



6.- Conclusions

6.1. Generalitats

Mitjançant aquesta tesina hem dut a terme una aproximació al marge existent en la seguretat estructural dels ponts atirantats davant la ruptura d'un tirant. També cal comentar que aquest tracta del tercer treball realitzat sobre aquest tema a nivell internacional, que nosaltres coneguem i, per tant, la informació de la que es disposava en un inici no era excessivament ampla.

D'entre tots els resultats obtinguts hem pogut veure el comportament que han patit uns elements tan importants com són el tauler i els tirants en aquests tipus d'estructura, en funció de la tipologia de tauler que s'ha escollit.

Abans de res cal recordar que l'anàlisi que hem realitzat en tot moment ha estat enfocat des del punt de vista estricte del comportament elàstic. Aquesta hipòtesi es basa en limitar l'esgotament seccional en l'instant en que s'igualen els esforços sol·licitants amb els valors de resistència en cada secció de forma individual. És a dir, hem comparat directament les sol·licitacions de cada hipòtesi de càrrega amb l'envolvent de servei obtinguda, sense entrar en l'aplicació de coeficients de seguretat, tant de reducció de la resposta com de majoració de les accions.

Tot i així cal remarcar que la resistència seccional pot augmentar a efectes de càlcul, amb l'aplicació de mètodes basats en hipòtesis de redistribucions plàstiques d'esforços en ruptura entre les diferents seccions. Si haguéssim tingut en compte aquest fenomen, els resultats indicarien, segurament, major marge de seguretat del que hem obtingut. Malgrat aquestes consideracions, l'objectiu de la tesina no comportava aquest nivell d'anàlisi, tot i que es deixa oberta una molt bona línia de recerca.

Un altre aspecte que volem aclarir és que en les nostres hipòtesis de treball referents a les càrregues de servei, hem aplicat en tot moment la totalitat de les sobrecàrregues pel motiu de no disposar de les normatives adients al inici del treball. Cal remarcar, tot i així, que es tracten de normatives molt recents.

Amb això ens referim a que certes normatives o recomanacions afecten amb coeficients de reducció les càrregues de servei en cas de produir-se situacions accidentals. Aquesta despenalització és deguda a la baixa probabilitat de concomitància existent entre una situació accidental i una situació de sobrecàrrega màxima de l'estructura. Aquestes disminucions es mostren a continuació:

- *Recomanació del Grupo de Tirantes de la ACHE (Recomanació espanyola) :*

Aconsella utilitzar en el càlcul la combinació de càrregues quasi-permanent i reduir la tensió de ruptura dels tirants al 85% de la seva capacitat. [8]

Si per tant mirem les normatives vigents a Espanya, EHE [16] i IAP [14], veurem que aquesta recomanació, pel que fa a sobrecàrregues, es tradueix en:

$$\gamma_{sc} \cdot 0,2 \cdot SC + \text{Efectes de ruptura} \quad (10)$$



- Recomanació francesa:

En aquest cas ens remet al Eurocodi 1 i aplica els següent coeficients a la sobrecàrrega en situació de ruptura d'un tirant [7]:

$$0,75 \cdot TS + 0,4 \cdot UDL \quad (11)$$

on recordem que TS es refereix a la càrrega del vehicle tipus i UDL fa referència a la sobrecàrrega uniforme repartida.

- PTI (Recomanació americana):

En aquest cas la situació de ruptura d'un tirant s'aconsella calcular-la segons la següent combinació de càrregues [6]:

$$1,2 \cdot DC + 1,4 \cdot DW + 0,75 \cdot (LL + IM) + \text{Cable Loss Dynamic Forces} \quad (12)$$

on DC el pes propi, DW són les càrregues mortes, LL és la part de sobrecàrrega amb caràcter estàtic, mentre que IM correspon a la part dinàmica de la sobrecàrrega.

En el treball realitzat no hem aplicat factors reductors de càrrega com els que aquestes recomanacions proposen. En aquest sentit cal puntualitzar que si no els hem aplicat és perquè no vàrem disposar de les recomanacions amb suficient antelació. Així doncs, per tenir en compte aquestes reduccions en les sobrecàrregues hem fraccionat les hipòtesis de càrrega, obtenint uns resultats que disposen de gran validesa i que permeten estudiar el problema amb la suficient extensió per permetre futures perspectives de continuïtat en aquesta línia.

Dels resultats obtinguts, n'hem tret les conclusions que s'exposen a continuació sobre el tauler i els tirants.

6.2. Tauler

El tauler resulta ser l'element crític en el moment que es produeix la ruptura d'un dels tirants, tant si estem amb una secció llosa nervada com si estem amb una secció calaix.

Ara veurem les conseqüències que representen pel tauler la ruptura dels diferents tirants.

6.2.A. Ruptura d'un tirant de retenció

Es produeix un resultat comú en els dos casos i és que si el tirant que es trenca és un dels de retenció el comportament del tauler és pràcticament invariable. És a dir que gairebé no es detecta la ruptura d'un dels tirants de retenció. El comportament observat en funció del tipus de secció ha estat:



- Secció llosa nervada: Resisteix perfectament la ruptura en estat permanent de càrregues tant la hipòtesis dinàmica com estàtica, ja que en cap secció es superen els esforços de disseny.

Tot i així a l'hora de fer passar la sobrecàrrega ens trobem que si la ruptura s'ha produït en estat permanent el tauler pot resistir gairebé la totalitat de la càrrega tal com es mostra en la taula següent:

% de sc	0,25q	0,5q	0,75q	q
0,25Q	☐	☐	☐	☐
0,5Q	☐	☐	☐	☐
Q	☐	☐	☐	✗

Taula 30: Percentatge de sc que pot passar si la ruptura del TR6d es produeix en estat permanent. Secció llosa nervada.
(Font: Elaboració pròpia).

Si per altra banda, la ruptura es produeix de manera concomitant amb la presència de sobrecàrrega, la màxima capacitat que permet el tauler sense superar els valors de l'envolvent de disseny es resumeix amb les següents combinacions de sobrecàrrega:

% de sc	0,25q	0,5q	0,75q	q
0,25Q	☐	☐	☐	☐
0,5Q	☐	☐	☐	✗
Q	☐	☐	✗	✗

Taula 31: Percentatge de sc que pot passar si la ruptura del TR6d es produeix de forma concomitant amb el pas de la sobrecàrrega. Secció llosa nervada.
(Font: Elaboració pròpia).

Recordem que 'Q' es refereix a la càrrega corresponent a dos vehicles de 600 kN definits per la IAP [14] i 'q' es refereix a una càrrega uniforme distribuïda de valor 4 kN/m² definida també a la IAP.

- Secció calaix: en aquest cas la resposta davant la ruptura de TR6d és molt similar al cas de la llosa nervada ja que també suporta perfectament la ruptura en estat permanent. Pel que fa a l'estat de sobrecàrregues el comportament és una mica pitjor, ja que el percentatge de càrrega admissible és una inferior tant en el cas d'estat estacionari de sobrecàrrega com en la situació de concomitància amb la ruptura. Tot i això la resposta obtinguda segueix sent molt bona. Aquest resultats es recullen en les següents taules.

% de sc	0,25q	0,5q	0,75q	q
0,25Q	☐	☐	☐	✗
0,5Q	☐	☐	☐	✗
Q	☐	☐	☐	✗

Taula 32: Percentatge de sc que pot passar si la ruptura del TR6d es produeix en estat permanent. Secció calaix.
(Font: Elaboració pròpia).



% de sc	0,25q	0,5q	0,75q	q
0,25Q	□	□	□	×
0,5Q	□	□	□	×
Q	□	□	×	×

Taula 33: Percentatge de sc que pot passar si la ruptura del TR6d es produeix de forma concomitant amb el pas de la sobrecàrrega. Secció calaix.
(Font: Elaboració pròpia).

Així doncs, contra tota intuïció inicial, hem obtingut que la ruptura d'un tirant de retenció suposa molt poca alteració en el comportament del tauler respecte el seu funcionament òptim.

6.2.B. Ruptura d'un tirant davanter

Pel que fa a la situació de ruptura d'un dels tirants davanters, la resposta del tauler obtinguda en funció de la secció que tinguem:

- Secció llosa nervada: es produeix l'esgotament de major o menor nombre de seccions del tauler sigui quina sigui la situació de ruptura. Tant si es produeix en estat permanent com si es produeix en situació de servei, els esforços superen l'envolvent de disseny en el tauler. Per tant la secció llosa nervada no resisteix la ruptura d'un tirant davanter sota cap hipòtesi de càrrega.
- Secció calaix: es resisteix la ruptura d'un dels tirants de les parelles centrals (casos T11P i T12P) en estat permanent, però segueixen esgotant la majoria de seccions en estat de servei.

Per aquests casos de ruptura per els quals es resisteix l'estat permanent veiem quines combinacions de sobrecàrrega poden circular-hi, tant en estat estacionari com si la ruptura es dona conjuntament amb una situació de sobrecàrrega.

% de sc	0,25q		0,5q		0,75q		Q	
	T11P	T12P	T11P	T12P	T11P	T12P	T11P	T12P
0,25Q	□	□	□	□	□	×	×	×
0,5Q	□	□	□	□	×	×	×	×
Q	□	□	□	□	×	×	×	×

Taula 34: Percentatge de sc que pot passar si la ruptura del T11P o T12P es produeixen en estat permanent. Secció calaix.
(Font: Elaboració pròpia).



% de sc	0,25q		0,5q		0,75q		q	
	T11P	T12P	T11P	T12P	T11P	T12P	T11P	T12P
0,25Q	□	□	×	□	×	×	×	×
0,5Q	□	×	×	×	×	×	×	×
Q	□	×	×	×	×	×	×	×

Taula 35: Percentatge de sc que pot passar si la ruptura del T11Po T12P es produeixen de forma concomitant amb el pas de la sobrecàrrega. Secció calaix.
(Font: Elaboració pròpia).

En aquest cas veiem que al ruptura d'un tirant davant sí resulta realment crítica per la secció llosa nervada, mentre que la resposta obtinguda en el cas de la secció calaix resulta molt més esperançadora.

6.3. Tirants

Dels resultats obtinguts en els tirants per les diferents hipòtesis de càrrega i els diferents casos de ruptura, n'hem extret les següents conclusions:

- 2 Els tirants, davanters o de retenció, en cap moment passen a ser un element crític per la seguretat de l'estructura.
- 2 En el pitjor dels casos algun dels tirants pròxims al que pateix la ruptura es susceptible de tenir tensions lleugerament superiors a les admissibles però, al definir-se les admissibles com el 45% de la tensió de ruptura, quedem encara molt per sota de qualsevol dany important. Aquesta sobretensió és com a màxim de l'ordre del 11% per sobre la tensió admissible.
- 2 En general la redistribució dels esforços és tal que implica un mínim augment de la tensió sense més conseqüències per la resta de tirants.

Com a aspecte més detallat, cal destacar per cada secció el següent:

- En el cas de la llosa nervada, la ruptura d'un tirant afecta de forma menyspreable als tirant del pla contrari de l'atirament.
- En el cas de la secció calaix, la ruptura d'un del tirants que formen cada parella no implica un augment remarcable sobre el que queda sinó que segueix l'esquema general de distribució entre els demés, augmentant de forma similar als adjacents.

Així doncs, aquesta tesina, tot i abarcar un petit aspecte de les possibilitats existents, ha permès veure una aproximació al comportament estructural d'una tipologia tan particular com és un pont atirantat, en una situació extrema de la ruptura d'un dels seus tirants.



Els resultats obtinguts han permès també, deixar obertes futures línies de recerca amb la orientació d'incloure aspectes relacionats amb la redistribució plàstica en el tauler i veure quines implicacions té sobre la seguretat global un comportament seccional no lineal.