$N_{Rd}$ (Tn)	416,318

CORDÓN INFERIOR	
SECCIÓN CIRCULAR CHS355,6X25	
Esfuerzo compresión último considerando pandeo	
En dirección X	
$\lambda$	42,932
E (MPa)	210000
$\sigma_E$ (Mpa)	1124,518
$\alpha$	0,49
$\lambda^*$	0,562
$\Phi$	0,747
$\chi$	0,808
$N_{p,Rd}$ (Tn)	677,777
En dirección Y	
$\lambda$	42,932
E (MPa)	210000,000
$\sigma_E$ (Mpa)	1124,518
$\alpha$	0,49
$\lambda^*$	0,562
$\Phi$	0,747
$\chi$	0,808
$N_{p,Rd}$ (Tn)	677,777
Axil compresión último (Tn)	
677,777	

Tabla 12.Hoja de cálculo esfuerzo de compresión y tracción (CI) para el cordón inferior.

Esfuerzo de tracción último	
$N_{Rd}$ (Tn)	839,091

DIAGONALES Y MONTANTES	
SECCIÓN CIRCULAR CHS 193,7X12,5	
Esfuerzo compresión último considerando pandeo	
En dirección X	
$\lambda$	53,536
E (MPa)	210000
$\sigma_E$ (Mpa)	723,156
$\alpha$	0,49
$\lambda^*$	0,701
$\Phi$	0,868
$\chi$	0,724
$N_{p,Rd}$ (Tn)	166,429
En dirección Y	
$\lambda$	53,536
E (MPa)	210000,000
$\sigma_E$ (Mpa)	723,156
$\alpha$	0,49
$\lambda^*$	0,701
$\Phi$	0,868
$\chi$	0,724
$N_{p,Rd}$ (Tn)	166,429
Axil compresión último (Tn)	
166,429	

Tabla13.Hoja de cálculo esfuerzo de compresión y tracción(D,M) para diagonales y montantes.

Esfuerzo de tracción último	
$N_{Rd}$ (Tn)	229,782

CORDONES SUPERIORES		
SECCIÓN CIRCULAR CHS 273X16		
Momento último considerando pandeo lateral		
En dirección X		
$\alpha_{LT}$	0,49	
$C_1$	1	
E (Mpa)	210000	
u	0,3	
G (Mpa)	80769,231	
$M_{cr,t}$ (mTn)	1238,261	Despreciamos la parte debida a torsión no uniforme
$\lambda_{LT}$	0,174	Si es menor que 0,4 no existe riesgo de pandeo lateral
En dirección Y		
$\alpha_{LT}$	0,49	
$C_1$	1	
E (Mpa)	210000	
u	0,3	
G (Mpa)	80769,231	
$M_{cr,t}$ (mTn)	1238,261	Despreciamos la parte debida a torsión no uniforme
$\lambda_{LT}$	0,174	Si es menor que 0,4 no existe riesgo de pandeo lateral

Tabla 14. Hoja de cálculo momento con pandeo (CS) para el cordón superior.

CORDÓN INFERIOR		
SECCIÓN CIRCULAR CHS355,6X25		
Momento último considerando pandeo lateral		
En dirección X		
$\alpha_{LT}$	0,49	
$C_1$	1	
E (Mpa)	210000	
u	0,3	
G (Mpa)	80769,231	
$M_{cr,t}$ (mTn)	4112,478	Despreciamos la parte debida a torsión no uniforme
$\lambda_{LT}$	0,154	Si es menor que 0,4 no existe riesgo de pandeo lateral
En dirección Y		
$\alpha_{LT}$	0,49	
$C_1$	1	
E (Mpa)	210000	
u	0,3	
G (Mpa)	80769,231	
$M_{cr,t}$ (mTn)	4112,478	Despreciamos la parte debida a torsión no uniforme
$\lambda_{LT}$	0,154	Si es menor que 0,4 no existe riesgo de pandeo lateral

Tabla 15. Hoja de cálculo momento con pandeo (CI) para el cordón inferior.

DIAGONALES Y MONTANTES		
SECCIÓN CIRCULAR CHS 193,7X12,5		
Momento último considerando pandeo lateral		
En dirección X		
$\alpha_{LT}$	0,49	
$C_1$	1	
E (Mpa)	210000	
u	0,3	
G (Mpa)	80769,231	
$M_{cr,t}$ (mTn)	493,693	Despreciamos la parte debida a torsión no uniforme
$\lambda_{LT}$	0,172	Si es menor que 0,4 no existe riesgo de pandeo lateral
En dirección Y		
$\alpha_{LT}$	0,49	
$C_1$	1	
E (Mpa)	210000	
u	0,3	
G (Mpa)	80769,231	
$M_{cr,t}$ (mTn)	493,693	Despreciamos la parte debida a torsión no uniforme
$\lambda_{LT}$	0,172	Si es menor que 0,4 no existe riesgo de pandeo lateral

Tabla 16. Hoja de cálculo momento con pandeo (D,M) para diagonales y montantes.

*Tabla 17. Hoja de cálculo comprobación ELU (valores máximos)*

CORDONES SUPERIORES										
SECCIÓN CIRCULAR CHS 273X16										
HIPOTESIS	ELEMENTO	AXIL (kN)	CORTANTE Vx (kN)	CORTANTE Vy (kN)	TORSOR Mt (kN·m)	FLECTOR Mx (kN·m)	FLECTOR My (kN·m)	Coef axil momento	Vx/VRd,x	Vy/VRd,y
C1CONST	299	-2614,867	2,884847934	64,5111	1,65294258	25,51482	-3,55E-03	0,955710212	0,00322235	0,07205828
C1CONJ	159	-919,472	-127,44775	9,6901	5,026	27,7587	9,883256	0,419863524	0,14235791	0,01082375
C1CONJ	349	-1213,79	-2,06952	144,2746	-19,75714	11,00901	10,065436	0,470607832	0,00231163	0,16115334
C1CONJ	349	-1213,79	-2,06952	144,2746	-19,75714	11,00901	10,065436	0,470607832	0,00231163	0,16115334
C1CONJ	159	-919,472	-127,44775	9,6901	5,026	27,7587	9,883256	0,419863524	0,14235791	0,01082375
C3CONJ	333	-2203,419	60,1418488	56,8328	-4,33918	11,30845	9,9566564	0,804634097	0,06717787	0,06348169

C1CONST: HIPOTESIS 1 CONSTRUCCIÓN      C1CONJ: HIPOTESIS 1 CONJUNTO      C2CONJ: HIPOTESIS 2 CONJUNTO      C3CONJ: HIPOTESIS 3 CONJUNTO

*Tabla 18. Hoja de cálculo comprobación ELU (valores máximos)*

CORDÓN INFERIOR										
SECCIÓN CIRCULAR CHS355,6X25										
HIPOTESIS	ELEMENTO	AXIL (kN)	CORTANTE Vx (kN)	CORTANTE Vy (kN)	TORSOR Mt (kN·m)	FLECTOR Mx (kN·m)	FLECTOR My (kN·m)	Coef axil momento	Vx/VRd,x	Vy/VRd,y
C2CONJ	206	6075,96	-0,681970098	101,7876	-0,147904076	-153,7377	0,079557127	0,898059999	3,74E-04	0,05586312
C2CONJ	207	6075,79	0,683814098	-101,7755	-0,153470076	-153,7245	-0,050997627	0,897992515	3,75E-04	0,05585648
C1CONST	241	117,06	-5,432042004	-67,5134	-0,903470851	14,54395	16,52889821	0,049090276	2,98E-03	0,03705274
C1CONST	241	117,06	-5,432042004	-67,5134	-0,903470851	14,54395	16,52889821	0,049090276	2,98E-03	0,03705274

C1CONST: HIPOTESIS 1 CONSTRUCCIÓN      C1CONJ: HIPOTESIS 1 CONJUNTO      C2CONJ: HIPOTESIS 2 CONJUNTO      C3CONJ: HIPOTESIS 3 CONJUNTO

Tabla 19. Hoja de cálculo comprobación ELU (valores máximos)										
DIAGONALES Y MONTANTES										
SECCIÓN CIRCULAR CHS 193,7X12,5										
HIPOTESIS	ELEMENTO	AXIL (kN)	CORTANTE V <sub>x</sub> (kN)	CORTANTE V <sub>y</sub> (kN)	TORSOR M <sub>t</sub> (kN·m)	FLECTOR M <sub>x</sub> (kN·m)	FLECTOR M <sub>y</sub> (kN·m)	Coef axil momento	V <sub>x</sub> /VR <sub>d,x</sub>	V <sub>y</sub> /VR <sub>d,y</sub>
C1CONJ	442	1405,946	-0,09597	1,703755	-2,103292	-12,31143	2,104336	0,720543945	1,93E-04	0,0034332
C2CONJ	147	-1022,889	-3,41664	3,111244	5,26101	-5,46428	1,5764339	0,667692508	6,88E-03	0,00626941
C2CONJ	373	1477,906	-0,00989	-0,9273707	-1,1683	-10,29298	-2,4762	0,739446747	1,99E-05	0,00186873
C2CONJ	360	76,4827	-71,5558	-14,2023	0,213488	-3,0647	-6,8004	0,107659413	1,44E-01	0,02861878
C2CONJ	361	76,7541	-71,5498	-14,4998	-35,1831	4,04158	-6,8014	0,115149911	1,44E-01	0,02921827
C2CONJ	359	76,2114	-71,545	-13,98954	35,6038	-10,05201	-6,7984	0,160204659	1,44E-01	0,02819005
C1CONST	428	60,4175	-49,3612	21,79503	23,76437	6,95409	-9,01351	0,146675587	9,95E-02	0,04391874
C1CONJ	442	1405,946	-0,09597	1,703755	-2,103292	-12,31143	2,104336	0,720543945	1,93E-04	0,0034332
C1CONST	169	60,54	49,5725	21,30999	-23,8301	6,71487	9,01257	0,144918296	9,99E-02	0,04294135
C1CONST: HIPOTESIS 1 CONSTRUCCIÓN			C1CONJ: HIPOTESIS 1 CONJUNTO			C2CONJ: HIPOTESIS 2 CONJUNTO			C3CONJ: HIPOTESIS 3 CONJUNTO	

### 3.2 VERIFICACIÓN EN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS):

De acuerdo a lo establecido en la vigente normativa de Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera debemos comprobar por un lado el Estado Límite de Plastificaciones locales y por otro el Estado Límite de Deformaciones de la Estructura.

#### Estado Límite de Plastificaciones Locales:

Para las hipótesis planteadas en el apartado 3.3 de la presente memoria las tensiones obtenidas de Von Mises deben cumplir para las diferentes combinaciones la siguiente regla:

- Combinación frecuente:  $\sigma_{VM} \leq 0,75f_y$   
 $\sigma_{VM} \leq 2,6625 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$
- Combinación poco probable:  $\sigma_{VM} \leq 0,9f_y$   
 $\sigma_{VM} \leq 3,195 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$

En las tablas 20 y 21 se pueden observar la hoja de cálculo Excel con la comprobación de cada una de las combinaciones teniendo en cuenta que  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ .

Tabla 20. Hoja de cálculo comprobación ELS (valores máximos)			
ELEMENTO	HIPÓTESIS		CUMPLE
	C1 RARA	C2 RARA	
	$\sigma_{VM} \text{ (kN·m}^2\text{)}$	$\sigma_{VM} \text{ (kN·m}^2\text{)}$	
76	1,58E+05	1,71E+05	SI
85	1,58E+05	1,71E+05	SI
197	1,94E+05	1,48E+05	SI
206	1,94E+05	1,48E+05	SI

Tabla 21. Hoja de cálculo comprobación ELS (valores máximos):			
ELEMENTO	HIPÓTESIS		CUMPLE
	C1 FRECUENTE		
	$\sigma_{VM} \text{ (kN·m}^2\text{)}$		
56	1,48E+05		SI
76	1,51E+05		SI

#### Estado Límite de Deformaciones:

Las deformaciones se calculan para la combinación frecuente, en el caso en que haya más de una optaremos por la más desfavorable. En este caso sólo tenemos una hipótesis frecuente la cuál es la siguiente:

#### COMBINACIÓN FRECUENTE

#### HIPOTESIS 1:

$$1,0 \times \text{RETRACCIÓN/FLUENCIA} + 0,4 \times (\text{SC1} + \text{SC2})$$

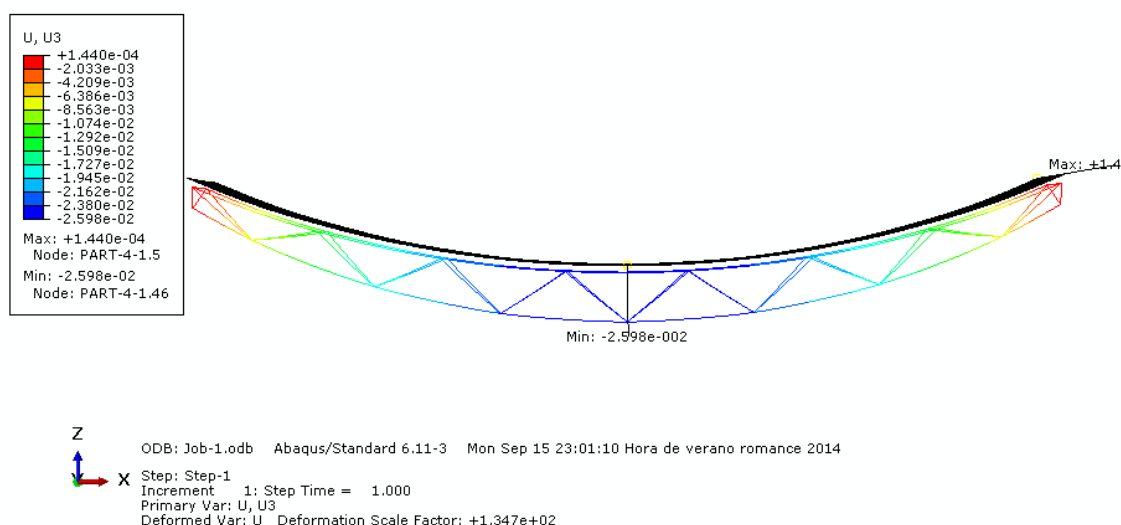
Según viene especificado en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11) y las Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras (RPM-95), la flecha correspondiente a la parte de las sobrecargas de la combinación no superará el valor siguiente:

$L/1200$  en pasarelas peatonales y puentes urbanos con aceras accesibles.

En nuestro caso dicho valor corresponderá:  $35\text{m}/1200 = 0,02917\text{m} = 29,17\text{mm}$ .

En la figura 13 se puede ver el desplazamiento máximo en dicha hipótesis, el cual corresponde a un valor de 25,98 mm, por lo tanto se cumple, incluso incluyendo la acción de la Retracción/Fluencia.

Figura 8 Representación gráfica del desplazamiento máximo en la hipótesis frecuente.(m)



### 3.3 CÁLCULO LOSA DE HORMIGÓN

El armado de la losa de hormigón se va realizar a comprobación a flexión y para ello utilizaremos la combinación o hipótesis correspondiente al Estado de Límite Último más desfavorable para la losa que corresponde con la siguiente:

#### **HIPÓTESIS 2 CONJUNTO:**

$1,35 \times (\text{PP METÁLICA} + \text{PP HORMIGÓN} + \text{CM BARANDILLA} + \text{RETRACCIÓN/FLUENCIA})$   
 $+ 1,35 \times (\text{SC1} + \text{SC2}) + 1,5 \times 0,3 \text{ VIENTO} + 1,5 \times 0,6 \times \text{AT CALENTAMIENTO}$

De dicha hipótesis obtenemos las Figuras 9, 10 y 11 donde se muestran cada uno de los Momento flectores por unidad de longitud que afectan a la losa.

Figura 9 Representación gráfica de Momento flector máximo por unidad de longitud en losa,  $M_x$  (m·kN/m).

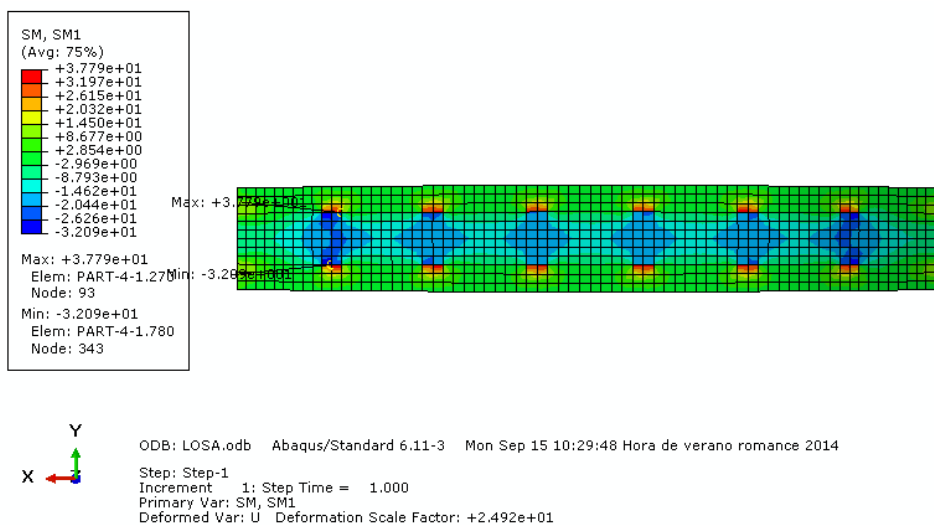


Figura 10 Representación gráfica de Momento flector máximo por unidad de longitud en losa,  $M_y$  (m·kN/m).

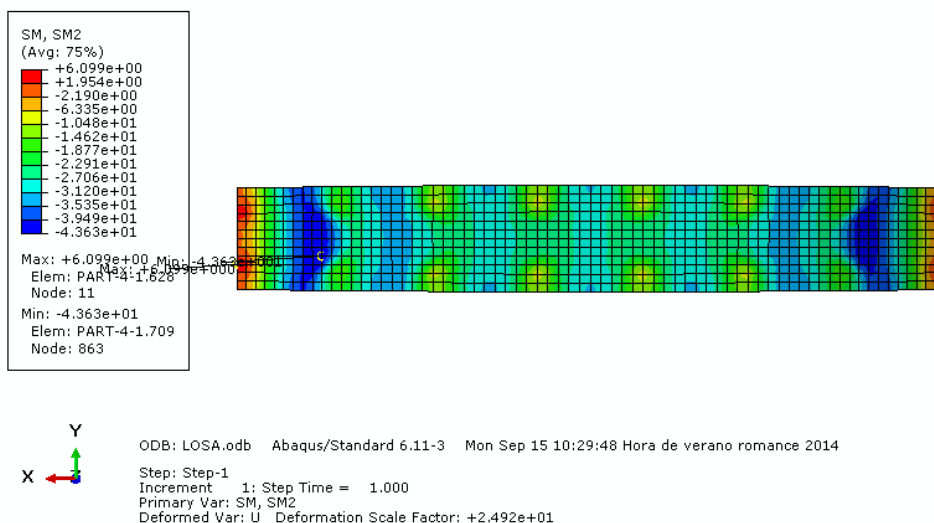
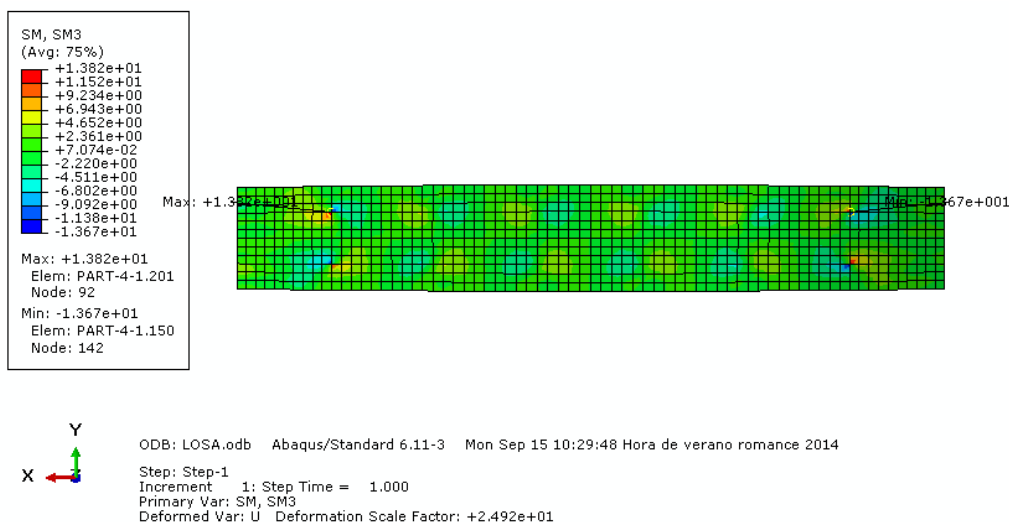


Figura 11 Representación gráfica de Momento flector máximo por unidad de longitud en losa,  $M_{xy}$  (m·kN/m).



Como puede verse en las figuras 9, 10 y 11 los momentos positivos por unidad de longitud son del mismo orden que los negativos. Por tanto, con el objeto de simplificar la disposición en obra del armado de la losa se va a disponer la misma armadura en la cara superior que en la cara inferior de la misma, por tanto, calcularemos la armadura en cada dirección utilizando el máximo del valor absoluto del momento por unidad de longitud en cada una de ellas, añadiendo el valor absoluto del momento por unidad de longitud  $M_{xy}$  correspondiente en el punto donde se localiza dicho valor. Con todo ello nos quedan los siguientes momentos de armado:

El método que empleamos para el cálculo de la armadura ha sido puesto a punto por R.H. Wood y G.S.T. Armer. Que se basa en unas reglas para disponer la armadura según dos direcciones ortogonales.

Sean  $M_x$ ,  $M_y$  y  $M_{xy}$  los momentos flectores y torsores por unidad de longitud que nos proporciona el cálculo en un punto cualquiera. Buscamos un par de esfuerzos  $M_x^*$  y  $M_y^*$  con los cuales dimensionara la armadura y que cubran todos los posibles momentos por unidad de longitud creados por  $M_x$ ,  $M_y$  y  $M_{xy}$  en cualquier dirección.

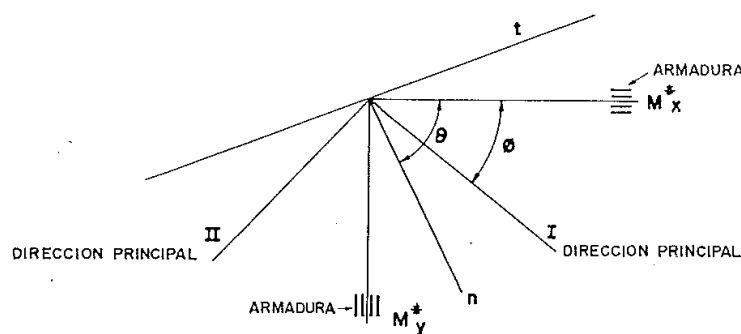
Si suponemos dos direcciones cualesquiera  $n$  y  $t$  (ver figura 12) tendremos que los esfuerzos según ellos serán:

$$M_n = M_x \cos^2 \theta + M_y \sin^2 \theta - 2 M_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$M_t = M_x \sin^2 \theta + M_y \cos^2 \theta + 2 M_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$M_{nt} = (M_x - M_y) \sin \theta \cos \theta + M_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Figura 12 Representación gráfica de direcciones  $n$  y  $t$  según sus momentos.



Si nosotros suponemos conocidos  $M_x$  y  $M_y$  y ocurrirá que la componente de estos esfuerzos sobre las direcciones  $n$  y  $t$  serán:

$$M_n = M_x^* \cos^2 \theta - M_y^* \sin^2 \theta$$

$$M_t = M_x^* \sin^2 \theta - M_y^* \cos^2 \theta$$

$$M_{nt} = (M_x^* - M_y^*) \sin \theta \cos \theta$$

Las condiciones que debemos establecer es que los resultados obtenidos por las fórmulas anteriores sean mayores o iguales a los obtenidos en:

$$M_n = M_x \cos^2 \theta + M_y \sin^2 \theta - 2 M_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$M_t = M_x \sin^2 \theta + M_y \cos^2 \theta + 2 M_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$M_{nt} = (M_x - M_y) \sin \theta \cos \theta + M_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Con estas condiciones Wood obtiene los siguientes valores para el cálculo de la Armadura inferior y superior:

$$M_x^* = M_x + |M_{xy}|$$

$$M_y^* = M_y + |M_{xy}|$$

Con estos esfuerzos la armadura resultante es la siguiente( ver tabla 22):

$$|M_{transversal}| = M_x + |M_{xy}| \rightarrow |M_{transversal}| = 37,79 + 13,82 = 51,61 \text{ m} \cdot \text{kN/m}$$

$$|M_{longitudinal}| = M_y + |M_{xy}| \rightarrow |M_{longitudinal}| = 43,63 + 13,82 = 57,45 \text{ m} \cdot \text{kN/m}$$

	ARMADURA TRANSVERSAL	ARMADURA LONGITUDINAL
MOMENTO DE DIMENSIONAMIENTO (m·kN/m)	51,61	57,45
$f_{ck}$ (kp/cm <sup>2</sup> )	300	300
$f_{cd}$ (kp/cm <sup>2</sup> )	200	200
b (cm)	100	100
d (cm)	17,5	17,5
$U_0$ (kp/m)	350000	350000
$U_{s1}$ (kp/m)	30851,13	34532,09
$f_{yd}$ (kp/cm <sup>2</sup> )	4434,78	4434,78
$A_{s1}$ (cm <sup>2</sup> /m)	6,96	7,79

Tabla 22 Hoja de cálculo dimensionamiento de armadura losa

Como las cuantías de armado son bastante similares en las direcciones longitudinal y transversal, se dispone en ambas un armado de  $\Phi 12$  cada 12,5cm, tanto en la cara superior como en la inferior.

### 3.4 UNIONES Y CONEXIONES

Todas las uniones de la estructura metálica se realizarán con soldadura a tope por lo que no es necesario su cálculo, aunque sería necesario comprobar los nudos.

La estructura metálica apoya a los estribos existente mediante elementos de apoyo elastoméricos reforzados.

Y por último la conexión entre la losa de hormigón y la estructura metálica se realiza mediante unos conectores normalizados. Habría que calcular el número de conectores necesarios según norma RPX-95 para materializar esta unión de forma que los cordones superiores y la losa trabajen de forma conjunta.



## 4. CONCLUSIONES

Para finalizar este documento y a modo de conclusión final se enumera a modo de síntesis las claves de este proyecto y del trabajo que implica.

La mayor complejidad del trabajo no solo ha sido manejar el programa comercial ABAQUS basado en elementos finitos, sino buscar y comprender las normativas referentes a la construcción de puentes de carreteras, así como la normativa EHE-08 que desconocía su manejo en el cálculo de estructuras de hormigón, debido a que finalicé mis estudios de Ingeniería Técnica Industrial en el curso académico 2006-2007.

Respecto a lo meramente técnico, decir que mediante el programa comercial ABAQUS, se ha introducido una estructura mixta de acero – hormigón para diseñar una pasarela peatonal de una luz de 35 m sobre un pequeño barranco y aprovechando la cimentación existente del antiguo puente en estado intransitable e irreparable.

Para ello se ha partido de un predimensionado a mano para luego comprobar con el programa comercial ABAQUS los esfuerzos y tensiones que son sometidas cada una de las secciones que forman la pasarela.

Con los esfuerzos y tensiones en cada uno de los elementos y nodos creados por el programa ABAQUS se han diseñado unas Hojas de cálculo Excel a modo de comprobación de las secciones y justificación de la solución adoptada.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Manual de ABAQUS/CAE v.6.11.
- “Prácticas de Ejemplos del programa de cálculo de elementos finitos ABAQUS de la EINA.”
- Uzcátegui Flores, M. Y. *“Ejemplos usando los programas de elementos finitos: ABAQUS y portal de pórticos”*. Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes. Mérida ( Venezuela)
- Dr. Savvas Triantafyllou . *“Quick Guide to ABAQUS/CAE.”* Institute of Structural Engineering, ETH.
- Instrucción de Acero Estructural (EAE). Ministerio de Fomento.
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón. Ministerio de Fomento.
- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Ministerio de Fomento.
- Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras (RPM-95). Dirección General de Carreteras.
- Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras (RPX-95) Dirección General de Carreteras.
- Norma de Construcción sismorresistente: puentes (NCSP-07). Ministerio de Fomento.
- [www.carreteros.org](http://www.carreteros.org)



## 6. ANEXOS:

*Anexo I: Memoria de cálculo.*

*Anexo II: Hojas de cálculos y resultados.*

*Anexo III: Planos.*