

## **CRITERIOS Y ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO DE UN TELEFÉRICO**

**Ing. Marcelo Romo Proaño, M.Sc.<sup>(1)</sup>, David Checa C.<sup>(2)</sup> y Santiago Zambrano E.<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup> **Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
[mromo@espe.edu.ec](mailto:mromo@espe.edu.ec)**

<sup>(2)</sup> **Carrera de Ingeniería Civil  
Escuela Politécnica del Ejército**

<sup>(3)</sup> **Carrera de Ingeniería Civil  
Escuela Politécnica del Ejército**

### **RESUMEN**

El presente artículo estudia el comportamiento de las estructuras requeridas para viabilizar proyectos de teleféricos como medios de transporte; también incluye ciertos aspectos mecánicos del mismo. Se discute el papel de los diferentes componentes estructurales requeridos en los teleféricos.

Se estudian las alternativas de funcionalidad que se pueden presentar en los proyectos y su impacto en la solución estructural correspondiente, así como las diferentes alternativas de sustentación estructural.

Se analizan los estados de carga requeridos para el diseño por resistencia y por esfuerzos admisibles, en base a las características particulares de este tipo de estructuras. Debido a la inexistencia de un código estandarizado de diseño de teleféricos, para la obtención de los estados de carga y los elementos de diseño, se recurre a analogías entre este tipo de proyectos y proyectos de puentes, edificaciones y estructuras preesforzadas, empleándose los códigos, fundamentos y prácticas de diseño correspondientes.

Se aplica el estudio realizado al caso particular de un teleférico destinado a la promoción turística en la zona de San Miguel de Los Bancos, para lo que se utiliza el paquete computacional SAP 2000.

**PALABRAS CLAVES:** cable, anclaje, torre, grandes deformaciones, sistema motriz

## 1. INTRODUCCIÓN

El teleférico es un medio de transporte que consiste en cabinas con capacidad para llevar un grupo de personas. Estas cabinas viajan suspendidas en el aire transportadas por uno o varios cables.

Los medios de elevación en general, son instalaciones que se difunden cada día más porque unen a la seguridad de su funcionamiento, la rapidez de comunicación entre localidades de difícil acceso. Por estas características posibilitan el desarrollo de importantes y famosos centros turísticos y la realización de importantes obras en montaña.

El teleférico en varios países de Latinoamérica ha aportado de manera significativa al desarrollo del turismo. Sin embargo las experiencias locales son escasas y el acceso a información técnica es restringido.



Figura 1 Teleférico de Mérida (Venezuela).

Por ser una estructura poco convencional no se cuenta con un código que norme su diseño y construcción. En consecuencia, es fundamental la aplicación de criterios basados en analogías con otro tipo de estructuras tales como edificios y puentes las cuales han sido estudiadas extensamente.

Un teleférico debe ser visualizado como sistema estructural en el que sus componentes (anclajes, apoyos, cables) tienen comportamientos diferentes pero que funcionan en conjunto.

Los elementos principales en un teleférico son:

- **Cable Carril (Sustentación):** Es un cable de suspensión que debido a la sollicitación de la carga éste se obliga a cambiar su forma, produciendo únicamente esfuerzos de tensión, que se distribuyen uniformemente sobre su sección transversal. Se encuentra suspendido por la estructura portante cuyos apoyos se ubican en dos o más puntos, y a través de ésta se desplaza el vehículo.
- **Cable Motriz:** Es un cable o un par de ellos, con una trayectoria paralela al cable carril, el cual transmite el movimiento desde el sistema motriz hasta la canasta. En algunos casos pueden actuar también como cables carriles.
- **Elementos de Apoyo:** Son elementos verticales, que sirven como sustento del cable carril y el cable motor, que a la vez permiten la circulación del vehículo. Deben ser capaces de absorber las deformaciones en los cables.
- **Vehículo:** Es el elemento que transporta a las personas y su equipaje. El diseño debe brindar facilidad de acceso, comodidad y seguridad.
- **Anclajes:** Son tipos especiales de cimentación, diseñadas para resistir una fuerza de tensión lateral o hacia arriba transmitida al suelo.

- **Sistema Motriz:** El objetivo de este sistema es dar la energía mecánica necesaria para mover el cable motriz y el vehículo. Consta de motor, mecanismos de transmisión de potencia, ejes, frenos y tambores en algunos casos.

## 2. COMPONENTES ESTRUCTURALES

Entre los componentes estructurales que puede requerir un teleférico, para diferentes alternativas de solución, se pueden señalar los siguientes:

### 2.1 SISTEMA DE CABLES

En un teleférico la sustentación está a cargo del cable carril y la transmisión de la potencia sujeta al cable motriz. Cuando un cable soporta la aplicación de las cargas y a la vez transmite el movimiento se le llama "motriz-carril".

Tanto la función carril como motriz pueden trabajar con uno o más cables. Mientras más cables se tenga el coeficiente de seguridad es mayor pero requiere de un alta precisión en la instalación.

### 2.2 SISTEMA DE APOYOS

Pueden ser pórticos, torres o columnas e independientemente de la solución escogida pueden tener las siguientes condiciones de funcionamiento:

- a) **Elemento Pendular:** Es un elemento isostático, simplemente apoyado en su base y unido al cable carril en la parte superior.

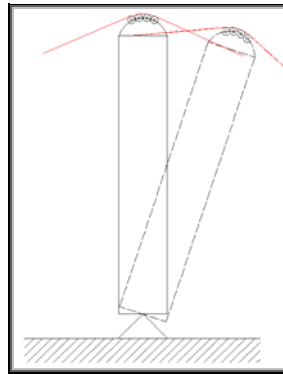


Figura 2 Elemento Pendular.

- b) **Elemento Rígido:** Tiene en la parte superior un elemento mecánico denominado galápago el cual absorbe deformaciones en los cables; se encuentra empotrado en su base y se mueve en el plano horizontal mediante rodillos.

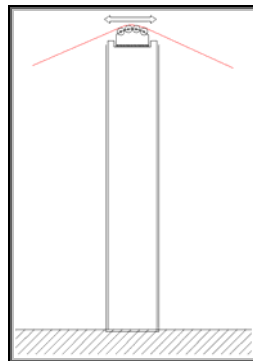
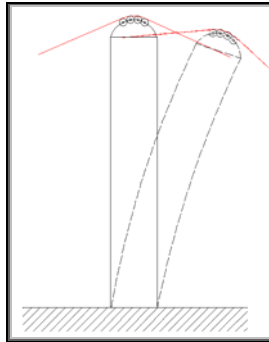


Figura 3 Elemento Rígido.

- c) **Elemento Flexible:** Las deformaciones de los cables son absorbidas en función del material del que está constituido el apoyo.



**Figura 4** Elemento Flexible.

### **2.3 ANCLAJES**

- a) **Bloques de Anclaje:** Son semejantes a muros incrustados en el suelo; su capacidad está regida por la capacidad de soporte debido al empuje pasivo del suelo y/o peso del bloque.
- b) **Barras de Anclaje:** Tipo pilotes de fricción; sus capacidades están definidas por la fricción o esfuerzo cortante que se desarrolla a lo largo del cuerpo cilíndrico del hormigón en forma de anclaje

### **3. ALTERNATIVAS DE FUNCIONALIDAD DEL PROYECTO**

La manera de operar un teleférico tiene influencia sobre la estructuración del mismo. Dependiendo del tipo de proyecto se presentarán diferentes alternativas estructurales y mecánicas viables:

- a) **Trazado con Apoyos Intermedios:** Debido a la longitud apreciable del recorrido, y a las condiciones topográficas ventajosas, pueden colocarse torres de apoyo distribuidas a lo largo del proyecto. Las torres intermedias ayudan a controlar las deflexiones en los cables lo que permite utilizar cables de menor diámetro que el que se requeriría sin los apoyos intermedios.
- b) **Trazado sin Torres Intermedias:** En proyectos de longitud limitada, con topografía que no permite colocar torres intermedias solamente se podrán colocar torres en los extremos del recorrido. De igual manera si la longitud horizontal del proyecto es relativamente pequeña (menor a unos 500 m), y el peso de los vehículos de transporte no es excesivo, puede ser económicamente conveniente no recurrir a las torres intermedias.
- c) **Cable de Circuito Completo:** Cuando existen facilidades técnicas y de distribución en planta en los puntos extremos del trayecto, el cable pueden realizar un recorrido completo del circuito (ida y vuelta en el mismo circuito) con las canastas de transporte, desplazándose siempre en la misma dirección.
- d) **Cable de Medio Circuito:** Cuando no existen facilidades técnicas y de distribución en planta, el cable puede diseñarse para realizar recorridos de medio circuito en sentido normal y en sentido reverso, para prestar el servicio de desplazamiento de las canastas en las 2 direcciones.

## 4. CRITERIOS DE DISEÑO

A pesar de que en muchos países latinoamericanos se utilizan teleféricos con fines de promoción turística, no existe ningún código para el diseño de este tipo de estructuras en la región, por la poca frecuencia con que se diseñan y construyen.

### 4.1 EL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE UN TELEFÉRICO

En un teleférico se integran componentes estructurales con comportamientos muy variados: cables, torres de sustentación, cimentaciones, contrapesos de anclaje, etc.

Los cables son elementos que trabajan axialmente, dentro del rango elástico de comportamiento de los materiales, que deben ser diseñados bajo el paradigma de grandes deformaciones, con factores de seguridad altos por su funcionamiento mecánico.

Las torres de sustentación pueden ser metálicas, o de hormigón armado o preesforzado. Son estructuras generalmente esbeltas, con deformaciones comparativamente pequeñas, que podrán ser diseñadas bajo criterios de resistencia última o de esfuerzos admisibles, dependiendo del material y de la geometría escogida.

La cimentación de los elementos de sustentación generalmente es de tipo tradicional, construida en hormigón, por lo que en el diseño estructural se recurre a cargas últimas, y en el diseño de la superficie en contacto con el suelo se utilizan cargas de servicio.

Los contrapesos de anclaje son elementos cuya sustentación depende del peso que poseen, del empuje pasivo que puede desarrollarse en el suelo, y de la capacidad de resistir a fricción la superficie de contacto entre el contrapeso y el suelo.

Los anclajes del cable de alta resistencia logran su funcionamiento gracias a la resistencia a compresión del hormigón en el que se embeben y apoyan, y la resistencia al desgarramiento por corte del hormigón en el que están incrustados.

### 4.2 ESTADOS DE CARGA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE TELEFÉRICOS

Los estados de carga deben revelar el comportamiento individual y el comportamiento integrado de los componentes estructurales del proyecto.

Para las solicitaciones de servicio se requiere la combinación directa de las cargas que actúan sobre la estructura. Para el caso de presentarse cargas eventuales, se puede mayorar la capacidad resistente en un 33%, o se pueden reducir las cargas en un 25%.

#### ➤ Estados de carga básicos de servicio

$$S = D + D_c + L$$

Ecuación 1

Donde:

S = carga de servicio

D = carga permanente de las estructuras y otros elementos con excepción del cable

D<sub>c</sub> = carga permanente por peso propio del cable

L = carga viva proveniente de las canastillas, las personas y el sobrepeso que llevan las personas.

#### ➤ Estados de carga eventuales de servicio

$$S = 0.75(D + D_c + L + W)$$

Ecuación 2

$$S = 0.75(D + D_c + L + Q)$$

Ecuación 3

Donde:

W = carga eventual de viento

Q = carga eventual de sismo

➤ **Estados de carga básicos últimos**

El ACI-2002 y el CEC-2000 establecen el siguiente estado de carga última base, que será el punto de partida del análisis:

$$U = 1.4D + 1.7L$$

Ecuación 4

En las estructuras de un teleférico existen 2 tipos de cargas permanentes: cargas cuyo comportamiento básico es estático como las torres y los anclajes, y cargas cuyo comportamiento es semidinámico cuando se combinan con las otras cargas gravitacionales pues sufren grandes desplazamientos, como es el caso del cable. En vista de este hecho es necesario diferenciar el comportamiento del peso del cable, cuyo efecto es más parecido al de las cargas vivas sobre edificios que al de las cargas permanentes tradicionales. Es por ello que el factor de mayoración del peso de los cables es más apropiado que sea 1.7; eso modificaría el estado de carga en los siguientes términos:

$$U = 1.4D + 1.7D_c + 1.7L$$

Ecuación 5

Por otro lado el código de diseño de puentes AASHTO establece la siguiente carga última básica, análoga a las cargas ACI-2002 y CEC-2000:

$$U = 1.3 \left[ D + \frac{5}{3}(L + I) \right]$$

Ecuación 6

$$U = 1.3D + (1.3) \cdot \frac{5}{3}(L + I)$$

Ecuación 6a

La carga viva que actúa sobre el cable es en realidad una carga móvil dinámica cuyo comportamiento es análogo al de las cargas vehiculares de puente, por lo que es más adecuado utilizar los coeficientes definidos en el código AASHTO. En tal virtud la ecuación 5 se transformará en:

$$U = 1.4D + 1.7D_c + (1.3) \cdot \frac{5}{3}(L + I)$$

Ecuación 7

Donde:

I = carga de impacto

El impacto es una función directa de la velocidad del vehículo de carga elevado al cuadrado (energía cinética) y puede llegar a ser hasta el 30% de la carga viva. En puentes las velocidades de los camiones de diseño son del orden de 60 Km/h, mientras que en teleféricos la velocidad referencial es del orden de 10 Km/h, lo que vuelve el efecto de impacto 36 veces menor (máximo 0.8% de la carga viva). Es por ello que en la ecuación 7 se puede despreciar el componente de impacto.

$$U = 1.4D + 1.7D_c + (1.3) \cdot \frac{5}{3}L$$

Ecuación 8

➤ **Estados de carga eventuales últimos**

El ACI-2002 y el CEC-2000 establecen los siguientes estados de carga últimos cuando se incluye el efecto del viento y del sismo:

$$U = 0.75[1.4D + 1.7L + 1.7W] \quad \text{Ecuación 9}$$

$$U = 0.75[1.4D + 1.7L + 1.87Q] \quad \text{Ecuación 10}$$

Incluyendo los nuevos elementos establecidos en las ecuaciones 9 y 10, los estados de carga de diseño serían:

$$U = 0.75 \left[ 1.4D + 1.7D_c + (1.3) \cdot \frac{5}{3}L + 1.7W \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

$$U = 0.75 \left[ 1.4D + 1.7D_c + (1.3) \cdot \frac{5}{3}L + 1.87Q \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

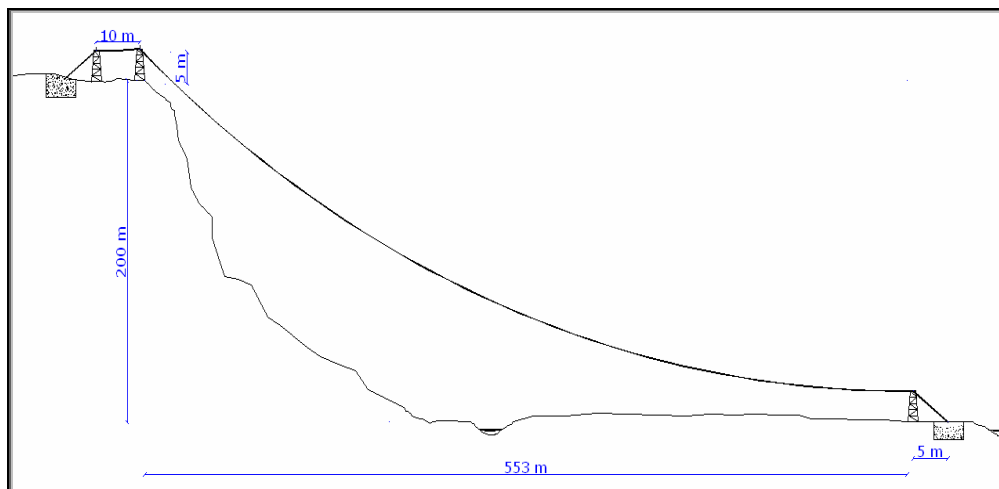
Las ecuaciones 1, 2 y 3 se pueden emplear en el diseño por esfuerzos admisibles de un teleférico, mientras que las ecuaciones 8, 11 y 12 se pueden emplear en el diseño por resistencia.

## 5. DISEÑO DE UN CASO PARTICULAR

Es de vital importancia la información referente a características topográficas, geológicas, climáticas y de funcionamiento. En base a éstas se trazan los lineamientos que regirán la fase de diseño

A continuación se presentan los criterios y sus justificaciones en base a los cuales se diseñó un teleférico ubicado al noroccidente de la provincia de Pichincha en el cantón San Miguel de los Bancos ubicado aproximadamente a 1100 m.s.n.m. en la zona del bosque húmedo tropical.

Se proyecta unir dos puntos con una diferencia de altura de 200 metros y separación de 553 m. Debido a la topografía no es posible la ubicación de apoyos intermedios.



**Figura 5** Esquema del Terreno.

## 5.1 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

Mediante la observación y análisis de las condiciones particulares del proyecto se pretende determinar la alternativa más favorable para lo cual es importante cuantificar dos variables que serán fundamentales en la fase de diseño, estas son: cargas esperadas y velocidad requerida.

- a) **Cargas:** Las cargas actuantes sobre las estructuras de cimentación y sustentación son consecuencia de las que se aplican sobre los cables. Para un primer análisis las cargas consideradas son:
- Peso propio del cable: Está en función del diámetro y tipo de cable utilizado.
  - Carga muerta (Peso del vehículo): Para efectos de prediseño se considera un peso de vehículo de 180 Kg. pero el peso real se definirá luego de diseñar el vehículo de transporte.
  - Carga de viento: La velocidad de diseño es de 80 Km/h. Luego de hacer un análisis de periodos de vibración de la estructura se determina su influencia.
  - Carga por sismo: No se considera para el análisis de las cargas sobre el cable debido a que estos elementos no ofrecen resistencia a flexión, sino que simplemente oscilan.
  - Carga Viva: Luego de una estimación de usuarios se considera un vehículo con capacidad para 8 personas. Se estima un peso por persona de 90 Kg. es decir un peso total de 720 kg.
- b) **Velocidad:** La longitud total del cable deformado desde la torre de direccionamiento y de llegada es de 600 metros y se espera que el recorrido dure aproximadamente 7 minutos, con lo cual se obtiene una velocidad de diseño de 1.42 m/s que es aproximadamente 5 Km/h.

## 5.2 PREDISEÑO

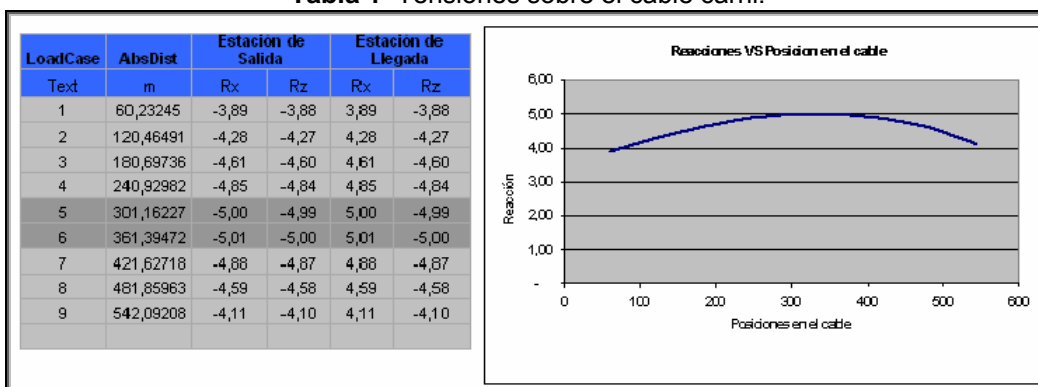
Como primer paso se arma un modelo tentativo, considerando que el elemento dirimente es el cable ya que las tensiones producidas son dependientes de la geometría inicial de éste.

Mediante el programa SAP2000 se ingresan elementos CABLES de 28.7 mm de diámetro, generando APOYOS MÓVILES para simular el efecto sobre las poleas y APOYOS FIJOS en los anclajes. El programa permite la selección de la geometría inicial, que es conveniente definirla en función del punto más bajo respecto a la prolongación horizontal del apoyo, por funcionalidad.

Para simular el movimiento del vehículo se asigna el valor estimado de carga viva (900Kg.) cada décimo de longitud del cable, como estados de carga independientes.

Una vez que se corre el modelo se obtienen los siguientes resultados de tensiones por carga D+L que indican que las mayores solicitaciones en el cable son producidas cuando el vehículo se encuentra en el tercio medio del recorrido, hacia la región baja del cable.

**Tabla 1** Tensiones sobre el cable carril.



### 5.3 DISEÑO

#### a) CABLE CARRIL

Con las tensiones obtenidas en el prediseño se aplica el coeficiente de seguridad recomendado por el fabricante de cables y se compara con ESFUERZOS ADMISIBLES.

Al modelar el sistema estructural en conjunto se hace una corrección de las propiedades del material y una aproximación más real de las cargas actuantes.

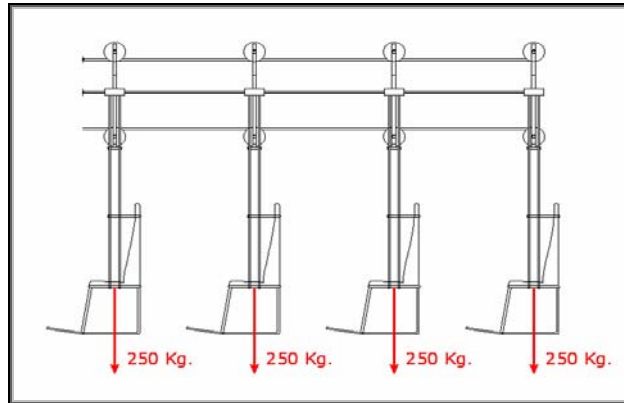


Figura 6 Carga viva

Al aplicarse los factores de seguridad recomendados para cables carriles (3 a 4) se requiere un cable de  $\frac{3}{4}$ " del tipo 6x7 A/A.

Para seleccionar la construcción de cable más adecuado se debe privilegiar las características más sensibles a cambio de una disminución de las menos relevantes.

#### ➤ Resistencia

Es el factor mandatorio y define el diámetro del cable. Una primera aproximación en base a éste ya se realizó previamente y luego de modificar las propiedades del material se hará una verificación o corrección en la selección.

#### ➤ Fatiga y Abrasión

Considerando estos dos factores se selecciona el tipo de construcción más apropiada.

La fatiga es la resistencia a las flexiones y vibraciones, es considerable cuando el cable se dobla alrededor de poleas, tambores o rodillos con bajos radios de curvatura o menores a los recomendados; sin embargo para el caso del cable carril no es considerable ya que el cable no dobla alrededor de la polea sino que la utiliza únicamente como apoyo por lo cual la flexibilidad del cable no es mandatoria.

La abrasión es un factor mucho más representativo en este caso particular, ya que la fricción entre cable y poleas produce un desgaste en los alambres exteriores.

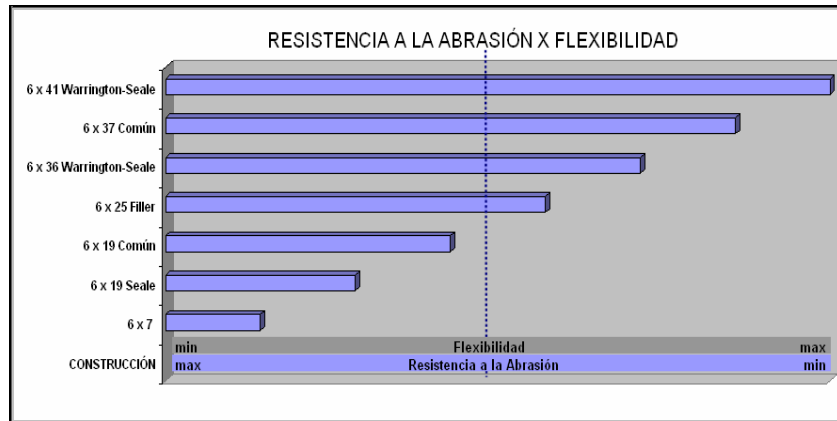


Figura 7 Resistencia a la Abrasión y Flexibilidad

En el gráfico se puede apreciar que la mayor flexibilidad de un cable de acero está en proporción inversa al diámetro de los alambres externos del mismo, mientras que la resistencia a la abrasión es directamente proporcional a este diámetro.

En consecuencia, se debería elegir una composición con alambres finos cuando prevalezca el esfuerzo a la fatiga de doblamiento, y una composición de alambres externos más gruesos cuando las condiciones de trabajo exijan gran resistencia a la abrasión.

Para cable carril es conveniente utilizar una configuración 6 x 7, Debido a que el número de alambres (7), que forman el torón (6) es reducido. Esto indica una construcción de cables formada por alambres gruesos lo cual le da la característica de ser muy resistente a la abrasión, y tiene una flexibilidad reducida, lo que permitirá seguir una trayectoria más homogénea de los vehículos.

➤ **Aplastamiento**

Para disminuir los efectos debido al aplastamiento se selecciona un cable con alma de acero ya que ésta da mayor soporte a los cordones e impide su deformación.

El alma de acero se ha seleccionado considerando también que prima la resistencia a la tracción.

➤ **Exposición a la corrosión**

Como las condiciones en las que va a operar el teleférico no son muy agresivas, no es económicamente recomendable utilizar cables con acabado galvanizado. Es recomendable el terminado negro, conocido también como brillante.

➤ **Otras consideraciones**

Por cuestiones de manejabilidad se recomienda el uso de un cable preformado y arrollamiento corriente.

	DIAMETRO	3/4"
	CONSTRUCCION	6 X 7
	ALMA	ACERO (6/1)
	TORCIDO	REGULAR DERECHO
	ACABADO	NEGRO
	PESO ESPECÍFICO	4.87 T/m <sup>3</sup>
	MODULO DE ELASTICIDAD	7000 kg/m <sup>2</sup>

Figura 8 Detalles del cable seleccionado

Algunas deformaciones que se producen en el cable durante la fase de operación, si son comparadas con las provocadas por la carga de servicio, resultan despreciables. Sin embargo, en esta fase de análisis se estiman este tipo de deformaciones con el fin de descartar la posibilidad que al producirse cambien las condiciones de embarque o desembarque, o dar soluciones en el caso de que resulten representativas.

o **Alargamiento permanente por construcción**

Se produce debido al acomodamiento de alambres y torones cuando se pone en servicio.

El valor práctico de esta característica depende de muchos factores. Los más importantes son el tipo y construcción del cable, el rango de cargas aplicadas y la cantidad y frecuencia de los ciclos de operación. No es posible afirmar cifras exactas para los distintos tipos de cables en uso, pero los siguientes valores aproximados son bastante cercanos a la realidad.

CARGA	Longitud del Cable	
	Alma de fibra	Alma de acero
Liviana (factor de seguridad 8:1)	0.25	0.125
Normal (factor de seguridad 5:1)	0.5	0.25
Pesada (factor de seguridad 3:1)	0.75	0.50
Pesada con muchos dobleces y deflexiones.	hasta 2.0	hasta 1.0

o **Alargamiento elástico**

El módulo de elasticidad también varía con las distintas construcciones de cables, pero generalmente se incrementa con el aumento del área de la Sección de Acero. Usando los valores en la tabla siguiente, es posible obtener una estimación razonable del "Alargamiento Elástico", pero si se requiere mayor exactitud en la información será necesario realizar una prueba experimental con una muestra del cable en consulta.

Módulos de Elasticidad	
Construcción Cables Negros	Módulo de elasticidad Kgs/mm <sup>2</sup>
Serie 6x7 Alma de Fibra	6.300
Serie 6x7 Alma de Acero	7.000
Serie 6x19 Alma de Fibra	5.000
Serie 6x19 Alma de Acero	6.000
Serie 6x37 Alma de Fibra	4.700
Serie 6x37 Alma de Acero	5.600
Serie 18x7 Alma de Fibra	4.300
Serie 18x7 Alma de Acero	4.500

$$\Delta L = \frac{CL}{EA}$$

Donde:

- ΔL = Alargamiento elástico (mm)
- C = Carga aplicada (Kg)
- L = Longitud del cable (mm)
- E= Módulo de elasticidad (Kg/mm<sup>2</sup>)
- A= Área aparente del cable (mm<sup>2</sup>)

Este alargamiento no es de tipo permanente. El programa SAP2000 ya hace el análisis de esta variación en la longitud del cable.

○ **Expansión o Contracción Térmica.**

El "Coeficiente de Expansión lineal" ( $\alpha$ ) de un cable de acero es  $12.5 \times 10^{-6}$  por cada Grado Celsius ( $1^{\circ}\text{C}$ ) siendo, por definición, el cambio en longitud de un cable de 1 metro producido por el cambio de temperatura de  $1^{\circ}\text{C}$ :

La ecuación general que describe los cambios de longitud producidos por los cambios de temperatura es:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

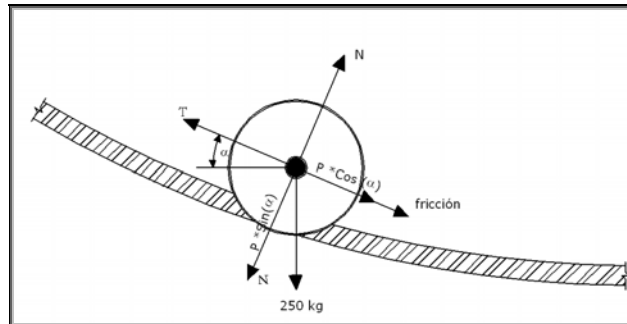
Donde:

- $\alpha$  = Coeficiente de expansión lineal
- $L_0$  = Longitud inicial del cable (mm)
- $\Delta T$  = Cambio de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta L$  = Cambio de longitud del cable

Este cambio significa un aumento en longitud si la temperatura aumenta y una reducción en longitud si la temperatura baja.

**b) CABLE MOTRIZ**

Para el diseño del cable motriz se determina la tensión máxima del mismo haciendo un diagrama de cuerpo libre para la condición más desfavorable, la que se determinó al mayor ángulo de inclinación.



**Figura 9** Diagrama de cuerpo (cable motriz sobre carril)

El diagrama del cuerpo libre se hace considerando la carga por cada par de personas y equipaje es decir 250 kg. Luego se obtiene el total por vehículo lleno. El coeficiente de rozamiento es,  $\mu = 0.005$ .

Dist/rel	Angulo	Normal	Peso x	F Rozamiento	Tensión	T.T. vehículos
0.1	44,32	0,18	0,17	0,01	0,18	0,73
0.2	39,48	0,19	0,16	0,01	0,17	0,67
0.3	35,02	0,20	0,14	0,01	0,15	0,61
0.4	30,91	0,21	0,13	0,01	0,14	0,56
0.5	26,55	0,22	0,11	0,01	0,12	0,49
0.6	23,81	0,23	0,10	0,01	0,11	0,45
0.7	19,80	0,24	0,08	0,01	0,10	0,39
0.8	14,59	0,24	0,06	0,01	0,08	0,30
0.9	8,21	0,25	0,04	0,01	0,05	0,19

La tensión necesaria para elevar el vehículo es de 0.73 Ton., cuando se encuentra más próximo a la estación superior, debido a que es en este punto donde existe mayor ángulo de inclinación.

Para la selección del cable motriz se deben tomar en cuenta los mismos factores que en el cable carril, estos son: resistencia, fatiga, abrasión, aplastamiento y exposición a la corrosión. Teniendo en cuenta las características de mayor exigencia para el caso particular.

➤ **Resistencia**

El programa SAP2000 no permite modelar un cable en movimiento, por lo cual para obtener la carga máxima a la que va a estar sometido el cable motriz se adicionan las cargas axiales obtenidas por peso propio y la necesaria para poner en movimiento al vehículo lleno en el punto mas desfavorable. Ambas calculadas previamente.

Comparadas las tensiones de ambos cables (carril y motriz), las del primero son considerablemente mayores. Sin embargo luego de determinar las condiciones del cable motriz más adecuadas se comprobará las tensiones admisibles con las propiedades correspondientes al material de acuerdo al tipo de cable.

➤ **Fatiga y Abrasión**

El cable motriz dobla alrededor de dos poleas que se determinarán de acuerdo a los diámetros recomendados por el fabricante. Es decir que se debe seleccionar un cable que tenga buen comportamiento tanto a la fatiga como a la abrasión.

Para cable motriz es conveniente utilizar una configuración 6 x 19 debido a que el número de alambres (19), que forman los torones (6) le da la condición de mayor flexibilidad que el seleccionado para cable carril debido a que está formado por alambres delgados, lo cual le vuelve resistente a la abrasión, y proporciona una flexibilidad adecuada para el uso en poleas y tambores.

La selección se la hace en función de la Resistencia a la Abrasión y Flexibilidad (Gráfico 1).

➤ **Aplastamiento**

El aplastamiento no es un factor crítico para el cable motriz, razón por la cual no es necesario utilizar alma de acero en éste, sino que por el contrario al mantener un cable con alma de fibra se obtienen mejores resultados en cuanto a la elasticidad del cable.

El alma de fibra sintética presenta mejor comportamiento en humedad si se los compara con los de fibra natural.

➤ **Exposición a la corrosión**

Las condiciones ambientales son las mismas que para el cable carril, por lo tanto se recomienda el uso de un cable en acabado negro o brillante.

➤ **Otras consideraciones**

Por cuestiones de manejabilidad se recomienda el uso de un cable preformado y arrollamiento corriente.

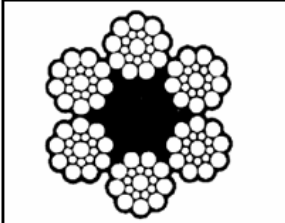
	DIAMETRO	1/2 "
	CONSTRUCCION	6 X 19 (9/9/1)
	ALMA	FIBRA
	TORCIDO	REGULAR DERECHO
	ACABADO	NEGRO
	PESO ESPECÍFICO	4.97 T/m3
	MODULO DE ELASTICIDAD	5000 kg/m <sup>2</sup>

Figura 10 Detalle del cable escogido

No es necesario verificar los alargamientos durante la fase de operación ya que mediante las poleas del vehículo, la sección del cable motriz que se encuentra operando adopta la geometría paralela a la del cable carril.

### c) TORRES

Se diseñan utilizando las herramientas de SAP 2000, que ofrece facilidades gráficas de diseño y rediseño, permitiendo determinar los elementos necesarios para cumplir con las normas y esfuerzos admisibles según AISC, puesto que se utilizó una torre en celosía compuesta por perfiles conformados en caliente.

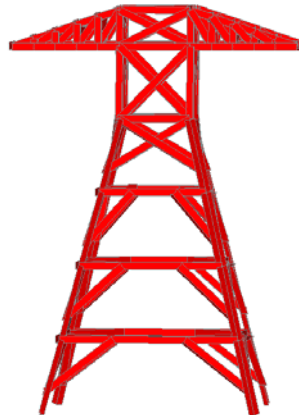


Figura 11 Geometría de la torre

Las cargas laterales, son aplicadas con la ayuda del paquete, que para la parte sísmica permitió la aplicación de los modelos estático equivalente y modal espectral, en el que por ser una estructura que en conjunto tiene un alto período de vibración, el uso del modal espectral minimiza las cargas en función del período fundamental.

Según el modelo estático equivalente del CEC-2000, es una estructura especial que requiere un corte basal igual a:

$$Corte\_Basal = 0.6 * Z * I$$

Con el cual se obtuvo el coeficiente del corte basal de 0.24 W.

La acción del viento se determinó mediante el área de exposición de la estructura, en función de las caras que sufren la acción del viento. Dado que la estructura es interiormente vacía el área expuesta es el doble del área de la superficie frontal.

### d) CIMENTACIONES

Las torres de estación tienen un comportamiento similar, pues éstas son las más cercanas a los anclajes y soportan al mecanismo de transmisión de potencia, el cual le da algunas cargas adicionales a la torre.  $p1 \approx p5$   $p2 \approx p4$

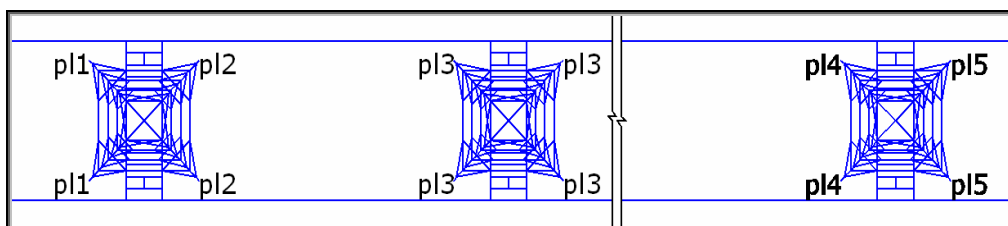


Figura 12 Vista aérea de las torres

La torre central trabaja completamente a compresión, determinándose así un solo tipo de cimentación para los cuatro puntos de apoyo.

Las torres exteriores al tener la polea de impulsión, tienen esta carga adicional que hace que trabajen a compresión en dos puntos y tensión en otros dos.

PI1 y PL5 : TENSIÓN  
PL2, PL3 y PL4 : COMPRESIÓN.

El diseño de la cimentación de los puntos de compresión, se lo realiza con el de la fuerza mayor y como resultado se obtiene un plinto de hormigón armado de área 1m\*1m y 0.30 m de altura. Con armadura de **1  $\phi$  12 mm @ 13 cm** que corresponde a la mínima según CEC-2000. En tal virtud para las cargas de menor valor se opta por el mismo tipo de plinto.

Las cimentaciones sometidas a carga de tensión se diseñan con un peso equivalente que resiste la componente vertical de la fuerza que trata de levantar al apoyo en ese punto y con la fricción suelo-plinto que sea mayor a la componente horizontal de la fuerza actuante.

Para darle estabilidad estructural se opta por plintos de hormigón con armadura mínima sobre los cuales se rellena con hormigón ciclópeo para completar el peso requerido.

Cuando este tipo de cimentaciones se encuentran cercanas a los ríos es necesario tener presente que una crecida puede llegar a sumergirlas completamente. Para esto, el peso específico del hormigón ciclópeo recomendado a usar es 1.2 T/m<sup>3</sup>, que corresponde al material sumergido.

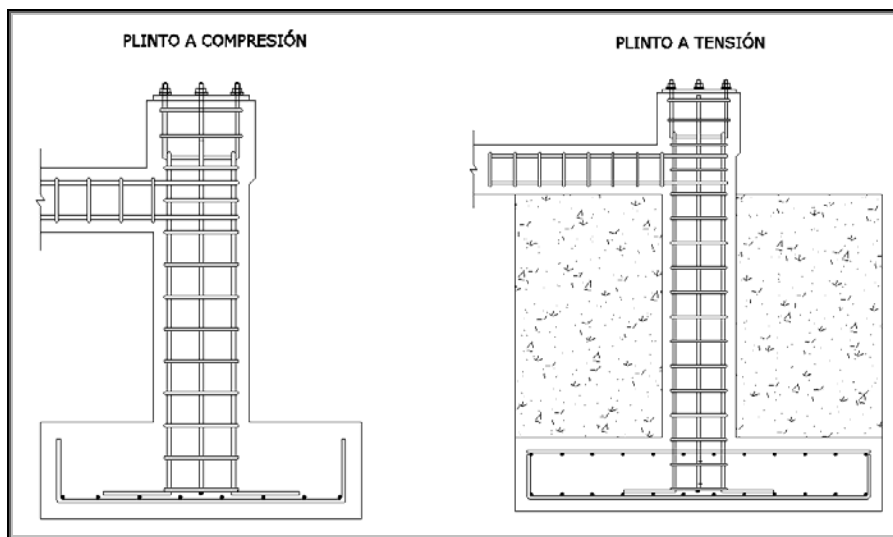


Figura 13 Detalle de cimentación de las patas de la torre

#### e) ANCLAJES

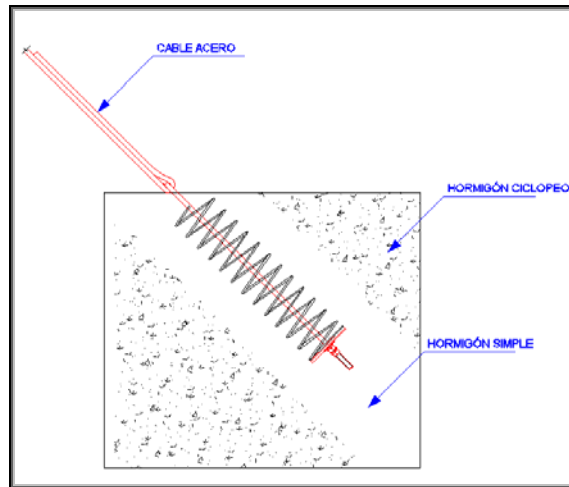
Los bloques de anclaje deben resistir la componente vertical de la tensión del cable carril por peso propio, y la horizontal por fricción y empuje pasivo.

El material constitutivo del bloque de anclaje es hormigón ciclópeo, que con un volumen considerable cumple con esta sollicitación, sin afectar mayormente al costo.

Es recomendable, cuando las condiciones lo sugieran, hacer la consideración que el peso del bloque puede verse considerablemente disminuido ante la eventualidad que se encuentre totalmente sumergido.

Para garantizar la adherencia entre el cable y el bloque de anclaje, se diseñó una placa que cumple con las demandas de flexión y corte, es decir que requiere el área necesaria para que se distribuya de una manera uniforme la presión sobre la cara de hormigón de contacto, y

estimando una profundidad de anclaje necesario para garantizar el trabajo a corte sobre el bloque. Con la ayuda de un suncho de varilla de acero de 4200 Kg./cm<sup>2</sup> se garantiza la condición de resistencia al corte y concentración de esfuerzos, para lo cual es necesario reemplazar el hormigón ciclópeo por hormigón simple. Este tipo de detalle se lo adopta de los anclajes de cables en hormigón preesforzado.



**Figura 14** Detalle del anclaje del cable en el bloque de hormigón

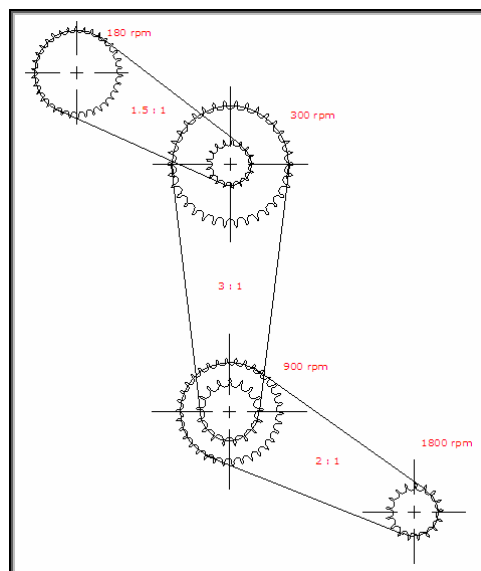
#### **f) SISTEMA MECÁNICO**

El diseño del sistema motriz está en función de la potencia necesaria para generar el movimiento del vehículo entre las estaciones.

Para seleccionar el motor se deben analizar condiciones tales como: Disponibilidad de fluido eléctrico en la zona, potencias disponibles en el mercado y régimen de trabajo de los motores (RPM).

Conocida la potencia necesaria para poner en movimiento el sistema se aplica una coeficiente de servicio de alrededor del 50%.

La transmisión de potencia del motor hacia el cable motriz se la realiza mediante un mecanismo de reducción de velocidad que puede ser mediante, bandas y poleas, cadenas de rodillos o engranes.



**Figura 15** Detalle de un sistema de transmisión de potencia

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En un teleférico confluyen diversos tipos de elementos estructurales, con comportamiento diferenciado, para viabilizar los proyectos.

No existe código de diseño de teleféricos en nuestro país por lo que es necesario recurrir a códigos para estructuras con comportamiento análogo, como ACI, CEC, AASHTO, PCI y AISC.

Si bien los esfuerzos en el cable se obtienen a partir de un análisis estructural, los factores de seguridad se establecen en función del comportamiento mecánico de los mismos.

El diseño de los cables debe ser realizado bajo un esquema de comportamiento elástico del material y grandes deformaciones.

La presencia de torres intermedias dependerá de la longitud total del proyecto y las características topográficas.

La flexibilidad de un cable de acero está en proporción inversa al diámetro de los alambres externos del mismo, mientras que la resistencia a la abrasión es directamente proporcional a este diámetro.

Se debe elegir una composición de cable con alambres finos cuando prevalezca el esfuerzo a la fatiga de doblamiento (cable motriz), y una composición de alambres externos más gruesos cuando las condiciones de trabajo exijan mayor resistencia a la abrasión (cable carril).

Es recomendable realizar la selección de los cables, basados en catálogos actualizados, esto permitirá concebir un diseño concordante con la disponibilidad de los productos en el mercado.

En la fase de operación, un cable debe ser inspeccionado a intervalos regulares para corregir fallas que aceleren el desgaste.