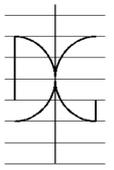




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de  
Proyectos de Ingeniería Civil

Comportamiento en servicio de vigas prefabricadas para  
tableros de puentes. Comparativa entre métodos de  
análisis tradicionales y un análisis mediante Elementos  
Finitos.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

AUTOR/A: Segura Jorge, Nicolas

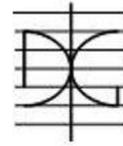
Tutor/a: Castro Bugallo, María Carmen

Cotutor/a: Navarro Gregori, Juan

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA DE  
LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS DE  
INGENIERÍA CIVIL

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
CURSO ACADÉMICO 2022/2023

**Comportamiento en servicio de vigas prefabricadas para tableros de puentes. Comparativa entre métodos de análisis tradicionales y un análisis mediante Elementos Finitos.**

**Autor/a: Nicolás Segura Jorge**

**Tutor/a: M. Carmen Castro Bugallo**

**Cotutor/a: Juan Navarro Gregori**

Valencia, mayo de 2023

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y  
PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



# INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INDICE</b> .....                               | <b>2</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                    | <b>5</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....                     | <b>8</b>  |
| <b>1. DEDICATORIA</b> .....                       | <b>9</b>  |
| <b>2. PALABRAS CLAVES</b> .....                   | <b>10</b> |
| Hormigón .....                                    | 10        |
| Pretensado .....                                  | 10        |
| Armadura .....                                    | 10        |
| Perdidas de pretensado .....                      | 10        |
| Método Elementos Finitos .....                    | 10        |
| <b>3. INTRODUCCIÓN</b> .....                      | <b>11</b> |
| <b>4. DEFINICION DE LA ESTRUCTURA</b> .....       | <b>12</b> |
| Descripción General. Descripción Geométrica ..... | 12        |
| Emplazamiento .....                               | 13        |
| Materiales .....                                  | 16        |
| Hormigón .....                                    | 16        |
| Armadura Pasiva .....                             | 17        |
| Armadura Activa .....                             | 17        |
| <b>5. ACCIONES CONSIDERADAS</b> .....             | <b>18</b> |
| Definición general .....                          | 18        |
| Esquema estructural .....                         | 18        |
| Datos para Tener en Cuenta .....                  | 18        |
| Valores Característicos de las acciones .....     | 18        |
| Acciones Persistentes .....                       | 18        |
| Acciones Transitorias. ....                       | 21        |
| Acciones Accidentales (Q) .....                   | 27        |
| Valores Representativos de las acciones .....     | 28        |
| Coeficientes Parciales de Seguridad .....         | 29        |
| En ELU .....                                      | 29        |

|   |           |
|---|-----------|
| En ELS .....  | 29        |
| <b>Combinación de Acciones.....</b>   | <b>29</b> |
| Estado Limite Ultimo.....   | 29        |
| Estado Limite de Servicio .....   | 30        |
| Obtención de valores máximos de diseño .....                                | 31        |
| <b>6. PROCEDIMIENTO DE CALCULO.....</b>                                     | <b>33</b> |
| <b>Fuerza de Tesado inicial .....</b>                                       | <b>33</b> |
| <b>Perdidas de Pretensado.....</b>  | <b>36</b> |
| <b>7. PERDIDAS BAJO NORMATIVA CIRSOC 201 .....</b>                          | <b>37</b> |
| <b>Pérdidas Instantáneas .....</b>  | <b>37</b> |
| Acuñamiento de los anclajes.....  | 37        |
| Fricción.....   | 38        |
| Acortamiento elástico .....   | 39        |
| <b>Pérdidas Diferidas .....</b>   | <b>40</b> |
| Retracción del hormigón.....  | 40        |
| Fluencia del hormigón.....  | 41        |
| Relajación del acero .....  | 42        |
| <b>8. PERDIDAS BAJO NORMATIVA EURCODIGO 02 .....</b>                        | <b>44</b> |
| <b>1- Perdidas Instantáneas .....</b>                                       | <b>44</b> |
| Pérdidas por Rozamiento ( $\Delta P_{\mu}(x)$ ) .....                       | 44        |
| Pérdidas en anclaje por Penetración de cuñas ( $\Delta P_{sl}(x)$ ).....    | 44        |
| Pérdidas por acortamiento elástico del hormigón ( $\Delta P_{el}(x)$ )..... | 46        |
| <b>Perdidas Diferidas .....</b>   | <b>49</b> |
| Pérdidas por Retracción, Fluencia y Relajación .....                        | 49        |
| <b>9. MODELIZACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS.....</b>                           | <b>54</b> |
| <b>Definición de la estructura .....</b>                                    | <b>54</b> |
| <b>Definición de materiales.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Definición de secciones .....</b>  | <b>60</b> |
| <b>Definición de Acciones y Combinaciones.....</b>                          | <b>65</b> |
| <b>Resultados.....</b>  | <b>72</b> |
| Modelo de Fuerzas Equivalentes .....  | 72        |
| Modelo de Elemento.....   | 76        |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| <b>9. RESULTADOS.....</b>     | <b>82</b> |
| <b>10. CONCLUSIONES .....</b> | <b>85</b> |
| <b>11. BIBLIOGRAFÍA .....</b> | <b>88</b> |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Ubicación de la ciudad de Salta en Argentina.....                                 | 13 |
| Figura 2: Ubicación de la Terminal de Ómnibus de la ciudad de Salta (Argentina). .....      | 14 |
| Figura 3: En el 2012 cedió la losa de la Terminal donde aparcan los buses. ....             | 15 |
| Figura 4: Corte transversal en la zona central del puente carretero.....                    | 16 |
| Figura 5: Viga ASSHTO tipo VI (unidades en m.).....   | 20 |
| Figura 6: Camión de diseño norma CIRSOC. ....   | 22 |
| Figura 7: Sistema de fuerzas debido al Camión de diseño.....                                | 23 |
| Figura 8: Resultante y recta de acción debido al Camión de diseño .....                     | 23 |
| Figura 9: Aplicación teorema de Barre para Camión de diseño.....                            | 24 |
| Figura 10: Tándem de diseño.....  | 24 |
| Figura 11: Sistema de fuerzas debido al tándem de diseño.....                               | 25 |
| Figura 12: Resultante y recta de acción debida al tándem de diseño.....                     | 25 |
| Figura 13: Aplicación teorema de Barre para tándem de diseño.....                           | 25 |
| Figura 14: Carril de diseño. ....   | 26 |
| Figura 15: Fuerza de Frenado.....   | 28 |
| Figura 16: Esfuerzos sin combinar.....  | 31 |
| Figura 17: Valores tenidos en cuenta a la hora del calculo.....                             | 33 |
| Figura 18: Función cuadrática de la parábola de la cable pretensado .....                   | 34 |
| Figura 19: representación gráfica de la parábola en la viga.....                            | 34 |
| Figura 20: Trazado medio en las secciones de apoyo y central .....                          | 35 |
| Figura 21: Grafico del momento a lo largo de la viga .....                                  | 36 |
| Figura 22: Perdidas por acuíñamiento en reglamento CIRSOC 201 .....                         | 37 |
| Figura 23: Datos utilizados para las pérdidas de acortamiento elástico .....                | 46 |
| Figura 24: Grafica de las perdidas instantáneas. ....                                       | 48 |
| Figura 25: Grafica de las perdidas Instantáneas totales vs la fuerza de tesado inicial .... | 48 |
| Figura 26: Datos tenidos en cuenta para el cálculo de las perdidas diferidas. ....          | 49 |
| Figura 27: Viga tipo ASSHTO en SAP 2000 idealizada .....                                    | 54 |
| Figura 28: Viga tipo ASSTHO en SAP 2000.....  | 55 |
| Figura 29: Materiales definidos en SAP 2000. ....   | 56 |
| Figura 30: Propiedades definidas para el Hormigón H-30 .....                                | 56 |
| Figura 31: Propiedades del hormigón con relación a la dependencia del tiempo .....          | 57 |
| Figura 32: Grafica de la variación de la resistencia del hormigón contra el tiempo.....     | 57 |
| Figura 33: Grafica de la variación de la fluencia del hormigón contra el tiempo .....       | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 34: Grafica de la variación del retracción del hormigón contra el tiempo .....                                       | 58 |
| Figura 35: Propiedades definidas para la armadura pasiva. ....  | 59 |
| Figura 36: Propiedades para la armadura activa .....  | 60 |
| Figura 37: Propiedades de la viga AASHTO VI.....  | 61 |
| Figura 38: Propiedades de la sección de tendón como carga equivalente. ....   | 62 |
| Figura 39: Propiedades de la sección de tendón como elemento. ....  | 63 |
| Figura 40: Definición del cable de tesado en SAP 2000 .....   | 64 |
| Figura 41: Acciones introducidas en el SAP 2000 .....   | 65 |
| Figura 42: Definición de los casos de Acciones.....   | 66 |
| Figura 43: Caso de carga de "etapas" como staged construction .....   | 67 |
| Figura 44: Carga de fuerza de tesado inicial en tendón definido como elemento .....   | 68 |
| Figura 45: Cargas de tesado inicial y final en el tendón modelado como elemento .....                                       | 69 |
| Figura 46: Perdidas en $\text{kN/m}^2$ . ....   | 69 |
| Figura 47: Acción de fuerza de tesado final en el tendón definido como carga equivalente con pérdidas del apoyo.....        | 70 |
| Figura 48: Cargas de tesado inicial y final en el tendón modelado como fuerza equivalente.....                              | 70 |
| Figura 49: Acción de fuerza de tesado final en el tendón definido como carga equivalente con pérdidas del centro luz. ....  | 71 |
| Figura 50: Cargas de tesado inicial y final en el tendón modelado como fuerza equivalente con pérdidas del centro luz. .... | 71 |
| Figura 51: Diagramas de esfuerzos en el fraguado del hormigón.....  | 73 |
| Figura 52: Momento y corte en el hormigón debido a las acciones del pretensado.....   | 74 |
| Figura 53: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Fuerza.....  | 75 |
| Figura 54: Perdidas en el centro luz del pretensado en el modelo como Fuerza.....   | 76 |
| Figura 55: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Elemento etapa 2   | 77 |
| Figura 56: Perdidas en centro luz del pretensado en el modelo como Elemento etapa 2 .....                                   | 78 |
| Figura 57: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Elemento etapa 3. ....                                     | 78 |
| Figura 58: Perdidas en centro luz del pretensado en el modelo como Elemento etapa 5 .....                                   | 79 |
| Figura 59: Perdidas instantáneas del pretensado.....  | 79 |
| Figura 60: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Elemento etapa 5.  | 80 |

Figura 61: Perdidas en centro luz del pretensado en el modelo como Elemento etapa 5 .....81

Figura 62: Perdidas diferidas a lo largo del tiempo en la estructura.....84

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Tabla E.1N del Eurocódigo 02 .....  | 17 |
| Tabla 2: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los Estados Límites Últimos. AN/1 (Tabla 2.1N)..... | 29 |
| Tabla 3: Estados Límites Últimos provenientes de la combinación Característica.....  | 32 |
| Tabla 4: Estados Límites de Servicio provenientes de la combinación Característica. ....   | 32 |
| Tabla 5: Momentos a lo largo de la viga.....   | 35 |
| Tabla 6: Cirsoc 201 – Tabla 10.3.2.5.1.....  | 39 |
| Tabla 7: Tabla de relajación de los aceros según su tensor .....   | 42 |
| Tabla 8: Perdidas por Rozamiento .....   | 44 |
| Tabla 9: Perdidas por penetración de cuñas .....   | 46 |
| Tabla 10: Perdidas por Acortamiento elástico del hormigón.....   | 47 |
| Tabla 11: Pérdidas totales instantáneas del pretensado .....   | 47 |
| Tabla 12: Perdidas Instantáneas y Diferidas.....   | 53 |
| Tabla 13: Resultados finales de las perdidas bajo Normativas .....   | 82 |
| Tabla 14: Resultados finales de las perdidas bajo Normativas y SAP 2000 .....  | 83 |
| Tabla 15: Resultados de perdidas diferidas en Apoyo y Centro Luz.....  | 83 |
| Tabla 16: Tablas comparativa de perdidas instantáneas .....  | 85 |
| Tabla 17: Tablas comparativa de perdidas diferidas .....   | 86 |

## 1. DEDICATORIA

A mi padre que me guio durante toda mi vida.

**Juan Carlos Segura – Q.E.P.D. 03/09/2021**

## 2. PALABRAS CLAVES

Hormigón

Pretensado

Armadura

Perdidas de pretensado

Método Elementos Finitos

### 3. INTRODUCCIÓN

En el año 2020 se realizó un Trabajo de Fin de Curso con el fin de buscar una solución a la constante demora y accidentes generados cerca de la estación de buses en la ciudad de Salta, Argentina. El trabajo nombrado logró resolver el diseño geométrico y estructural del puente llegando a conclusiones que se consideraron podían ser optimizadas y que derivaron en la búsqueda de diferentes maneras para lograr una mejor utilización de los recursos.

Teniendo este contexto en mano se planteó realizar un cálculo en condiciones de servicio de las vigas pretensadas mediante un análisis convencional, reflejado lo aprendido a lo largo del Master Universitario de Ingeniería del Hormigón. Para ello se tendría en cuenta las acciones y combinaciones utilizadas anteriormente en el Trabajo de Fin de Curso, aplicadas a una viga de ASSTHO tipo VI para obtener un punto de partida.

Por otro lado, y con un enfoque más investigador, se realizará el análisis con el uso del software SAP 2000 conocido por sus aplicaciones en ingeniería civil. Con éste lo que se buscará es calcular mediante el Método de Elementos Finitos los Estados Límites de Servicio y de esta manera poder comparar otra vez estos resultados con los obtenidos mediante el cálculo tradicional. El principal enfoque del cálculo serán las pérdidas instantáneas y diferidas del pretensado, las cuales durante la metodología tradicional conllevan de muchos cálculos auxiliares que ante el uso del software aportarían un ahorro de tiempo considerable y de rápida aplicación.

En conclusión, el desarrollo del trabajo buscará obtener resultados que puedan ser comparados con aquellos ya obtenidos previamente y permitan realizar los análisis y comparativas de las ventajas y desventajas del cálculo tradicional utilizando el CIRSOC y el Eurocódigo 02. Además, con la inclusión del cálculo mediante elementos finitos se podrá realizar un análisis detallado de las pérdidas de pretensado y si pueden mejorar o perjudicar el comportamiento y desarrollo de la viga a lo largo de su vida útil.

## 4. DEFINICION DE LA ESTRUCTURA

### **Descripción General. Descripción Geométrica**

La ocurrencia de un conflicto vehicular surge de la interacción entre el usuario, el vehículo, la vía y el entorno. La evaluación de dichos factores en un ambiente urbano nos lleva rápidamente a pensar en el crecimiento del parque automotor, que genera mayor demanda para la oferta vial existente y, consecuentemente, mayor congestamiento y conflicto entre flujos vehiculares.

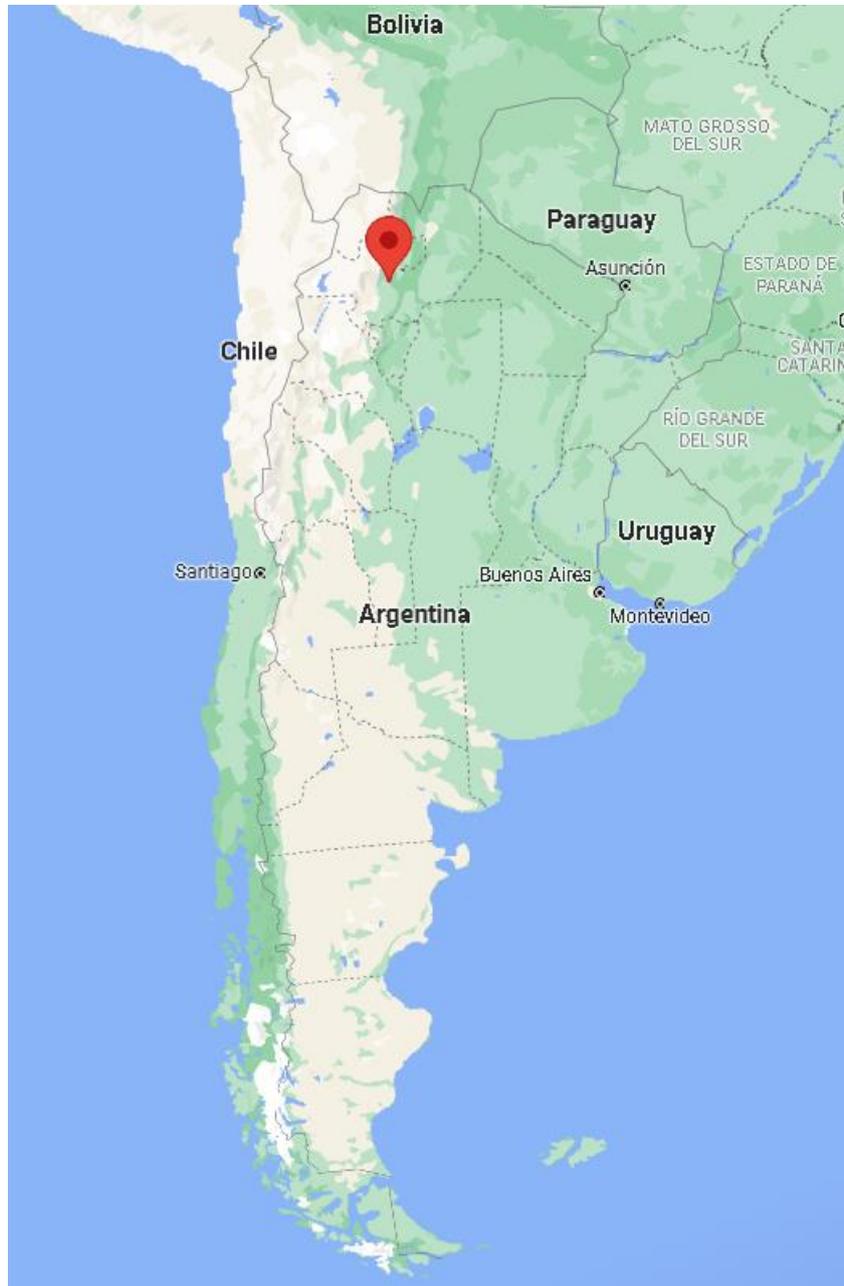
Como consecuencia, surge la necesidad de evaluar el diseño vial, principalmente en las intersecciones, con el fin de lograr una operación eficiente del tránsito, disminuyendo los tiempos de desplazamiento y la frecuencia de choques.

El Puente Distribuidor Terminal se diseñó de manera paralela a la Avenida Yrigoyen que desemboca en dicha estación de ómnibus, logrando dejar la misma en un nivel inferior al paso de los automotores. Para esto, se tuvo en cuenta seguir la forma de la mencionada avenida y el canal que se emplaza por debajo de esta, tal y como podrá observarse en imágenes que se adjuntaran a lo largo del Trabajo de Fin de Master.

El puente consta de 16.70 metros de ancho (4 carriles, 2 en cada sentido) y la longitud de cada vano es de 25 metros. Logrando consecutivamente unos 400 metros en total.

## Emplazamiento

El Trabajo de Fin de Grado realizado durante el año 2020 se basó en la posibilidad de construir un puente que atravesara de forma longitudinal la estación de buses de la ciudad de Salta, Argentina.



*Figura 1: Ubicación de la ciudad de Salta en Argentina.*

La ciudad de Salta es conocida debido a su gran movimiento turístico a lo largo del año por parte de ciudadanos de todo el mundo. Debido a esto, uno de los puntos más

conflictivos de tráfico de la ciudad es la estación de buses que se encuentra a la vez en una de las avenidas más importantes de la ciudad.



**Figura 2: Ubicación de la Terminal de Ómnibus de la ciudad de Salta (Argentina).**

El cálculo de dicho puente se dividió en tres partes, Norte, Central y Sur; siendo la central la más difícil a la hora de ser diseñada debido a su cercanía con la Terminal de Ómnibus. Es por esto por lo que, la sección elegida para representar el puente calculado es la central; lo que buscamos es mejorar el diseño ya obtenido.

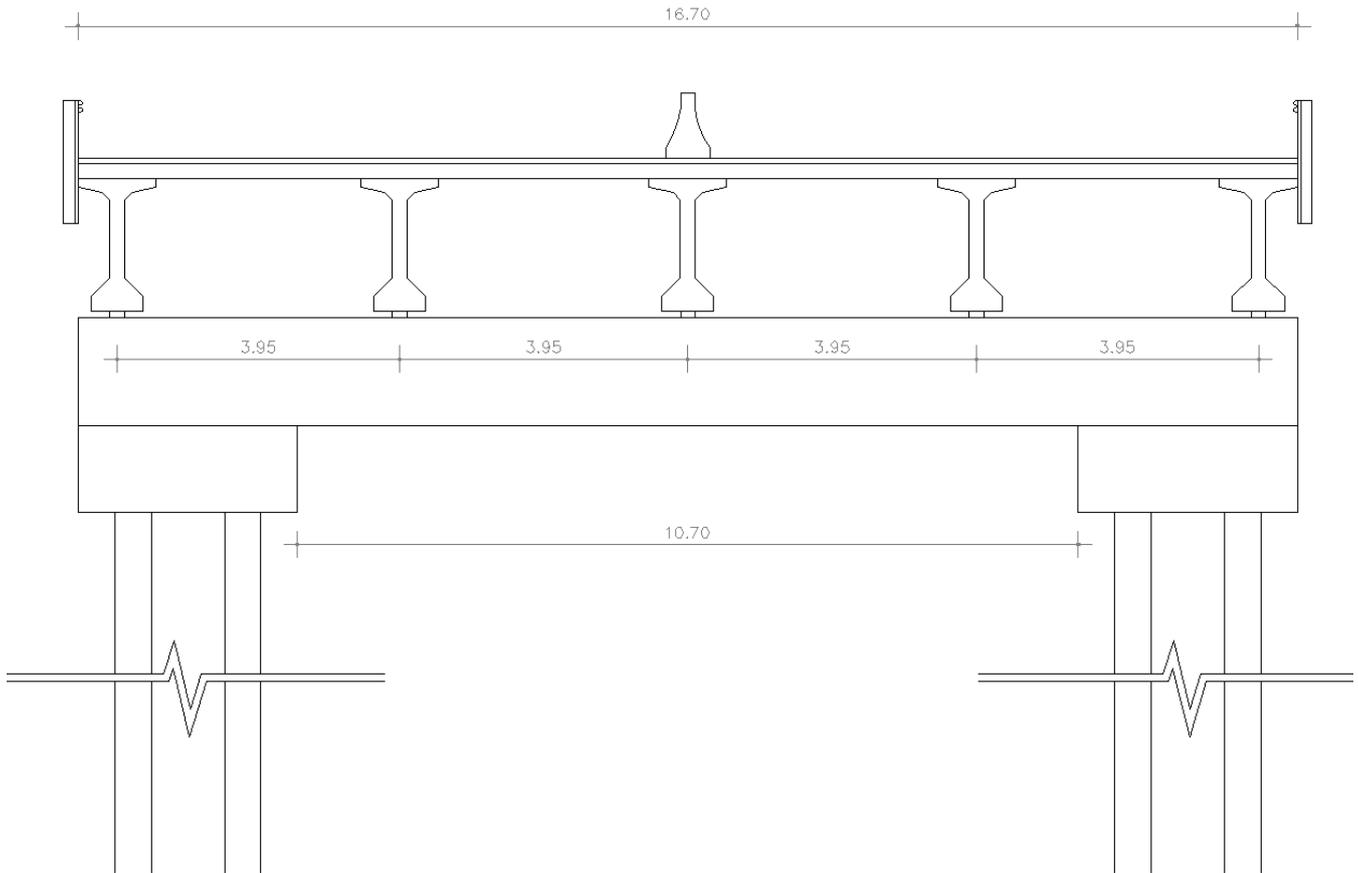
Hay ciertos aspectos para tener en cuenta en esta zona del puente.

- El canal recolector de agua de lluvia se encuentra por debajo de la Terminal y sobre todo por debajo de la playa de maniobras de los buses.
- El Puente se alza sobre la Avda. Yrigoyen sobre todo sobre su platabanda
- Se planteo un pórtico con voladizo a ambos lados.



***Figura 3: En el 2012 cedió la losa de la Terminal donde aparcan los buses.***

A lo largo de la denominada “Zona Central” del puente carretero se tomó en cuenta una losa o forjado de hormigón, soportado por 5 vigas de hormigón pretensado con armaduras postesas, como se muestra en la figura a continuación (Figura 4).



*Figura 4: Corte transversal en la zona central del puente carretero.*

## **Materiales**

Los dos materiales principales con los cuales se realizó el cálculo de la estructura se describen a continuación, se enuncian también sus características principales mínimas de acuerdo con los criterios exigidos por la normativa nacional Argentina y Eurocódigo 02.

### Hormigón

Con relación a la resistencia característica mínima del hormigón se escogió un hormigón H-30 según el reglamento CIRSOC 201 (su similitud con la UNE-EN-1-1:2004, se muestra en la Tabla E.1N de los anexos la resistencia del hormigón de acuerdo con la clase de exposición). De acuerdo con esta tabla se escoge una resistencia de C30/37, teniendo así 30 MPa la resistencia en probeta cilíndrica y 37 MPa para probeta cubica.

| Clases de exposición conforme a la tabla 4.1 |                                       |                           |        |        |                                  |     |        |   |        |     |
|--|---------------------------------------|---------------------------|--------|--------|----------------------------------|-----|--------|---|--------|-----|
| Corrosión                                    |                                       |                           |        |        |                                  |     |        |   |        |     |
|  | Corrosión provocada por carbonatación |                           |        |        | Corrosión provocada por cloruros |     |        | Corrosión provocada por cloruros de origen marino |        |     |
|  | XC1                                   | XC2                       | XC3    | XC4    | XD1                              | XD2 | XD3    | XS1   | XS2    | XS3 |
| Clase resistente mínima indicativa           | C20/25                                | C25/30                    | C30/37 |        | C30/37                           |     | C35/45 | C30/37  | C35/45 |     |
| Daños al hormigón                            |                                       |                           |        |        |                                  |     |        |   |        |     |
|  | Sin riesgo                            | Ataque por hielo/deshielo |        |        | Ataque químico                   |     |        |   |        |     |
|  | X0                                    | XF1                       | XF2    | XF3    | XA1                              | XA2 | XA3    |   |        |     |
| Clase resistente mínima indicativa           | C12/15                                | C30/37                    | C25/30 | C30/37 | C30/37                           |     | C35/45 |   |        |     |

**Tabla 1: Tabla E.1N del Eurocódigo 02**

### Armadura Pasiva

El acero de refuerzo a emplear consiste en barras de sección circular corrugadas con el fin de garantizar una correcta adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón, el tipo de acero que se utilizó para el cálculo fue el ADN 420 o 420S caracterizado por un límite elástico de 420 MPa y un módulo de elasticidad de 200.000 MPa.

En nuestra ocasión utilizaremos un acero de 500MPa que es aquel utilizado en España.

### Armadura Activa

El acero de la armadura activa será conformado por alambres que tendrán un módulo de elasticidad de 195 GPa, 1860 MPa de resistencia, con un área de 100 mm<sup>2</sup> cada uno y un diámetro de 12.9mm. Estos alambres se juntarán en 5 para formar cordones de 500 mm<sup>2</sup>.

## 5. ACCIONES CONSIDERADAS

### Definición general

#### Esquema estructural

A efectos de simplificar la carga que transmite el tablero y a fin de enforcarnos en el análisis de la viga y las pérdidas de pretensado en las mismas se dividirá el tablero en cinco vigas y se analizará la central.

Cada tablero posee una longitud de 25 metros y se divide en 5 vigas cada una separada en 3.95 metros de eje en eje.

Antes de poder empezar a realizar el diseño estructural, debemos tener en cuenta todas las acciones que van a actuar a lo largo del puente, tanto persistentes, transitorias, fatigas y dinámicas. Por ende, definiremos cada una de ellas.

### Datos para Tener en Cuenta

Luz Máxima = 25 m.

Ancho de Calzada por Carril = 4.175 m.

Cantidad de Carriles = 4.

Nro. de Vigas Longitudinales = 5.

### Valores Característicos de las acciones

#### Acciones Persistentes

Como bien sabemos son aquellas que actuarán a lo largo de la vida útil del puente, es decir que no varían con respecto al tiempo. Estas son:

#### Peso de Losas

Tenemos en nuestro puente, dos tipos de losas; aquellas con ambos extremos con continuidad de hormigón y las que, por encontrarse en el límite, con un solo extremo con continuidad de hormigón. Calcularemos ambas de la forma más desfavorable para evitar posibles errores, equivocaciones y con fin de mantener un espesor de losa constante a lo ancho del puente.

$$h \geq \frac{Ln}{24} = \frac{2,69}{24} = 0.11 \text{ m}$$

Como creemos que es un espesor muy delgado para la importancia del puente, más la recomendación de los diferentes profesionales consultados, optamos por un espesor de 18 centímetros.

$$= 0.18 \text{ m}$$

Peso de las losas será entonces:

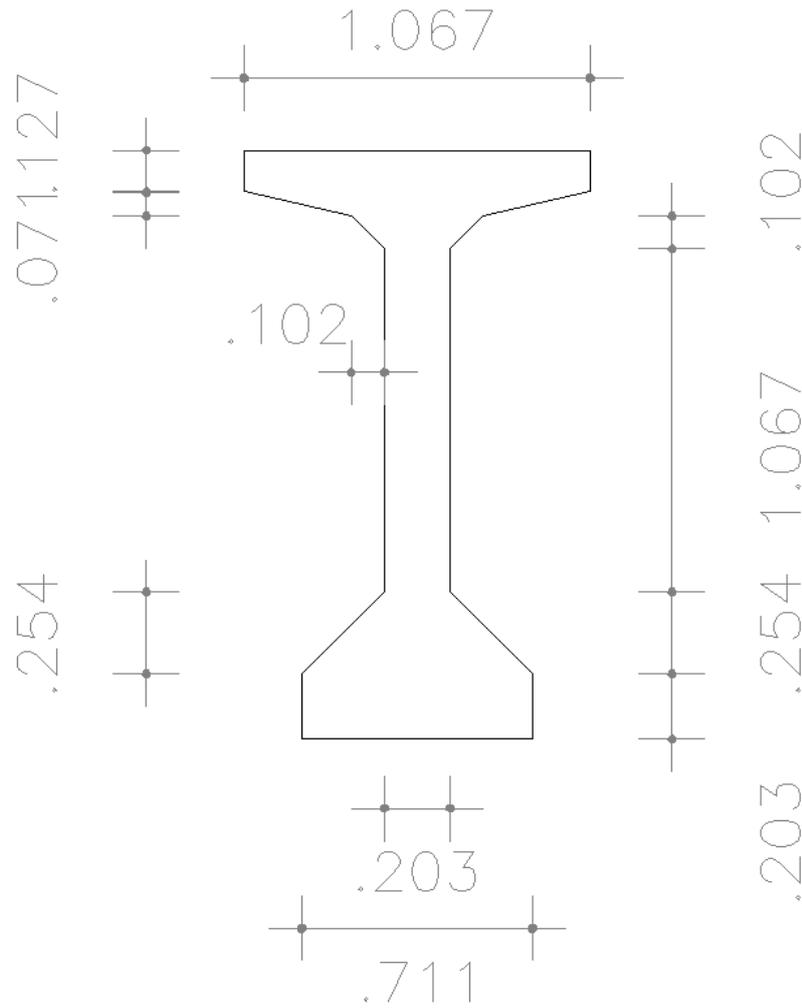
$$h \cdot b \cdot \gamma_{\text{Hormigon}} = 0.18 \text{ m} \cdot 16.70 \text{ m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 75.15 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Se debe tener en cuenta que dicha losa que se realizará tendrá que ser hormigonada en vanos de igual longitud que las vigas longitudinales, teniendo una junta constructiva en cada apoyo de las vigas y de esta manera no generará un efecto o capacidad resistente sobre las vigas longitudinales ni el pretensado.

### **Peso de Viga Longitudinales**

Para las vigas longitudinales se tomará en cuenta una sección conocida como la viga VI de la AASHTO. Desde los valores de esta obtendremos las cargas necesarias para tener en cuenta. Por ende, el peso de las vigas linealizado será entonces:

$$n \cdot Area \cdot \gamma_{\text{Hormigon}} = 5 \cdot 0.68 \text{ m}^2 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$
$$n \cdot h \cdot b \cdot \gamma_{\text{Hormigon}} = 85.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



**Figura 5: Viga ASSHTO tipo VI (unidades en m.).**

**Peso de la Carpeta de Rodamiento**

El peso de la carpeta de rodamiento se lo hizo teniendo en cuenta el espesor de esta, todos los carriles y el peso específico de la carpeta asfáltica:

$$\begin{aligned}
 & b_{Carpeta\ Rto} \cdot h_{Carpeta\ Rto} \cdot \gamma_{Cto} \\
 & = 0.08\ m \cdot 16.70\ m \cdot 15\ \frac{kN}{m^3} = 20.04\ \frac{kN}{m}
 \end{aligned}$$

**Peso de la Baranda**

El Reglamento CIRSOC 801 establece un peso de 3 KN/m de baranda.

### **Peso de Separadores New Jerseys**

Los separadores provienen con un peso estipulado de 4,5 kN/m.

### **Acción Persistente: Total**

Por lo tanto, la carga persistente total final es:

- Para vigas longitudinales (25m):

$$\begin{aligned} qp &= 75.15 \frac{kN}{m} + 85.04 \frac{kN}{m} + 20.04 \frac{kN}{m} + 3 \frac{kN}{m} \\ &+ 4.5 \frac{kN}{m} = 187.73 \frac{kN}{m} \end{aligned}$$

### **Acciones Transitorias.**

#### **Aplicación de vehículos de diseño**

A menos que se especifique lo contrario, la acción extrema se deberá tomar como el mayor de los siguientes valores:

- La sollicitación debida al tándem de diseño combinada con la sollicitación debida a la carga de carril de diseño.
- La sollicitación debida a un camión de diseño con la separación variable entre ejes combinada con la sollicitación debida a la carga de carril de diseño.
- Tanto para momento negativo entre puntos de inflexión bajo una carga uniforme en todos los tramos, como para reacción en pilas interiores solamente, el 90 % de la sollicitación debida a dos camiones de diseño separados como mínimo 15 m entre el eje delantero de un camión y el eje trasero del otro, combinada con el 90 % de la sollicitación debida a la carga de carril de diseño. La distancia entre los ejes de 232 kN de cada camión se deberá tomar como 4,30 m. Los dos camiones de diseño se deberán ubicar en tramos adyacentes de manera que generen las máximas sollicitaciones.

#### **1. Acción Vehicular**

Para poder realizar el cálculo de la acción vehicular, tenemos que considerar el camión de diseño o el tándem de diseño, ambos impuestos por el Reglamento Argentino CIRSOC 801, dedicado a la construcción de puentes carreteros. En el mismo se detallan ambos

diseños a seguir, donde se describe las cargas máximas por eje; también se detalla cual utilizar y en qué caso.

Antes de realizar dicho calculo se debe mencionar que se definirá que sistema de transporte genera mayor carga sobre una trocha o sentido de circulación y que luego este se afectará por el diseño final del puente, el cual consta de 4 trochas o carriles en total. Por lo tanto, se puede decir que se tendrá en cuenta un diseño en el cual el ancho total del puente se ve afectado por una acción vehicular.

### 1.a. Camión de Diseño

Los pesos y las separaciones entre los ejes y las ruedas del camión de diseño son los que se especifican a continuación. Se deberá considerar un incremento por carga dinámica; que se detallará más adelante. La separación entre los dos ejes de 232 kN deberá variar entre 4,30 y 9,0 m para producir las solicitaciones extremas

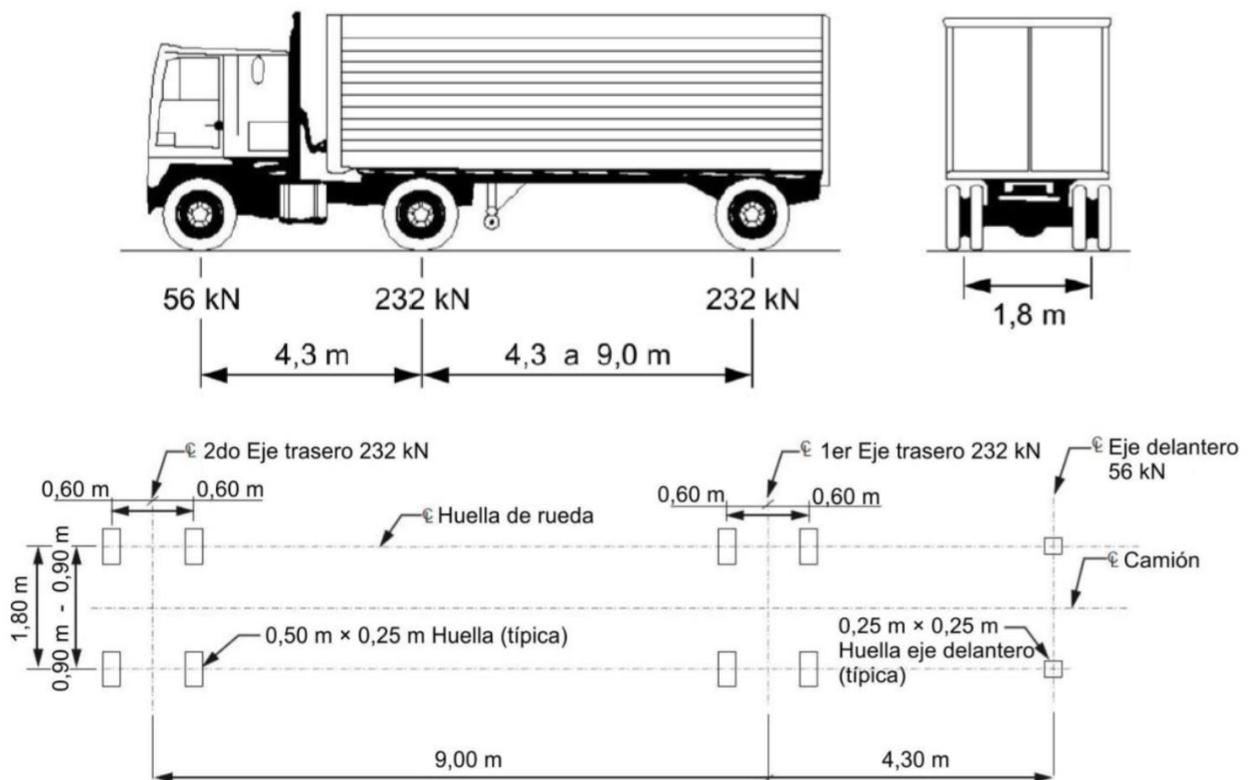
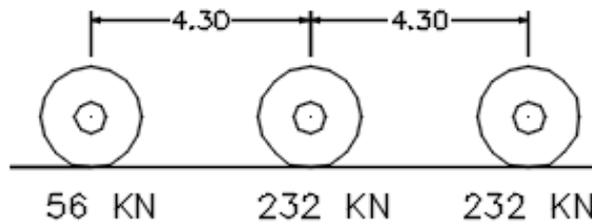


Figura 6: Camión de diseño norma CIRSOC.

**Acciones debidas al camión de diseño**

En primer lugar, se tomó el sistema de fuerzas especificado anteriormente.

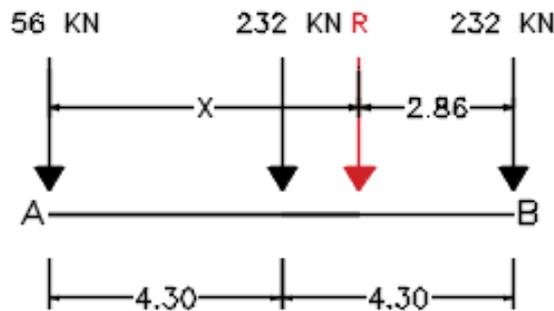


*Figura 7: Sistema de fuerzas debido al Camión de diseño.*

Se calculó la resultante de este y su recta de acción por medio del Teorema de Varignon. Para eso, se tomó sumatoria de momento en el punto A:

$$520 \text{ kN} * X = 232 \text{ kN} * 4.3 \text{ m} + 232 \text{ kN} * 8.6 \text{ m}$$

$$X = 5.75 \text{ m}$$



*Figura 8: Resultante y recta de acción debido al Camión de diseño*

Por último, para calcular el máximo momento producido, se utilizó el Teorema de Barre. El teorema enuncia que el máximo momento se produce en donde actúa la fuerza más cercana a la resultante, que en este caso es la fuerza céntrica (232 KN). Por lo tanto, el momento máximo se produce allí. Se ubicó este sistema de fuerzas del camión de diseño en la viga de tal forma que el punto medio entre la resultante y la fuerza próxima quede en la mitad de la viga.

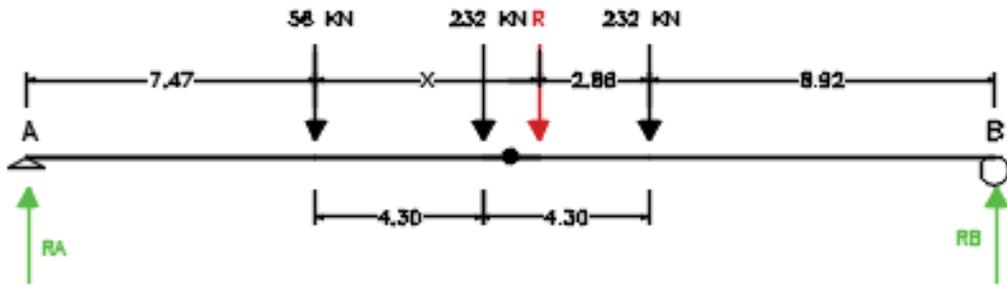


Figura 9: Aplicación teorema de Barre para Camión de diseño.

Luego se buscaron las reacciones. Tomando sumatoria de momento en el punto A:

$$520 \text{ kN} * 13.21 \text{ m} = RB * 25\text{m}$$

$$RB = 274.77 \text{ kN}$$

Y, por ende:

$$RA = 245.23 \text{ kN}$$

Por último, se calculó el momento máximo producido:

$$M_{max} = RA * 13.21 \text{ m}$$

$$M_{max} = 3239.51 \text{ kNm}$$

### 1.b. Tándem de diseño

El tándem de diseño consistirá en un par de ejes de 176 kN con una separación de 1.20 m. La separación transversal de las ruedas se deberá tomar como 1.80 m. Se deberá considerar un incremento por carga dinámica.

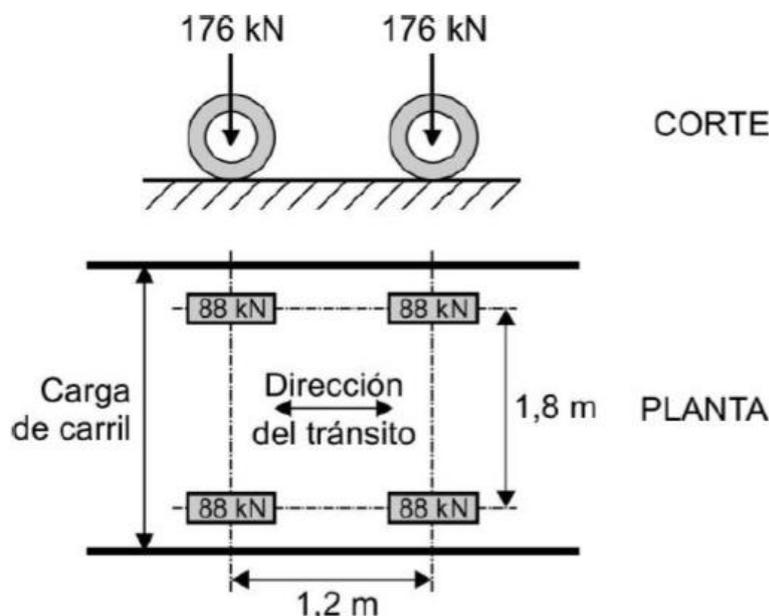
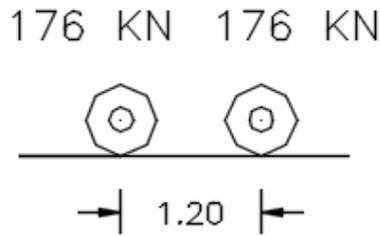


Figura 10: Tándem de diseño.

**Acciones debidas al tándem de diseño**

En primer lugar, se tomó el sistema de fuerzas especificado anteriormente.

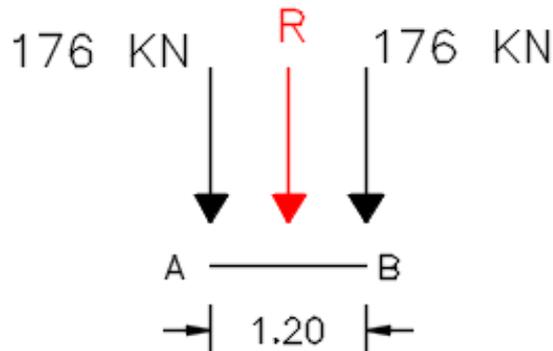


*Figura 11: Sistema de fuerzas debido al tándem de diseño.*

Se calculó la resultante de este y su recta de acción por medio del Teorema de Varignon. Para eso, se tomó sumatoria de momento en el punto A:

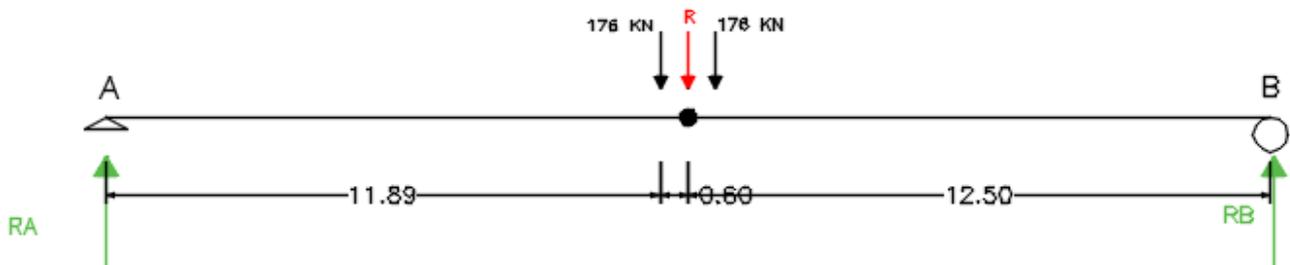
$$352 \text{ kN} * X = 176 \text{ kN} * 1.2 \text{ m}$$

$$X = 0.6 \text{ m}$$



*Figura 12: Resultante y recta de acción debida al tándem de diseño.*

Por último, para calcular el máximo momento producido, se siguió el mismo procedimiento que para el camión.



*Figura 13: Aplicación teorema de Barre para tándem de diseño.*

Luego se buscaron las reacciones. Tomando sumatoria de momento en el punto A:

$$352 \text{ kN} * 12.5 \text{ m} = RB * 25\text{m}$$

$$RB = 176 \text{ kN}$$

Y, por ende:

$$RA = 176 \text{ kN}$$

Por último, se calculó el momento máximo producido:

$$M_{max} = RA * 12.5 \text{ m}$$

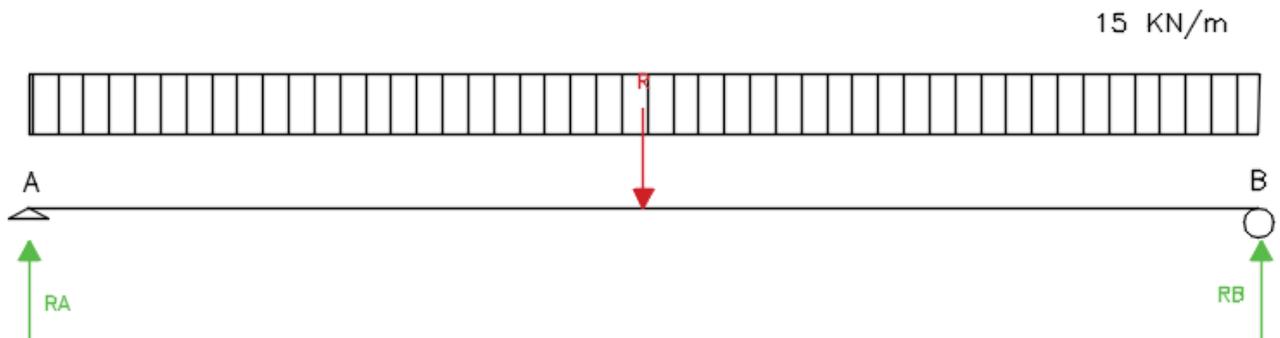
$$M_{max} = 2200 \text{ kNm}$$

### 1.c. Acción de carril de diseño

La carga de carril de diseño consistirá en una carga de 15 kN/m, uniformemente distribuida en dirección longitudinal. Transversalmente, la carga de carril de diseño se supondrá uniformemente distribuida en un ancho de 3.0 m. Las solicitaciones debidas a la carga de carril de diseño no estarán sujetas a un incremento por carga dinámica.

### Acciones debidas al carril de diseño

Se calculó el momento máximo que produce la carga sobre nuestra viga:



**Figura 14: Carril de diseño.**

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{15 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * (25 \text{ m})^2}{8}$$

$$M_{max} = 1171.88 \text{ kNm}$$

### *Combinación (de valores característicos para obtención de la acción)*

Como se mencionó anteriormente, se realizaron dos cargas para calcular la sobrecarga vehicular de diseño:

- Combinación 1

$$C1 = \text{Camion de diseño} * \text{Incremento dinámico} \\ + \text{Carril de diseño}$$

$$M_{max1} = 3239.51 \text{ kNm} * 1.33 + 1171.88 \text{ kNm} \\ = 5480.42 \text{ kNm}$$

- Combinación 2

$$C2 = \text{Tándem de diseño} * \text{Incremento dinámico} \\ + \text{Carril de diseño}$$

$$M_{max2} = 2200 \text{ kNm} * 1.33 + 1171.88 \text{ kNm} \\ = 3371.88 \text{ kNm}$$

Donde el incremento dinámico es del 33%.

### *Acción vehicular: Total*

Por lo tanto, como se demostró anteriormente, el momento máximo fue producido por el camión de diseño.

Por lo tanto, lo que se hizo fue linealizar ese momento máximo:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8} \\ q = \frac{M_{max} * 8}{l^2} \\ q = \frac{3239.51 \text{ kNm} * 8}{(25 \text{ m})^2} \\ q = 41.47 \text{ kN/m}$$

### *Acciones Accidentales (Q)*

#### *Presión vertical de viento*

Se deberá considerar una fuerza de viento vertical ascendente de 0.96 kN/m<sup>2</sup> aplicada en todo el ancho del tablero, incluyendo los parapetos y veredas, como una carga lineal longitudinal.

### Fuerza de Frenado: $FBR$

La fuerza de frenado se tomó como el mayor de los siguientes valores:

- 25 % de los pesos por eje del camión de diseño o tándem de diseño.
- 5 % del camión de diseño más la carga del carril o 5 % del tándem de diseño más la carga del carril.

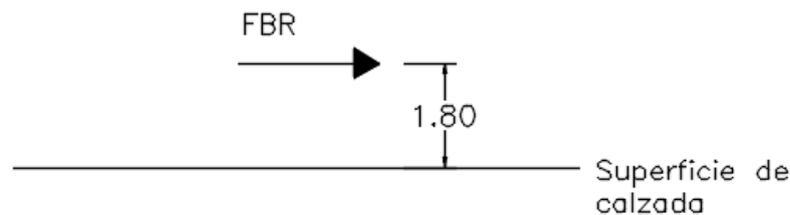
Por lo tanto:

$$1. FBR = 0.25 * (232 \text{ kN} + 232 \text{ kN} + 56 \text{ kN}) = 130 \text{ kN}$$

$$2. FBR = 0.05 * 520 \text{ kN} + 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 25 \text{ m} = 401 \text{ kN}$$

Según el reglamento, fuerzas actúan horizontalmente a una distancia de  $1,80 \text{ m}$  sobre la superficie de la calzada en cualquiera de las direcciones longitudinales para provocar sollicitaciones extremas. Por lo tanto:

$$M_{FBR} = 401 \text{ kN} * 1.8 \text{ m} = 7218 \text{ kNm}$$



**Figura 15: Fuerza de Frenado**

Por lo tanto, lo que se hizo fue linealizar ese momento máximo:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8}$$

$$q = \frac{M_{max} * 8}{l^2}$$

$$q = \frac{7218 \text{ kNm} * 8}{(25 \text{ m})^2}$$

$$q = 369.56 \text{ kN/m}$$

Este momento se lo cargó en todos los carriles que se suponían cargados.

## Valores Representativos de las acciones

Obtenidos una vez los valores de las acciones proseguiremos con los coeficientes de combinación  $\Psi$  para las acciones variables. En este caso nos apartaremos de la normativa

argentina para los cálculos de las cargas e implementaremos la EHE para la combinación de estas. De esta manera utilizaremos ambas normativas.

|                        |                    |                   |
|------------------------|--------------------|-------------------|
| Valor de combinación   | $\Psi_0 \cdot Q_K$ | $(\Psi_0 = 0.60)$ |
| Valor frecuente        | $\Psi_1 \cdot Q_K$ | $(\Psi_1 = 0.50)$ |
| Valor cuasi permanente | $\Psi_2 \cdot Q_K$ | $(\Psi_2 = 0.20)$ |

## Coeficientes Parciales de Seguridad

### En ELU

De acuerdo con el Eurocódigo los valores de seguridad para los ELU son:

| Situaciones de proyecto   | $\gamma_c$ hormigón | $\gamma_s$ para armadura pasiva | $\gamma_s$ para armadura activa |
|---------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Persistente o transitoria | 1,5                 | 1,15                            | 1,15                            |
| Accidental                | 1,3                 | 1,0                             | 1,0                             |

**Tabla 2: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los Estados Límites Últimos. AN/1 (Tabla 2.1N)**

### En ELS

De acuerdo con la Eurocódigo los valores de seguridad para los ELS para ambas situaciones e independiente del material es 1.00.

## Combinación de Acciones

### Estado Limite Ultimo

Situación de Proyecto: Persistente o Transitoria

- Combinación característica:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación frecuente:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_A \cdot A_{E,k} \\ + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,i} \cdot Q_{k,1} + \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación cuasi-permanente:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_A \cdot A_{E,k} \\ + \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

### Estado Limite de Servicio

Situación de Proyecto: Persistente o Transitoria

- Combinación característica:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \\ + \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación frecuente:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,i} \cdot Q_{k,1} \\ + \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación cuasi-permanente:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_k \\ + \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

donde:

$\Sigma$ : “el efecto combinado de”

+: “a combinarse con”

$G_{k,j}$ : Valor característico de las acciones permanentes.

$G^*_{k,j}$ : Valor característico de las acciones permanentes de valor NO constante.

$P_k$ : Valor característico de la acción del pretensado.

$Q_{k,1}$ : Valor característico de la acción variable determinante.

$\psi_{0,i}Q_{k,i}$ : Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes

$\psi_{1,1}Q_{k,1}$ : Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.

$\psi_{2,i}Q_{k,i}$ : Valores representativos cuasi-permanentes de las acciones variables con la acción determinante

$A_k$ : Valor característico de la acción accidental

$A_{E,k}$ : Valor característico de la acción sísmica

Obtención de valores máximos de diseño

A partir de las acciones ya antes definidas y las combinaciones antes presentadas a continuación se adjuntan las tablas de los valores máximos de diseño a lo largo de la viga en los puntos  $x=0$ ,  $x=4.17$ ,  $x=8.33$  e  $x=12.5$ . Al ser una carga uniforme distribuida en un vano repetido a lo largo de todo el puente, vamos a tomar los valores restantes hasta los 25 metros de manera espejada.

|              |    |
|--------------|----|
| Nro de Vigas | 5  |
| Luz Maxima   | 25 |

|                    |         |
|--------------------|---------|
| Peso Muerto        | 160,19  |
| Accion Persistente | 27,54   |
| Accion Transitoria | 165,86  |
| Fuerza de Frenado  | 369,56  |
| Viento (+)         | 16,03   |
| Viento (-)         | -16,032 |

*Figura 16: Esfuerzos sin combinar*

| ELU Agotamiento  |        |        |               |               |        |         |
|------------------|--------|--------|---------------|---------------|--------|---------|
| MOMENTO MINIMO - |        |        |               |               |        |         |
|                  | x =    | 0      | x = 4,16667   | x = 8,33333   | x =    | 12,5    |
| TOTAL            | M Qv2  | 0,0    | M Qv2 1907,6  | M Qv2 3052,1  | M Qv2  | 3433,6  |
|                  | Nc Qv2 | 0,0    | Nc Qv2 0,0    | Nc Qv2 0,0    | Nc Qv2 | 0,0     |
|                  | Vc Qv2 | 549,4  | Vc Qv2 366,3  | Vc Qv2 183,1  | Vc Qv2 | 0,0     |
| MOMENTO MAXIMO + |        |        |               |               |        |         |
|                  | x =    | 0      | x = 4,16667   | x = 8,33333   | x =    | 12,5    |
| TOTAL            | M Qv2  | 0,0    | M Qv2 6890,9  | M Qv2 11025,5 | M Qv2  | 12403,6 |
|                  | Nc Qv2 | 0,0    | Nc Qv2 0,0    | Nc Qv2 0,0    | Nc Qv2 | 0,0     |
|                  | Vc Qv2 | 1984,6 | Vc Qv2 1323,1 | Vc Qv2 661,5  | Vc Qv2 | 0,0     |

*Tabla 3: Estados Limites Últimos provenientes de la combinación Característica.*

| ELS              |        |       |              |              |        |        |
|------------------|--------|-------|--------------|--------------|--------|--------|
| MOMENTO MINIMO - |        |       |              |              |        |        |
|                  | x =    | 0     | x = 4,16667  | x = 8,33333  | x =    | 12,5   |
| TOTAL            | M Qv2  | 0,0   | M Qv2 1629,6 | M Qv2 2607,4 | M Qv2  | 2933,3 |
|                  | Nc Qv2 | 0,0   | Nc Qv2 0,0   | Nc Qv2 0,0   | Nc Qv2 | 0,0    |
|                  | Vc Qv2 | 469,3 | Vc Qv2 312,9 | Vc Qv2 156,4 | Vc Qv2 | 0,0    |
| MOMENTO MAXIMO + |        |       |              |              |        |        |
|                  | x =    | 0     | x = 4,16667  | x = 8,33333  | x =    | 12,5   |
| TOTAL            | M Qv2  | 0,0   | M Qv2 3069,4 | M Qv2 4911,0 | M Qv2  | 5524,9 |
|                  | Nc Qv2 | 0,0   | Nc Qv2 0,0   | Nc Qv2 0,0   | Nc Qv2 | 0,0    |
|                  | Vc Qv2 | 884,0 | Vc Qv2 589,3 | Vc Qv2 294,7 | Vc Qv2 | 0,0    |

*Tabla 4: Estados Limites de Servicio provenientes de la combinación Característica.*

## 6. PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

### Fuerza de Tesado inicial

Con los Estados Limites de Servicio ya obtenidos podemos continuar con nuestro trabajo. Para el cálculo vamos a suponer inicialmente que las vigas van a ser postesas para poder realizarse en el sitio de la obra y que los parámetros supuestos serán los siguientes:

- Área de tendones o cordones de  $1000 \text{ mm}^2$ .
- Fuerza de tesado de cada tendón o cordón  $P_{\text{max}} = 1400 \text{ kN}$ .

Por lo tanto, se tratará de 2 tendones que se tensaran desde ambos extremos cada uno con la fuerza de tesado expresada y enfilados en una vaina de 63mm de diámetro. Los dos tendones lograrán una fuerza total máxima sobre la sección transversal de la viga de 2800 kN.

|                       |            |       |
|-----------------------|------------|-------|
| Luz Maxima            | 25         | [m]   |
| $f'_c$                | 30         | [MPa] |
| Modulo de Elasticidad | 33550,5511 | [MPa] |
| Momento de Inercia    | 0,3052     | [m]   |
| Fuerza de Pretensado  | 2800       | [kN]  |
| Nro de Vigas          | 5          | [m]   |
| $V_{1b}$              | 0,940      |       |
| $V_{2b}$              | 0,889      |       |

|               |       |
|---------------|-------|
| Recubrimiento | 0,025 |
| Estribo       | 0,008 |
| Barra         | 0,006 |
| Total         | 0,039 |

*Figura 17: Valores tenidos en cuenta a la hora del calculo*

También se debe tener en cuenta que se realizaran dos operaciones de tesados, siendo un tendón a la vez.

Parabola

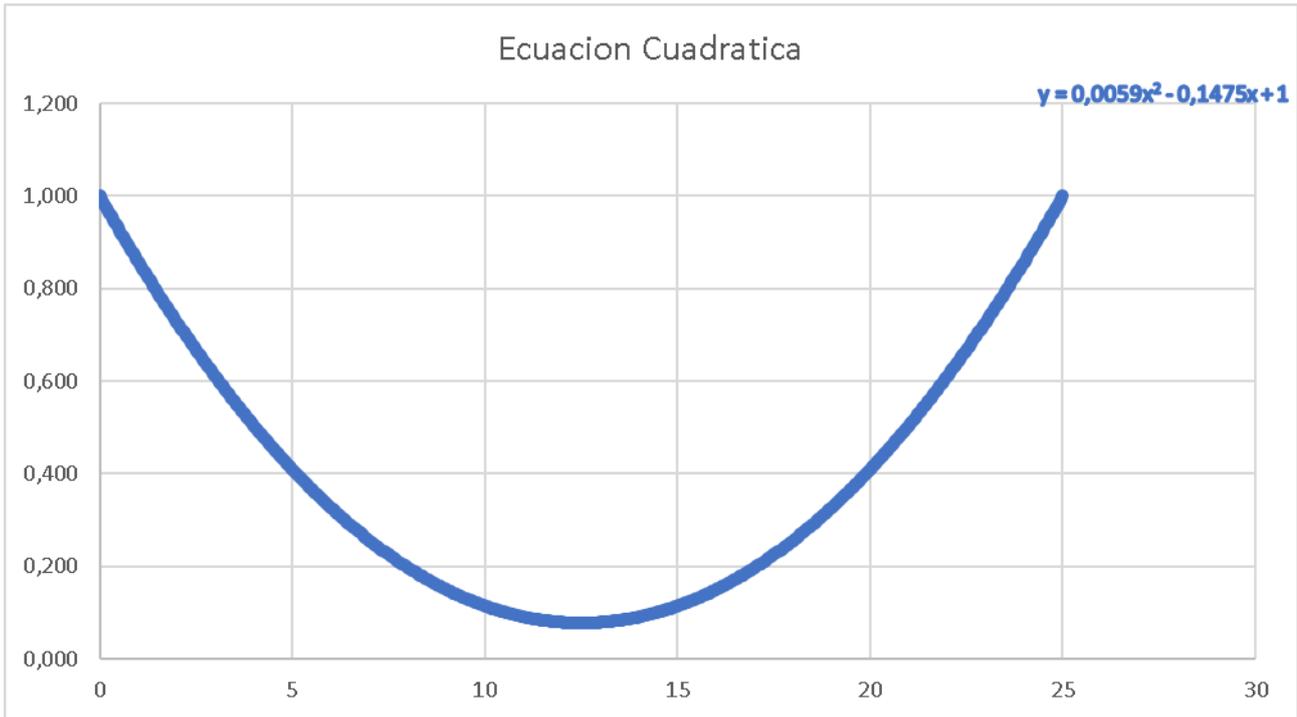
$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

tres puntos

|   | x    | y     |
|---|------|-------|
| 1 | 0    | 1,000 |
| 2 | 12,5 | 0,078 |
| 3 | 25   | 1,000 |

|    |         |
|----|---------|
| A= | 0,0059  |
| B= | -0,1475 |
| C= | 1       |

|      |       |
|------|-------|
| e    | 0,922 |
| alfa | 1,16  |

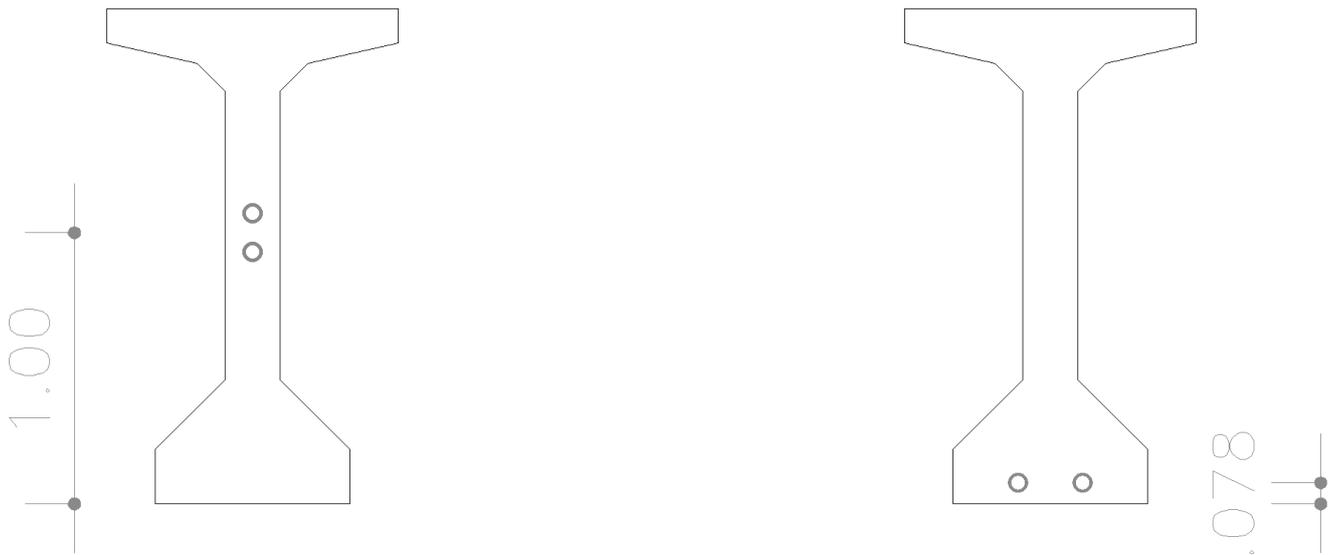


**Figura 18: Función cuadrática de la parábola del cable pretensado**

De las combinaciones límites de servicio, tenemos los valores máximos de cortante y momento a lo largo de la viga.



**Figura 19: representación gráfica de la parábola en la viga.**



**Figura 20: Trazado medio en las secciones de apoyo y central**

| x    | y     | M Total |
|------|-------|---------|
| 0    | 1,000 | 311,2   |
| 1    | 0,858 | -85,3   |
| 2    | 0,729 | -448,7  |
| 3    | 0,611 | -779,1  |
| 4    | 0,504 | -1076,5 |
| 5    | 0,410 | -1340,8 |
| 6    | 0,327 | -1572,1 |
| 7    | 0,257 | -1770,3 |
| 8    | 0,198 | -1935,5 |
| 9    | 0,150 | -2067,7 |
| 10   | 0,115 | -2166,8 |
| 11   | 0,091 | -2232,9 |
| 12   | 0,080 | -2265,9 |
| 12,5 | 0,078 | -2270,1 |
| 13   | 0,080 | -2265,9 |
| 14   | 0,091 | -2232,9 |
| 15   | 0,115 | -2166,8 |
| 16   | 0,150 | -2067,7 |
| 17   | 0,198 | -1935,5 |
| 18   | 0,257 | -1770,3 |
| 19   | 0,327 | -1572,1 |
| 20   | 0,410 | -1340,8 |
| 21   | 0,504 | -1076,5 |
| 22   | 0,611 | -779,1  |
| 23   | 0,729 | -448,7  |
| 24   | 0,858 | -85,3   |
| 25   | 1,000 | 311,2   |

**Tabla 5: Momentos a lo largo de la viga**

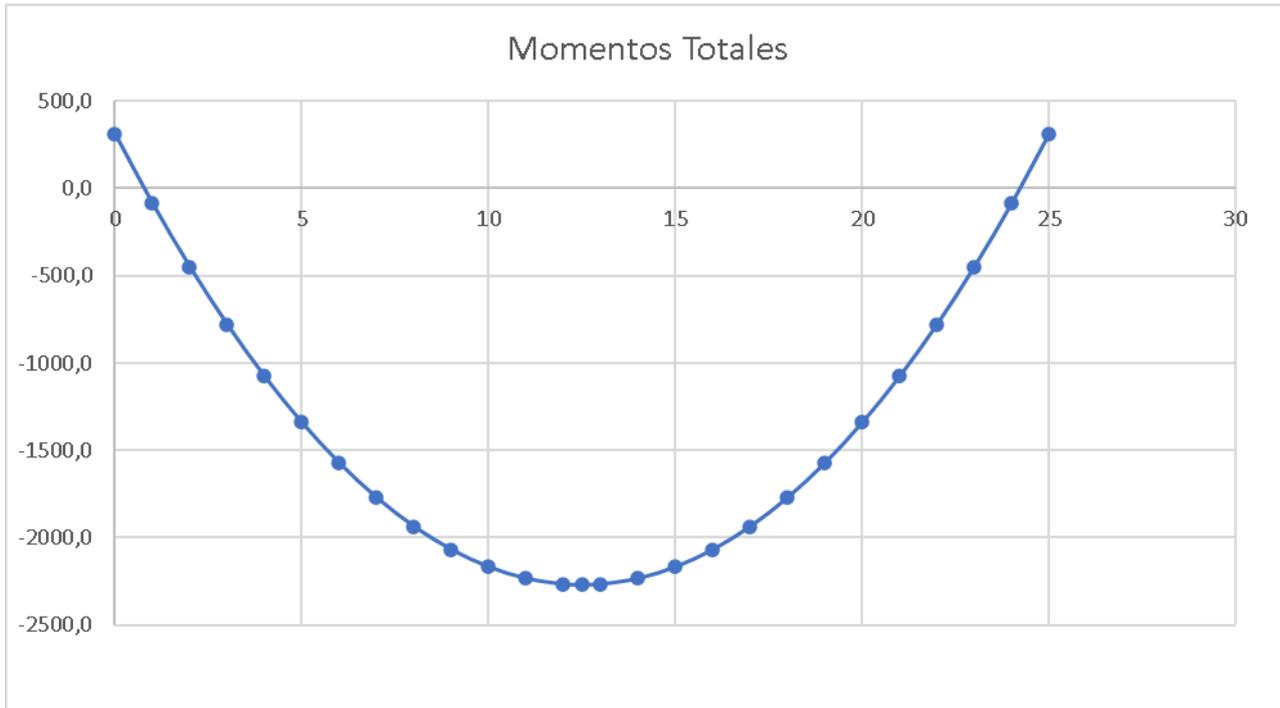


Figura 21: Grafico del momento a lo largo de la viga

## Perdidas de Pretensado

La fuerza  $P_{max}$  de tesado no se mantiene constante a lo largo del tiempo debido a diferentes pérdidas que ocurren en el sistema, ya sea a tiempo instantáneo ( $\Delta P_i(x)$ ) producto del rozamiento, movimiento de las cunas de anclaje y deformación del hormigón; como así también diferidas en el tiempo ( $\Delta P_{c+s+r}(x)$ ) a causa de la fluencia y retracción del hormigón y la propia relajación de la armadura activa. Estas pérdidas son variables y se analizan para cada una de las secciones de la pieza en estudio. En forma genérica tenemos:

$$P_{max} \rightarrow \text{pérdidas instantaneas } \Delta P_i(x) \rightarrow \Delta P_{m0}(x)$$

$$P_{m0} \rightarrow \text{pérdidas diferidas } \Delta P_{c+s+r}(x) \rightarrow \Delta P_{mf}(x)$$

Las pérdidas  $\Delta P_i(x)$  las podemos obtener a partir de los siguientes efectos:

$$\Delta P_i(x) = \Delta P_u(x) + \Delta P_{si}(x) + \Delta P_{el}(x)$$

Siendo

$\Delta P_u(x)$  = Pérdidas por rozamiento

$\Delta P_{si}(x)$  = Pérdidas en anclaje por penetración de cunas

$\Delta P_{el}(x)$  = Pérdidas por acortamiento elástico.

## 7. PERDIDAS BAJO NORMATIVA CIRSOC 201

### Pérdidas Instantáneas

#### Acuñamiento de los anclajes

Para producir la transferencia de esfuerzos del gato a los anclajes, se disminuye gradualmente la fuerza que el gato ejerce sobre los elementos tensores por lo que éstos tienden a acortarse. Un dispositivo de anclaje ideal sería aquel que impida totalmente que durante la transferencia se produzcan acortamientos de los elementos tensores en el interior de la pieza que se está pretensando. Los anclajes reales (sobre todo los constituidos por cuñas) permiten un cierto deslizamiento que en nuestro medio suele denominarse "acuñamiento". A los efectos prácticos puede suponerse que la fricción actúa con igual intensidad tanto en el proceso de alargamiento como en el de acortamiento del cable.

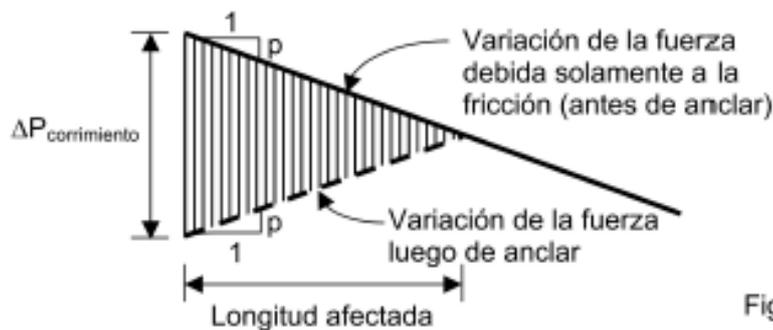


Figura 10.3.2.6.1

**Figura 22: Pérdidas por acuñamiento en reglamento CIRSOC 201**

En la Figura 22 se han indicado con "p" a la pendiente de la curva que indica la variación de la fuerza en los elementos tensores. Puede demostrarse que, si la pendiente es constante e igual para la carga que para la descarga, valen las siguientes expresiones:

$$\Delta_{set} = (\text{Area rayada en la Figura}) / (A_{ps} \cdot E_{ps})$$

$$\text{Longitud afectada} = \left( \frac{\Delta_{set} \cdot A_{ps} \cdot E_{ps}}{p} \right)^{1/2}$$

$$\Delta P_{\text{corrimiento}} = \text{Longitud afectada} \cdot 2 \cdot p$$

Prosiguiendo con el cálculo, podemos observar que al utilizar el valor de 4 mm como  $\Delta_{set}$ , se puede continuar de manera sencilla con el uso de las ecuaciones proporcionadas. Este

valor de  $\Delta_{set}$  lo vamos a utilizar más adelante como un valor asumido de deslizamiento de cuñas.

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| $\Delta_{set}$         | 0,004 [m]                     |
| Aps                    | 0,002 [m <sup>2</sup> ]       |
| Eps                    | 1,90E+08 [kN/m <sup>2</sup> ] |
| p                      | 7,14                          |
| Longitud Afectada      | 14,59 [m]                     |
| $\Delta p$ Corrimiento | 208,40 [kN]                   |

### Fricción

La puesta en tensión de la armadura implica su alargamiento y por lo tanto un desplazamiento relativo respecto a las vainas. Existen tres causas de pérdidas por rozamiento (fricción):

- rozamiento en curva
- rozamiento en recta
- rozamiento en desviadores (pretensado externo)

El CIRSOC 201-2005, artículo 18.6.2.1, propone la siguiente expresión para el cálculo de las pérdidas por fricción:

$$P_{px} = P_{pj} e^{-(K l_{px} + \mu p \alpha_{px})}$$

Si el valor del paréntesis resultara menor o igual que 0,3 la expresión anterior se podrá reemplazar por la siguiente expresión aproximada:

$$P_{px} = P_{pj} (1 + K \cdot l_{px} + P_{px} \mu p \alpha_{px})^{-1}$$

Donde:

$P_{pj}$  = Fuerza de tesado en el extremo desde donde se efectúa el tesado

$P_{px}$  = Fuerza de tesado evaluada a una distancia " $l_{px}$ " del extremo desde donde se efectúa el tesado

K = Coeficiente de desviación accidental (rozamiento parásito O rozamiento en recta) por metro lineal de cable

$l_{px}$  = Longitud de cable medida desde el extremo desde donde se efectúa

el pretensado

$\mu_p$  = Coeficiente de fricción por curvatura (o en curva)

$\alpha_{px}$  = Suma de los valores absolutos de las variaciones angulares (desviaciones sucesivas), medidas en radianes, que se producen en el cable a lo largo de  $l_{px}$

El CIRSOC 201-2005, tabla C18.6.2, da algunos valores orientadores para los coeficientes anteriores. Estos valores son reproducidos en la siguiente Tabla 10.3.2.5.1:

| Condición del cable                       | Tipo de acero de pretensado | Coeficiente de desviación o curvatura accidental K | Coeficiente de fricción por curvatura $\mu_p$ |
|---|-----------------------------|--|---|
| Cables inyectados en vainas metálicas     | Cables de alambre           | 0,0033 – 0,0049                                    | 0,15 – 0,25                                   |
|   | Barras de alta resistencia  | 0,0003 – 0,0020                                    | 0,08 – 0,30                                   |
|   | Cordones de 7 alambres      | 0,0016 – 0,0066                                    | 0,15 – 0,25                                   |
| Cables no adherentes cubiertos con Mastic | Cables de alambre           | 0,0033 – 0,0066                                    | 0,05 – 0,15                                   |
|   | Cordones de 7 alambres      |  |   |
| Cables no adherentes pre-encontrados      | Cables de alambre           | 0,0010 – 0,0066                                    |   |
|   | Cordones de 7 alambres      |  |   |

**Tabla 6: Cirsoc 201 – Tabla 10.3.2.5.1.**

Resultando las pérdidas por Fricción en:

|                       |        |      |
|-----------------------|--------|------|
| Perdidas por Fricción | 286,54 | [kN] |
|-----------------------|--------|------|

### Acortamiento elástico

Cuando se libera la fuerza anclada en los estribos del banco de tesado la adherencia pone en tensión al hormigón. Este, al acortarse produce una pérdida de tensión en el acero que es igual al producto de la relación de módulos de elasticidad entre el acero y el hormigón y la tensión que el pretensado y las cargas externas concomitantes con el momento del tesado producen en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores.

$$ES = K_{es} E_s \frac{f_{cir}}{E_{ci}}$$

Donde:

$K_{es} = 1$  para elementos pretensados

$K_{cir} = 0,9$  para elementos pretensados

$E_s =$  Módulo de elasticidad de los elementos tensores (195000 MPa)

$E_{ci} =$  Módulo de elasticidad del hormigón en el momento del tesado  $4700 \sqrt{f'_{ci}}$  (25742,96 MPa)

$f_{cir} =$  Tensión de compresión neta en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores inmediatamente después de haberse aplicado la totalidad del pretensado

$f_{cpi} =$  Tensión en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores producida por la fuerza de tesado consideradas solamente las pérdidas por fricción y por acuanamiento de anclajes

$f_g =$  Tensión en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores debido al peso propio y otras cargas presentes en el momento del pretensado

Por lo tanto:

$$f_{cir} = K_{cir} f_{cpi} - f_g$$

$$f_{cpi} = \frac{P_{inicial}}{A} + \frac{P_{inicial} e_{adop}}{I_x}$$

$$f_g = \frac{M_2 e_{adop}}{I_x}$$

|                           |             |
|---------------------------|-------------|
| Perdidas por Acortamiento | 259,18 [kN] |
|---------------------------|-------------|

## Pérdidas Diferidas

### Retracción del hormigón

La retracción es la deformación que sufre una pieza de hormigón por movimientos del agua no fijada químicamente al gel de cemento. Aunque el fenómeno más conocido es la pérdida de agua con la consiguiente disminución de volumen, existe también el fenómeno opuesto denominado hinchamiento o expansión. Obviamente, desde el punto de vista práctico interesa solamente la contracción que se produce desde el momento del tesado hasta el momento en que se desea conocer el pretensado efectivo. Dado que la mayoría de los elementos pretensados son puestos en tensión a edades muy tempranas, los efectos de la contracción son mucho más importantes que en elementos postesados.

Las variables que considera CIRSOC son solamente las siguientes:

- RH: Humedad media del ambiente que rodea al elemento
- V/S: Relación entre la sección transversal de la pieza y su perímetro (en rigor se trata de la relación Volumen/Superficie). En algunos textos se la denomina “espesor ficticio”.
- Tiempo transcurrido desde la finalización del curado húmedo hasta la aplicación del pretensado

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} K_{sh} E_s \left( 1 - 0.024 \frac{V}{S} \right) (100 - RH)$$

Donde:

$K_{sh} = 1$  para elementos pretensados

$E_s$  = Módulo de elasticidad de los elementos tensores (195000 MPa)

$\frac{V}{S}$  = Relación entre el área de la viga y su perímetro en cm

RH = Humedad media relativa s/ tabla (70 %)

| Ambiente  | Humedad relativa media en % |
|---|-----------------------------|
| En aire muy húmedo                                | 90                          |
| En general al aire libre                          | 70                          |
| En aire seco (p.e. en ambientes interiores secos) | 50                          |

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Perdidas de Retraccion | 264,54 [kN] |
|------------------------|-------------|

### Fluencia del hormigón

De forma simplificada se engloban en el concepto de fluencia todas las deformaciones diferidas, elásticas y plásticas, que dependen de la tensión. También en forma simplificada, y siempre que la tensión actuante no sea demasiado elevada (digamos no superior al 40 o 50% de la tensión de rotura), la deformación de fluencia puede suponerse proporcional a la deformación elástica instantánea.

En rigor la fluencia lenta se ve afectada por prácticamente los mismos factores que la contracción, aunque la bibliografía recomendada por el CIRSOC hace un abordaje bastante simplificado a través de la expresión:

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} (f_{cir} - f_{c ds})$$

Donde:

$K_{cr} = 2$  para elementos pretensados

$E_s$  = Módulo de elasticidad de los elementos tensores (195000 MPa)

$E_c$  = Módulo de elasticidad del hormigón a 28 días  $4700 \sqrt{f'_{ci}}$  (25742,96 MPa)

$f_{cir}$  = Tensión de compresión neta en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores inmediatamente después de haberse aplicado la totalidad del pretensado

$f_{cds}$  = Tensión en el hormigón a nivel del centro de gravedad de los elementos tensores debida a todas las cargas permanentes que se agregan luego del tesado

$$f_{cds} = \frac{(M_2 - (M_1)) e_{adop}}{I_x}$$

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Perdidas por Fluencia | 177,12 [kN] |
|-----------------------|-------------|

### Relajación del acero

La única pérdida significativa que presenta el acero en el tiempo es la relajación, es decir, la pérdida de tensión a deformación constante. El valor de la relajación depende del tipo de acero, de la tensión de tesado, del tiempo transcurrido desde la puesta en tensión y de la temperatura. Asimismo, depende de la interrelación con las otras pérdidas diferidas.

$$RE = [K_{re} - J (SH + CR + ES)] C$$

Donde:

$K_{re}$  = Valores básicos de relajación s/ tabla (Baja relajación C1900, vale 35)

J = Factor de interacción para la reducción de tensión debido a otras perdidas s/ tabla (Baja relajación C1900, vale 0,04)

C = Factor por nivel de tensión

| Tipo de elemento tensor     | Relevado de tensiones                   | $K_{re}$ [MPa] | J    |
|-----------------------------|---|----------------|------|
| Cordón de 3 alambres C-1950 | Térmico<br>(Relajación Normal - RN)     | 144            | 0,16 |
| Cordón de 3 alambres C-1800 |   | 133            | 0,15 |
| Cordón de 3 alambres C-1750 |   | 130            | 0,14 |
| Cordón de 3 alambres C-1650 |   | 122            | 0,13 |
| Alambre de acero APL-1700   | Termomecánico<br>(Baja relajación - BR) | 31             | 0,04 |
| Cordón de 7 alambres C-1900 |   | 35             | 0,04 |

**Tabla 7: Tabla de relajación de los aceros según su tensor**

$$C = \frac{f_{pi}}{f_{pu}}$$

$f_{pu}$  = Tensión de tracción fluencia especificada para el acero pretensado (1890 MPa)

$f_{pi}$  = Tensión en los elementos tensores producida por:

$$f_{pi} = \frac{P_{pi}}{A_{ps}}$$

$P_{pi}$  = Fuerza de pretensado en la sección en estudio descontadas solamente las pérdidas por fricción y por acúñamiento de anclajes, pero antes de ES, CR, SH y RE

$A_{ps}$  = Sección transversal de los elementos tensores.

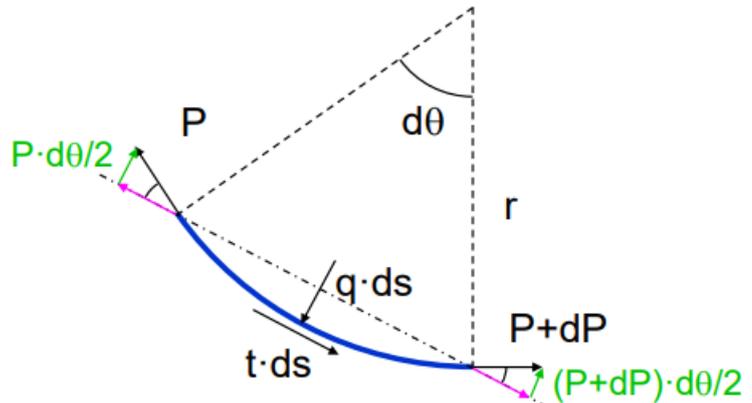
|                         |        |      |
|-------------------------|--------|------|
| Perdidas por Relajacion | 229,11 | [kN] |
|-------------------------|--------|------|

## 8. PERDIDAS BAJO NORMATIVA EURCODIGO 02

### 1- Perdidas Instantáneas

#### Perdidas por Rozamiento ( $\Delta P_{\mu}(x)$ )

Para su determinación debemos plantear el equilibrio de un diferencial del trazado propuesto y resolviendo analíticamente se podrá obtener que:



$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max} \cdot [1 - e^{-(\mu \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i + K \cdot x)}]$$

Donde:

$\theta_i$  = variación angular

$\mu$  = coeficiente de rozamiento en curva = 0.21

$K$  = coeficiente de rozamiento parasito = 0.006.  $\mu = 0.00126$

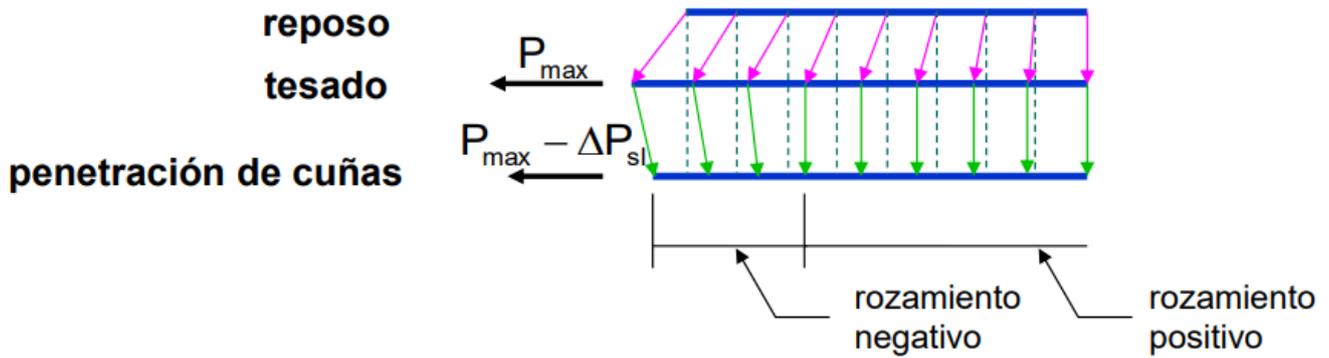
Primeramente, indicamos las coordenadas X e Y de los puntos de paso de la parábola. Luego, aplicando la expresión de cálculo  $\Delta P_{\mu}(x)$  mostrada para los puntos característicos de la parábola obtenemos los siguientes valores de perdidas por rozamiento:

|   | x    | $\theta_i$ [rad/m] | $\Delta P_{\mu}$ [kN] |
|---|------|--------------------|-----------------------|
| 1 | 0    | 0,0000             | 0,00                  |
| 2 | 12,5 | 0,1475             | 127,82                |
| 3 | 25   | 0,0000             | 0,00                  |

**Tabla 8: Perdidas por Rozamiento**

#### Perdidas en anclaje por Penetración de cuñas ( $\Delta P_{sl}(x)$ )

En este caso se trata de un destesado parcial que se produce al deslizarse las cuñas dentro de la placa de anclaje, lo cual genera una pérdida inicial de la fuerza de tesado, siendo en forma esquemática:

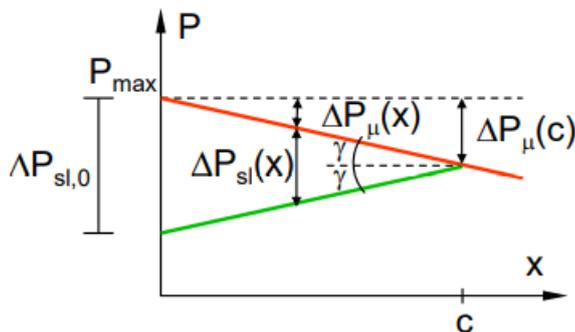


Donde el deslizamiento  $a$  de la cuña viene dado por la expresión:

$$a = \int_0^c \frac{\Delta P_{si}}{E_p \cdot A_p} \cdot dx = \frac{2 \cdot P_{max} \cdot (\mu \cdot \alpha_m + K)}{E_p \cdot A_p} \cdot c^2 = 4mm$$

$$a = 4mm$$

Como hipótesis se plantea que el cable es lo suficientemente largo para que la distancia  $c$  de afectación del destesado es menor que su longitud, y aplicando el método simplificado de aproximaciones lineales, podemos aplicar las siguientes expresiones:



$$\Delta P_{si}(x) = 2 \cdot P_{max} \cdot (\mu \cdot \alpha_m + K) \cdot (c - x)$$

Para lo cual, despejando el valor de  $c$  tenemos:

$$c = \sqrt{\frac{\alpha \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot (\mu \cdot \alpha_m + K)}} = 12.05 \text{ m.}$$

Aplicando las expresiones y datos del problema, asumimos la hipótesis de que el valor de  $c$  se encuentra dentro de la parábola.

|              |                |
|--------------|----------------|
| $\mu$        | 0,210          |
| $\kappa/\mu$ | 0,006          |
| $\theta_m$   | 0,0118 [rad/m] |
| $\lambda$    | 0,003738       |

|     |            |                            |       |              |
|-----|------------|----------------------------|-------|--------------|
| $c$ | 12,0510012 | $0 < z \text{ isq} < 12,5$ | 0,018 | Aprox Lineal |
|-----|------------|----------------------------|-------|--------------|

|   | x    | $\theta_i$ [rad/m] | $\Delta P_{sl}$ [kN] |
|---|------|--------------------|----------------------|
| 1 | 0    | 0,0000             | 252,26               |
| 2 | 12,5 | 0,1475             | 0,00                 |
| 3 | 25   | 0,0000             | 252,26               |

Tabla 9: Pérdidas por penetración de cuñas

Pérdidas por acortamiento elástico del hormigón ( $\Delta P_{el}(x)$ )

A considerar dependiendo de la secuencia de tesado que estén previstas, para lo cual en nuestro caso tenemos tesado en dos (2) etapas. La expresión que permite estimar la pérdida de tesado por las deformaciones elásticas del hormigón en cada una de los tesados parciales es:

$$\Delta P_{el} = \frac{(n - 1)}{2 \cdot n} \cdot \frac{E_p \cdot A_p}{E_c} \cdot \sigma_{cpm}$$

$$\sigma_{cpm} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \sigma_{cp}(x) \cdot dx$$

donde:

$n$ : numero de operaciones de tesado=2  $\sigma_c$

$\sigma_{cpm}$  = tension media del hormigón.

$\sigma_{cp}$  = tension del hormigón a la altura de armadura activa.

$$\sigma_{cp} = \frac{(P_{max} - \Delta P_{\mu} - \Delta P_{sl})}{A_b} + \frac{M_g \cdot (P_{max} - \Delta P_{\mu} - \Delta P_{sl}) \cdot e_p}{I_{gb}} \cdot e_p$$

|             |         |                          |
|-------------|---------|--------------------------|
| <b>Pmax</b> | 2,80    | [MN]                     |
| <b>Ap</b>   | 0,0020  | [m2]                     |
| <b>Ep</b>   | 190.000 | [MPa]                    |
| <b>Ec</b>   | 33.551  | [MPa]                    |
| <b>n</b>    | 2       | N° operaciones de tesado |
| <b>Igb</b>  | 0,305   | [m4]                     |
| <b>Ab</b>   | 0,7000  | [m2]                     |

Figura 23: Datos utilizados para las pérdidas de acortamiento elástico

Aplicando la expresión de cálculo  $\Delta P_{el}(x)$  mostrada para los puntos característicos de la parábola obtenemos los siguientes valores de pérdidas por deformación elástica durante el proceso de tesado en etapas:

|          | x    | $\sigma_{cp}$ [MPa] | $\Delta P_{el}$ [kN] |
|----------|------|---------------------|----------------------|
| <b>1</b> | 0    | 3,74                | 10,60                |
| <b>2</b> | 12,5 | 9,57                | 27,10                |
| <b>3</b> | 25   | 3,74                | 10,60                |

**Tabla 10: Pérdidas por Acortamiento elástico del hormigón**

Por último, las pérdidas totales de pretensado del tipo instantáneas se obtienen aplicando la expresión:

$$\Delta P_i(x) = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el}(x)$$

Resumiendo, para las secciones características los valores de pérdidas instantáneas, la fuerzas de tesado y el respectivo porcentaje de disminución respecto a  $P_{max}=2800$  kN, tenemos:

|          | x    | $\Delta P$ ins [kN] | $P_{m0}$ [kN] | %     |
|----------|------|---------------------|---------------|-------|
| <b>1</b> | 0    | 262,86              | 2537,14       | 9,39% |
| <b>2</b> | 12,5 | 154,92              | 2645,08       | 5,53% |
| <b>3</b> | 25   | 262,86              | 2537,14       | 9,39% |

**Tabla 11: Pérdidas totales instantáneas del pretensado**

Y en forma gráfica para todas las secciones del puente, como se adjuntan a continuación:

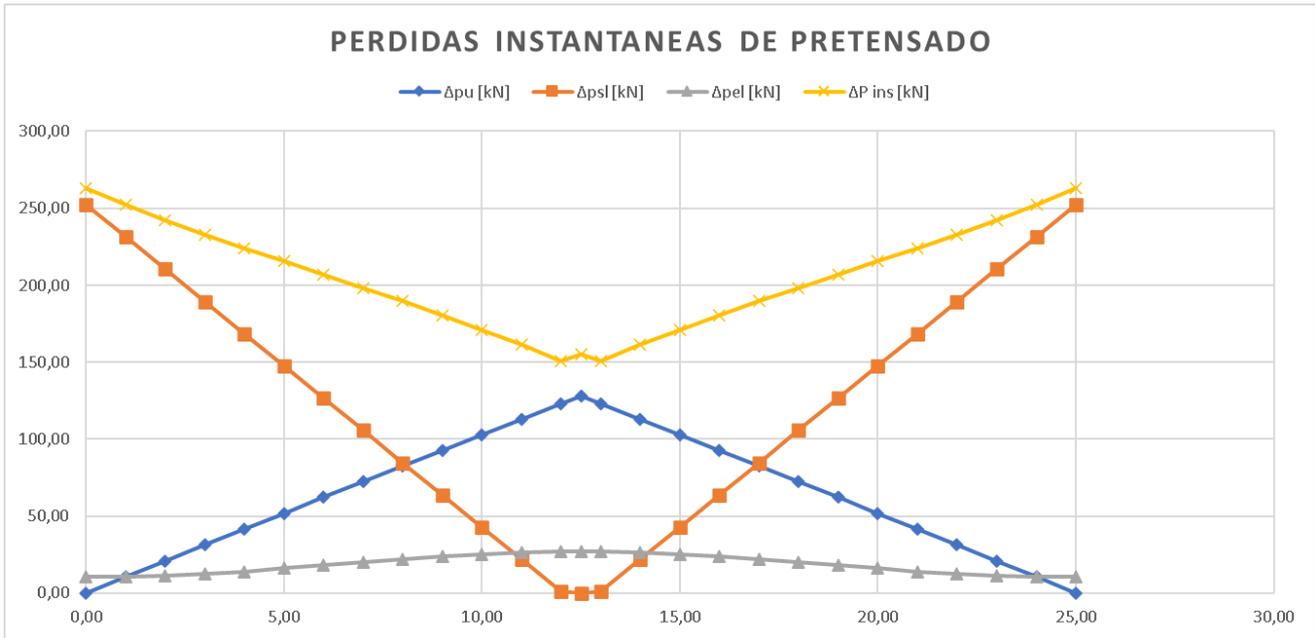


Figura 24: Grafica de las perdidas instantáneas.

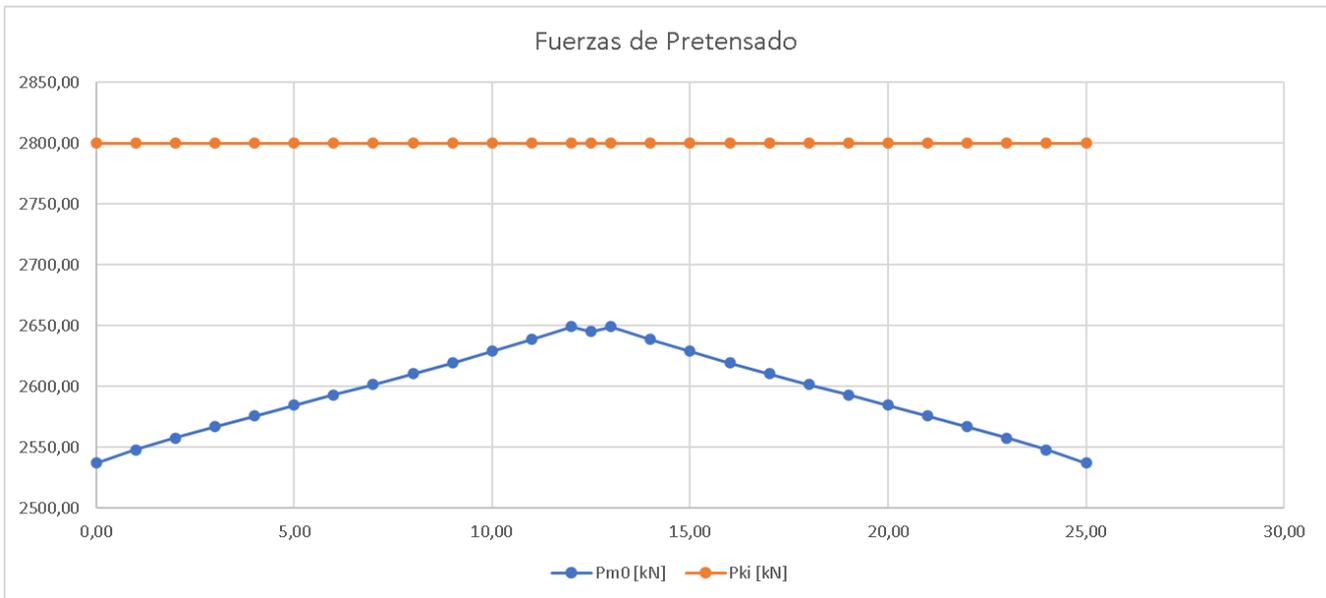


Figura 25: Grafica de las perdidas Instantáneas totales vs la fuerza de tesado inicial

## Perdidas Diferidas

Para el cálculo de las perdidas diferidas uno de los mayores datos que se tuvieron que definir son los tiempos y dentro de estos se especifican 3 (tres), tiempo de endurecimiento  $t_0$  (7 días), tiempo de curado  $t_s$  (3 días) y tiempo de análisis  $t$  (1825 días = 5 años). Además, se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

|                  |          |                                      |
|------------------|----------|--------------------------------------|
| <b>fck</b>       | 30,00    |                                      |
| <b>fcm</b>       | 38,00    |                                      |
| <b>Pmax</b>      | 2.800,00 | [KN]                                 |
| <b>Ap</b>        | 0,0020   | [m2]                                 |
| <b>Ep</b>        | 190.000  | [MPa]                                |
| <b>Ec</b>        | 33.551   | [MPa]                                |
| <b>n</b>         | 2        | N° operaciones de tesado             |
| <b>lc</b>        | 0,305    | [m4]                                 |
| <b>Ac</b>        | 0,7000   | [m2]                                 |
| <b>perimetro</b> | 5,2840   | [m]                                  |
| <b>t0</b>        | 7        | [dias]                               |
| <b>t</b>         | 1.825    | [dias]                               |
| <b>ts</b>        | 3        | [dias]                               |
| <b>h0</b>        | 264,95   | espesor medio de la seccion . =( $z$ |

**Figura 26: Datos tenidos en cuenta para el cálculo de las perdidas diferidas.**

### Pérdidas por Retracción, Fluencia y Relajación

$$\Delta P_{c+s+R} = A_p \cdot \Delta \sigma_{p,c+s+R}$$

$$\Delta P_{c+s+R} = A_p \cdot \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot Z_{cp}^2\right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0))}$$

$\varepsilon_{cs}$  = deformación de retracción (art. 3.1.4 (6)).

$$\varepsilon_{cs}(t_s, t) = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

siendo:

$\varepsilon_{cd}$ : *Retracción por secado*

$\varepsilon_{ca}$ : *Retracción autógena (por endurecimiento)*

a. Retracción por Secado:

|       |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
| $h_0$ | 100  | 200  | 300  | >500 |
| $k_h$ | 1.00 | 0.85 | 0.75 | 0.70 |

- $\varepsilon_{cd}(t) = K_h \cdot \beta_{ds}(t, t_s) \cdot \varepsilon_{cd,\infty}$ 
  - $K_h = 0,925$
  - $\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}}$
  - $\varepsilon_{cd,\infty} = 0,85 \cdot \left[ (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$

b. Retracción autógena:

- $\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}$ 
  - $\varepsilon_{ca} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$
  - $\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}}$

Luego el total de la deformación diferida por retracción resulta:

|            |          |
|------------|----------|
| <b>εCS</b> | 0,000315 |
|------------|----------|

$E_p$  = módulo de elasticidad de la armadura activa (art. 3.3.6 (2)).

|           |               |
|-----------|---------------|
| <b>Ep</b> | 190.000 [MPa] |
|-----------|---------------|

$E_{cm}$  = módulo de deformación del hormigón (Tabla 3.1).

- $E_{cm}(t_0) = \left( \frac{f_{cm}(t_0)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm,28}$ 
  - $\frac{f_{cm}(t_0)}{f_{cm}} = e^{s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t_0}} \right)}$
  - $E_{cm,28} = 22000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$

|               |                |
|---------------|----------------|
| <b>Ecm,28</b> | 30463,91 [MPa] |
|---------------|----------------|

$\varphi(t, t_0)$  = coeficiente de fluencia.

Coeficiente de Fluencia  $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$

○ Coeficiente de fluencia básico  $\varphi_0 = \varphi_{HR} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$

▪  $\varphi_{HR} = \left[ 1 + \frac{1 - \frac{HR}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2$

▪  $\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$

▪  $\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}}$

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| <b><math>\varphi_0</math></b> | 2,54 |
|-------------------------------|------|

○  $\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)} \right]^{0,3}$

▪  $\beta_H = 484,75 \leq 1.500$

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| <b><math>\beta_c(t, t_0)</math></b> | 0,91 |
|-------------------------------------|------|

Resultando el coeficiente de fluencia:

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| <b><math>\varphi(t, t_0)</math></b> | 2,32 |
|-------------------------------------|------|

$A_p$  = área de la armadura activa.

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| <b><math>A_p</math></b> | 0,0020 [m <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|--------------------------|

$A_c I_c$  = área e inercia de la sección de hormigón.

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| <b><math>I_c</math></b> | 0,305 [m <sup>4</sup> ]  |
| <b><math>A_c</math></b> | 0,7000 [m <sup>2</sup> ] |

$Z_{cp}$  = distancia entre el cdg de la sección de hormigón y la armadura activa

**APOYO**

**CENTRO LUZ**

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| <b><math>Z_{cp}</math></b> | -0,111 |
|----------------------------|--------|

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| <b><math>Z_{cp}</math></b> | 0,811 |
|----------------------------|-------|

$\sigma_{c,qp}$  = tensión en el hormigón a la armadura activa debido al peso propio, al pretensado inicial y a otras acciones cuasi permanentes relevantes.

$$\sigma_{cp,Q} = \frac{P_{m0,cL}}{A_b} + \frac{P_{m0,cL} \cdot e_{p,cL} + M_g + M_{cm} + \varphi_2 \cdot M_q}{I_{gB}} \cdot e_{p,cL}$$

|           |                |
|-----------|----------------|
| <b>Mg</b> | 1367,19 [kN.m] |
|-----------|----------------|

|            |                |
|------------|----------------|
| <b>Mcm</b> | 1604,53 [kN.m] |
|------------|----------------|

|           |                |
|-----------|----------------|
| <b>Mq</b> | 2591,61 [kN.m] |
|-----------|----------------|

**CENTRO LUZ**

|               |       |
|---------------|-------|
| <b>e p,cl</b> | -0,81 |
|---------------|-------|

|           |         |
|-----------|---------|
| <b>Pm</b> | 2645,08 |
|-----------|---------|

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| <b>σ (c,QP)</b> | 548,85 kN/m <sup>2</sup> |
|-----------------|--------------------------|

**APOYO**

|              |      |
|--------------|------|
| <b>e p,a</b> | 0,11 |
|--------------|------|

|           |         |
|-----------|---------|
| <b>Pm</b> | 2537,14 |
|-----------|---------|

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| <b>σ (c,QP)</b> | 3727,17 kN/m <sup>2</sup> |
|-----------------|---------------------------|

$\Delta\sigma_{pr}$  = valor absoluto de la variación de tensión en la armadura activa debido a la relajación del acero.

$$\Delta\sigma_{pr,a} = \rho_f \frac{P_{m0,cL}}{A_p}$$

**CENTRO LUZ**

$\Delta\sigma_{pr}$  79,35 MPa

**APOYO**

$\Delta\sigma_{pr}$  76,11 MPa

Con todo esto en cuenta podemos ahora si obtener las perdidas diferidas de la viga. Recordando la ecuación de esta:

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \cdot \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot Z_{cp}^2\right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0))}$$

**CENTRO LUZ**

$\Delta P_s$  106,03 [kN]

$\Delta P_r$  112,61 [kN]

$\Delta P_c$  14,06 [kN]

**APOYO**

$\Delta P_s$  113,61 [kN]

$\Delta P_r$  115,73 [kN]

$\Delta P_c$  102,32 [kN]

Obteniendo de esta manera unas pérdidas totales como se detalla a continuación:

**PERDIDAS TOTALES**

|   | X     | Pmax    | $\Delta P_i$ | $\Delta P_s$ | $\Delta P_r$ | $\Delta P_c$ | $\Delta P_{c+s+r}$ |
|---|-------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| 1 | 0,00  | 2800,00 | 262,86       | 113,61       | 115,73       | 102,32       | 331,66             |
| 2 | 12,50 | 2800,00 | 154,92       | 106,03       | 112,61       | 14,06        | 232,70             |
| 3 | 0,00  | 2800,00 | 262,86       | 113,61       | 115,73       | 102,32       | 331,66             |

**Tabla 12: Perdidas Instantáneas y Diferidas.**

## 9. MODELIZACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

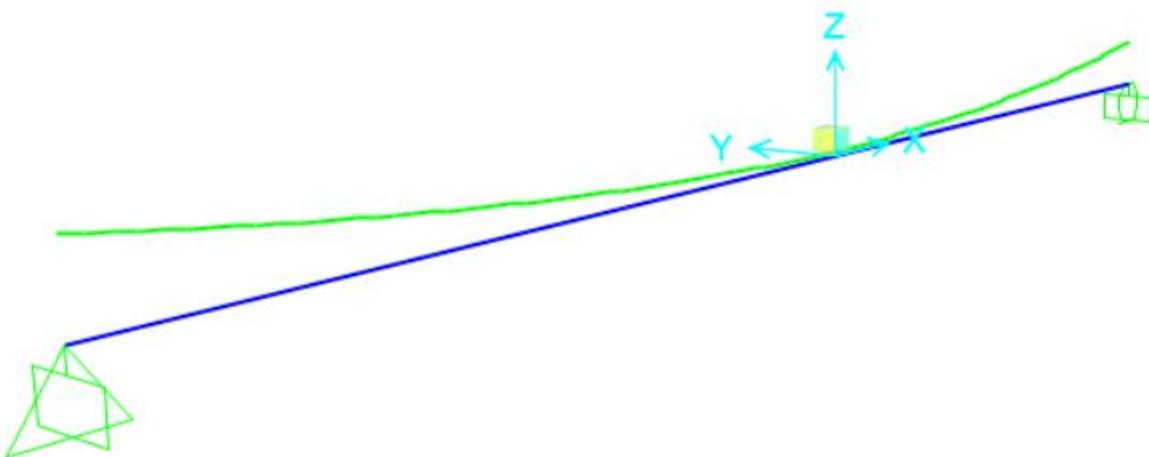
Una vez obtenido el primer objetivo del trabajo, proseguiremos con el cálculo en el software de ingeniería civil de SAP 2000. En el mismo se introdujo una viga simplemente apoyada a la cual se definió una sección (Viga tipo VI AHSTO) se adjuntarán figuras 27 en adelante de dicho procedimiento para su seguimiento.

Se debe destacar que el programa SAP 2000 permite la modelización de los tendones de dos maneras diferentes. Una es con cargas equivalentes, donde debemos introducir al programa las pérdidas ya calculadas para que el mismo genere resultados similares a los ya calculados. De la otra manera, modelizando los tendones como elementos, de esta manera las pérdidas las calcula de manera más acertada y se poda también hacer un análisis a través del tiempo de la variación de las pérdidas. Se ira narrando y comentado cada paso entre modelos a medida que varíen.

### Definición de la estructura

Al tener que comparar los resultados de las pérdidas, podemos analizar una sola viga de las 5 del puente en el modelo. Esto conlleva con un programa más ágil y sencillo.

En primer lugar, se define los ejes que este caso es un eje lineal de 25 metros.



*Figura 27: Viga tipo ASSHTO en SAP 2000 idealizada*

Subsiguientemente se deben definir los materiales y secciones a utilizar para que el modelo sea semejante y representativo. Esto se puede realizar de manera sencilla como se muestra a continuación.

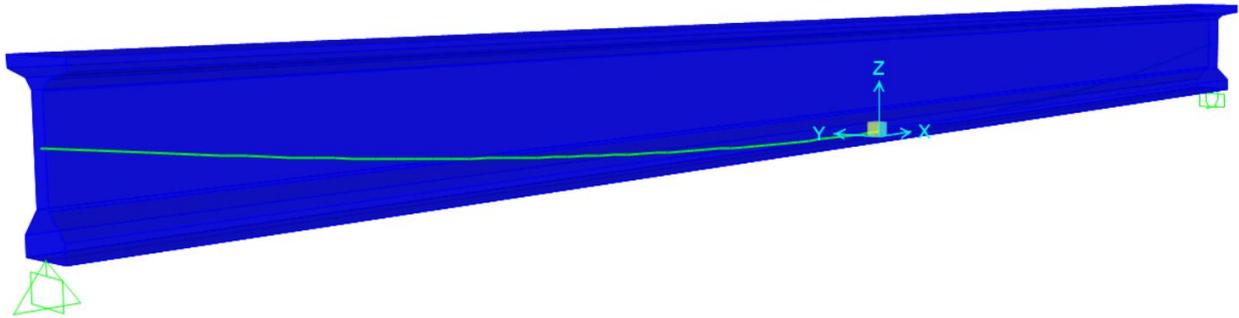


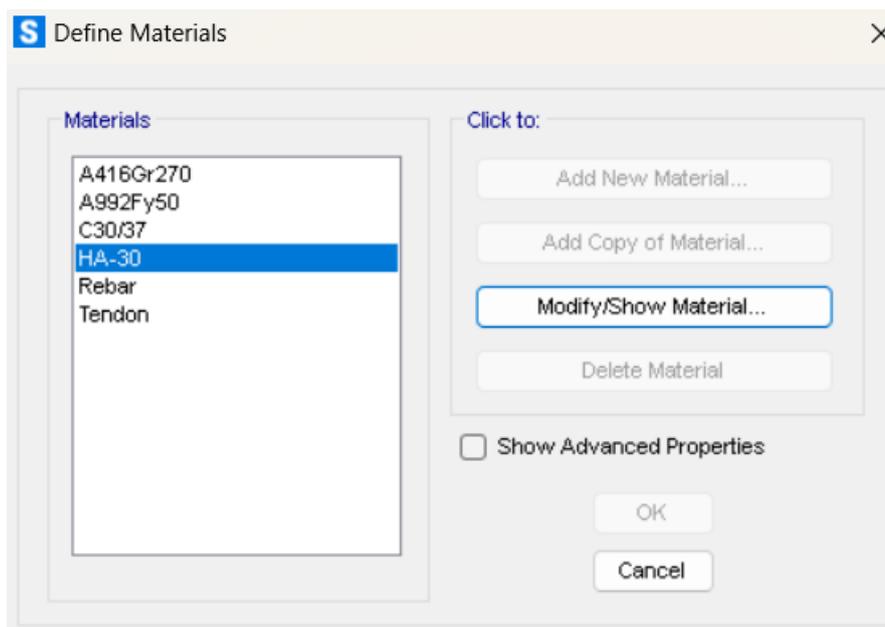
Figura 28: Viga tipo ASSTHO en SAP 2000

## Definición de materiales

Se establecieron los parámetros de acero de 500MPa y hormigón de 30 MPa de resistencia a cada uno. Se introdujo también la armadura activa de 1860 MPa de resistencia para el pretensado calculado.

Estos como muestra la siguiente figura, se denominaron como :

1. HA-30
2. Rebar
3. Tendon



**Figura 29: Materiales definidos en SAP 2000.**

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name and Display Color: HA-30

Material Type: Concrete

Material Grade: HA-30

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Weight and Mass**

Weight per Unit Volume: 24,9926

Mass per Unit Volume: 2,5485

**Units**

KN, m, C

**Isotropic Property Data**

Modulus Of Elasticity, E: 33577729,

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 5,500E-06

Shear Modulus, G: 13990721,

**Other Properties For Concrete Materials**

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 30000,

Expected Concrete Compressive Strength: 30000,

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

**Figura 30: Propiedades definidas para el Hormigón H-30**

En las propiedades del hormigón también añadiremos que pueda sufrir deformaciones por el paso del tiempo. Esto se realiza en propiedades avanzadas y utilizaremos un factor de 1.

**S** Time Dependent Properties for Concrete

Material Name: HA-30

Material Type: Concrete

Symmetry Type: Isotropic

Time Dependent Type: Eurocode 2-2004

Units: KN, m, C

Eurocode 2-2004 Parameters:

- Relative Humidity, %: 70
- Shrinkage Start Age, days: 1
- Cement Type: Class R
- Lightweight Concrete Grade:
- Lightweight Oven-dry Density, kg/m3:

Time Dependence Considered For:

| Item   | Factor |
|--|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Compressive Strength and Stiffness (Modulus of Elasticity) | 1      |
| <input checked="" type="checkbox"/> Creep  | 1      |
| <input checked="" type="checkbox"/> Shrinkage  | 1      |

Creep Analysis Type:

Full Integration

Dirichlet Series With  Terms

Show Plot...

OK Cancel

Figura 31: Propiedades del hormigón con relación a la dependencia del tiempo

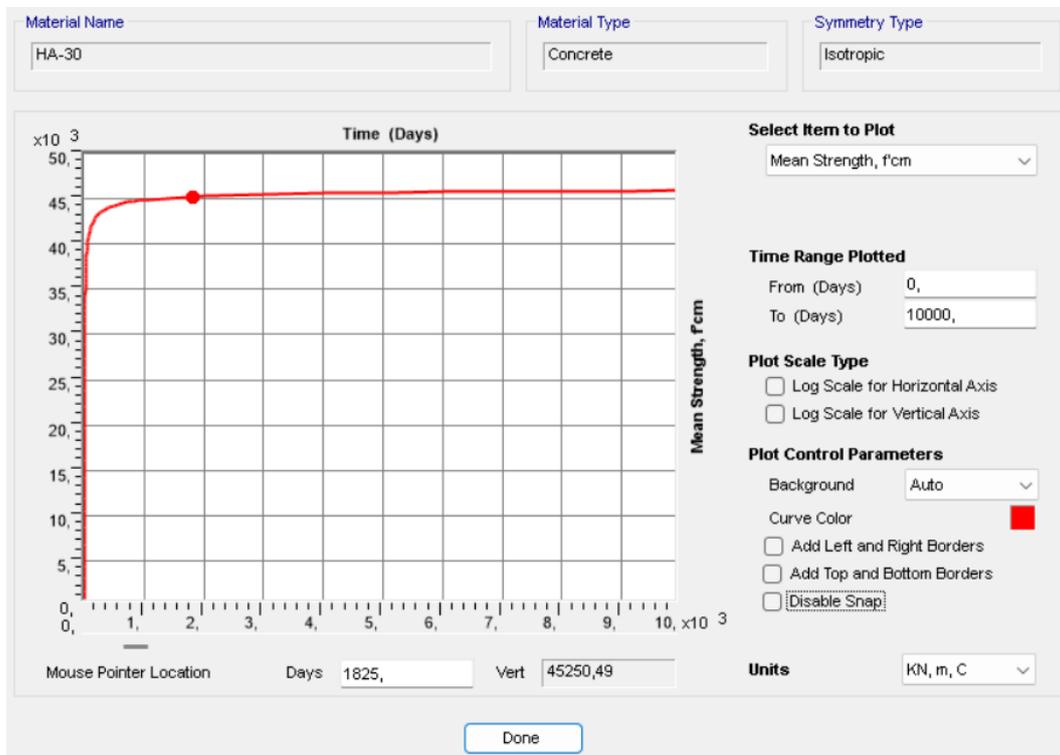


Figura 32: Grafica de la variación de la resistencia del hormigón contra el tiempo

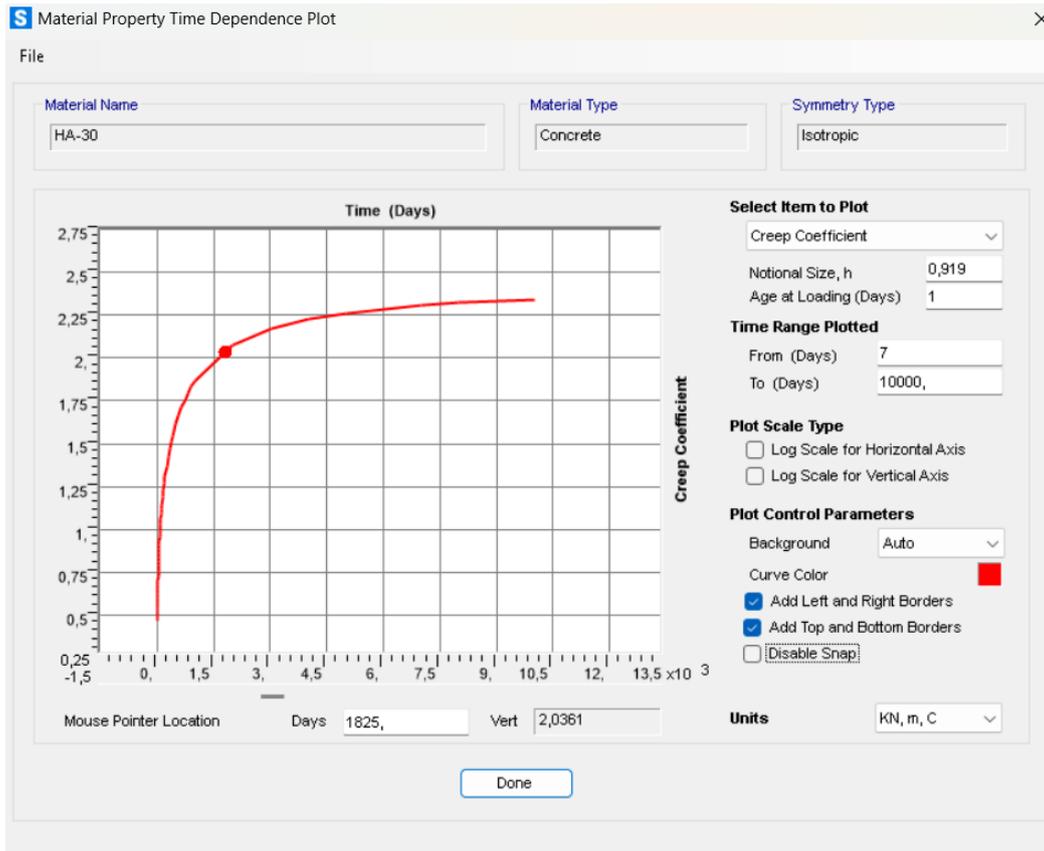


Figura 33: Grafica de la variación de la fluencia del hormigón contra el tiempo

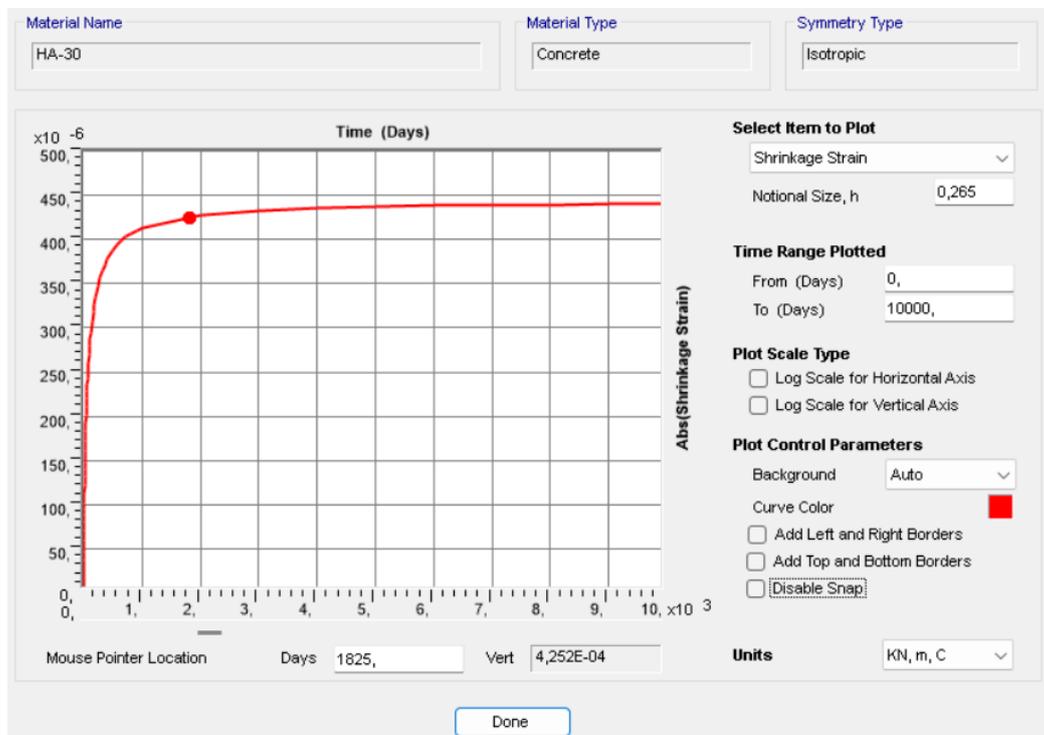


Figura 34: Grafica de la variación del retracción del hormigón contra el tiempo

**S** Material Property Data

**General Data**

|                                 |                      |   |
|---------------------------------|----------------------|---|
| Material Name and Display Color | Rebar                |   |
| Material Type                   | Rebar                | ▼ |
| Material Grade                  |                      |   |
| Material Notes                  | Modify/Show Notes... |   |

**Weight and Mass**

|                        |         |
|------------------------|---------|
| Weight per Unit Volume | 76,9729 |
| Mass per Unit Volume   | 7,849   |

**Units**

|       |          |   |
|-------|----------|---|
| Units | KN, m, C | ▼ |
|-------|----------|---|

**Uniaxial Property Data**

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Modulus Of Elasticity, E            | 1,999E+08 |
| Poisson, U                          | 0,        |
| Coefficient Of Thermal Expansion, A | 1,170E-05 |
| Shear Modulus, G                    |           |

**Other Properties For Rebar Materials**

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| Minimum Yield Stress, Fy     | 413685,5 |
| Minimum Tensile Stress, Fu   | 620528,2 |
| Expected Yield Stress, Fye   | 455054,  |
| Expected Tensile Stress, Fue | 682581,  |

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

**Figura 35: Propiedades definidas para la armadura pasiva.**

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name and Display Color: Tendon

Material Type: Tendon

Material Grade: Y1860S7

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Weight and Mass**

Weight per Unit Volume: 76,9729

Mass per Unit Volume: 7,849

**Units**

KN, m, C

**Uniaxial Property Data**

Modulus Of Elasticity, E: 1,950E+08

Poisson, U: 0

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G:

**Other Properties For Tendon Materials**

Minimum Yield Stress, Fy: 1670000

Minimum Tensile Stress, Fu: 1860000

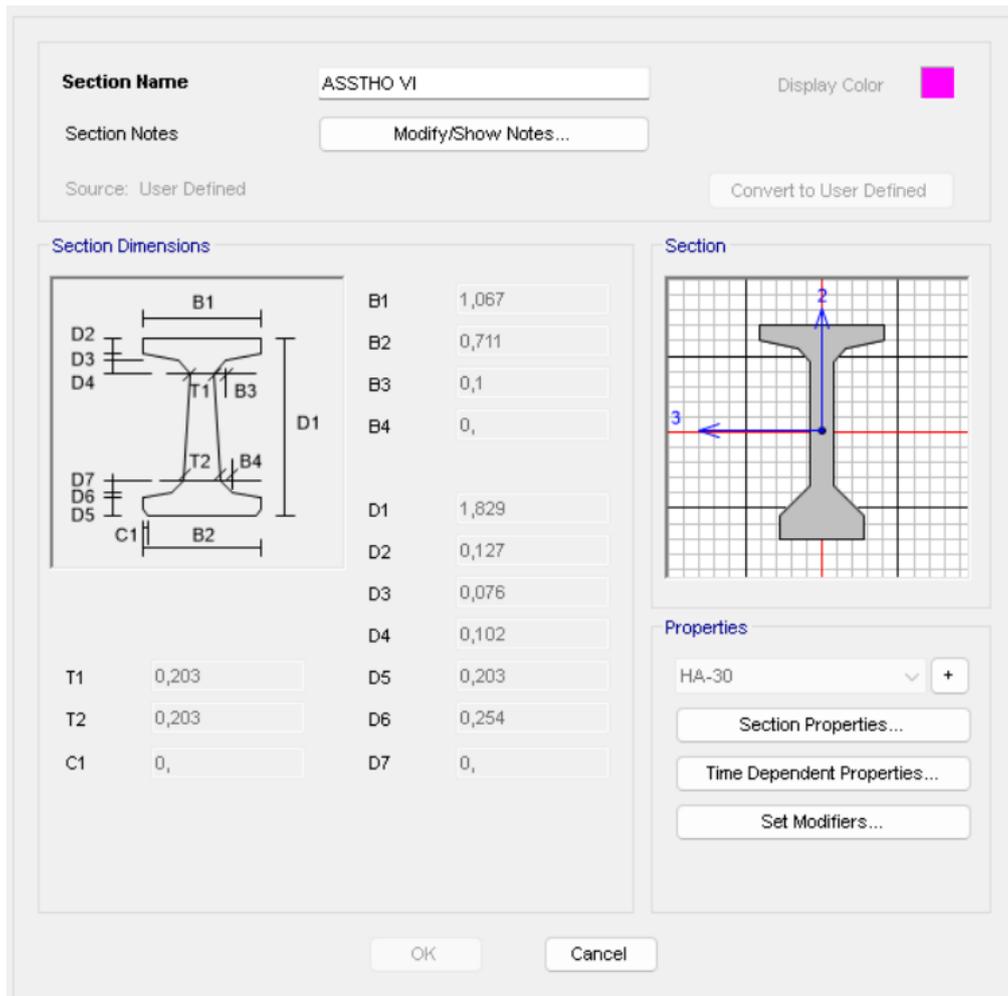
Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

*Figura 36: Propiedades para la armadura activa*

## Definición de secciones

Una vez definidos los materiales, se deben definir las dos secciones que se utilizarán a lo largo del modelo. Tal y como se comentó anteriormente los tendones o cordones se modelizarán de dos maneras y en las imágenes adjuntadas se mostrará el cambio entre ellas.



*Figura 37: Propiedades de la viga AASHTO VI*

**S** Tendon Section Data

**Tendon Section Name** Tendon6904

Section Notes

**Tendon Modeling Options For Analysis Model**

Model Tendon as Loads

Model Tendon as Elements

**Tendon Parameters**

Prestress Type Post Tension

Material Property + Tendon

**Tendon Properties**

Specify Tendon Diameter 0,0505

Specify Tendon Area 2,000E-03

Torsional Constant 6,366E-07

Moment of Inertia 3,183E-07

Shear Area 1,800E-03

**Units** KN, m, C

Display Color 

*Figura 38: Propiedades de la sección de tendón como carga equivalente.*

**Tendon Section Name** Tendon6904

Section Notes Modify/Show...

**Tendon Modeling Options For Analysis Model**

Model Tendon as Loads

Model Tendon as Elements

**Tendon Parameters**

Prestress Type Post Tension

Material Property + Tendon

**Tendon Properties**

Specify Tendon Diameter 0,0505

Specify Tendon Area 2,000E-03

Torsional Constant 6,366E-07

Moment of Inertia 3,183E-07

Shear Area 1,800E-03

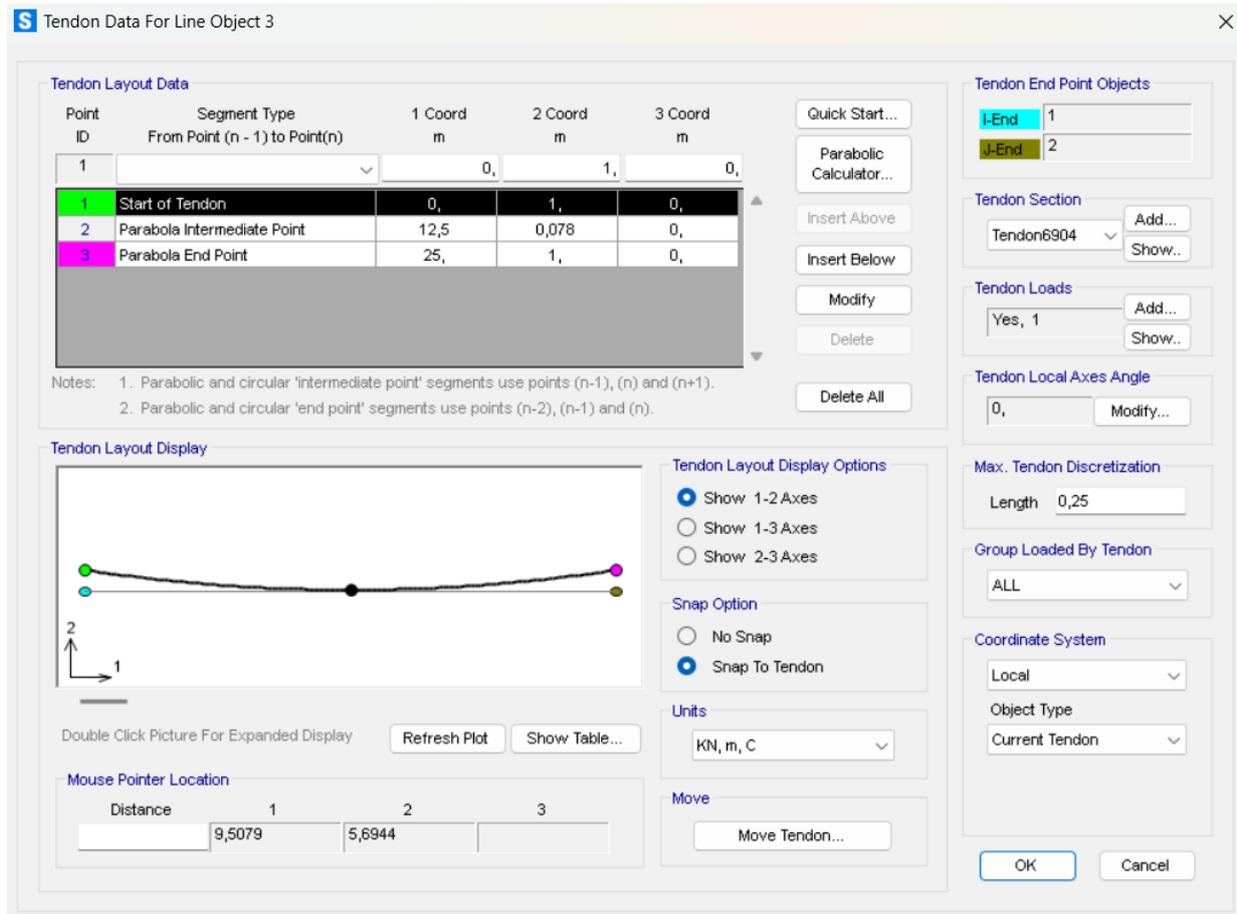
**Units** KN, m, C

Display Color ■

OK Cancel

**Figura 39: Propiedades de la sección de tendón como elemento.**

Una vez definida la sección del cable, se puede modificar muchas propiedades del mismo como ser en este caso de un postesado su parábola en la cual se ha colocado el tendón con las vainas en sus extremos.

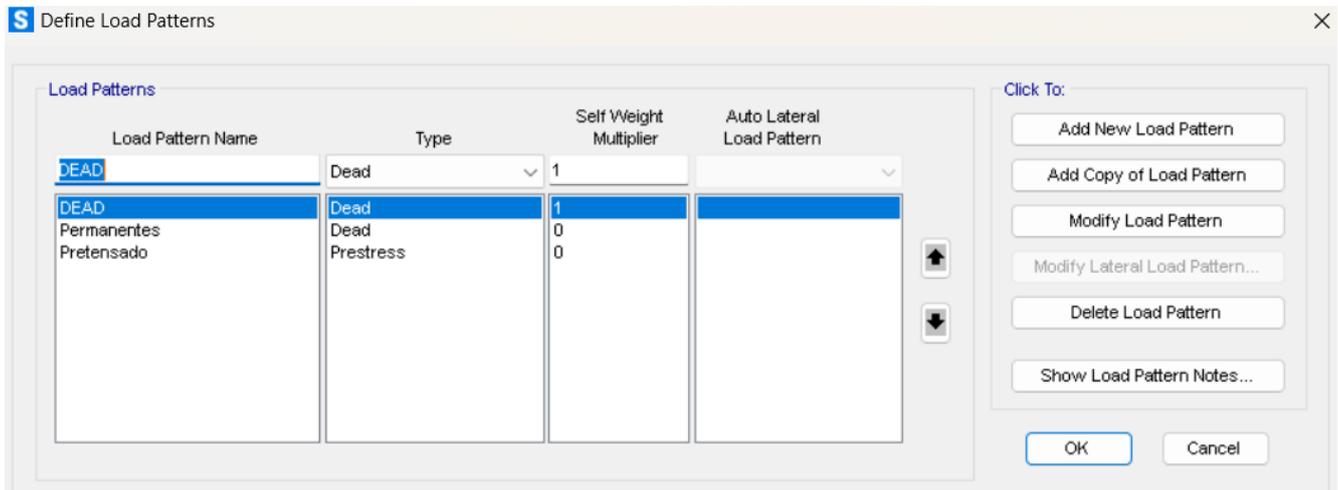


**Figura 40: Definición del cable de tesado en SAP 2000**

Dentro de la misma ventana, podemos seleccionar también las cargas que recibirá dicho tendón. Estas se describirán en el apartado de acciones y combinaciones.

## Definición de Acciones y Combinaciones

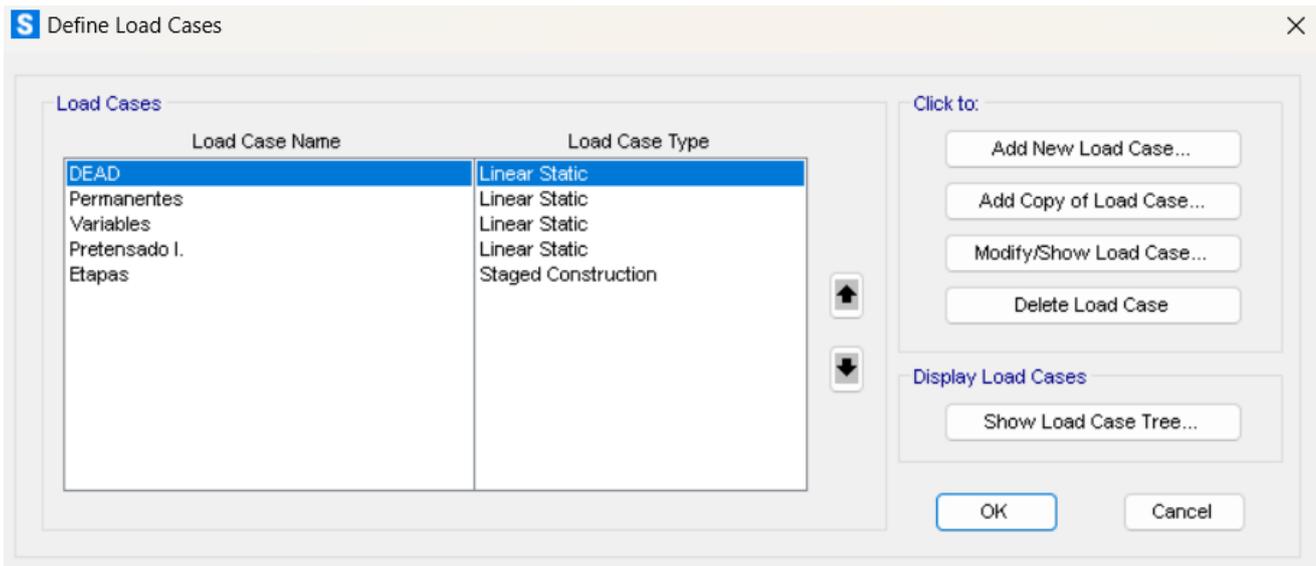
Una vez definidos los materiales y las secciones, se introdujeron los tipos de acciones o cargas en conjunto con sus respectivas combinaciones. Tal y como se muestra a continuación:



**Figura 41: Acciones introducidas en el SAP 2000**

También se definen a continuación la linealidad o no de las cargas y en este caso en particular las etapas que tendrá el postensado al realizarse primero de un extremo a los 28 días después del curado y por otro extremo el día siguiente. Logrando así tesar los tendones desde ambos extremos.

De esta manera, el software generara por sí mismo a través de un análisis con respecto al tiempo, las pérdidas del acero y al mismo estar modelo dentro del hormigón también integrara las perdidas debido a este.



**Figura 42: Definición de los casos de Acciones**

Una vez definidas todas las acciones se procederá a realizar la carga de los elementos con las acciones calculadas anteriormente en el caso de carga de “Etapas”. Es en este dónde se tendrá en cuenta las etapas constructivas, el análisis de carga y el paso del tiempo en los elementos constructivos.

Se definen de esta manera 13 (trece) etapas de control, las cuales se detallan a continuación

1. Etapa 1: Fraguado del hormigón
2. Etapa 2: Tesado del elemento postesado
3. Etapa 3: Transferencia de las cargas permanentes y variables en E.L.S.
4. Etapa 4: Análisis al 1<sup>er</sup> mes.
5. Etapa 5: Análisis al 2<sup>do</sup> mes.
6. Etapa 6: Análisis al 3<sup>er</sup> mes.
7. Etapa 7: Análisis al 4<sup>to</sup> mes.
8. Etapa 8: Análisis al 5<sup>to</sup> mes.
9. Etapa 9: Análisis al 6<sup>to</sup> mes.
10. Etapa 10: Análisis al 1<sup>er</sup> año.
11. Etapa 11: Análisis al 5<sup>to</sup> año.
12. Etapa 12: Análisis al 10<sup>mo</sup> año.
13. Etapa 13: Análisis a los 100 años de vida (vida útil de la estructura).

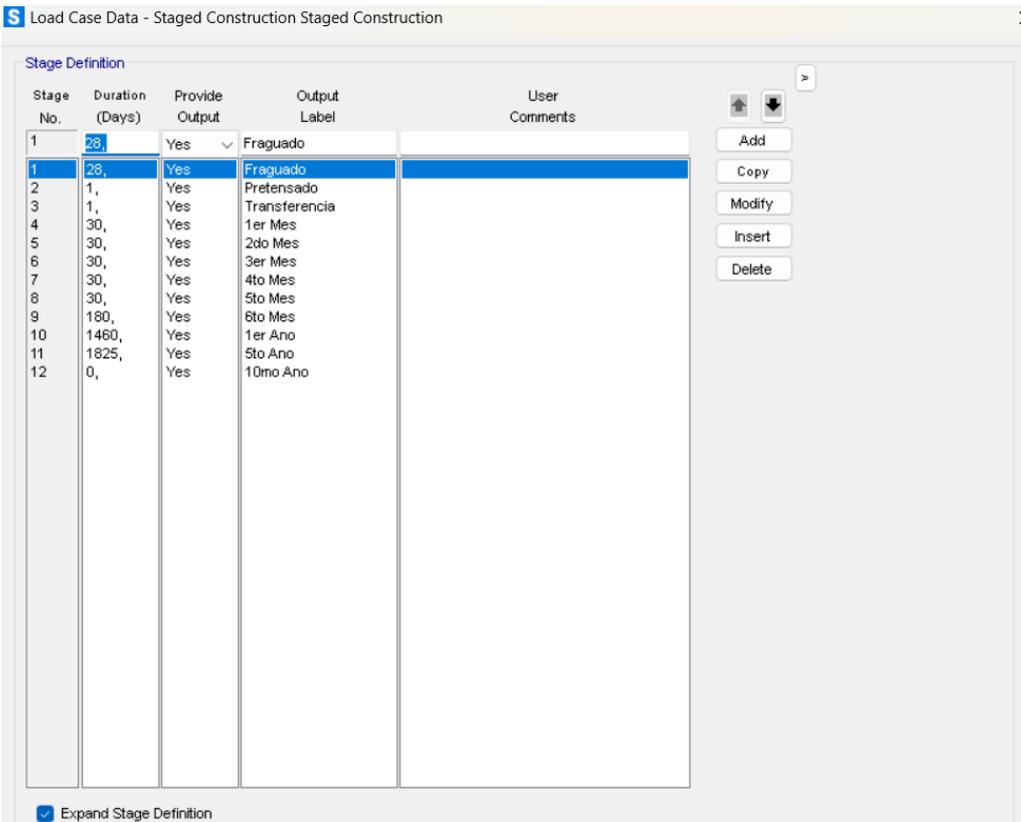
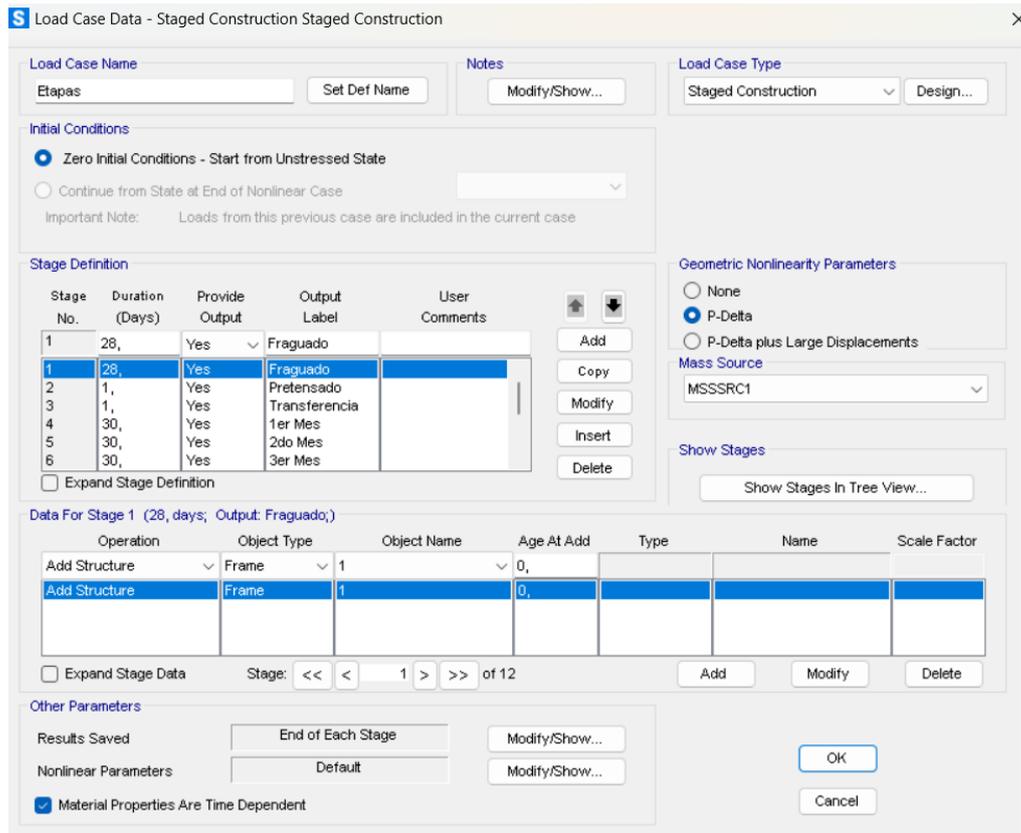


Figura 43: Caso de carga de "etapas" como staged construction

Además, por otro lado, se detallarán en los tendones las acciones de la fuerza de

pretensado inicial y con ella también se colocarán las pérdidas en el modelo que toma en cuenta la fuerza equivalente, mientras que en el modelo de tendón como elemento dichas pérdidas serán calculadas por el programa y se ingresarán como nulas.

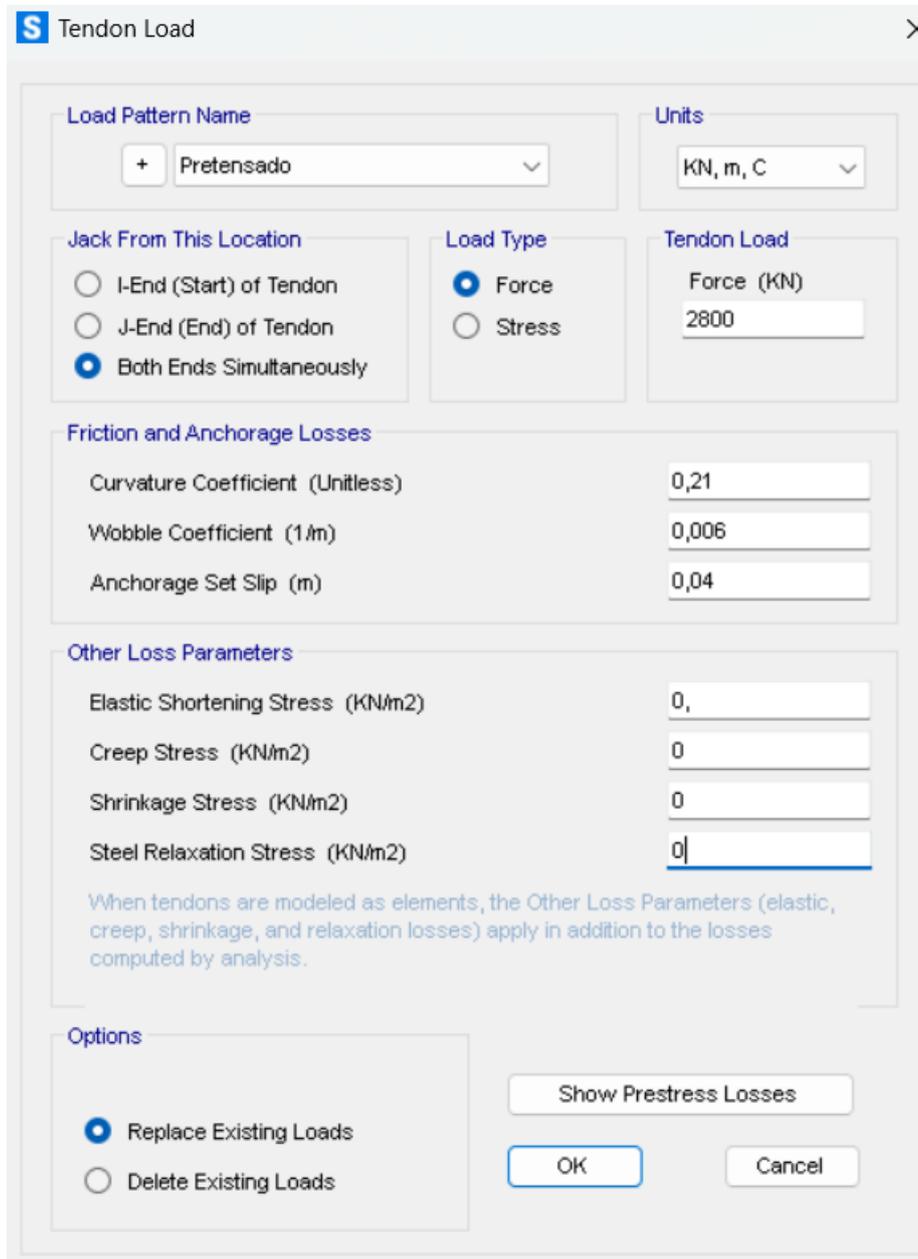
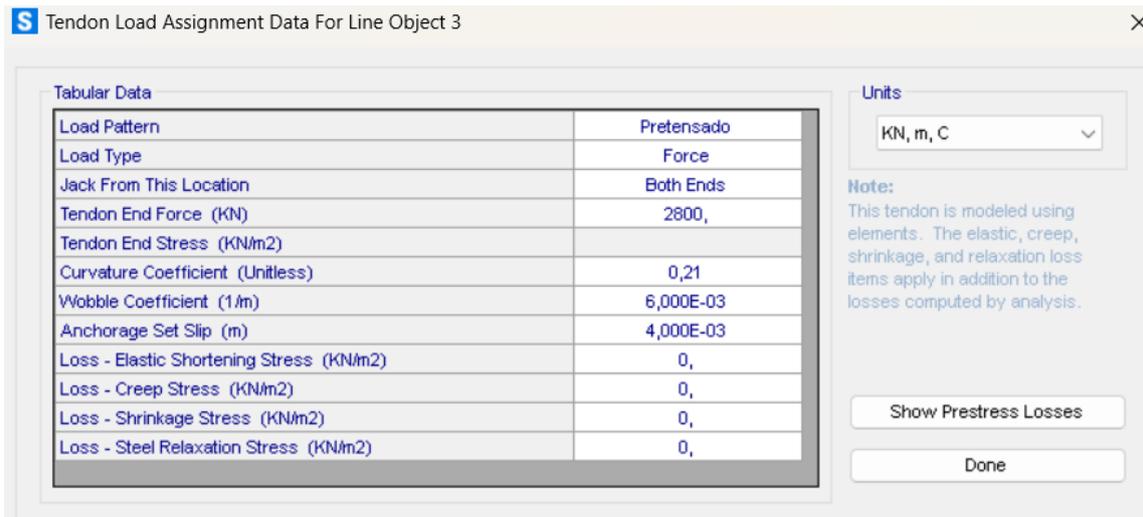


Figura 44: Carga de fuerza de tesado inicial en tendón definido como elemento



**Figura 45: Cargas de tesado inicial y final en el tendón modelado como elemento**

De esta manera, podemos observar que el elemento se tesara desde ambos extremos con la fuerza de tesado definida anteriormente. Una vez definidos estos parámetros debemos correr el programa como se definió anteriormente para que el mismo tenga en cuenta el transcurso del tiempo y de esta manera tener un cálculo de las pérdidas en el pretensado.

De igual manera se realizó la carga del tendón analizado como fuerza equivalente donde se introdujeron los valores de las pérdidas antes mencionadas en kN/m2. A continuación, se adjunta una tabla comparativa con los valores obtenidos en kN divididos por el área de los tendones.

$$\Delta pu [MPa] = \frac{\Delta pu [kN]}{Ap [m^2]} \times 10^{-3}$$

| Perdida (Eng)                   | Perdida (Esp)                | Valor A [kN] | Valor [kN/m2] | Valor C L [kN] | Valor [kN/m2] |
|---------------------------------|------------------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| Elastic deformation of concrete | Deformacion elastica en H    | 10,60        | 5298,9        | 27,10          | 13552,2       |
| Relaxation of stress in steel   | Relajacion de tensiones en A | 115,73       | 57866,6       | 112,61         | 56303,8       |
| Shrinkage of concrete           | Retraccion del hormigon      | 113,61       | 56806,7       | 106,03         | 53017,1       |
| Creep of concrete               | Fluencia de hormigon         | 102,32       | 51157,6       | 14,06          | 7030,7        |
| Friction                        | Friccion                     | 0,00         | 0,0           | 127,82         | 63910,3       |
| Anchorage grip                  | Anclaje                      | 252,26       | 126130,6      | 0,00           | 0,0           |

**Figura 46: Perdidas en kN/m<sup>2</sup>.**

Esto denota que deberán realizarse tres modelos en total en el software de elementos finitos, uno para el tendón como elemento y dos como fuerza equivalente cargando a uno con las pérdidas en el apoyo y otro con las pérdidas en el centro luz.

**Tendon Load**

Load Pattern Name: Pretensado

Units: KN, m, C

Jack From This Location:
 

- I-End (Start) of Tendon
- J-End (End) of Tendon
- Both Ends Simultaneously

Load Type:
 

- Force
- Stress

Tendon Load: Force (KN) 2800

Friction and Anchorage Losses:
 

- Curvature Coefficient (Unitless): 0,21
- Wobble Coefficient (1/m): 0,006
- Anchorage Set Slip (m): 0,004

Other Loss Parameters:
 

- Elastic Shortening Stress (KN/m2): 5298,9
- Creep Stress (KN/m2): 51157,6
- Shrinkage Stress (KN/m2): 56806,7
- Steel Relaxation Stress (KN/m2): 57866,6

When tendons are modeled as elements, the Other Loss Parameters (elastic, creep, shrinkage, and relaxation losses) apply in addition to the losses computed by analysis.

Options:
 

- Replace Existing Loads
- Delete Existing Loads

Show Prestress Losses

OK Cancel

**Figura 47: Acción de fuerza de tesado final en el tendón definido como carga equivalente con pérdidas del apoyo**

**Tendon Load Assignment Data For Line Object 3**

Units: KN, m, C

| Tabular Data                             |            |
|--|------------|
| Load Pattern                             | Pretensado |
| Load Type                                | Force      |
| Jack From This Location                  | Both Ends  |
| Tendon End Force (KN)                    | 2800,      |
| Tendon End Stress (KN/m2)                |            |
| Curvature Coefficient (Unitless)         | 0,21       |
| Wobble Coefficient (1/m)                 | 6,000E-03  |
| Anchorage Set Slip (m)                   | 4,000E-03  |
| Loss - Elastic Shortening Stress (KN/m2) | 5298,9     |
| Loss - Creep Stress (KN/m2)              | 51157,6    |
| Loss - Shrinkage Stress (KN/m2)          | 56806,7    |
| Loss - Steel Relaxation Stress (KN/m2)   | 57866,6    |

Show Prestress Losses

Done

**Figura 48: Cargas de tesado inicial y final en el tendón modelado como fuerza equivalente.**

**S Tendon Load**

Load Pattern Name: + Pretensado

Units: KN, m, C

Jack From This Location:
 

- I-End (Start) of Tendon
- J-End (End) of Tendon
- Both Ends Simultaneously

Load Type:
 

- Force
- Stress

Tendon Load: Force (KN) 2800

Friction and Anchorage Losses:
 

- Curvature Coefficient (Unitless): 0,21
- Wobble Coefficient (1/m): 0,006
- Anchorage Set Slip (m): 0,004

Other Loss Parameters:
 

- Elastic Shortening Stress (KN/m2): 13552,2
- Creep Stress (KN/m2): 7030,7
- Shrinkage Stress (KN/m2): 53017,1
- Steel Relaxation Stress (KN/m2): 56303,8

Options:
 

- Replace Existing Loads
- Delete Existing Loads

Show Prestress Losses

OK Cancel

**Figura 49:** Acción de fuerza de tesado final en el tendón definido como carga equivalente con pérdidas del centro luz.

**S Tendon Load Assignment Data For Line Object 3**

Units: KN, m, C

| Tabular Data                             |            |
|--|------------|
| Load Pattern                             | Pretensado |
| Load Type                                | Force      |
| Jack From This Location                  | Both Ends  |
| Tendon End Force (KN)                    | 2800,      |
| Tendon End Stress (KN/m2)                |            |
| Curvature Coefficient (Unitless)         | 0,21       |
| Wobble Coefficient (1/m)                 | 6,000E-03  |
| Anchorage Set Slip (m)                   | 4,000E-03  |
| Loss - Elastic Shortening Stress (KN/m2) | 13552,2    |
| Loss - Creep Stress (KN/m2)              | 7030,7     |
| Loss - Shrinkage Stress (KN/m2)          | 53017,1    |
| Loss - Steel Relaxation Stress (KN/m2)   | 56303,8    |

Show Prestress Losses

Done

**Figura 50:** Cargas de tesado inicial y final en el tendón modelado como fuerza equivalente con pérdidas del centro luz.

Una vez definidos todos los parámetros anteriormente enunciados debemos correr el programa para poder obtener los resultados buscados.

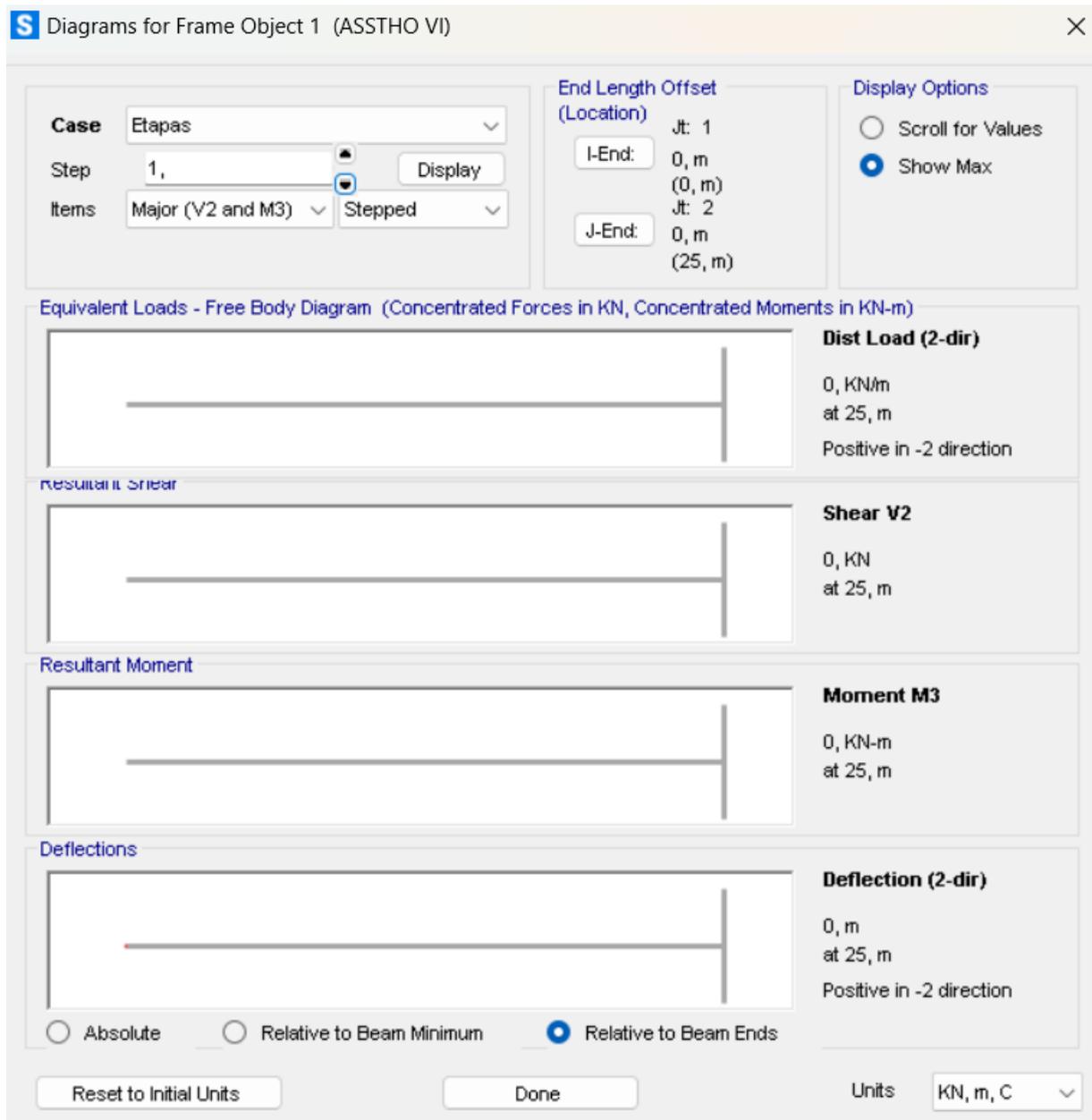
## Resultados

Se llevaron a cabo dos modelos como se describió anteriormente y se obtuvieron dos resultados de pérdidas correspondientemente. Analizaremos los resultados por separado para luego evaluarlos y compararlos con los obtenidos a mano anteriormente.

### Modelo de Fuerzas Equivalentes

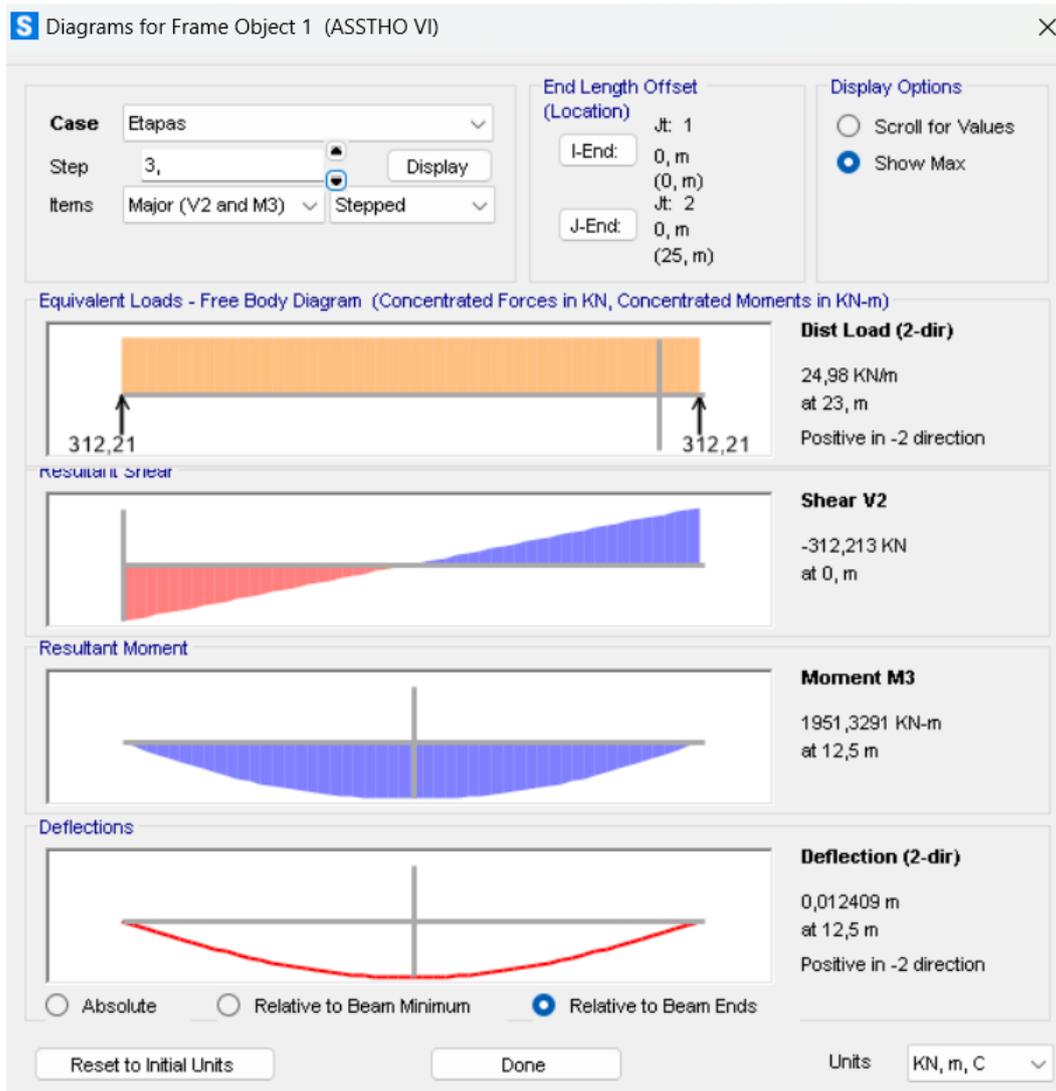
En este modelo se mostraron los efectos del pretensado en como fuerzas equivalentes y eso se reflejó en el acero y no el denominado “frame” como menciona el programa, esto se podrá observar en las figuras adjuntadas a continuación (51 - 54). De esta manera podemos ver el cambio en las etapas constructivas debido a la aplicación de las cargas y las pérdidas obtenidas, pero solamente en el tendón y no podemos realizar un análisis más profundo como si cuando diseñamos las barras como un elemento.

En la primera etapa podemos ver como el elemento no se encuentra cargado ni modificado, ya que como bien hemos definido es una etapa de fragüe.



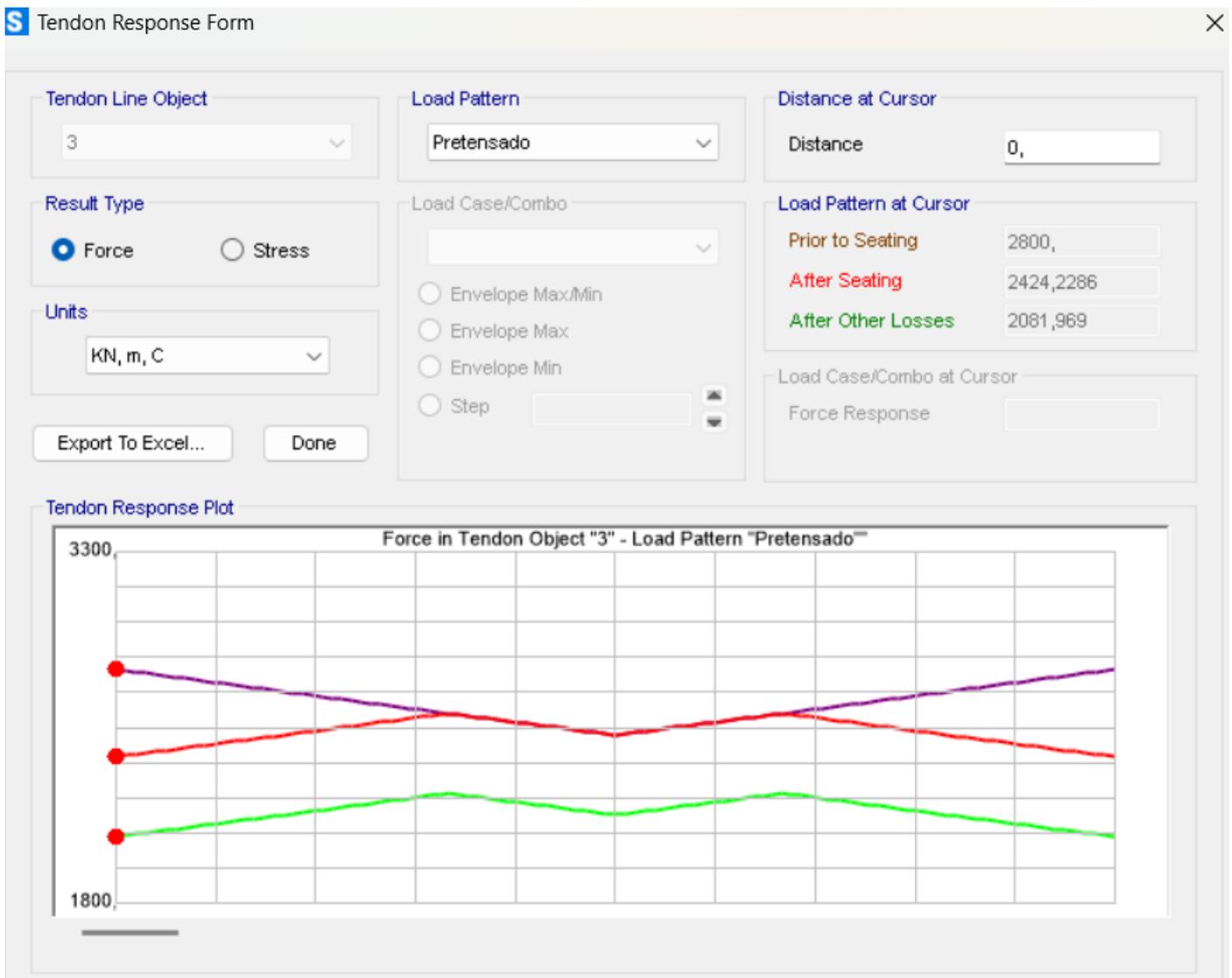
*Figura 51: Diagramas de esfuerzos en el fraguado del hormigón*

En la siguiente etapa, podremos ver como al realizar el pretensado, el hormigón se ve afectado por el mismo tomando un momento y un corte debido a este.



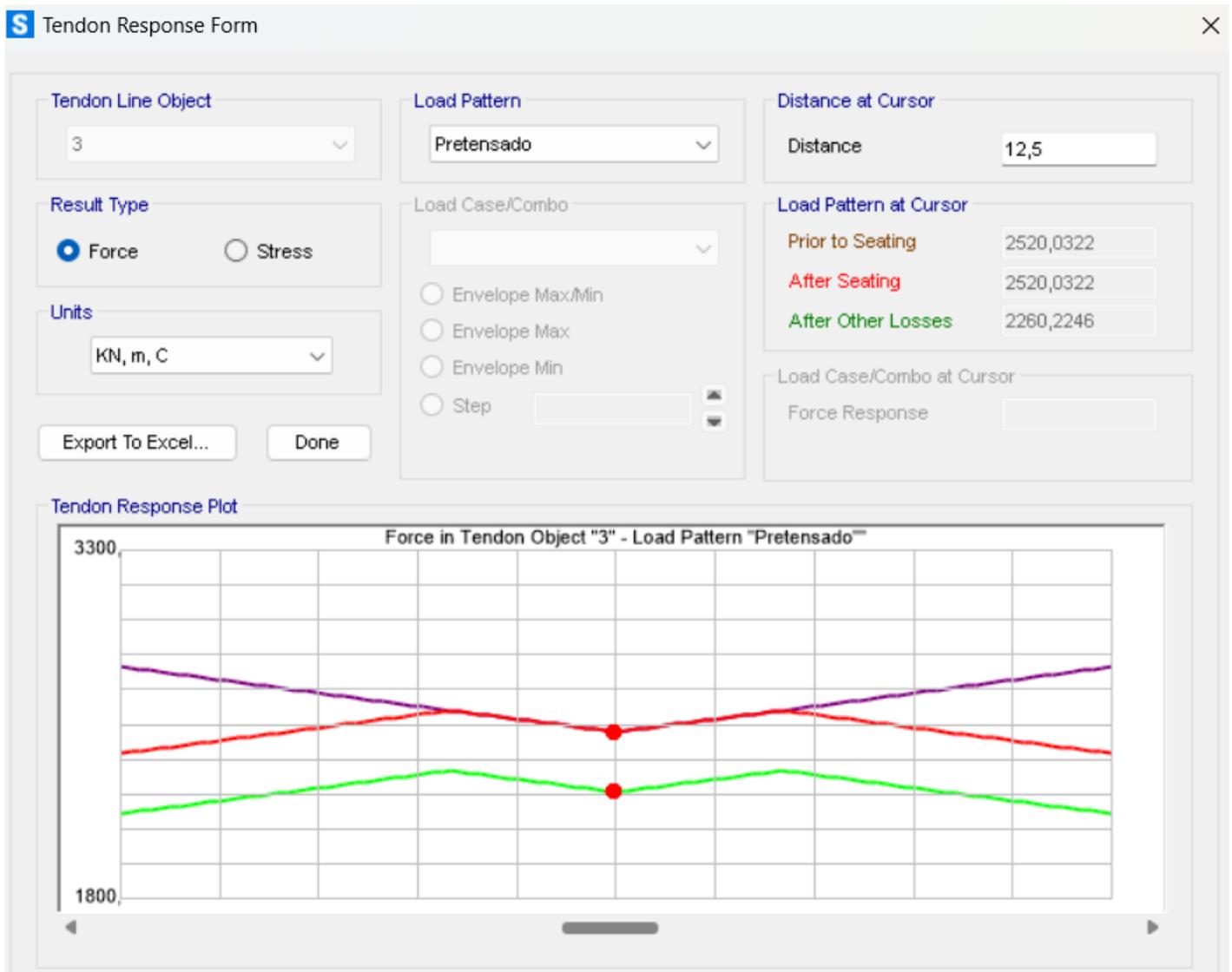
**Figura 52: Momento y corte en el hormigón debido a las acciones del pretensado**

Así podemos ver que la viga y el modelo si sufren cambios debido a la aplicación de las fuerzas equivalentes en el tendón del pretensado. Buscando ahora las perdidas en el apoyo en el programa, figura 52, podemos ver que el tendón se ve cargado con una acción de 2800 kN y que luego de dicha carga, posee un valor de 2424.23 kN. Teniendo por lo tanto unas pérdidas instantáneas de aproximadamente 375.77 kN. A su vez, como bien demuestra la imagen adjunta se podrá ver que la carga en el pretensado disminuye por perdidas diferidas a 2081.97 kN, teniendo una pérdida de 342.26 kN. Lo mismo se realizará en centro luz de la viga.



**Figura 53: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Fuerza Equivalente**

De la misma manera, podemos observar los cambios en centro luz (figura 54) y como las perdidas instantáneas y diferidas se ven reflejadas en el apartado del tendón por fuera de la estructura desarrollándose en el tiempo.



**Figura 54: Pérdidas en el centro luz del pretensado en el modelo como Fuerza**

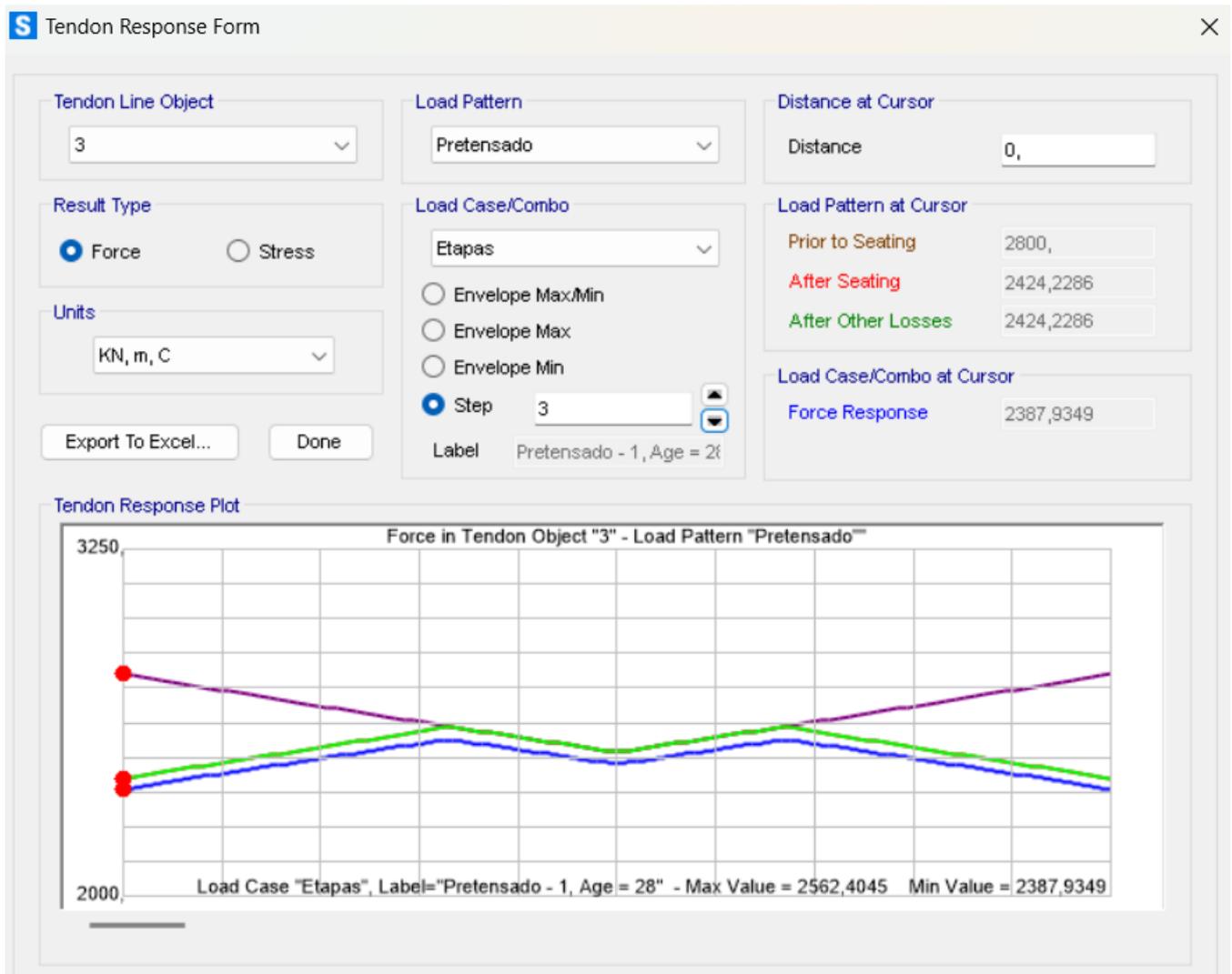
Se puede ver en este caso como en el centro luz, las pérdidas fueron menores que en el apoyo, algo que también se dio en el cálculo manual. Se resumirán los detalles de las pérdidas en una tabla adjunta.

Modelo de Elemento

En este caso, al realizar el modelo de cables como elementos, podremos ser más detallados en cuanto a las pérdidas obtenidas y su variación, en especial de las diferidas con respecto al tiempo.

El proceso no varía en comparación al anterior, una vez que se ejecuta el programa, se obtienen en las diferentes etapas los resultados de las pérdidas instantáneas en el

diagrama desplegable del acero y las diferidas en el diagrama desplegable del hormigón. De tal manera que podemos ver lo siguiente:



**Figura 55: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Elemento etapa 2**

En este caso podemos observar en la etapa 2 de la aplicación de la acción del pretensado como se genera el diagrama adjuntado que muestra la variación de la tensión a lo largo del tendón.

A continuación, se adjuntará, la tensión de la etapa No. 3 (siguiente a la de la figura 56) donde se puede observar un diagrama de pérdidas de carga similar al calculado de manera manual (que se volverá a adjuntar para su comparativa).

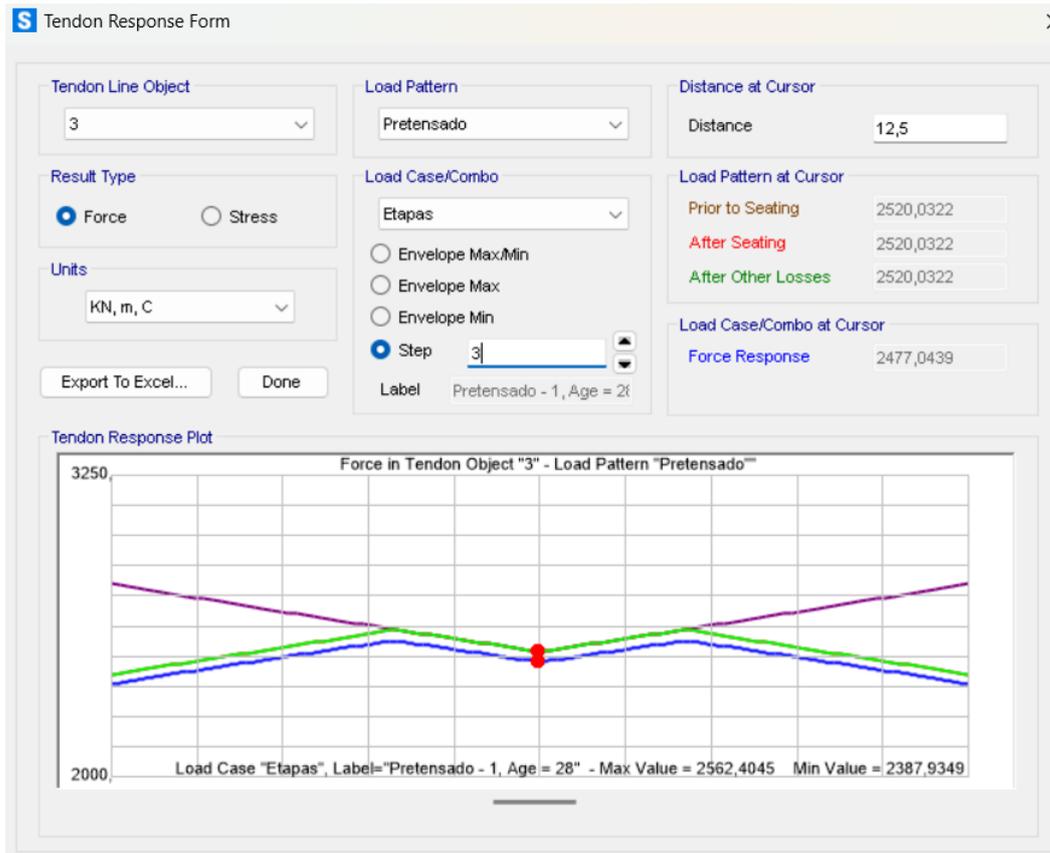


Figura 56: Perdidas en centro luz del pretensado en el modelo como Elemento etapa 2

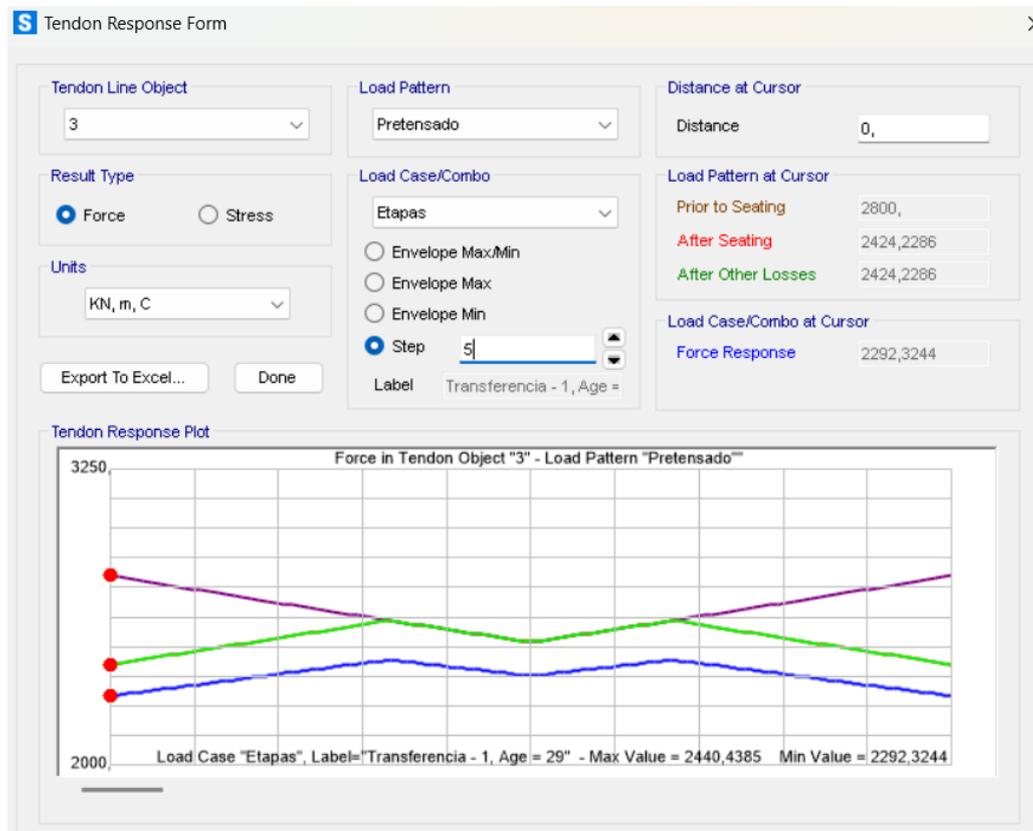
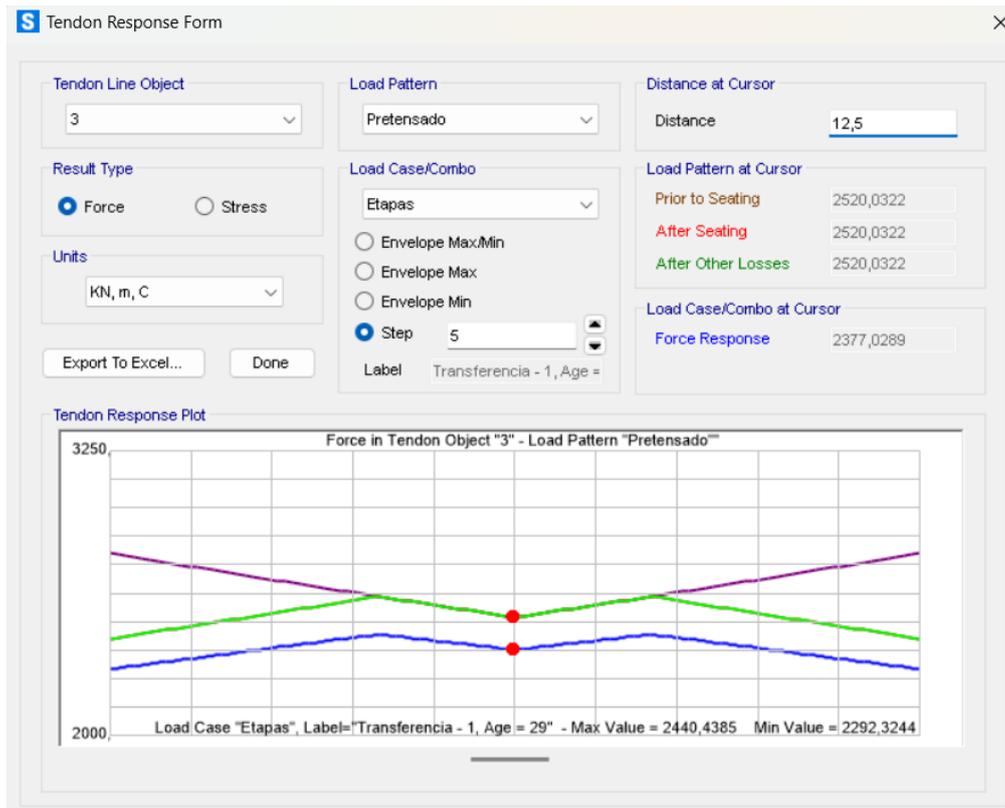
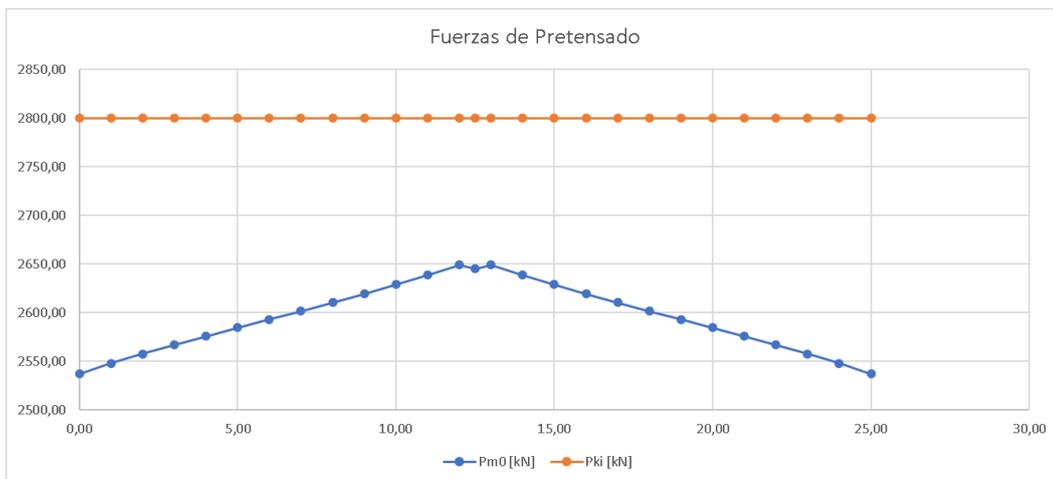


Figura 57: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Elemento etapa 3.



**Figura 58: Perdidas en centro luz del pretensado en el modelo como Elemento etapa 5**



**Figura 59: Perdidas instantáneas del pretensado.**

Es así entonces como podemos ver en la figura 58, que las perdidas instantáneas en el apoyo son del valor que surge al resto la fuerza de pretensado (2800 kN) con la fuerza de respuesta del tendón (2424.23 kN) es decir, se trata de un total de 375.77 kN.

De la misma manera se prosigue a realizar o verificar las perdidas diferidas en la viga a lo largo de las etapas, esto se puede realizar mediante la misma pestaña variando las etapas antes definidas. Al ser considerado el tendón como un elemento, la viga muestra

diferencia en su comportamiento al ser cargado el tendón y al ser cargada la viga con E.L.S. y mediante esta diferencia podemos obtener las perdidas diferidas.

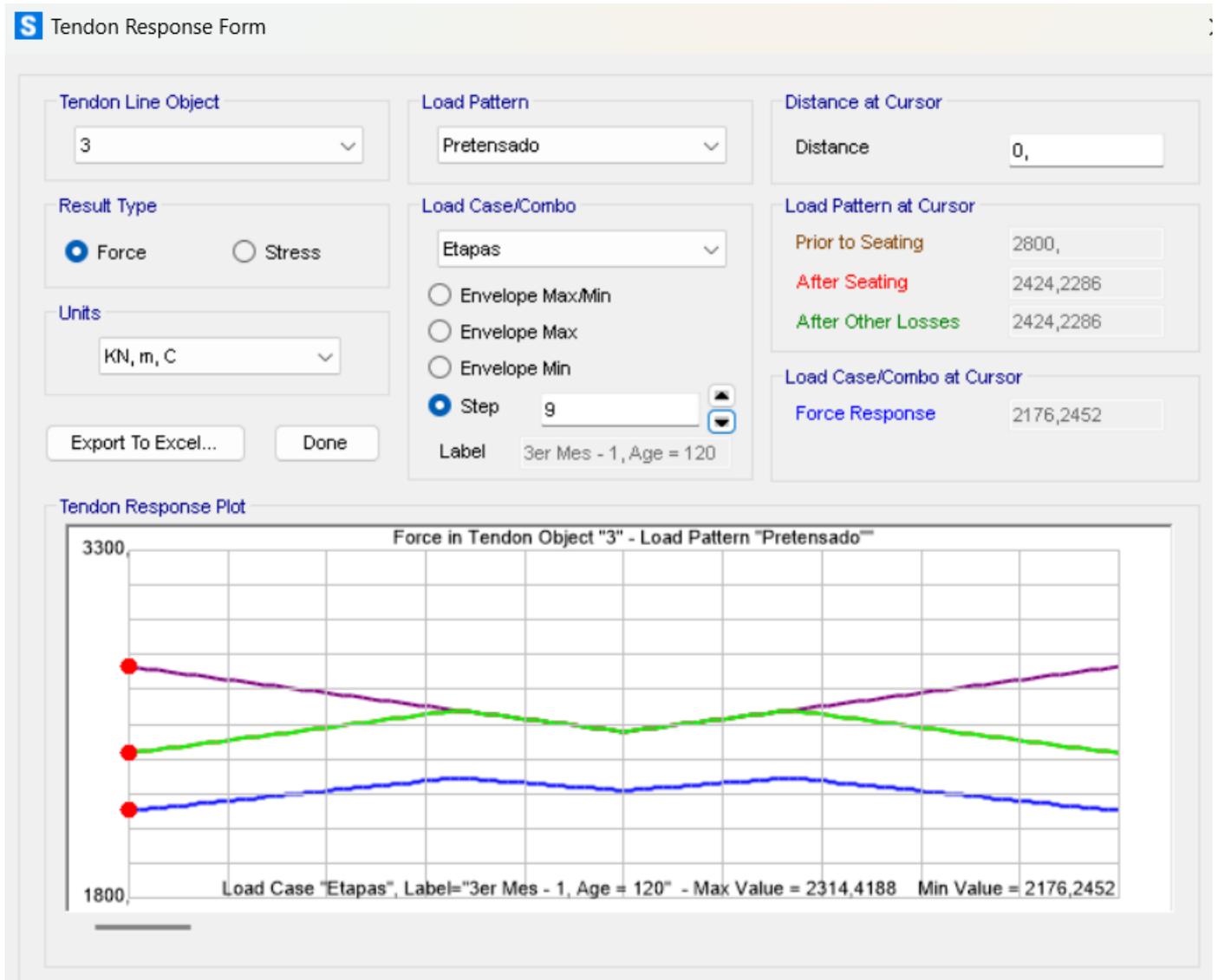
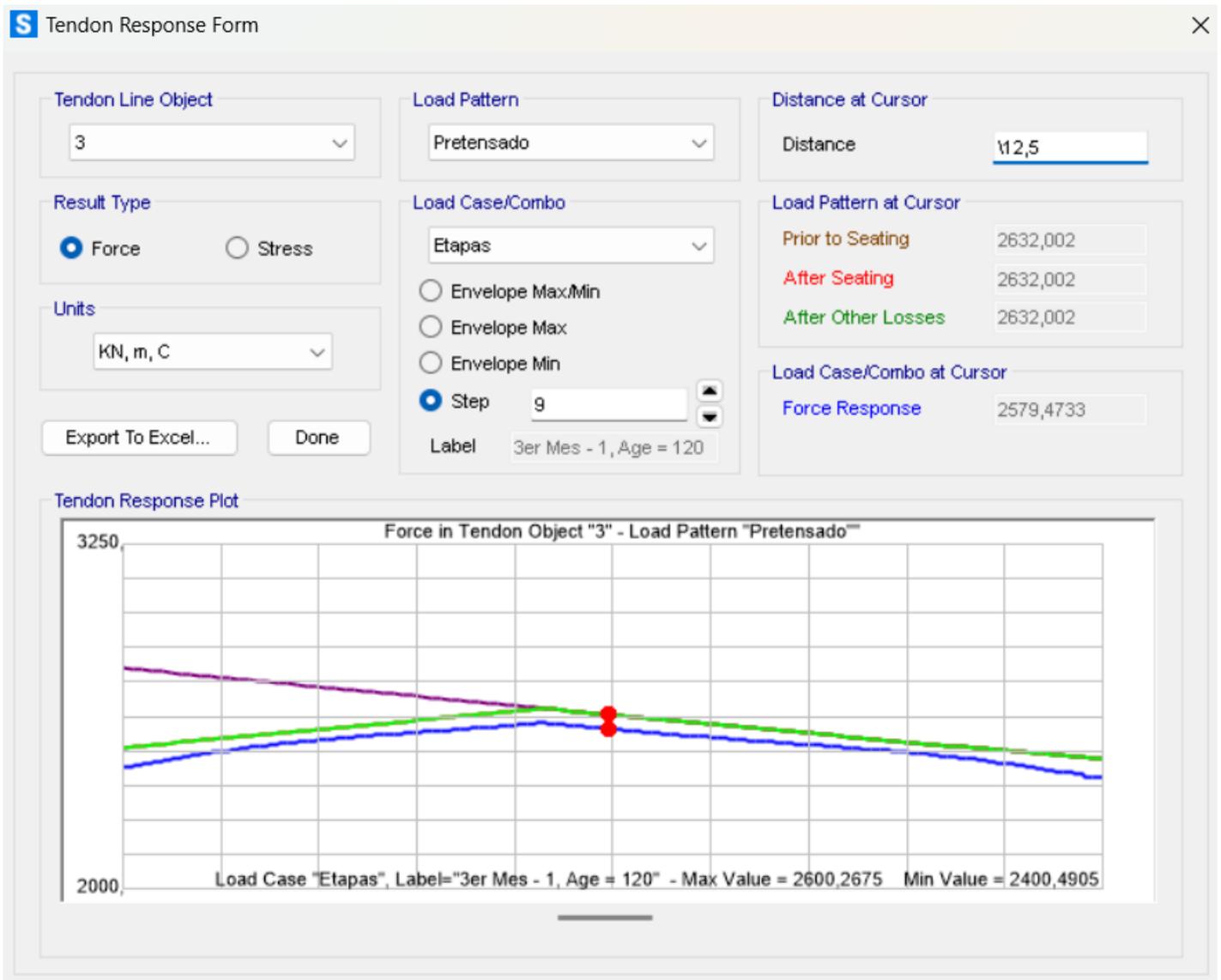


Figura 60: Perdidas en el apoyo del pretensado en el modelo como Elemento etapa 5.



**Figura 61: Perdidas en centro luz del pretensado en el modelo como Elemento etapa 5**

Tal y como se ven en las imágenes, la tensión en el pretensado no sufre modificaciones debido al transcurso del tiempo; las perdidas diferidas deberían verse en aumento en las diferentes etapas. Con esta información y la obtenida a lo largo de las definidas etapas, podemos entonces avanzar al siguiente capítulo.

## 9. RESULTADOS

Tal y como se describió a lo largo del trabajo, existen diferencias entre ambas normativas que conllevan a pequeñas variaciones de resultados en los cálculos de las pérdidas. Dichas diferencias se pueden ver reflejadas de una forma más clara en la siguiente figura.

|            | Pérdidas en apoyo [kN]      |          |              |            |          |            |
|------------|-----------------------------|----------|--------------|------------|----------|------------|
|            | Instantáneas                |          |              | Diferidas  |          |            |
|            | Acuñamiento                 | Fricción | Acortamiento | Retracción | Fluencia | Relajación |
| CIRSOC 201 | 208,40                      | 286,54   | 259,18       | 264,54     | 177,12   | 229,11     |
| Eurocodigo | 252,26                      | 0,00     | 10,60        | 113,61     | 102,32   | 115,73     |
|            | Pérdidas en centro luz [kN] |          |              |            |          |            |
|            | Instantáneas                |          |              | Diferidas  |          |            |
|            | Acuñamiento                 | Fricción | Acortamiento | Retracción | Fluencia | Relajación |
| CIRSOC 201 | 208,40                      | 286,54   | 259,18       | 264,54     | 177,12   | 229,11     |
| Eurocodigo | 0,00                        | 127,82   | 27,10        | 106,03     | 14,06    | 112,61     |

**Tabla 13: Resultados finales de las pérdidas bajo Normativas**

De igual manera, podemos observar las diferencias con el cálculo mediante el software nombrado reiteradas veces a continuación, logrando un cuadro de doble entrada con cuatro diferentes maneras de calcularlas y con diferentes valores a su vez.

|                            | Pérdidas en apoyo [kN]      |          |              |            |          |            |
|----------------------------|-----------------------------|----------|--------------|------------|----------|------------|
|                            | Instantáneas                |          |              | Diferidas  |          |            |
|                            | Acuñamiento                 | Fricción | Acortamiento | Retracción | Fluencia | Relajación |
| CIRSOC 201                 | 208,40                      | 286,54   | 259,18       | 264,54     | 177,12   | 229,11     |
| Eurocodigo                 | 252,26                      | 0,00     | 10,60        | 113,61     | 102,32   | 115,73     |
| SAP 2000 - Modelo F.E.     | 375,77                      |          |              | 342,26     |          |            |
| SAP 2000 - Modelo Elemento | 375,77                      |          |              | 359,33     |          |            |
|                            | Pérdidas en centro luz [kN] |          |              |            |          |            |
|                            | Instantáneas                |          |              | Diferidas  |          |            |
|                            | Acuñamiento                 | Fricción | Acortamiento | Retracción | Fluencia | Relajación |
| CIRSOC 201                 | 208,40                      | 286,54   | 259,18       | 264,54     | 177,12   | 229,11     |
| Eurocodigo                 | 0,00                        | 127,82   | 27,10        | 106,03     | 14,06    | 112,61     |
| SAP 2000 - Modelo F.E.     | 279,97                      |          |              | 259,81     |          |            |
| SAP 2000 - Modelo Elemento | 279,97                      |          |              | 358,77     |          |            |

|                            | Perdidas Apoyo |           |
|----------------------------|----------------|-----------|
|                            | Instantáneas   | Diferidas |
|                            | Total          | Total     |
| CIRSOC 201                 | 545,72         | 670,77    |
| Eurocodigo                 | 262,86         | 331,66    |
| SAP 2000 - Modelo F.E.     | 375,77         | 342,26    |
| SAP 2000 - Modelo Elemento | 375,77         | 359,33    |

|                            | Perdidas Centro luz |           |
|----------------------------|---------------------|-----------|
|                            | Instantáneas        | Diferidas |
|                            | Total               | Total     |
| CIRSOC 201                 | 545,72              | 670,77    |
| Eurocodigo                 | 154,92              | 232,70    |
| SAP 2000 - Modelo F.E.     | 279,97              | 259,81    |
| SAP 2000 - Modelo Elemento | 279,97              | 358,77    |

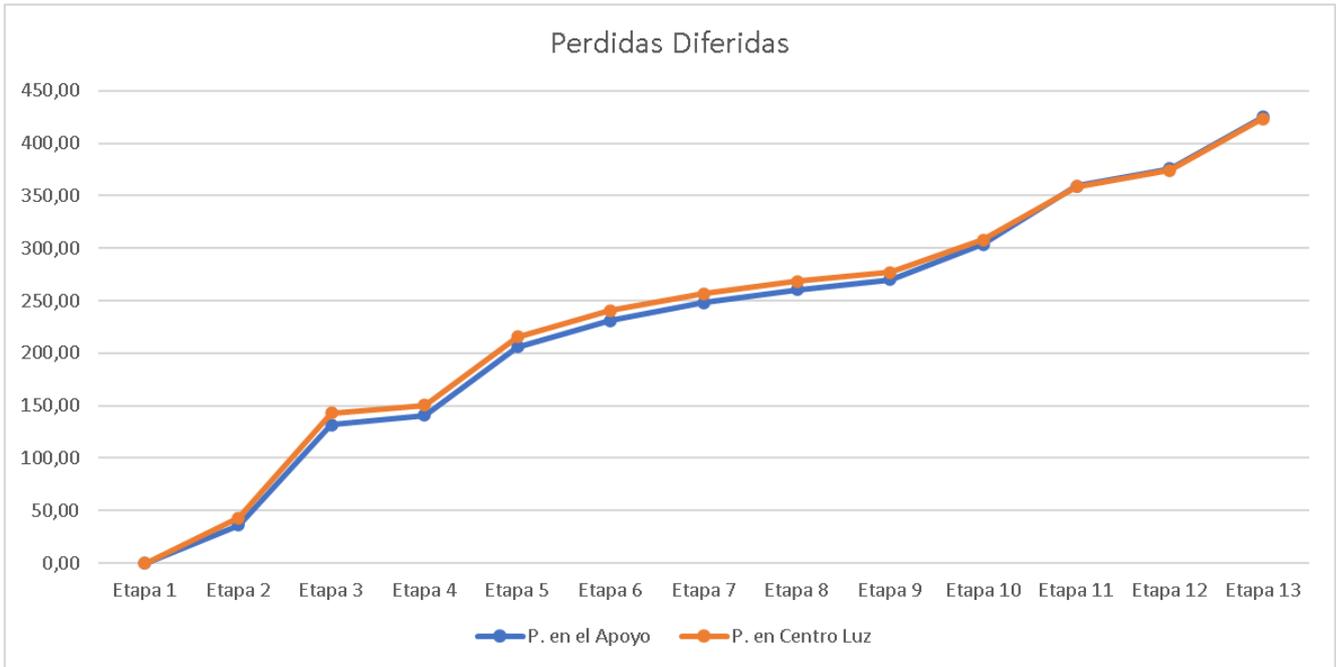
**Tabla 14: Resultados finales de las perdidas bajo Normativas y SAP 2000**

Por otro lado, se pudo observar la variación en las perdidas diferidas en el sistema a lo largo del tiempo tal y como se buscó. Esto se detallará en la tabla a continuación (tabla 15) donde se denotan el aumento de las pérdidas a lo largo del tiempo en las etapas que anteriormente definimos.

| Modelo Elemento |               | Tiempo (días) | Perdidas Diferidas (kN) |            |
|-----------------|---------------|---------------|-------------------------|------------|
|                 |               |               | Apoyo                   | Centro Luz |
| Etapa 1         | Fraguado      | 0             | 0,00                    | 0,00       |
| Etapa 2         | Pretensado    | 28            | 36,29                   | 42,99      |
| Etapa 3         | Transferencia | 29            | 131,91                  | 143,00     |
| Etapa 4         | 1er Mes       | 30            | 140,84                  | 150,20     |
| Etapa 5         | 2do Mes       | 60            | 205,72                  | 215,77     |
| Etapa 6         | 3er Mes       | 90            | 231,11                  | 240,51     |
| Etapa 7         | 4to Mes       | 120           | 247,98                  | 256,56     |
| Etapa 8         | 5to Mes       | 150           | 260,47                  | 268,24     |
| Etapa 9         | 6to Mes       | 180           | 270,26                  | 277,29     |
| Etapa 10        | 1 Año         | 365           | 303,95                  | 308,23     |
| Etapa 11        | 5 Años        | 1825          | 359,33                  | 358,77     |
| Etapa 12        | 10 Años       | 3650          | 375,85                  | 374,36     |
| Etapa 13        | 100 Años      | 36500         | 425,09                  | 423,42     |

**Tabla 15: Resultados de perdidas diferidas en Apoyo y Centro Luz**

Como bien lo dice la tabla 15, en el periodo de vida útil se tendrán 446,1 kN de perdidas diferidas en el apoyo y 327,62 kN en el centro luz. Esto demuestra el avance y aumento de los coeficientes de fluencia, módulo de retracción y deformación, que dependen del tiempo. Se puede ver a continuación, la figura de dicha tabla que denota de manera grafica como las perdidas diferidas son proporcionales al avance del tiempo en la estructura.



**Figura 62: Perdidas diferidas a lo largo del tiempo en la estructura.**

Podemos ver que ambas curvas presentan valores muy similares debido a que, si bien las tensiones en los cables van variando y tienen valores diferenciables entre el apoyo y centro luz, el paso del tiempo actúa de la misma manera para ambas, logrando una curva casi idéntica.

## 10. CONCLUSIONES

Como pudimos ver a lo largo del trabajo y era de esperarse, el cálculo de las pérdidas diferidas e instantáneas es diferente según la normativa que se tiene en cuenta. Dentro de las diferencias que se pueden resaltar, se debe nombrar la sencillez de la normativa argentina a la hora de realizar el cálculo mediante fórmulas con valores constantes de tablas. Esto se ve reflejado en un considerable aumento en los valores de pérdidas obtenidos mediante el CIRSOC 201 comparado con el Eurocódigo,

Por otro lado, es destacable que dentro de la norma europea se tienen en cuenta un mayor número de variables a lo largo de las pérdidas diferidas que ayudan a tener una mayor exactitud en el diseño. Esto ayuda a la previsibilidad de pérdidas disminuyendo potenciales sobredimensionamientos de tanto armaduras activas como secciones brutas del hormigón, logrando de esta manera secciones con un mejor porcentaje de uso que el reglamento argentino.

Incorporando al programa SAP 2000 dentro de las conclusiones podemos observar que las diferencias relativas entre los diferentes métodos se pueden agrupar en un cuadro comparativo de doble entrada. Donde podemos comparar tanto en fila como en columna las 4 formas en las cuales se llevaron los cálculos de pérdidas a lo largo de este trabajo.

| Perdidas Inst. en Apoyo    | CIRSOC 201 | Eurocodigo | Modelo F.E. | Modelo E. |
|----------------------------|------------|------------|-------------|-----------|
| CIRSOC 201                 | 0,0%       | 51,8%      | 31,1%       | 31,1%     |
| Eurocodigo                 | 107,6%     | 0,0%       | 43,0%       | 43,0%     |
| SAP 2000 - Modelo F.E.     | 45,2%      | 30,0%      | 0,0%        | 0,0%      |
| SAP 2000 - Modelo Elemento | 45,2%      | 30,0%      | 0,0%        | 0,0%      |
| Perdidas Dif. En Apoyo     | CIRSOC 201 | Eurocodigo | Modelo F.E. | Modelo E. |
| CIRSOC 201                 | 0,0%       | 50,6%      | 49,0%       | 46,4%     |
| Eurocodigo                 | 102,2%     | 0,0%       | 3,2%        | 8,3%      |
| SAP 2000 - Modelo F.E.     | 96,0%      | 3,1%       | 0,0%        | 5,0%      |
| SAP 2000 - Modelo Elemento | 86,7%      | 7,7%       | 4,8%        | 0,0%      |

**Tabla 16: Tablas comparativa de pérdidas instantáneas**

| Perdidas Inst. en Centro luz | CIRSOC 201 | Eurocodigo | Modelo F.E. | Modelo E. |
|------------------------------|------------|------------|-------------|-----------|
| CIRSOC 201                   | 0,0%       | 111,6%     | 64,4%       | 64,4%     |
| Eurocodigo                   | 111,6%     | 0,0%       | 57,5%       | 57,5%     |
| SAP 2000 - Modelo F.E.       | 64,4%      | 57,5%      | 0,0%        | 0,0%      |
| SAP 2000 - Modelo Elemento   | 64,4%      | 57,5%      | 0,0%        | 0,0%      |

| Perdidas Dif. En Centro Luz | CIRSOC 201 | Eurocodigo | Modelo F.E. | Modelo E. |
|-----------------------------|------------|------------|-------------|-----------|
| CIRSOC 201                  | 0,0%       | 97,0%      | 88,3%       | 60,6%     |
| Eurocodigo                  | 97,0%      | 0,0%       | 11,0%       | 42,6%     |
| SAP 2000 - Modelo F.E.      | 88,3%      | 11,0%      | 0,0%        | 32,0%     |
| SAP 2000 - Modelo Elemento  | 60,6%      | 42,6%      | 32,0%       | 0,0%      |

**Tabla 17: Tablas comparativa de perdidas diferidas**

Debido al uso de la tabla 16 y 17, es sencillo realizar la comparación de los resultados del análisis entre las normativas y lo obtenido en el software. Podremos enumerar a continuación las principales conclusiones:

- Existen grandes diferencias entre cálculos aproximados por el CIRSOC 201 y los valores obtenidos por el programa SAP 2000, ya sea en perdidas diferidas o instantáneas, en apoyo o centro luz, llegando a valores de un 88,3% de diferencia.
- En las perdidas en el apoyo (tabla 16),
  - Las perdidas instantáneas son muy exactas entre ambos métodos de cálculo por SAP 2000, logrando que la diferencia en porcentaje entre ellas sea de 0%. Mientras que en las perdidas diferidas la diferencia entre los métodos de cálculo de SAP 2000 llega al 5,0%.
  - El cálculo por Eurocódigo se ve que difiere un 43% de los modelos por SAP 2000 en perdidas instantáneas, mientras que en diferidas llega a un 3,2%.
- En las perdidas en centro luz,
  - Se repite la exactitud por parte de las perdidas instantáneas en los modelos de SAP 2000, aunque aumenta considerablemente (6 veces) un 32% la diferencia en las perdidas diferidas.
  - El Eurocódigo se aleja más de los valores de SAP2000, llegando a tener variaciones de 57,5% en instantáneas y un 42,6% en diferidas.

Esto nos lleva a concluir que las diferencias entre los modelos de SAP 2000 son menores y que por lo tanto se podría resguardar o confiar el cálculo de las perdidas en dicho

programa de cálculo. Cabe destacar que en el modelo de Fuerzas Equivalente se incluyeron los valores calculados manualmente del Eurocódigo de:

1. Deformación elástica del Hormigón
2. Fluencia del Hormigón
3. Retracción del Hormigón
4. Relajación de los aceros

Por lo que las diferencias encontradas se pueden deber a variaciones de pérdidas debidas a la ejecución del programa que al comparar ambos métodos nos devuelve un resultado similar. Esto conlleva a que el cálculo de pérdidas mediante el Eurocódigo no estaría tan distanciado como muestran las tablas al realizar un análisis.

Por otro lado, podemos concluir que las pérdidas diferidas se incrementan en el tiempo sin importar la ubicación del análisis a lo largo del elemento estructural. Además, que existe una linealidad o proporcionalidad entre las nombradas pérdidas diferidas y el tiempo, como también una relación con la humedad relativa en el ambiente.

Esto conlleva a que, durante el diseño, se pueda tener en cuenta la variación de la humedad relativa y como afecta la misma a la estructura, más teniendo en cuenta el cambio climático en las diferentes zonas del planeta. A su vez, podría tenerse en cuenta los puntos críticos a largo del tiempo, en los que las pérdidas diferidas conlleven a fallas en la estructura que puedan prevenirse con un mejor mantenimiento en el tiempo o en determinados momentos de la vida útil de la estructura.

## 11. Bibliografía

1. Apuntes de Catedra. (2021). *Analisis de estructuras de hormigon mediante elementos finitos*. Valencia.
2. Apuntes de Catedra. (2021). *Estructuras de hormigon pretensado*. Valencia.
3. CIRSOC 201. (2005). *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigon*. Buenos Aires: INTI.
4. CIRSOC 801. (2005). *Reglamento Argentino para el Diseño de Puentes Carreteros*. Buenos Aires: INTI.
5. CSI. (2022). *Manual SAP 2000 v23 "Integrated Software for Structural Analysis & Design"*.
6. UNE. (2020). *Eurocodigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigon*. Madrid: AENOR.