

DISEÑO ESTRUCTURAL II

Carrera de **Arquitectura**

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE
INGENIERÍA

UNIDAD 2

TRACCION



Dr. Ing. Gonzalo S. Torrissi

2021

1. SISTEMAS DE ESTRUCTURAS

La estrategia del proyecto estructural en conjunto dependerá de la empleada en particular en cada componente mediante la utilización de distintos sistemas resistentes.

Se pueden aprovechar superficies curvadas que reducen sus tensiones hasta límites inofensivos (láminas), sistemas articulados que descomponen sus fuerzas según direcciones en las que puedan ser resistidas (reticulados), la flexibilidad que deriva el camino de fuerzas llevándolas a los apoyos (cubiertas colgantes), las masas que ponen en acción el brazo de palanca de los materiales sólidos, modificando la dirección de las fuerzas alejándolas de la zona crítica (estructuras flexadas).

Estas tácticas además de permitir controlar las fuerzas se dan en tal variedad que permiten también que sean usados como formas artísticas.

Se pueden ordenar los sistemas estructurales de acuerdo a su modo de transmitir las acciones en:

- Según su forma material: sistemas de **forma activa** en estado de tracción y compresión simple.
- Mediante la colaboración de miembros en tracción y compresión: sistemas de **vector activo** o sistemas de tracción compresión simultáneos.
- Debido a la masa y continuidad de la materia: sistemas de **masa activa** o sistemas en estado de flexión.
- Mediante su continuidad superficial: sistemas de **superficie activa** o sistemas estructurales en estado de membrana.
- Mediante transmisión de cargas verticales: **sistemas estructurales verticales**.

Es difícil encontrar un sistema estructural puro, pero se debe considerar la principal acción resistente

2. FORMA ACTIVA

La columna vertical y el cable son prototipos de sistemas de forma activa, ya que transmiten cargas mediante tensiones normales de compresión o tracción, pero no simultáneamente. Los esfuerzos se presentan exclusivamente como compresión o como tracción, a diferencia de los sistemas de vectores (reticulados).

La característica de los sistemas estructurales de forma activa es que encauzan las fuerzas exteriores por tensiones normales (compresión o tracción).

El arco y el cable (por ser solicitados solo a tracción o compresión) son los sistemas más económicos para cubrir un espacio, pero desarrollan fuerzas horizontales en los extremos que constituyen el principal problema a resolver.

El funicular de los esfuerzos de tracción es la segunda característica de estos sistemas entendiendo como tal a la posición de equilibrio que toma un cable bajo la acción de las cargas exteriores. Cualquier cambio en la carga o la sustentación da origen a una nueva forma.

Un cable siempre busca una posición de equilibrio. Al producirse un cambio de forma o una modificación de la altura de los apoyos buscará una nueva posición de equilibrio (cable sustentante), a diferencia de un arco que mantendrá su forma pero modificará la manera de transmisión interna de los esfuerzos, es decir, que en este caso el arco además de esfuerzos de compresión (esfuerzos normales a la sección) presentará flexiones (momentos flectores).

Los sistemas de forma activa son los mecanismos más convenientes para alcanzar grandes luces y configurar amplios espacios porque toda la sección trabaja uniformemente a un único esfuerzo. La materialización se logra a partir de algunos o combinación de los siguientes componentes:

1. Barras rígidas
2. Cables
3. Membranas y carpas
4. Sistemas neumáticos

2.1. Barras rígidas

Es la forma más simple de transmitir la tracción. Las secciones comerciales más comunes tienen forma de “I”, “U”, “L” “T”, entre otras. Las propiedades mecánicas se estudian en el punto 4.

2.2. Cables

Una de las formas de clasificación es la siguiente:

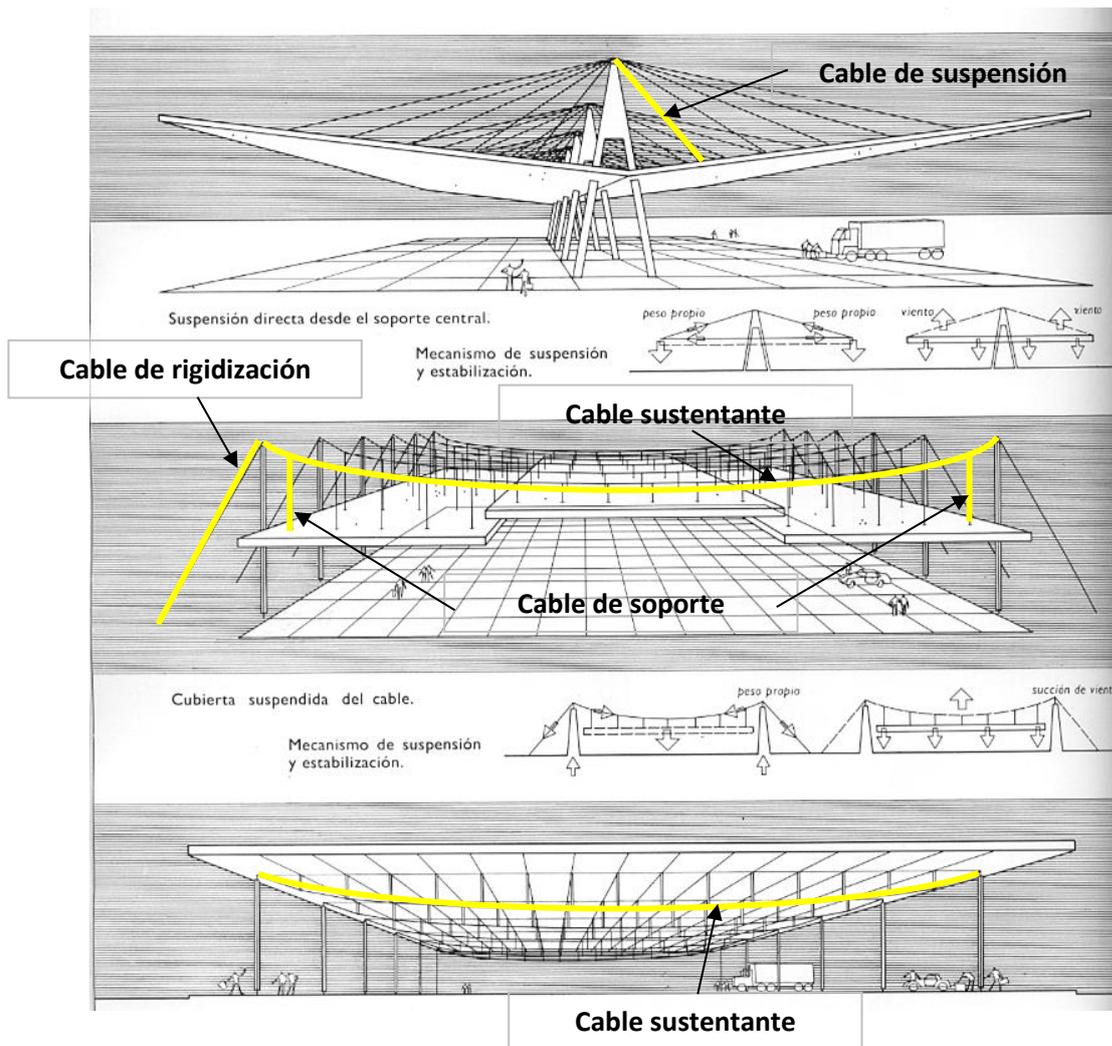


Figura 1 – Clasificación de cables

2.3. Membranas y carpas

Las cubiertas de membranas pueden ser tensadas o pretensadas. Las cubiertas de membranas pretensadas están definidas por membranas translúcidas, tendidas entre puntos firmes. Algunos autores las llaman *cáscaras blandas*. Es necesario conferirles *rigidez*, para evitar que salgan de servicio ante las variaciones de cargas, porque son soluciones estructurales livianas y flexibles, que se encuadra dentro de las que resisten por tracción, con posibilidad de adaptar su forma al funicular de las cargas externas.

Antecesoras de las *cubiertas de membranas pretensadas* son las cubiertas de *membranas tensadas*, que son antiquísimas, tan antiguas como el primitivo hombre nómada.



Figura. 2 - Carpas

2.4. Sistemas neumáticos

Los sistemas neumáticos responden a membranas en las que el mecanismo sustentante es la presión interior de inflado.

La estabilidad de la forma depende de que se mantengan valores límites de la presión, ya que cuando por acciones exteriores se produzcan esfuerzos de compresión la membrana (incapaz de resistirlo) comienza a “flamear” y pierde capacidad de sustentación.

En algunos casos se han planteado membranas infladas por la acción del viento que mantienen la presión con válvulas de retención o bien por la incorporación permanente de aire con equipos adecuados.



Figura. 3 – Membranas Infladas

3. LEY DE HOOKE

Los elementos estructurales son capaces de resistir los efectos de las fuerzas debido a la composición molecular del material que los constituye. Al someter un cable a esfuerzos axiales divergentes (tracción) se genera una reacción interna que se opone a la fuerza externa. El cable se romperá cuando la carga exceda su capacidad, la que viene dada por la resistencia del material. La mayor o menor “fortaleza” de cada material está directamente relacionada con su constitución molecular.

En 1676 Robert Hooke observó que

- Cualquier sólido cambia su forma alargándose o contrayéndose bajo la acción de una fuerza. Al colgar un ladrillo con una soga, ésta se alarga.
- Los sólidos recobran su forma original luego de retirada la carga.

Aunque Hooke nunca supo nada sobre los enlaces químicos entendió, a partir de la observación macroscópica, que el material, internamente, también se alarga o se acorta produciendo la separación o el acortamiento de sus moléculas

A este comportamiento se lo llama “elástico” y es aplicable a los materiales tales como acero, hormigón, ladrillo, piedra, madera, huesos o tendones.

A partir de estas observaciones Hooke publicó la famosa sentencia “ut tensio sic vis” (cómo el alargamiento, así es la fuerza), hoy conocida como la ley de Hooke.

Ley de Hooke

Las **Tensiones** son proporcionales a las **Deformaciones**

σ proporcional a **ϵ**

$\sigma = E \cdot \epsilon$ ($f = E \epsilon$ para la nueva notación)

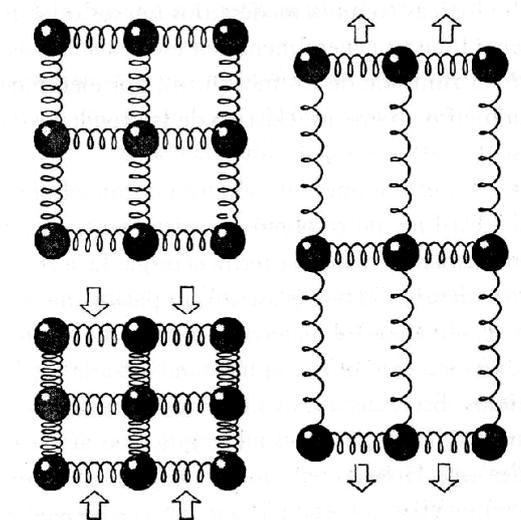


Figura 4 – Estructura molecular de los materiales

En el caso del acero, las propiedades mecánicas se obtienen a partir del ensayo de tracción donde se destaca un punto característico: el punto de fluencia y según el tipo se clasifican por la calidad en:

Designación		Módulo Elasticidad (E)		Tensión de fluencia (F _y)		Tensión de rotura (F _u)	
		[MPa]	[kg/cm ²]	[MPa]	[kg/cm ²]	[MPa]	[kg/cm ²]
1	F-24	200.000	2.100.000	240	2400	370	3700
2	F-30	200.000	2.100.000	300	3000	430	4300
3	F-36	200.000	2.100.000	360	3600	520	5200

Los aceros presentan fluencia definida, (Fig. 6), es decir que aparece una rama casi horizontal donde las partículas del acero “fluyen” deformándose, sin que se aumente la carga aplicada. En los acero de mayor resistencia (como los usados en hormigón armado) la fluencia no es tan marcada.

Para este ensayo se utiliza una probeta (Fig. 5) que se lleva hasta la rotura por medio de un equipo que la somete a esfuerzos de tracción.

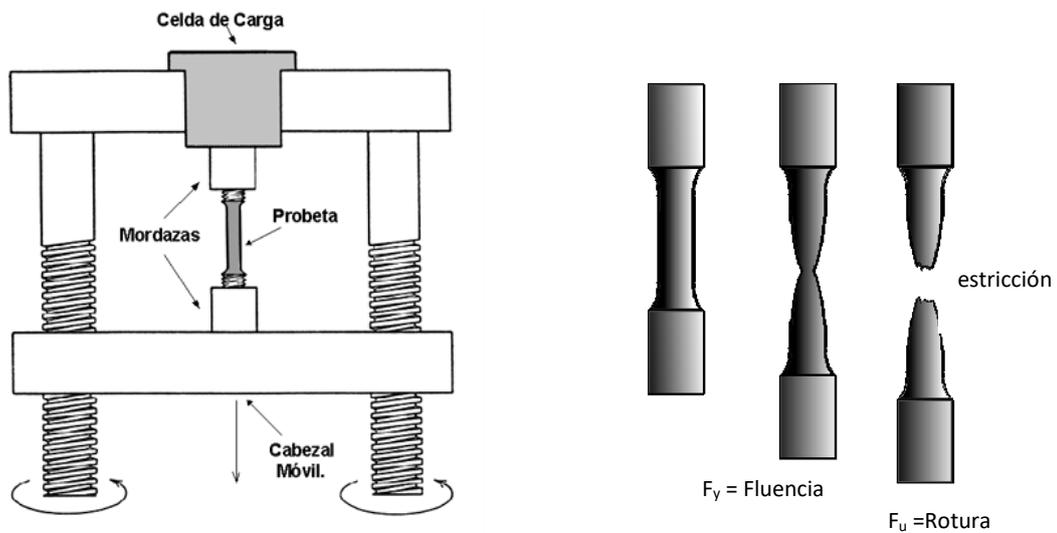
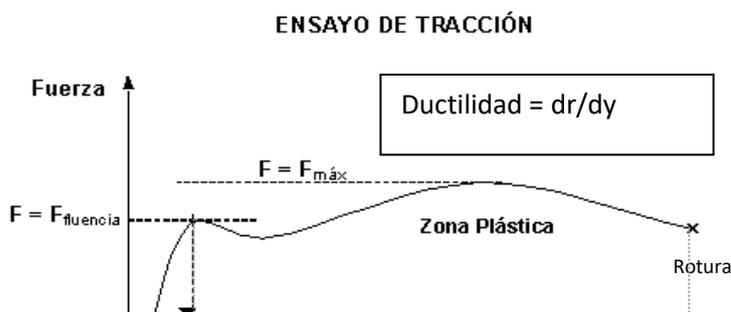
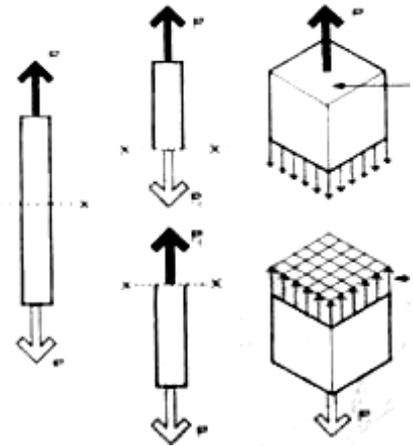


Figura 5 – Máquina de ensayo y probetas





4. MATERIALES

Se pueden configurar elementos estructurales de alta resistencia y rigidez trabajando en tracción. Pero resistencia nula a compresión, flexión o corte.

Los elementos en tracción pueden ser:

- Fibras: Se conforman con fibras sintéticas enrolladas alrededor de una fibra central
- Cadenas: se conforman por medio de eslabones vinculados entre si
- Cables: se producen a partir de acero de alta resistencia (mayor a 1000 MPa = 10000 kg/cm²), lográndose elementos de muy alta resistencia a tracción
- Barras: perfiles normales, tubos, barras, etc

Al no resistir compresión, ni siquiera su peso propio, no son capaces de mantener su propia forma. Esto ocasiona que ante una variación de la magnitud o posición de la carga, la forma del cable debe cambiar.

5. CONEXIONES

Los elementos traccionados que soportan cargas, deben vincularse al resto de la estructura y la terreno de fundación por medio de piezas que los conecten a los que se denominan “conexiones” o “medios de unión”.

Existen diversos medios de conexión y se destacan como más comunes: tornillos, soldadura, clavos, colas, pegamentos, etc. En el caso de cables se fabrican piezas tales como prensacables, anillos etc.

Si no se tuviesen en cuenta los elementos de conexión, el diseño de elementos traccionados es bastante sencillo, pues el peso de una estructura en tracción, será

proporcional a su longitud. Un cable que deba soportar una carga de 1000 kg a una distancia de 100 metros tiene la misma sección (área del cable) que si la tiene que soportar a 1,00 metro. Además la carga se puede soportar con un cable o con varios cables más pequeños.

El problema se presenta cuando se deben conectar en los extremos por medio de piezas de unión. El peso y costo de las piezas de extremo, para una cierta carga, será exactamente igual para cualquier longitud de cable, por lo que el peso y costo de un elemento traccionado “por unidad de longitud” será menor para un cable largo que para uno corto, es decir, el peso no es directamente proporcional a la longitud. (Gordon).

El peso total de las piezas de extremo de dos barras a tracción en paralelo es menor que el de la conexión de una sola barra de sección equivalente, por lo que se concluye que se ahorra peso subdividiendo la carga en varios elementos en lugar de soportarlo con uno solo.



Figura 7 – Diversas Conexiones (Martiri)

6. COMPORTAMIENTO DE CABLES

Los cables son estructuras especialmente apropiadas para cubiertas de grandes luces con materiales ligeros (livianos) donde el elemento estructural esencial es el cable y el esfuerzo fundamental es el de tracción.

A causa de ser estructuras solicitadas exclusivamente por tracción simple, son los sistemas más económicos para cubrir un espacio atendiendo a la relación peso/luz.

El cable adopta la forma de las cargas: por ejemplo la plomada nos indica la verticalidad de la fuerza de gravedad del peso de la misma (carga), en la forma del hilo (cable) que lo sostiene. Aplicada una fuerza horizontal en cualquier punto de dicho cable, la forma del mismo se modifica en función del valor de dicha carga.

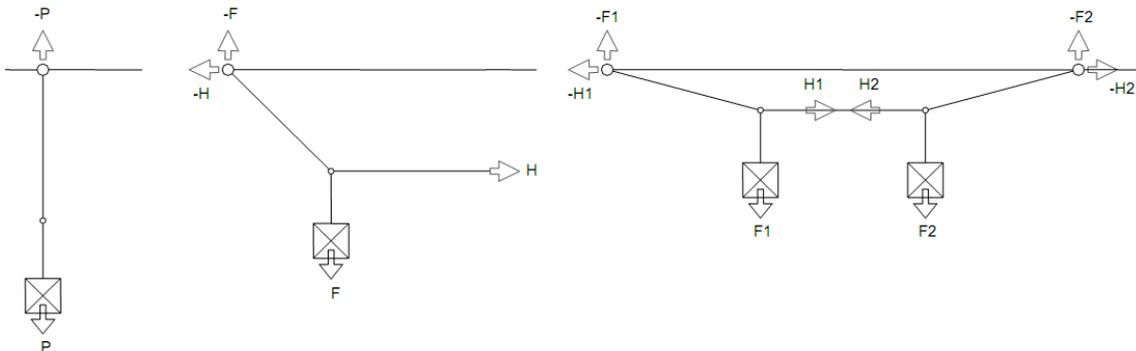


Figura 8 – Forma y cargas en los cables

Si colgamos la carga de dos cables en vez de uno, cada uno de ellos equilibrará la mitad de la carga.

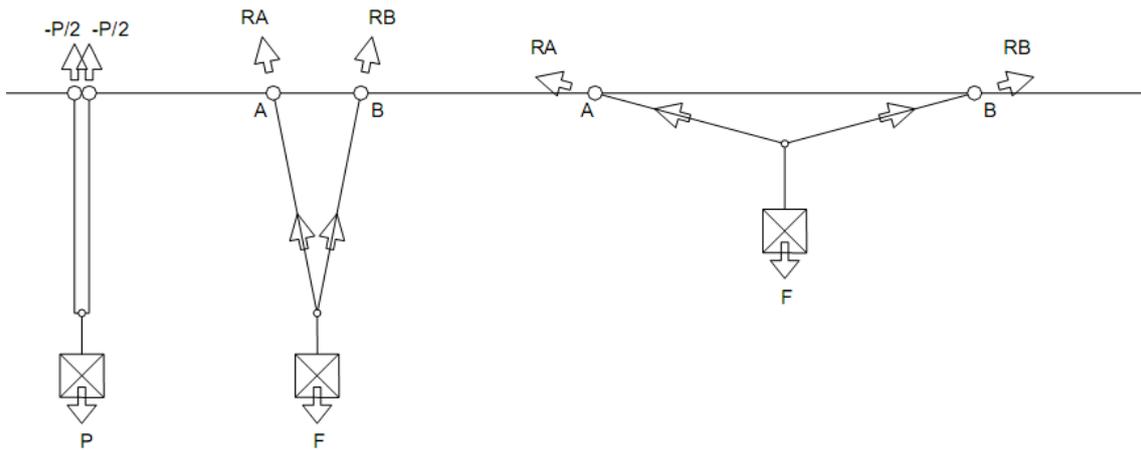


Figura 9 – Equilibrio en cables

Separando los puntos de amarre, la carga quedará suspendida en el espacio creado. El cable transmite la carga a ambos lados, cubriendo el espacio. La forma del cable sigue las direcciones de las fuerzas.

Debido a su reducida sección transversal en relación con su longitud, el cable no puede resistir la flexión, y así modifica su forma para cada nuevo estado de cargas.

Vemos que la componente vertical se mantiene constante: $RA_v = RC_v = F/2$, en tanto que el valor del esfuerzo a que está sometido el cable aumenta: $RC > RA$ a medida que se incrementa la distancia entre los puntos de amarre (L).

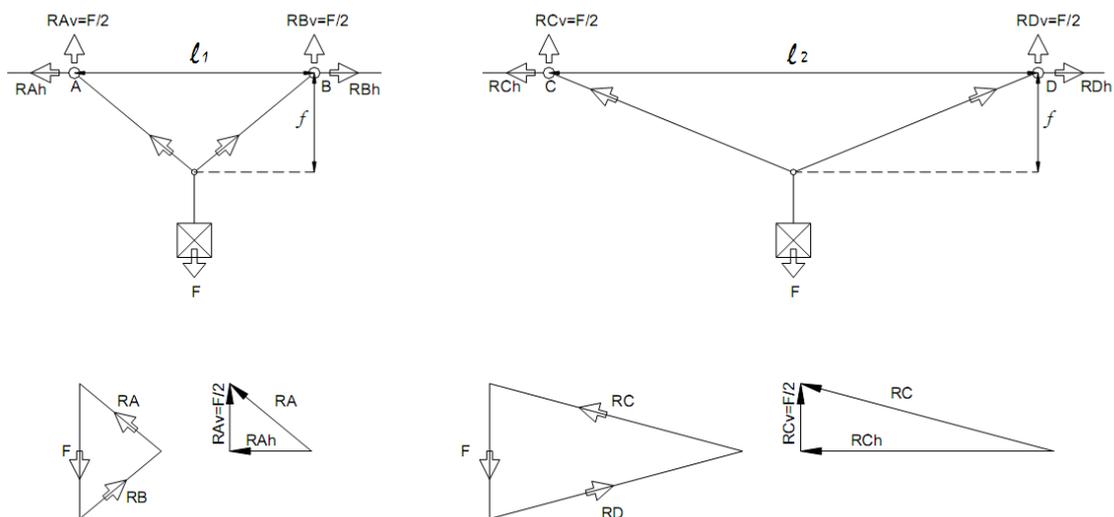


Figura 10 – Esfuerzos en cables

7. VOCABULARIO

Tensión: (en algunos textos se define como esfuerzo) es la fuerza por unidad de superficie. Si una fuerza exterior se aplica en un elemento estructural e imaginamos la sección dividida en muchos cuadrados muy pequeños, la tensión es la fuerza que soporta cada cuadrado.

Ley del cubo – cuadrado: la capacidad de la sección varía con el cuadrado del tamaño de la estructura, mientras que la carga de gravedad varía con el cubo del tamaño. Al aumentar la escala de una estructura, los elementos estructurales deben crecer desproporcionadamente.

Elasticidad: muestra el comportamiento de ciertos cuerpos en los que la deformación es proporcional a la fuerza aplicada y recuperará su tamaño original al retirar la fuerza.

Módulo de elasticidad: relación entre la tensión y la deformación. Es la pendiente de la curva en el diagrama de tensión-deformación. A mayor pendiente mayor módulo de elasticidad.

Comportamiento plástico: A partir de cierto punto (fluencia) el material deforma sin que se produzca incremento de cargas hasta alcanzar la rotura. Al retirar la carga el elemento no recuperará su forma original.

Ductilidad: medida de la capacidad de deformación del material luego de la fluencia. La energía de deformación plástica está representada por el área debajo de la curva (tensión-deformación) del material.

Tracción: (en algunos textos se le llama tensión) tendencia de las partículas de un material a separarse bajo el efecto de las cargas.

Compresión: tendencia de las partículas de un material a juntarse bajo el efecto de las cargas.

8. EJEMPLO

Se quiere dimensionar un tensor que soporta 6 losas iguales.

Las cargas por piso son:

$$P_D=24 \text{ t} \quad P_L=15 \text{ t}$$

La altura de cada piso es de 2.80m y la deformación límite es $L/800$.

Acero tipo F-24

a) Cargas

Por piso:

$$P_{ui}=1.2P_D+1.6P_L=1.2 \times 24 \text{ t} + 1.6 \times 15 \text{ t} = 52.8 \text{ t}$$

$$P_i=P_D+P_L=24 \text{ t} + 15 \text{ t} = 39 \text{ t}$$

Totales:

$$P_u=6P_{ui}=6 \times 52.8 \text{ t} = 316.8 \text{ t}$$

$$P=6P_i=6 \times 39 \text{ t} = 234 \text{ t}$$

b) Deformación límite

Por piso: $d_i=280\text{cm}/800 = 0.35 \text{ cm}$

Total: $d=(6 \times 280\text{cm}) / 800 = 2.1 \text{ cm}$

c) Sección

$$A_g = P_u / (\phi f_y) = 316.8 \text{ t} / (0.9 \times 2.4 \text{ t/cm}^2) = 146.67 \text{ cm}^2$$

$$r_{\min} = L / \lambda_{\max} = 280\text{cm} / 300 = 0.93 \text{ cm}$$

Se eligen tubos cuadrados de 280x280x8 mm

$$A_g = 87.36\text{cm}^2 \quad r_{\min} = 11.09 \text{ cm}$$

Dado que $A_{g_real} < A_{g_nec}$ se opta por colocar 2 tubos. Por tanto las cargas se dividen en 2.

La carga por tubo es:

$$P_u = 158.4 \text{ t} \quad P = 117 \text{ t}$$

d) Verificación

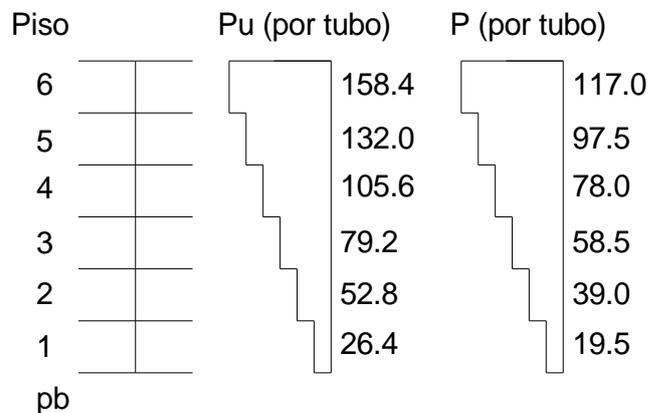
$$P_d = 0.9 A_g f_y = 0.9 \times 87.36\text{cm}^2 \times 2.4\text{t/cm}^2 = 188.7 \text{ t}$$

$$E_f = P_u / P_d = 0.84 \quad \text{similar a } 0.85 \text{ por lo que se acepta la barra.}$$

Deformación parcial del último piso

$$\Delta = PL / (EA) = 117 \text{ t} \times 280 \text{ cm} / (2100 \text{ t/cm}^2 \times 87.36 \text{ cm}^2) = 0.18 \text{ cm} < 0.35 \text{ cm}$$

e) Diagramas de Esfuerzos normales y deformaciones acumuladas.



Piso	P (t)	d (cm)	d acum(cm)
6	117.0	0.179	0.656
5	97.5	0.149	0.477
4	78.0	0.119	0.328
3	58.5	0.089	0.209
2	39.0	0.060	0.090
1	19.5	0.030	0.030

Deformación máxima = 0.656 cm < 2.1 cm Verifica.

9. ANALOGIA ARCOS Y CABLES

En principio el análisis de arcos y cables es similar al análisis de una viga. Viendo el arco de la figura 11, de longitud L , flecha f y carga q , el cálculo de las reacciones es análogo al de una viga. Por lo tanto, las reacciones valen:

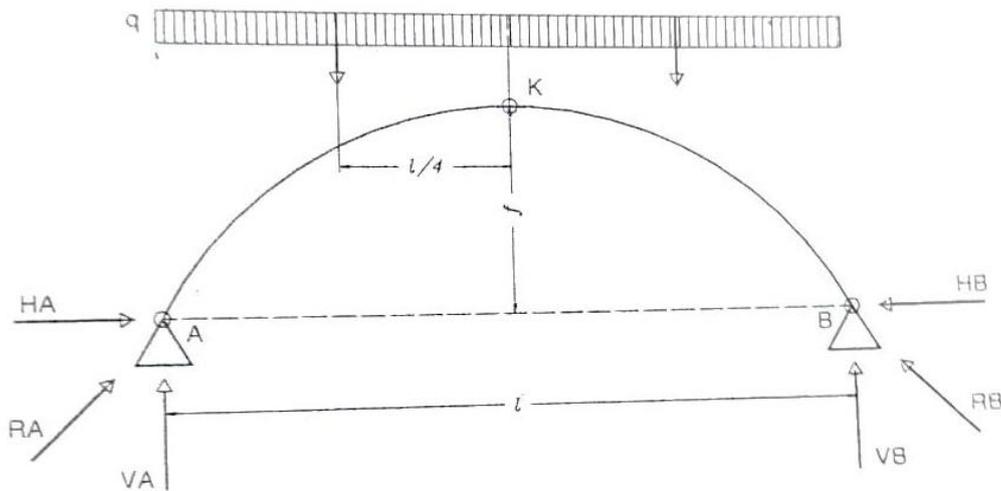


Figura 11

$$V_A = V_B = qL/2$$

Para el cálculo de las reacciones horizontales H_A y H_B , tomamos momentos de todas las fuerzas situadas a la izquierda respecto a la articulación K, que debe ser igual a cero.

$$V_A \frac{L}{2} - H_A f - q \frac{L}{2} \frac{L}{4} = 0 \quad \text{siendo} \quad V_A = q \frac{L}{2} \quad \text{reemplazamos y operamos:}$$

$$q \frac{L}{2} \frac{L}{2} - H_A f - q \frac{L^2}{8} = 0 \quad \implies \quad q \frac{L^2}{4} - q \frac{L^2}{8} = H_A f \quad \implies \quad \frac{2qL^2 - qL^2}{8} = H_A f$$

$$H_A = q \frac{L^2}{8f} = H_B$$

Esta expresión es de mucho interés porque intervienen los parámetros que definen el grado de sollicitación de los arcos.

El máximo esfuerzo en el arco en el apoyo está dado por la composición de las reacciones H_A y V_A

$$R = \sqrt{H_A^2 + V_A^2}$$

Si ahora damos vuelta el arco y consideramos que es un cable en tracción, como en la figura 12, el análisis es análogo para el cálculo de reacciones y esfuerzos. En este caso, con el valor de R se podría diseñar el cable en tracción.

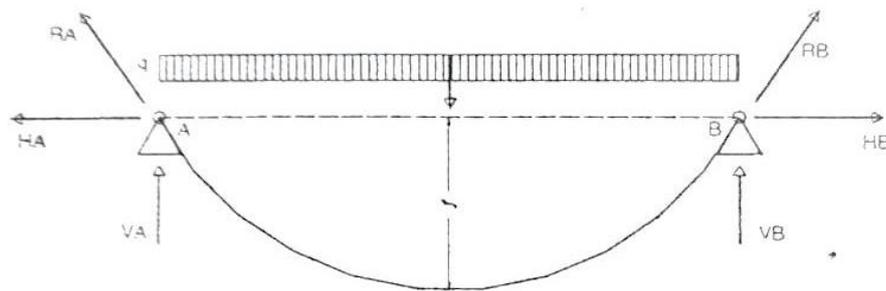


Figura 12

Si en cambio el cable no está sometido a una carga puntual sino a una serie de cargas puntuales, como se muestra en la figura 13 los esfuerzos en el cable, en cada tramo serían:

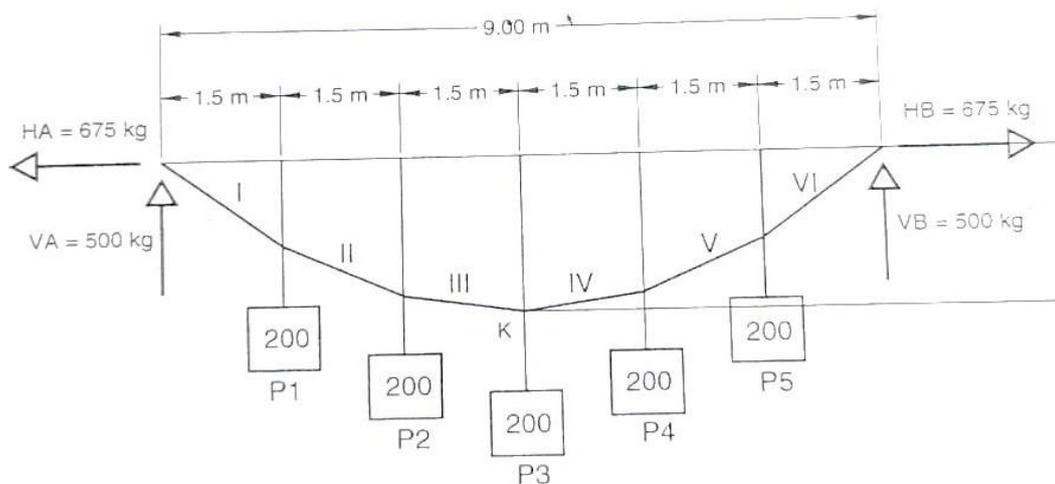


Figura 13

En primer lugar, calculamos las reacciones:

$$VA=VB=nP/2=200 \text{ kg} \times 5/2 =500 \text{ kg}$$

Tomando momentos respecto al punto K:

$$-HA \times 2m+500\text{kg} \times 4.5m-200\text{kg} \times 3m-200\text{kg} \times 1.5m=0$$

$$HA=(2250 \text{ kgm}-600 \text{ kgm}-300 \text{ kgm})/2m=675 \text{ kg} = HB$$

Para calcular el esfuerzo en cada tramo partimos del triángulo de fuerzas con el corte del tramo.

$$T = \sqrt{V^2 + H^2}$$

Para el tramo I:

$$T_I = \sqrt{(500 \text{ kg})^2 + (675 \text{ kg})^2} = 840 \text{ kg} = T_{VI}$$

Para el tramo II:

$$T_{II} = \sqrt{(300 \text{ kg})^2 + (675 \text{ kg})^2} = 739 \text{ kg} = T_V$$

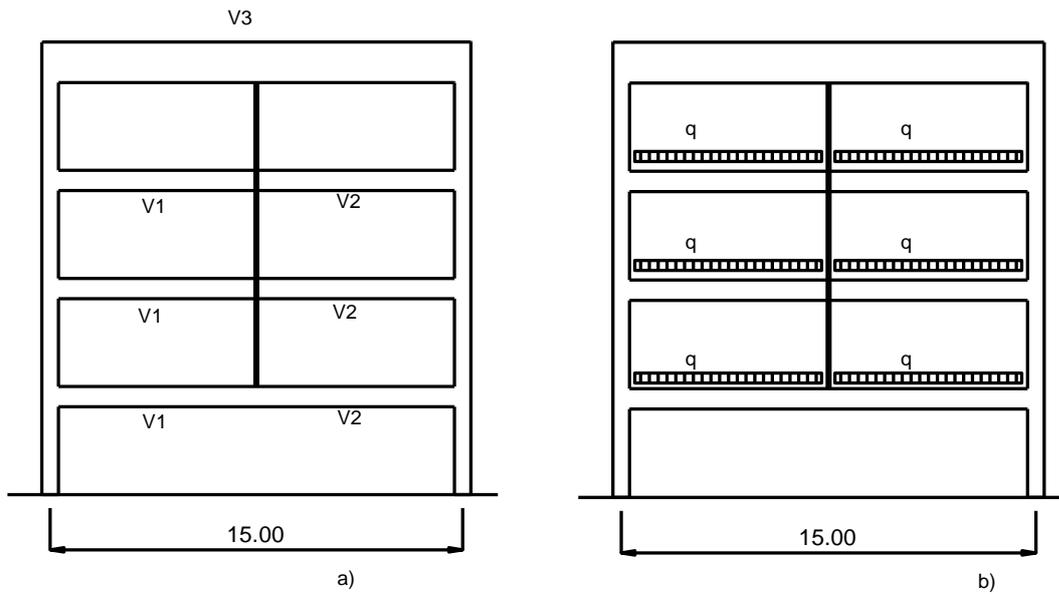
Para el tramo III:

$$T_{III} = \sqrt{(100 \text{ kg})^2 + (675 \text{ kg})^2} = 682 \text{ kg} = T_{IV}$$

Con estos valores se procede a diseñar el cable. Conociendo la sección adoptada, la longitud del tramo y la carga de servicio es posible calcular la deformación de cada tramo y por tanto, sumarlas y obtener la deformación total del cable.

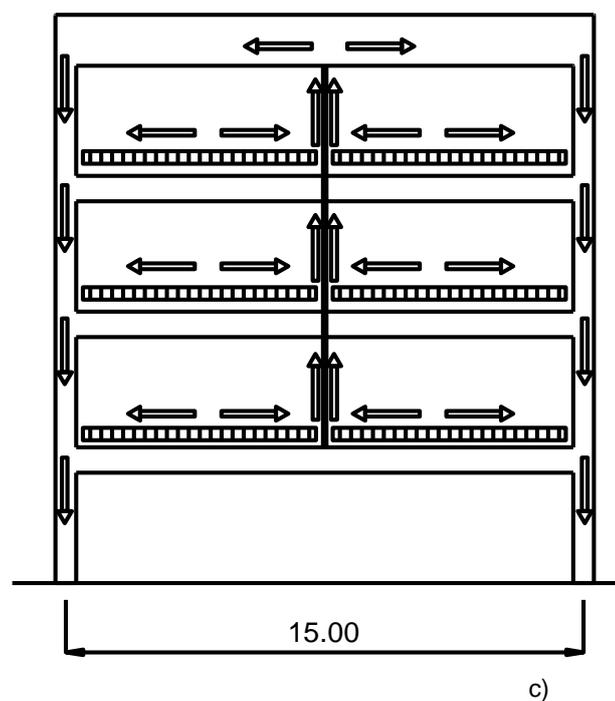
10. TRANSFERENCIA DE CARGAS EN UN EDIFICIO

En este ejemplo se muestra como afecta un tensor en el comportamiento de un sistema estructural. Viendo la elevación del edificio (figura a), se tiene un vano de 15m de longitud y en el medio de el se encuentra un tensor que va desde la viga de primer piso hasta la viga del ultimo nivel. De esta forma, el tensor forma un apoyo para las vigas de los pisos 1, 2 y 3 y queda suspendido de la viga del ultimo nivel. Con esta configuración, las vigas de los pisos 1, 2 y 3 poseen una longitud de 7.5m, por lo que si $h=L/10$, pueden ser de 75cm de altura, sin embargo, la viga del ultimo nivel posee 15m de longitud ($h=1.50\text{m}$) ya que de esta cuelgan los demás pisos.



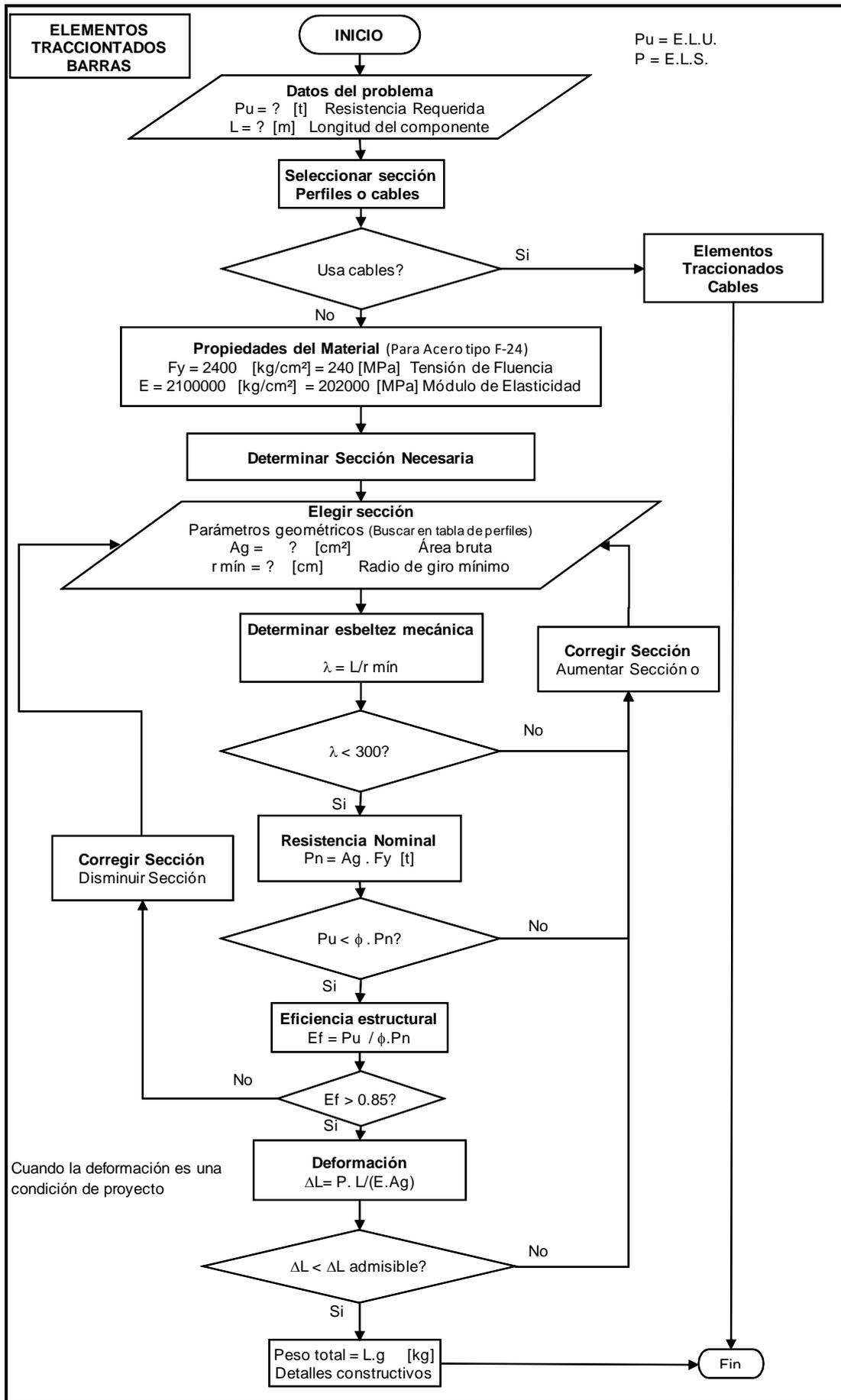
Considerando las cargas q que se encuentran en las vigas (figura b) que pueden ser reacciones de losas, pesos de muros, pesos propios, etc. La transferencia se realiza según se ve en la figura c).

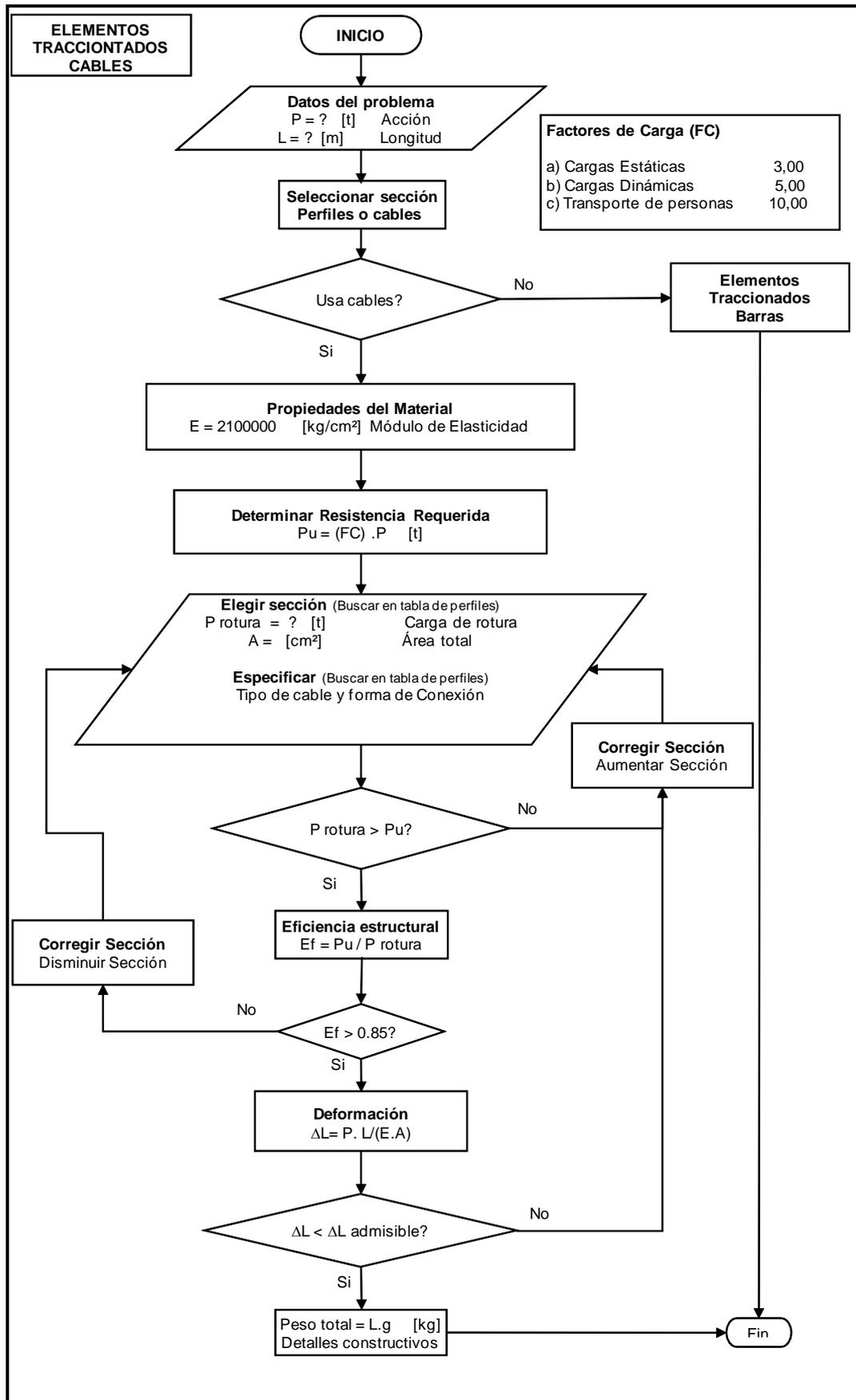
Las vigas v1 y v2 descargan en las columnas laterales y en el tensor central, por lo que las reacciones “bajan” por las columnas y “suben” por el tensor. Esto ocurre en los primeros 3 niveles. Al llegar al ultimo nivel el tensor es una carga puntual en el centro de la luz de la viga V3 y esta a su vez descarga en las columnas laterales. De esta forma, se consigue la transferencia total de cargas hasta la fundación.



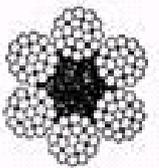
10. DIAGRAMAS LÓGICOS

Se presentan dos diagramas lógicos para barras y cables para describir el procedimiento de dimensionamiento y verificación de componentes en tracción. También se agrega una tabla comercial de cables.





11. TABLA DE RESISTENCIA DE CABLES

TABLA DE RESISTENCIA DE CABLES								
Forma de Construcción	Diámetro nominal del cable	Diámetro nominal del Alambre	Sección total de los alambres	Peso del cable	Resistencia a la Rotura (kg/cm ²)			
					13000	16000	18000	
Nº de cables	(mm)	(mm)	(mm ²)	(kg/m)	(kg)	(kg)	(kg)	
114	6,5	0,4	14,3	0,14	1861	2291	2577	
 6x19=114 alambres un alma de fibras	8,0	0,5	22,4	0,21	2908	3580	4027	
	9,5	0,6	32,2	0,30	4188	5155	5799	
	11,0	0,7	43,9	0,41	5701	7016	7893	
	13,0	0,8	57,3	0,54	7446	9164	10309	
	14,0	0,9	72,5	0,68	9423	11598	13048	
	16,0	1,0	89,5	0,84	11634	14318	16108	
	17,0	1,1	108,3	1,02	14077	17325	19491	
	19,0	1,2	128,9	1,22	16753	20618	23196	
	20,0	1,3	151,2	1,43	19661	24198	27223	
	6 x 19 = 114	22,0	1,4	175,4	1,65	22802	28064	31572
222	9,0	0,4	27,9	0,26	3625	4461	5019	
 6x37=222 alambres un alma de fibras	11,0	0,5	43,6	0,41	5664	6971	7842	
	13,0	0,6	62,7	0,59	8156	10038	11293	
	15,0	0,7	85,4	0,81	11101	13663	15371	
	18,0	0,8	111,5	1,05	14499	17845	20076	
	20,0	0,9	141,2	1,33	18351	22585	25409	
	22,0	1,0	174,3	1,64	22655	27883	31369	
	24,0	1,1	210,9	1,99	27413	33739	37956	
	26,0	1,2	250,9	2,37	32623	40152	45171	
	28,0	1,3	294,5	2,78	38287	47123	53013	
	31,0	1,4	341,6	3,22	44404	54651	61482	
	33,0	1,5	392,1	3,70	50974	62737	70579	
	35,0	1,6	446,1	4,21	57997	71381	80304	
	37,0	1,7	503,6	4,75	65473	80582	90655	
	39,0	1,8	564,6	5,33	73403	90342	101634	
	42,0	1,9	629,1	5,94	81785	100658	113241	
6 x 37 = 222	44,0	2,0	697,1	6,58	90620	111533	125474	
366	20,0	0,7	140,8	1,33	18302	22525	25341	
 6x61=366 alambres un alma de fibras	22,0	0,8	183,9	1,73	23904	29421	33098	
	25,0	0,9	232,7	2,20	30254	37235	41890	
	28,0	1,0	287,3	2,71	37350	45970	51716	
	31,0	1,1	347,6	3,28	45194	55623	62576	
	34,0	1,2	413,7	3,90	53784	66196	74471	
	36,0	1,3	485,6	4,58	63122	77689	87400	
	39,0	1,4	563,1	5,31	73207	90100	101363	
	42,0	1,5	646,4	6,10	84038	103432	116361	
	45,0	1,6	735,5	6,94	95617	117682	132392	
	48,0	1,7	830,3	7,83	107942	132852	149459	
	51,0	1,8	930,9	8,78	121015	148942	167559	
	53,0	1,9	1037,2	9,78	134835	165950	186694	
	6 x 61 = 366	56,0	2,0	1149,2	10,84	149401	183878	206863

12. BIBLIOGRAFÍA

- Engel, H. Sistemas de Estructuras. Blume.
- Salvadori, M; Heller, R. Estructuras para Arquitectos. CP 67.
- Moore, F. Comprensión de las Estructuras en la Arquitectura. Mc. Graw Hill.
- Diaz Puertas, D. Introducción a las Estructuras de Edificios. Ediciones Summa.