



4.- Simulació Numèrica de la Ruptura d'un Tirant.

4.1. Introducció

El pont objecte d'estudi en aquesta tesina està inspirat pel que fa a la tipologia d'atirament en un pont existent.

El que s'ha fet ha estat canviar-ne les característiques seccionals adaptant-les a dues seccions diferents de cara a obtenir uns resultats que posteriorment compararem entre ells amb l'objectiu de:

1. Intentar treure'n algunes conclusions sobre la seguretat,
2. Veure si és possible establir una relació clara entre l'elecció d'una tipologia de tauler i sistema d'atirament respecte la seguretat en la resposta del pont vers una ocasional ruptura d'un tirant.

Amb aquest objectiu s'han escollit dos tauler diametralment oposats pel que fa a la resposta que donen, com són:

1. Llosa Nervada : es tracta d'un tauler format per dos nervis longitudinals clarament diferenciats units entre sí per mitjà d'una llosa de poc espessor, que confereixen una clara flexibilitat al tauler. Aquesta flexibilitat la quantifiquem al obtenir una esveltesa $h/L=1/115$.
2. Calaix: en aquest cas tenim una secció tancada en calaix que respon a la clàssica idea de secció tancada d'elevada rigidesa. En aquest cas particular la secció presenta una esveltesa $h/L=1/45$.

Aquesta tria de casos es pot justificar en què el comportament d'una secció flexible, com és la llosa nervada, es basa en una major transmissió dels esforços cap als tirants mentre que la flexió del tauler és més reduïda. En canvi aquest mecanisme és invers en el cas d'una secció rígida, com és la secció calaix, on la flexió del tauler és prioritària a la càrrega dels tirants a l'hora de transferir els esforços als elements en contacte amb el terreny.

Amb aquest raonament es pot intuir que la resposta en el moment que es produeixi el trencament d'un tirant serà clarament diferent entre un tipus de secció i l'altre. Aquesta resposta és el que analitzarem en aquesta tesina.

Un factor que pot jugar un paper important en els resultats és quin dels tirants es trenca, ja que el comportament d'aquests elements és diferent dins els mateix tipus de pont, només pel simple fet d'estar situat prop de la torre o estar situat en una posició més llunyana. Com que les característiques mecàniques d'aquests elements són molt sensibles a la longitud que tenen, un tirant de longitud reduïda (com és el cas dels pròxims a la torre) serà molt més rígid que un altre amb una longitud més gran. Aquest comportament és degut a la no-linialitat geomètrica intrínseca dels tirants.



Tot i així en el nostre cas, i degut a les relativament reduïdes dimensions dins l'àmbit d'aquest tipus de ponts, suposarem un comportament lineal de l'estructura a l'hora de modelitzar-la.

Aquesta major o menor rigidesa dels tirants es tradueix de forma directa en una major o menor eficàcia del propi tirant ja que si es tracta d'un tirant molt llarg i per tant molt flexible, la seva deformació serà major sota el mateix estat de càrrega i per tant el moviment vertical del tauler serà major i això és justament un dels aspectes importants que sempre s'han de vigilar pel bon funcionament estructural d'aquest tipus de ponts.

Pel que fa a la disposició dels tirants de retenció es troben ancorats a través d'un contrapès directament sobre el terreny, cosa que els proporciona una gran rigidesa i per tant una major eficàcia.

4.2. Descripció geomètrica del model.

La longitud del vanyol principal és de 185 metres de llum mentre que les dels vanyol d'accés són respectivament 45, 50 i 45 metres. Així doncs ens queda una configuració longitudinal del pont de 45+50+185+50 tenint una longitud total de 330 metres.

Pel que fa a les vinculacions, els recolzaments dels trams d'accés es tracten de recolzaments lliscants, mentre que a l'estrep on arriben els tirants ens trobem amb un encastament. La relació entre el tauler i la torre, en aquest cas estan desvinculats i així s'ha tingut en compte en els càlculs.

Pel que fa a l'amplada del tauler estem en un cas d'un pont força ample, ja que amida 30 metres, la qual cosa ens condicionarà posteriorment les hipòtesis de càrregues que haurem de tenir en compte.

En la definició de la torre, aquesta està formada per una secció de formigó en calaix de dimensions variables que li ofereixen la suficient rigidesa obtenint una alçada total de quasi 75 metres per sobre la cota del tauler.

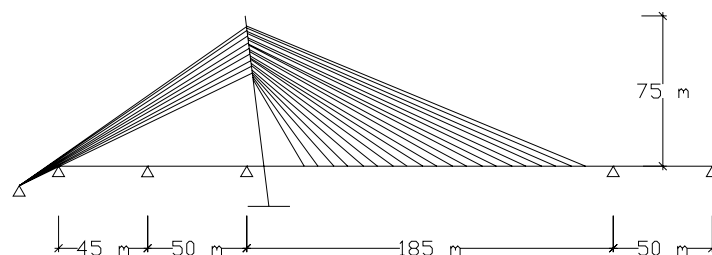


Figura 2: Esquema longitudinal del pont d'estudi. (Font: Elaboració pròpia).



Finalment cal comentar la disposició dels tirants que en els dos casos tindran una configuració en pseudo-ventall formada per 20 parelles de tirants davanters i 9 parelles de tirants de retenció.

En el cas dels tirants davanters estan ancorats amb una separació de 7,5 metres al vànol principal, cosa que permet combinar els avantatges de la configuració en ventall estricte, que són uns menors esforços de flexió sobre la torre, garantint una facilitat constructiva que no té la configuració en ventall ja que és molt costós materialitzar un únic punt de contacte entre els tirants i la torre. D'altra banda l'avantatge davant d'una configuració en arpa és que la torre està sotmesa a una llei de moments flectors molt menor.

Tot i presentar una disposició equivalent, els dos casos estudiants difereixen en la situació dels plans de tirants:

1. Secció llosa nervada: es disposen dos plans de tirants que surten de la torre junts i arriba un pla sobre cada una de les vores del tauler donant lloc a un atirantament lateral.
2. Secció calaix: els dos plans es mantenen paral·lels en tot el seu recorregut obtenint una disposició d'atirantament central.

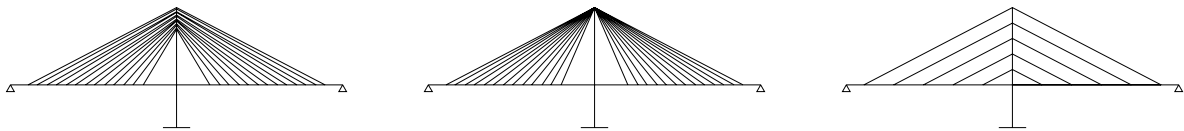


Figura 3: Configuració dels tirants en pseudo-ventall, ventall o arpa.
(Font: Elaboració pròpia).

La distinció entre un sistema de tirants centrals o laterals ve estretament determinada per la secció de tauler que s'escull.

Davant d'un atirantament central, càrregues excèntriques originen esforços de torsió sobre el tauler que ha de resistir per ell mateix i per tant ens veiem forçats a disposar de seccions amb elevada rigidesa torsional com és el cas de les seccions calaix.

En canvi quan estem davant d'un cas d'un atirantament lateral el comportament transversal és més semblant al que té una biga recolzada sobre els tirants i, en cas de càrrega excèntrica el que es produeix és una major tensió en un dels dos tirants situats en la mateixa secció i no té repercussió sobre tauler.

Per acabar només hem d'afegir que la compensació dels esforços sobre la torre no es fa mitjançant l'ancoratge dels tirants de retenció en els vànols d'accés, sinó que



s'ha optat per executar uns contrapesos ancorats directament sobre el terreny a ambdós costats d'un dels estreps del pont.

4.2.1. Secció llosa nervada.

Com ja s'ha comentat es tracta d'una solució molt flexible formada per dos nervis longitudinals de formigó amb unes dimensions imponents (1,6 x 2,0 m.) sobre la resta de la secció que són els encarregats de recollir i resistir la flexió en el sentit longitudinal del pont. (Veure figura 4).

Un altre aspecte important pel bon funcionament és que a cada secció coincident amb una parella de tirants, que equidisten 7,5 metres entre sí, es rigiditza amb un diafragma també de formigó de 0,30 metres de gruix que permet millorar la transferència d'esforços entre el tauler i els tirants.

Finalment es disposa d'una llosa superior de 0,30 metres encarregada de proporcionar la superfície de rodament i controlar a la vegada la flexió transversal, que en aquest esquema estructural es converteix en una flexió longitudinal entre diafragmes consecutius.



Figura 4: Secció llosa nervada tipus i secció coincident amb tirants.
(Font: Elaboració pròpia).

Una primera dada que sorprèn en aquest cas és que tot i tenir un cantell de 1,6 metres estem davant d'un tauler extraordinàriament esvelt ja que gaudeix d'una esveltesa de l'ordre de $L/115$.

Aquest és un valor molt elevat si ho comparem amb ponts convencionals on esvelteses de l'ordre de $L/40$ són ja valors destacables obtinguts, per exemple, en casos de ponts amb seccions llosa pretensades, cantell constant i tenint en compte que parlaríem d'una configuració de biga continua.

4.2.2. Secció calaix.

La segona proposta d'estudi és una secció en calaix d'unes dimensions força considerables que presenta un fons de 10 metres d'ample i dos voladissos de 5,5 metres aproximadament a la part superior que permeten obtenir un ample total de 30 metres. (Veure figura 5).



Ara ens trobem, amb una secció molt més robusta i amb un cantell major, de l'ordre dels 3,50 metres que li ofereixen una esveltesa de $L/45$ que segueix sent més elevada que en d'altres tipologies més corrents.

Aquest fet posa de manifest que amb una solució atirantada realment es poden salvar grans llums sense necessitat de perdre les proporcions ni l'ordre estètic.

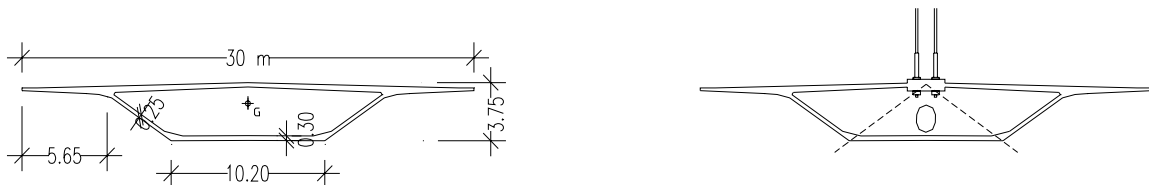


Figura 5: Secció calaix tipus i secció coincident amb tirants.
(Font: Elaboració pròpia).

Ara tornant a aspectes més estructurals, tenim una secció tancada que ens dona una resposta a la torsió excel·lent com també a la flexió que no es resol com el cas anterior amb dos potents nervis, sinó que fem un ús més tradicional de resistir la flexió, que com hem dit serà major a priori, a base de tenir un major braç mecànic que ofereix el major cantell.

Aquesta solució la podríem qualificar de límit ja que per a taulers més amples que aquest, recordem que teníem un ample de 30 metres, es comença a fer necessari recórrer a una disposició de secció bicelular o fins i tot multicelular. De no ser així la flexió transversal seria considerable i la llosa superior s'hauria d'incrementar de manera excessiva.

El que sí s'ha de tenir en compte també en aquest cas, de forma equivalent a la llosa nervada, és que en les seccions coincidents amb una parella de tirants s'hi col·loca un diafragma per permetre la correcta transferència d'esforços de les ànimes del calaix als tirants.

4.3. Predimensionament dels principals elements.

Tal i com ja s'ha explicat es parteix d'una idea basada en un pont real, tot i així s'han hagut de tornar a dimensionar alguns dels elements del pont com són:

- Els dos tipus de tauler : la secció llosa i el calaix.
- S'han hagut de reajustar les seccions dels tirants davanters i els de retenció.
- Tornar a dimensionar les forces de tesat de tots els tirants ja que per fer-ho és determinant l'estat permanent de càrregues i per tant si es modifica la secció, es modifica també sensiblement l'estat permanent que sol venir condicionat principalment pel pes propi de l'estructura.



4.3.1. Tauler

Pel que fa a les seccions del tauler, s'han predimensionat per resistir els esforços longitudinals i la flexió transversal local ha condicionat les dimensions de la llosa superior.

4.3.2. Torre

En el cas de la torre el seu comportament seria assimilable al d'una mènula recolzada sobre un fonament elàstic, que serien els propis tirants, tot i que la similitud seria més acusada quan més lluny estiguéssim de la configuració en ventall.

4.3.3. Tirants

Pel que fa als tirants, els explicarem més detalladament ja que, al tractar-se d'un element menys comú, hem cregut interessant veure com es dimensionen.

La tecnologia de tirants que actualment es fa servir és la mateixa que en els cables de pretensat des del punt de vista estricte del cable.

D'altra banda i referent als sistemes i tecnologies d'ancoratges, es tendeix a uniformitzar mètodes i sistemes tot i que encara difereixen una mica degut a que el típic sistema d'ancoratge de pretensat com són les falques, ofereix unes pèrdues de tensió molt perjudicials pel bon comportament resposta i eficàcia del tirants.

Així doncs, els nostres tirants estaran formats per un feix de monocordons paral·lels de 0,6" del tipus Y1860S7 on cada cordó està format per set filaments.

Les seves característiques geomètriques i mecàniques són :

$$\phi_{\text{nominal}}=15.2\text{mm}$$

$$A=140\text{mm}^2$$

$$f_y=1670\text{MPa}$$

$$f_u=1870\text{MPa}$$

$$E_o=195000\text{MPa}$$

(Aquestes dades són segons la norma ASTM i estan extretes del catàleg de sistemes de pretensat de la casa comercial *VSL Internacional*).

Aquest mòdul de deformació (E_o) és aproximat ja que part del comportament no lineal d'aquest tipus de ponts és degut a la no linealitat del diagrama tensió-deformació dels tirants ja que hi influeix de manera significativa la deformació no tensional que es produeix en un tirant en repòs fruit de la recuperació parcial de la catenària a que està sotmès qualsevol cable sota els efectes del pes propi.

Així doncs quan un cable està sotmès a un esforç segons el seu eix es produeix una deformació que es pot descomposar com una part de deformació geomètrica i una altre d'origen purament tensional en l'acer:



$$\delta_{total} = \delta_{geometric} + \delta_{tensional} = \delta_{geometric} + \frac{\sigma}{Ea} \cdot L \quad (1)$$

Per tot això hem de definir un nou mòdul de deformació que dependrà de l' estat tensional de cada tirant en particular. Així doncs es defineix el mòdul d'Ernst com:

$$E^* = \frac{E_s}{1 + \frac{\gamma^2 \cdot L^2}{12 \cdot \sigma^3} \cdot E_s} \quad (2) \text{ (Font:[11])}$$

on E_s és el mòdul de l'acer que forma el tirant, γ és el pes específic de l'acer (78,5 kN/m³), L és la longitud del tirant en qüestió i σ és la tensió mitjana al tirant definida com la força de tesat entre l'àrea d'acer del tirant.

4.3.3.1. Predimensionament dels tirants

Per determinar la secció d'acer que hem de disposar en els tirants, hem de tenir en compte dos casos diferenciats com són els tirants davanters o els tirants de retenció ja que les hipòtesis de sol·licitació de disseny són diferents.

L'objectiu que hem d'aconseguir és el de tesar els cables davanters a una tensió, de manera que les seccions on s'ancoren els tirants respongui de forma equivalent a com si d'un recolzament d'una biga contínua es tractés, sota la hipòtesis de càrrega permanent, és a dir pes propi i càrregues mortes.

Tanmateix també es redueix de forma espectacular la deformació en l'estructura que en el cas d'estat permanent es tradueix en els següents valors de fletxes sobre el vànol principal :

	Fletxa sense tesat	Fletxa amb tesat
Llosa nervada	1,48 m	6,4 mm
Calaix	0,82 m	-2,66 mm

Taula 1: Comparació de fletxes en estat permanent.
(Font: Elaboració pròpia).

Així veiem que la diferència és realment sorprenent. Hem d'aclarir que la fletxa negativa es refereix a una situació de contrafletxa produïda pel propi tesat dels tirants.

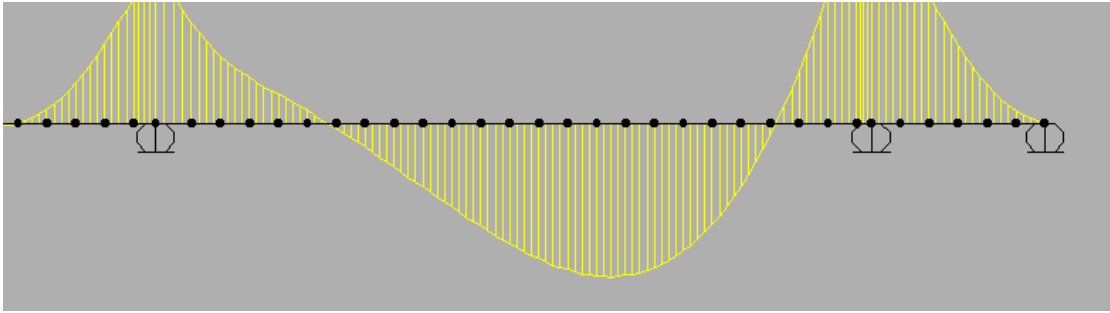


Figura 6: Estat permanent qualitatiu sense tesar els tirants.
(Font: Elaboració pròpia).

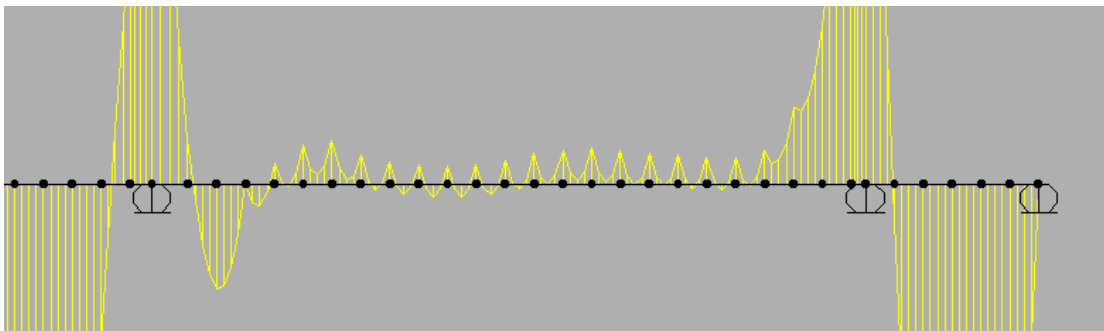


Figura 7: Estat permanent qualitatiu amb els tirants en tensió
(Obs: l'escala del dibuix s'ha ampliat respecte el cas sense tensió).
(Font: Elaboració pròpia).

D'altra banda a l'hora de tesar els tirants de retenció ens basarem en mirar d'aconseguir que el moviment horitzontal de la torre sigui nul obtenint així l'efecte esperat per part dels tirants davanters, ja que fixant el moviment de la torre s'aconsegueix millorar l'eficàcia de l'atirantament.

Aquesta situació l'obtenim a base d'aplicar una força de tesar als tirants de retenció, tal que equilibrin la resultant de les forces horitzontals provocades pels cables davanters sobre la torre.

Pel que fa a l'àrea d'acer que ha de formar cada tirant la determinem considerant que actuen tant les càrregues permanents com les sobrecàrregues, és a dir en la situació de servei. Tot i que no es té en compte la totalitat de la càrrega corresponent al vehicle de la instrucció ja que s'ha comprovat que només de l'ordre del 30-40% d'aquesta es transfereix als tirants i la resta es transmet per flexió a través del tauler.

Així doncs pel que fa al dimensionament de la secció del tirant tindrem en compte el pes propi, les càrregues mortes, la sobrecàrrega uniforme i un 40% de la càrrega puntual definida pel vehicle de la instrucció descrites per la instrucció pertinent.

Un cop obtenim les forces que aquesta combinació de càrregues provoca sobre el tirant, deduïm l'àrea restringint la tensió admissible que es permet en aquest tipus d'elements.



Tot i que actualment no hi ha cap norma vigent espanyola de projecte de tirants estructural sinó que només n'hi ha un esborrany, està estesa la idea de limitar les tensions als tirants en el 45% de la seva càrrega de ruptura.

S'ha demostrat que per valors superiors al 50% de la ruptura, es produeix el fenomen de relaxació de l'acer que forma el tirant, perdent tensió i perdent progressivament eficàcia com a element portant.

Cal insistir que el dimensionament dels tirants no només és una qüestió d'esforços màxims i controlar la tensió admissible per evitar problemes en servei sinó que són també elements molt susceptibles de ser afectats per les oscil·lacions de tensió i per tant per patologies derivades de la fatiga. Per això i per evitar problemes de fatiga, aquestes oscil·lacions també estan controlades i limitades segons recomanacions a no superar una variació de tensió superior a 200 MPa en hipòtesis de càrrega freqüent.

Això ens obliga a limitar en configuració de servei la tensió en el tirant i per tant a l'hora d'encaixar l'estat permanent hem de deixar un marge per quan actui la sobrecàrrega.

$$F_T = \frac{G}{\sin \alpha} \quad (3)$$

$$F_{TR} = \frac{(\Sigma F_h)_G}{\cos \beta} \quad (5)$$

$$A_{s,T} \geq \frac{G+Q}{0,45 \cdot f_{pu} \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

$$A_{s,TR} \geq \frac{(\Sigma F_h)_{G+Q}}{0,45 \cdot f_{pu} \cdot \sin \beta} \quad (6)$$

Les formules (3), (4), (5) i (6) determinen les forces de tesat dels tirants, on F és la força amb la que tesem, G és cadascuna de les reaccions en les diverses seccions on es col·loca un tirant sota la hipòtesi de càrregues permanents, G+Q és en cas de situació de sobrecàrrega i α és l'angle que forma el tirant amb el tauler. [12].

En el cas dels tirants de retenció ΣF_H és la suma de les forces horitzontals exercides pels tirants davanters sobre el cap de la torre i β és l'angle que formen els tirants de retenció amb el tauler. Els resultats del predimensionament dels tirants es recullen en l'Annex 3.

Com es pot entreveure el mètode de dimensionament exacte dels tirants es tracta d'un procés iteratiu que cal ajustar en funció dels resultats que es van obtenint i sobre els que es controlen, entre altres factors, les tensions admissibles.

En el nostre cas per ajustar el model en estat permanent hem retesat alguns tirants fins varies vegades fins que finalment hem aconseguit una llei d'esforços de flexió tal i com es volia, similar a la resposta d'una biga contínua a l'hora que controlem també les deformacions produïdes.



Els resultats obtinguts es troben en l'Annex 3,i a continuació es presenten les tensions finals de tesat que cal aplicar:

Tirants davanters	Força pretensat tirant (kN)	Tirants davanters	Força pretensat tirant (kN)
T0	4976,17	T10	3494,62
T1	1133,13	T11	3613,79
T2	2670,71	T12	3613,79
T3	2788,04	T13	3742,55
T4	2934,07	T14	3742,55
T5	3095,98	T15	3742,64
T6	3185,44	T16	3879,96
T7	3281,25	T17	3927,26
T8	3384,06	T18	2903,90
T9	3494,62	T19	7097,97

Tirant de retenció	Força tesat TR (kN)
TR1	7184,99
TR2	7239,72
TR3	7297,54
TR4	7422,86
TR5	7490,61
TR6	7561,93
TR7	7636,97
TR8	7798,87
TR9	7886,07

Taula 2: Valors de la força de tesat dels tirants en el cas de la secció calaix.
(Font: Elaboració pròpia).

Tirants davanters	Força pretensat tirant (kN)	Tirants davanters	Força pretensat tirant (kN)
T0	6879,13	T10	7786,12
T1	4105,38	T11	8063,16
T2	4803,52	T12	8325,08
T3	5325,95	T13	8571,08
T4	5764,08	T14	8796,55
T5	6156,82	T15	8988,40
T6	6520,72	T16	9111,96
T7	6862,87	T17	9077,12
T8	7186,99	T18	8652,20
T9	7494,33	T19	9266,77

Tirants retenció	Força tesat TR (kN)
TR1	7673,26
TR2	7731,71
TR3	7793,46
TR4	7927,30
TR5	7999,65
TR6	8075,82
TR7	8155,96
TR8	8328,86
TR9	8421,99

Taula 3: Valors de la força de tesat dels tirants en el cas de la secció calaix.
(Font: Elaboració pròpia).

4.4. Anàlisi de l'estructura

4.4.1. Discretització de l'estructura

Per l'anàlisi dels diferents casos tant en el procés de predimensionament de tots els elements portants, així com en la posterior determinació d'envolvents en estat permanent i en sobrecàrregues i en el anàlisi final, i centre pròpiament de la tesina, s'ha fet servir un programa de càlcul d'estructures per elements finits tipus barra com és el SAP 2000 versió v6.11.



En els dos casos d'estructura que aquí es presenten, s'han simulat com a pòrtics espaials representant com a elements unidimensionals tipus barra els tirants i la torre ja que són elements clarament unidireccionals i per tant queden perfectament modelitzats.

En el cas del tauler s'ha modelitzat amb dues barres longitudinals unides de manera infinitament rígida a través de barres transversals situades de forma coincident amb els diafragmes disposats cada 7,5 metres. La nomenclatura de nervi dret i esquerre que es mantindrà al llarg de tota l'anàlisi queda, identificada en la figura 8.

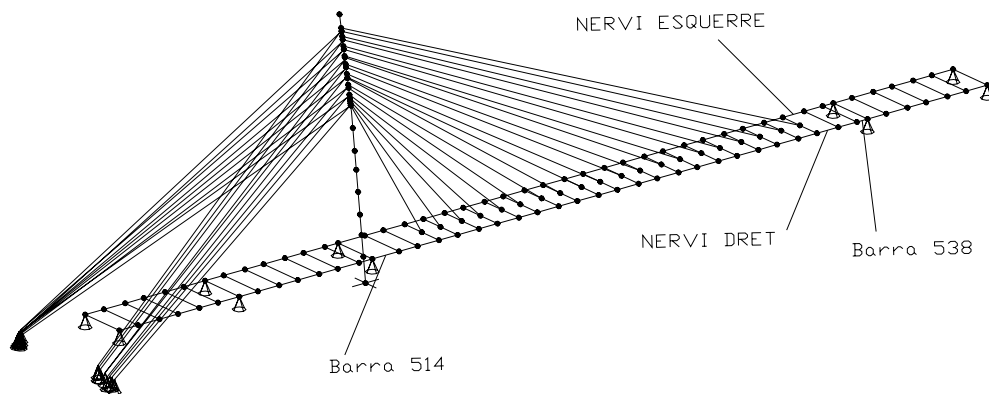


Figura 8: Discretització de l'estructura introduïda en el SAP2000 a base d'elements barra. Exemple del cas de secció calaix i atirantament central. (Font: Elaboració pròpia).

Aclarir que la numeració 500 es correspondrà amb el que anomenarem nervi dret mentre la sèrie 600 es referirà al nervi esquerre, sempre parlant del vanyol principal del pont.

Pel que fa a les característiques mecàniques de cada un dels elements veiem que no es fa necessari descriure-les ja que són representatives de la configuració geomètrica descrita i no aporten cap informació rellevant. Per més detall remetim a [13] per la definició de les propietats mecàniques i la modelització de les diverses seccions.

4.4.2. Estats de càrrega

Abans de començar amb les diferents hipòtesis que s'han utilitzat, hem d'aclarir que s'ha fet una petita modificació en un dels dos casos, el de la secció llosa nervada.

En aquest estudi no s'han tingut en compte un sistema de forces externes com és el pretensat i ens hem trobat que en el cas de la llosa nervada, al tractar-se d'una secció molt flexible es produeixen uns esforços no representatius i fora de la



magnitud general en les seccions de recolzament del vànol central, degut a la falta de pretensat.

És per aquest motiu que per evitar interferències d'aquest origen en els resultats s'ha optat per partir les llums dels vànols d'accés, per aconseguir els següents efectes:

- Reduir els moments, no representatius, en les seccions de recolzament del vànol central.
- Garantir una anàlisi fiable del comportament d'aquest vànol atirantat.

4.4.2.1. Estat permanent

Entenem per estat permanent aquell sistema de càrregues que actua en tot moment sobre l'estructura estigui aquesta en servei o no. És per això que d'ara en endavant en parlar d'estat permanent ens referirem sempre a la combinació de càrregues que inclou:

- Pes propi de l'estructura (g_1): tenint en compte tots els elements que conformen l'estructura.
- Càrregues permanents (g_2): considerant el pes propi de tots aquells elements que són necessaris pel bon funcionament en servei de l'estructura però que no són necessaris com a estructura portant: parlem de paviment, murs de protecció baranes, acerces...
- Força de tesat: ja que és un sistema de forces del que depèn sensiblement la resposta del conjunt.

D'aquest estat cal destacar la simulació del tesat que s'ha introduït en el programa de càlcul com a disminució tèrmica dels tirants, és a dir mitjançant la congelació dels tirants. Portant-los a temperatures de l'ordre dels $-250/-300$ °C es simula perfectament un estat pretensional en ells a partir de la deformació imposada originada per aquesta disminució de la temperatura segons la relació:

$$\varepsilon_0 = \frac{F}{A_{ST} \cdot E_S} \quad (7) \quad [12]$$

$$\Delta T = \frac{F}{A_{ST} \cdot E_S \cdot \alpha} \quad (9)$$

$$\varepsilon_T = \Delta T \cdot \alpha \quad (8)$$

4.4.2.2. Estat en servei

L'estat en servei es referirà a aquells casos de càrrega que tenen en compte l'estat permanent i diferents hipòtesis de sobrecarrega o càrregues de servei en funció de la seva implicació en la resposta final. Per tant doncs ens caldrà definir aquests casos de càrregues de servei.



En aquest estudi ens hem centrat en la resposta de l'estructura davant d'hipòtesis de càrrega exclusivament vertical deixant de banda accions horitzontals com poden ser les de frenat dels vehicles, les del vent tant per l'impacte contra el cantell del tauler o la pila com per la pròpia fricció sobre la superfície del tauler, accions sísmiques...

Per intentar definir el més estrictament possible els casos de sobrecàrrega més interessants i crítics hem definit 49 seccions de control distribuïdes al llarg del tauler per intentar recollir tots els valors màxims i mínims possibles.

Evidentment també s'ha seguit l'evolució de l'esforç axil en tots els tirants davanters i de retenció, quedant així controlats els dos mecanismes de transmissió d'esforços que juguen un paper més destacat en aquest estudi.

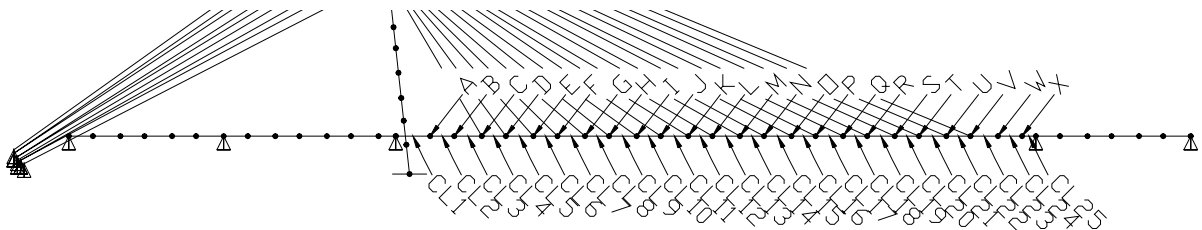


Figura 9: Definició de les seccions per les quals s'han obtingut les superfícies d'influència. (Font: Elaboració pròpia).

Per la determinació d'aquests esforços en les diferents seccions de control del tauler i en els tirants i amb l'objectiu de conèixer amb exactitud les hipòtesis de càrrega més desfavorables s'han constituït les superfícies d'influència per cada una de les 49 seccions del tauler (veure figura 9) i també per cada tirant.

Aquestes superfícies d'influència s'han realitzat pels esforços de moment flector i axil respectivament, a partir de fer discórrer una càrrega puntual de 100kN per diferents posicions del tauler que per motius de simplificació de càlcul hem definit posicions discretes però en nombre suficient per obtenir un resultat coherent.(veure figura 11)

Totes les superfícies d'influència es poden trobar a l'Annex 1 i per definir la nomenclatura utilitzada s'adjunta l'esquema de la figura 9, on les seccions CL es corresponen al centre de llum de cada una de les barres que formen els nervis longitudinals que representen tant a la secció llosa com a la secció calaix.

Cal aclarir que el concepte de superfície d'influència és una ampliació en 2D del concepte clàssic de línies d'influència que ens delimita sempre les zones crítiques on cal col·locar les càrregues per obtenir els màxims esforços en una secció determinada.

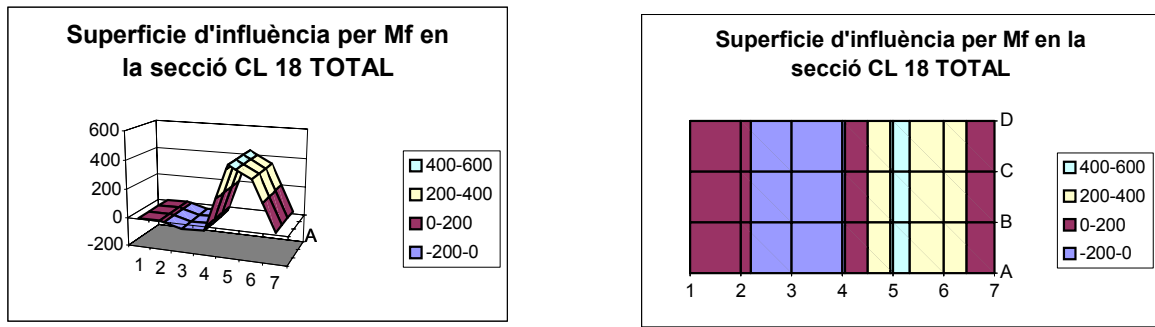


Figura 10: Exemple d'un superfície d'influència pel moment flector en una secció del tauler (cas de secció llosa). (Font: Elaboració pròpia).

Les posicions indicades en la figura 11 de les superfícies d'influència es corresponen amb las diferent posicions on es disposa la càrrega puntual de 100 kN ja definida.

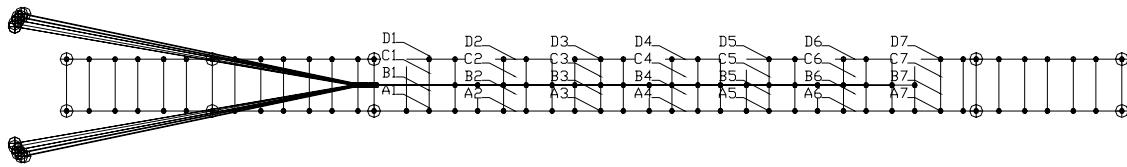


Figura 11: Posicions de la càrrega mòbil per determinar les superfícies d'influència, en els dos casos d'anàlisi. (Font: Elaboració pròpia).

Una vegada determinades les hipòtesis més desfavorables s'ha procedit a aplicar-hi les sobrecàrregues definides per ponts a la IAP [14] :

- Sobrecàrrega repartida uniforme de 4 kN/m² (q).
- Sobrecàrrega mòbil puntual de 600 kN (Q). En el nostre cas per les dimensions del tauler cal col·locar-hi dos vehicles en cas de ser més desfavorable, obtenint una càrrega puntual de 1200 kN.

4.4.3. Simulació de la ruptura

En la simulació de la ruptura d'un tirant sembla prioritari escollir quin dels tirants es trencarà. Aquesta reflexió és fruit del comportament clarament diferenciat entre un tirant llarg i llunyà a la torre i un altre de més proper i més curt. Tal i com s'ha explicat anteriorment, la diferent rigidesa, la diferent tensió de tesat, la diferent eficàcia de cada tirant... poden fer que la ruptura de un o altre tirant tingui conseqüències molt diferents.



Així doncs per intentar acotar al màxim les possibles respostes hem decidit de simular la ruptura de cinc tirants emmarcats dins de quatre zones clarament diferenciades en el posicionament dels tirants, Aquest tirants escollits són:

- Tirants llargs i llunyans a la torre: T16
- Tirants intermitjos: T11 i T12
- Tirants curts i pròxims a al torre: T3
- Tirants de retenció: TR6

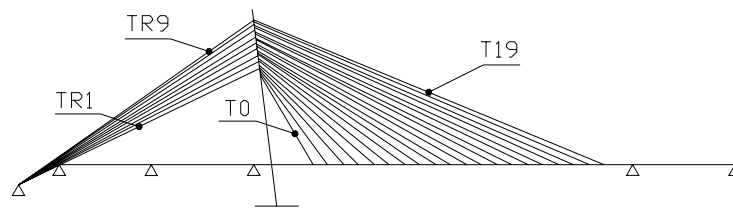


Figura 12: Nomenclatura dels tirants davanters (T) i de retenció (TR).
(Font: Elaboració pròpia).

Cal remarcar que en la zona de tirants intermitjos hem procedit a simular la ruptura de dos tirants consecutius amb la intenció de determinar si el comportament és equivalent, tal i com és d'esperar, o bé es produeixen respostes marcadament diferents.

A part de la diferenciació longitudinal també hem analitzat la ruptura de tirants per parelles, és a dir, s'ha analitzat per la mateixa secció la ruptura del tirant dret i la de l'esquerre ja que les hipòtesis de sobrecàrregues excèntriques poden donar diferents resultats en funció de quin tirant es trenca.

La simulació de la ruptura d'un tirant no comporta una única situació d'anàlisi ja que no és el mateix que un tirant es trenqui en una situació de sobrecàrrega inexistente o mínima que quan el trànsit rodat que discorre pel pont està al límit de la seva capacitat. Tampoc és el mateix que es trenqui un tirant i s'hi apliqui la sobrecàrrega de forma concomitant a que el tirant es trenqui i la càrrega d'ús aparegui després.

És per això que hem diferenciat quatre situacions per analitzar que es descriuen a continuació:

- DINÀMIC CP: La ruptura es produeix de forma concomitant amb l'estat de càrrega permanent (tal i com està definit anteriorment) i es té en compte l'efecte dinàmic de la ruptura.
- ESTÀTIC CP: És el cas de la resposta estacionària de l'estructura a l'estat permanent una vegada superats els efectes dinàmics inicials.



- **ESTÀTIC SC:** Es tracta de la situació estacionària de sobrecàrrega. Si els elements de control resisteixen les dues combinacions de ruptura en l'estat permanent, s'hi aplica la sobrecàrrega d'ús.
- **DINÀMIC SC:** la ruptura i els efectes dinàmics que se'n deriven es produeix amb tota la sobrecàrrega actuant, cosa que a priori, sembla indicar la combinació més desfavorable.

Estem parlant de simulació de ruptura i efectes dinàmics i encara no hem definit aquest concepte i què representa per a l'estructura.

La ruptura d'un tirant no és una situació de càrrega estàtica, és a dir, que no es tracta de treure el tirant trencat i veure que passa sinó que apareixen uns esforços on era l'antic tirant fruit de la tensió prèvia del tirant que s'han de quantificar.

Una de les teories existents [15] és que al trencar-se un element tesat s'origina una força en la mateixa direcció que la directriu del tirant, però de signe contrari i de mòdul el doble de la força de tesat.

Aquest és doncs, el fenomen al què ens referim amb els efectes dinàmics associats a la ruptura d'un tirant. No obstant, existeix una altra manera de simular l'efecte dinàmic de la ruptura equivalent al que s'ha explicat i es tracta de fer desaparèixer el tirant trencat i aleshores col·locar una càrrega en sentit contrari a la força de tesat i de valor igual a aquesta força, tal com s'indica a la figura següent:

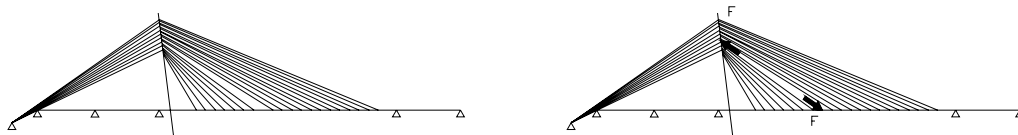


Figura 13: Simulació de la ruptura a base de treure un tirant i afegir-hi un força F.
(Font: Elaboració pròpia).

Un altre objectiu que buscarem serà determinar el percentatge de càrrega que pot actuar sobre el pont una vegada s'ha produït la ruptura. És un objectiu amb molta importància a l'hora de realitzar la gestió de la seguretat en aquest tipus de ponts i és un concepte extensible a qualsevol camp.

Això es tradueix en veure què passa en cas què les seccions tant dels tirants que resten intactes, com de les seccions de tauler resisteixen la ruptura en estat permanent i en canvi no ho facin en estat de servei. Aleshores, intentarem determinar de forma acotada la porció de sobrecàrrega que admetria el pont, abans que alguna de les seves seccions s'esgotés.