

TRANSPORTE FORESTAL CON CABLES

- I — Generalidades sobre transporte de Madera
- II — Estructura y construcción de un cable
- III — El cable como medio de transporte
- IV — Cables transportadores de uso forestal
 - 1 — Cables terrestres
 - a — Sistema "Va y viene Bajo"
 - b — Sistema "Va y Viene Alto"
 - 2 — Cables Aéreos
 - a — Sistema "Simple de Gravedad"
 - b — Sistema "North Bend"
 - c — Sistema "Wyssen"
- V — Estática de cables suspendidos
 - 1 — Generalidades sobre ingeniería de cables
 - 2 — Cálculo de tensiones de un cable aéreo
 - a — Tensiones en un cable aéreo no cargado
 - b — Tensiones y cargas en un cable aéreo con una carga concentrada.

TRANSPORTE FORESTAL CON CABLES

Por Héctor J. Anaya L. I.F. M.F
Profesor de Ingeniería Forestal

Generalidades Sobre el Transporte de Madera

La explotación forestal es un problema fundamentalmente de transporte. El apeo y la preparación de las trozas, aunque a veces presentan algunas dificultades, son operaciones fáciles de resolver comparadas con la operación de transporte la cual absorbe del 60% al 70% o más del costo total del aprovechamiento del bosque. El 30% o 40% restante es absorbido por las faenas previas de apeo y troceo.

El transporte de la madera en bruto del lugar de apeo a los centros de procesado o consumo se divide en dos clases:

1o. "Transporte Menor", que consiste en llevar las trozas del sitio de corta a un punto común llamado patio de agrupamiento, el cuál debe estar localizado a la orilla de una vía de acceso al bosque, como una carretera, ferrocarril, río, etc. El transporte menor se hace a distancias máximas de 3.5 kms. De acuerdo con las condiciones locales de topografía, suelos, bosque y recursos humanos, este primer transporte se puede realizar por uno de los siguientes métodos:

- a — Manual
- b — Animal
- c — Tractores
- d — Canales naturales o artificiales
- e — Cables

Cuando la distancia entre el lugar de apeo y el patio de agrupamiento es considerable (más de 1.5 kms), el transporte menor se realiza en dos o más etapas. Es decir las trozas se llevan del punto de troceo a un patio intermedio y de aquí al patio ubicado en la vía de acceso. En el caso de existir patios intermedios se puede emplear una combinación de sistemas para lo cual se recomienda una previa planificación de la explotación hecha por un ingeniero o por una persona de experiencia.

2o. "Transporte Mayor" que consiste en movilizar las trozas del patio de agrupamiento al lugar de procesado como aserraderos, plantas de triplex, plantas de pulpa, etc. Este transporte se efectúa a largas distancias, por agua o por tierra, según las circunstancias regionales.

Haciendo un corto análisis de los métodos de transporte menor se puede concluir que el sistema manual y el uso de animales cada día están siendo reemplazados por medios mecánicos, aumentando la producción y justificando la creación de grandes empresas. El tractor de oruga es la máquina básica en los bosques secos de topografía ondulada. Los canales o zanjas son un medio bastante eficiente en los bosques bajos e inundados. Los diferentes sistemas de cables como medio de transporte se pueden emplear en cualquier tipo de bosque, sin tener en cuenta las condiciones ambientales, topográficas y de suelos.

El objeto de este trabajo es hacer un estudio del uso de los cables como medio de transporte en las explotaciones forestales, incluyendo las técnicas de las instalaciones y funcionamiento de algunos sistemas, así como los aspectos básicos de la ingeniería de cables aéreos.

Estructura y Construcción de un Cable

Antes de considerar un cable como medio de transporte es conveniente tener un buen conocimiento de la construcción y estructuración de las partes que lo integran.

Reducido a sus elementos más simples un cable está integrado por numerosos alambres combinados en torones los cuales están trenzados al rededor de un corazón central para formar el cable, Fig. 1.

Analizando por separado las partes constitutivas de un cable se pueden resumir sus principales funciones y características:

Alambres. Son hilos metálicos que constituyen el elemento más simple de un cable. La resistencia de éste así como su flexibilidad y tenacidad dependen del material y diámetro de los hilos, los alambres son de acero y su resistencia está gobernada por el porcentaje de carbono. También existen cables con hilos de hierro pero no se emplean como medio de transporte.

De acuerdo con el tratamiento previo que se le da a los alambres, los cables pueden ser "preformados" o "no preformados". Un cable es preformado cuando a cada uno de los hilos que forman los torones se le ha dado la forma del torcido exacta que ocupará en el cable final. En los cables "no preformados" los alambres no han sido sometidos a ningún proceso previo.

Los cables preformados ofrecen ventajas en lo relativo a la resistencia a la fatiga metálica, flexibilidad, ensortijado, distribución interna de las cargas, giro en las poleas, devanado, enrollado, etc. Estas ventajas hacen que el tipo "preformado", sea más usado que el "no preformado" en el campo de transporte con cables.

Torones. Los torones están formados por varios alambres que se enrollan en forma de espiral al rededor de un hilo metálico que sirve como centro o corazón. A su vez los torones para formar el cable se trenzan al rededor de un centro o corazón que puede ser otro cable independiente o un corazón de cáñamo.

La construcción de un cable está dada por el diámetro y posición relativa de los alambres en cada torón. Existen diferentes construcciones las cuales se denominan así: primero dos números, el primero de los cuales indica el número de torones que forman el cable y el segundo indica el número de alambres que constituyen cada torón, a continuación se indican las iniciales del material del corazón y por último una palabra característica que indica la posición de los alambres en el torón, Fig. 2.

De acuerdo con la dirección de trenzado de los torones y alambres se distinguen cuatro tipos de cables, los cuales se denominan así: "Tren-

zado Regular derecho", "Trenzado regular izquierdo", "Trenzado Lang derecho" y "Trenzado Lang izquierdo". La figura 3 aclara este concepto que resultaría confuso al darle una explicación literal.

Corazón. Es el núcleo metálico o de fibra al rededor del cual se enrollan los torones en forma de espiral. Se le conoce también con el nombre de alma o centro. Además de núcleo de enrollamiento el corazón desempeña la función de depósito de lubricante.

El corazón metálico es generalmente un cable independiente de diámetro pequeño y se denomina con las iniciales C.C.I. (Centro cable independiente).

Los cables de alma metálica presentan mejores cargas a la rotura, soportan altas tensiones y pueden ser sometidos a grandes presiones laterales.

El corazón de fibra es de cáñamo o sisal y se denomina por las iniciales C.S. (centro sisal). Los cables con este tipo de alma son más flexibles y pueden almacenar mayor cantidad de lubricante.

Los manuales y folletos distribuidos por las casas fabricantes, tanto nacionales como extranjeras especifican los pesos por unidad de longitud así como las cargas a la ruptura correspondientes a cada cable según su diámetro y tipo de construcción. Estos datos son la base para el cálculo de la magnitud de las cargas que pueden ser transportadas a lo largo de un cable aéreo.

El Cable como Medio de Transporte

La elección del método más económico y favorable de transporte de madera es uno de los problemas más difíciles en el campo forestal. Existen pocos datos precisos sobre los principios que deben regir el perfeccionamiento sistemático de la explotación forestal y en particular la elección y adaptación de métodos cuya eficiencia ha quedado demostrada en otros países. Pero a pesar de que algunos sistemas son más eficaces que otros, cabe la posibilidad de que lo que resulta eficaz en determinadas condiciones puede resultar impracticable en otros lugares. De ahí el cuidado que debe tenerse al tratar de adaptar un sistema de otro país a un medio de condiciones diferentes.

Cuando se trata del empleo de cables para transporte forestal debe ante todo saberse en qué lugares y condiciones es ventajoso su uso. Los sitios donde los cables pueden emplearse con gran eficiencia son:

a) Donde la construcción de una red de carretera de explotación se haga muy difícil, bien sea por inconvenientes de orden técnico o eco-

nómico.

- b) En bosques sobre terrenos muy abruptos y rocosos.
- c) En el centro de zonas pantanosas.
- d) En zonas de terreno muy suelto con gran peligro de erosión.
- e) En bosques rodeados de terrenos de poco interés económico, donde la amortización de una carretera sería muy difícil.
- f) Donde haya necesidad de extraer rápidamente los productos en casos de incendio, plagas, etc.
- g) En las hoyas hidrográficas de agua para consumo doméstico, donde se debe evitar la contaminación y acumulación de desechos.

Así como los cables transportadores tienen sus ventajas, también presentan algunas limitaciones:

- a) Normalmente los cables obligan al propietario a hacer el máximo de explotación, para amortizar los costos de maquinaria.
- b) El equipo debe usarse continuamente hasta completar el tiempo de servicio o duración empleado para el cálculo de costos de producción.
- c) Los cables exigen operarios hábiles y cuidadoso mantenimiento.
- d) El transporte de pasajeros por cables forestales está absolutamente prohibido.

Cables Transportadores de uso Forestal

Los cables empleados para el transporte de trozas en las explotaciones forestales se pueden clasificar de acuerdo a sus características y modo de operar en dos clases:

- 1) Cables terrestres
- 2) Cables aéreos

A continuación se darán algunos detalles sobre instalación y operación de algunos sistemas de cables transportadores.

La magnitud de este trabajo no permite entrar en análisis de planeación de cada sistema, aunque sí se harán algunas consideraciones sobre el lugar donde se aconseja su uso. La extensión del artículo tampoco permite el análisis de costo de operación y producción.

1 — Cables Terrestres

Se denominan así porque durante el proceso de transporte las trozas van arrastrándose sobre el suelo, Fig. 4 y 5.

En los cables terrestres se pueden distinguir dos sistemas:

- a) "Va y Viene Bajo"

b) "Va y Viene Alto"

Aunque la instalación de estos dos sistemas difiere un poco la mayoría de los elementos son comunes a ambos.

Los elementos comunes son:

- 1) Winche o máquina principal con dos tambores mínimo, uno para accionar la línea de arrastre durante el proceso de transporte y el otro para accionar la línea de regreso que lleva la línea principal al lugar donde están las trozas para transportar.
- 2) Línea principal o línea de arrastre de las trozas durante el proceso de transporte.
- 3) Línea de regreso para llevar la línea principal hacia atrás donde se van a recoger las trozas.
- 4) Poleas de la línea principal y línea de regreso instaladas cerca al winche.
- 5) Poleas esquinera y trasera por donde pasa la línea de regreso, para ir a unirse al cable principal.
- 6) Estobos para amarrar las trozas en un extremo y sujetarlas al punto de unión de las líneas.

A — Sistema "Va y Viene Bajo" Fig. 4

Se emplea para transportar madera en zonas moderadamente inclinadas uniformes o planas generalmente inundadas. Con este sistema el transporte se puede efectuar hasta más de 500 metros. Las trozas se arrastran totalmente sobre el suelo. Para facilitar el deslizamiento de las trozas sobre el suelo, en el punto de unión de la línea de arrastre y de regreso se coloca de manera especial un embudo o cono metálico en el cual se introduce el extremo delantero de la troza, de tal manera que al efectuarse el arrastre el embudo puede pasar obstáculos del suelo como tocones bajos, piedras, raíces, etc. Este sistema es apropiado para trozas grandes.

Un método semejante a este, con winches hasta de 100 H.P., se ha venido empleando para el arrastre del cativo (Prioria copaifera), desde el lugar de apeo hasta los canales o caños en la región del Bajo Atrato, (Golfo de Urabá).

B — Sistema "Va y Viene Alto" Fig. 5

Se diferencia del anterior en que las poleas principales y de regreso van instaladas en un árbol mástil a una altura entre 10 y 20 metros

sobre el suelo, por lo tanto al efectuarse el arrastre la troza no va totalmente sobre la superficie, sino que el extremo delantero se levanta a medida que se acerca al árbol mástil, el cual va sujeto a toconos por medio de cables de sujeción que impiden el pandeo durante el proceso de transporte.

Con este sistema se puede barrer un círculo de radio hasta 6 veces la altura de la polea principal sin que se presenten mayores dificultades durante el arrastre. Este método es apropiado para zonas planas o cuesta arriba, no es muy aconsejable cuesta abajo porque el extremo delantero de la troza no puede levantarse del suelo puesto que la polea principal queda más baja que la carga, hasta cuando esta se coloque en el mismo plano horizontal de la polea principal.

Este sistema se conoce en Norte América con el nombre de "High leald" y es posiblemente el más empleado para las explotaciones de Douglas Fir en el Noroeste de Estados Unidos y Sureste del Canadá. En la Fig. 5 puede apreciarse el montaje de las poleas y demás accesorios así como el funcionamiento del sistema.

2 — Cables Aéreos.

Un cable aéreo es una línea suspendida a determinada altura del suelo. En los cables aéreos las cargas se deslizan a lo largo del cable por acción de la gravedad si es cuesta abajo o por medio de la potencia de un motor si el transporte se efectúa cuesta arriba.

Aunque hay muchos sistemas de cables aéreos cuyas instalaciones y funcionamientos difieren en mayor o menor grado, existen algunos elementos que son comunes a los diferentes sistemas. Dichos elementos son:

1—Winche o máquina principal, con dos tambores mínimo, el uno para accionar la línea principal durante el proceso de transporte y el otro para accionar la línea de regreso del carro- portacargas. Este winche es movido por un motor de gasolina o Diesel, cuya potencia puede variar entre 20 a 200 H.P. o más de acuerdo con la magnitud de las instalaciones.

2—Arboles mástiles anterior y posterior. En el mástil anterior se instalan las poleas principal y de regreso. Este mástil posterior está ubicado en el lugar de troceo. Ambos árboles están sostenidos por cables de sujeción atados en la parte superior. A poca distancia de los cables de sujeción están los soportes de la línea aérea. El montaje de poleas y demás accesorios puede verse en las figuras referentes a cables aéreos.

3—Carro-portacargas, es un mecanismo que se desliza o rueda so-

bre el cable aéreo, cuyo fin es suspender las cargas durante el transporte.

4—Línea principal. Arrastra el carro-portacargas para efectuar el transporte del mástil posterior hacia el patio de agrupamiento.

5—Línea de regreso, sirve para llevar el carro-portacargas vacío hasta el mástil posterior o hasta el lugar donde está la carga. El diámetro de esta línea es menor que el de la línea principal.

6—Poleas principal y de regreso, instaladas en el mástil anterior, tienen como objeto orientar la dirección de la línea principal y de regreso respectivamente. La polea principal es de diámetro mayor que la polea de regreso.

7—Poleas esquinera y trasera, están sujetas a tocones cerca al mástil posterior, tienen como objeto orientar la dirección de la línea de regreso la cual va a unirse a la línea principal.

8—Soportes del cable aéreo, estos soportes están montados uno en el árbol mástil anterior y otro en el posterior, sirven para suspender el cable aéreo, cuyos extremos van a sujetarse a tocones ubicados en la misma dirección de la línea aérea.

9—Cables de sujeción, son líneas atadas por un extremo a la parte superior del árbol mástil y por el otro a tocones vecinos. El objeto de estas líneas es mantener firmes los mástiles y evitar el pandeo durante la operación de transporte.

10—Estrobos, son cables cortos que sirven para atar las trozas al carro-portacargas.

A—Sistema “Simple de gravedad” Fig. 6

Este es el sistema más elemental de cables aéros. El transporte se efectúa cuesta abajo gracias a la fuerza de la gravedad. Las pendientes más convenientes oscilan entre el 12% y 65%. El perfil entre los árboles mástiles debe ser cóncavo para que la distancia entre el suelo y el cable sea suficiente al paso de la carga. Este sistema se adapta mejor para cargas livianas (menores de 150 kilogramos) ya que no existe ninguna línea de control para la carga, la cual marcha a altas velocidades.

El sistema “Simple de gravedad”, es apropiado para zonas montañosas, es fácil de instalar, requiere poco personal, pero no se puede ejer-

cer ningún control sobre la carga durante el tiempo de recorrido. La Fig. 6 explica en detalle la instalación y funcionamiento del sistema, el cual puede operar con eficiencia hasta distancias de 700 metros.

Puede adaptarse para trozas enteras o cargas formadas por varias piezas de madera de pequeñas dimensiones.

B - Sistema "North Bend" Fig. 7

Este sistema de origen americano es apropiado para transporte en plano o cuesta arriba. La Fig. 7 muestra el montaje y funcionamiento del sistema, el cual opera hasta 500 metros. Solo es adaptado para transporte de trozas enteras y no para cargas formadas por varias piezas de madera pequeña, ya que al principio del recorrido la carga va arrastrando sobre el suelo. Este sistema se diferencia de los demás cables aéreos en que lleva una polea de izar de la cual va suspendida la carga. El "North Bend" no se aconseja usar cuesta abajo ya que la polea de izar no puede dar mayor levante a la carga la cual chocaría contra los obstáculos del suelo.

La manera como se desplaza la carga es parecida a la del "Va y Viene Alto" con la diferencia de que en el "North Bend" el extremo delantero de la troza puede alcanzar mayor altura, pasando con menos dificultad los obstáculos del suelo.

Fuera de la polea de izar, los demás accesorios son los comunes a los demás cables aéreos. En este sistema la mitad de la carga la soporta el cable aéreo y la otra mitad la línea principal.

Para cuesta abajo se emplea el "North Bend Modificado (1)". Como lo muestra la Fig. 8. Se obtiene mayor levante de la carga pero el cable aéreo queda soportando los dos tercios del peso transportado.

Con el "North Bend Modificado (2)" Fig. 9, empleado también cuesta abajo se obtiene la máxima elevación de la carga, pero tiene la desventaja de que todo el peso es soportado por la línea aérea.

Una modificación semejante a esta se emplea en las explotaciones forestales de "Pulpa" en el Bajo Calima (Buenaventura), con winches pequeños de aproximadamente 35 H.P.

C - Sistema "Wyssen" Fig. 10.

Este es un sistema suizo empleado para el transporte en fuertes pendientes, donde no pueden operar con eficiencia otros sistemas. Se ha empleado en el Noroeste de los Estados Unidos para transportar trozas

de Douglas Fir en zonas de fuertes pendientes. La distancia entre los soportes depende de la deflexión que se pueda obtener en la línea aérea. La carga se desliza por gravedad a lo largo del cable aéreo y es controlada por una línea que se enrolla en el tambor de un winche colocado en la parte superior. Tiene la ventaja de que la carga se puede recoger a determinada distancia a lado y lado del cable aéreo, pero presenta la desventaja que el carro portacargas es un mecanismo bastante complejo que exige operarios especializados. Para una completa información de este sistema puede consultarse "Logging Cableway" por G. Giordano, o Unasyva Vol. VII No. 4 de 1953.

Estatica de cables suspendidos

El ingeniero dedicado a las explotaciones forestales con cables debe conocer con alguna aproximación la máxima tensión a que queda sometida una línea aérea dada, así como la carga que puede ser transportada bajo ciertas condiciones gobernadas por el perfil del suelo a lo largo del cuál se va a extender la línea, por la carga a la ruptura del cable y por el factor de seguridad elegido.

Los manuales de ingeniería y textos de mecánica que hacen algún estudio sobre líneas aéreas, solo tratan el problema con la condición de que el cable queda sometido a carga uniformemente distribuida y sus dos extremos soportados en el mismo plano horizontal. Sin embargo en la práctica, cuando se trata de transporte a lo largo de un cable aéreo, la situación se presenta diferente, ya que en la mayoría de los casos se trabaja con cargas concentradas que se deslizan a lo largo de cables en espacio inclinado. Por eso, el autor ha querido hacer un estudio sobre este problema, presentando al final del artículo la manera de computar tensiones y cargas para cables de uso forestal.

Este tratado sobre estática de cables suspendidos se dividirá en dos partes:

- 1) Generalidades sobre ingeniería de cables aéreos.
- 2) Cálculo de tensiones en un cable aéreo.

1 . Generalidades sobre Ingeniería de Cables Aéreos

La distancia de transporte a que puede operar un cable aéreo está limitada por la deflexión o flecha de la línea aérea. Por eso el punto de

vista más importante que se debe tener en cuenta cuando se planea la instalación de un cable aéreo, es que la capacidad de la línea para soportar una carga depende de la deflexión del cable cuando está cargado. Para un cable aéreo dado, cuando la pendiente, diámetro de la línea, espacio y factor de seguridad son constantes un incremento en deflexión trae como resultado un incremento en la capacidad de carga.

La deflexión está determinada por la altura de los soportes de los dos extremos del cable sobre el suelo, por el "espacio" o distancia horizontal entre los soportes, por el perfil del suelo entre los árboles donde están los soportes y por la tensión permitida en el cable aéreo. La deflexión se expresa en porcentaje del espacio, así una deflexión de 10 mts., en un cable de 200 mts. de espacio horizontal se dice que es una deflexión del 5%.

En un cable aéreo de espacio inclinado, cuando la deflexión permanece constante la tensión aumenta al aumentar la pendiente como lo demuestran los cálculos tanto gráficos como analíticos.

El propósito de la ingeniería de cables aéreos tratados en este trabajo es primero determinar que deflexión permite el terreno, y luego determinar la capacidad de carga de la línea aérea con esta deflexión, empleando las formas de cálculo establecidas.

Un cable en suspensión adopta la forma de una curva especial, llamada "curva de la catenaria", la cuál será analizada más adelante. Cuando un cable está cargado en un punto la conformación que asume es la de dos arcos de una catenaria común, con el punto de intersección en el lugar de carga.

En un cable aéreo horizontal la máxima tensión ocurre cuando la carga está en el punto medio. En cables de espacio inclinado la máxima tensión se produce cuando la carga está ligeramente desplazada del punto medio hacia el soporte inferior. Sin embargo hasta pendientes del 120% la diferencia entre la tensión producida cuando la carga está en la posición de tensión máxima y la producida cuando la carga está en el punto medio es despreciable. Por lo tanto para simplificar los cálculos matemáticos de deflexiones y tensiones se considerará la carga situada en el punto medio.

El mejor medio para determinar la deflexión permitida de un cable aéreo es el método gráfico, el cual se conoce con el nombre de "Gráfico de deflexiones". Los materiales necesarios para confeccionar dicho gráfico son: papel milimetrado, una cuerda metálica o de fibra, una cadena fina y varios pines y chinchas. A mayor escala en el gráfico mayor exactitud se obtendrá en la medida.

La nivelación de la dirección en la cual va a ser tendido el cable aéreo es indispensable para la confección del perfil. Otra información adicional para diseñar la instalación de un cable aéreo es el peso del carro portacargas ya que la tensión debida a la carga es producida por el peso del carro portacargas más el peso de la troza.

La figura 11 ilustra las características más importantes de un cable aéreo de espacio simple. Esta figura sirve también para aclarar las definiciones de los siguientes términos relacionados con una línea aérea.

- 1) Arbol soporte o árbol mástil, es el empleado para soportar los extremos de la línea aérea.
- 2) Cuerda, es la línea recta entre los soportes del cable.
- 3) Deflexión, es la distancia vertical entre la cuerda y el cable aéreo.
- 4) Punto crítico, es el punto del perfil más cercano a la línea aérea.
- 5) Luz, es la distancia vertical entre la línea aérea y el suelo.

Como se mencionó previamente el mejor sistema para hallar la deflexión permitida en un cable aéreo, es el "Gráfico de deflexiones" el cual se confecciona de la manera siguiente: (ver Fig. 12).

- 1) En papel milimetrado se dibuja el perfil del suelo entre los árboles mástiles anterior y posterior, empleando la misma escala para los ejes horizontal y vertical, (se recomienda una escala de 1:200).
- 2) Se coloca el papel en una pared con el eje horizontal perfectamente nivelado.
- 3) Se colocan dos pines en la elevación estimada sobre el suelo de los soportes del cable.
- 4) Se coloca una cuerda bien tensionada entre los dos pines.
- 5) Se suspende una cadena liviana que tenga como soportes a los dos pines, anclando el extremo superior con un chinche. La cadena asumirá el perfil del cable aéreo que es una catenaria.
- 6) Se cuelga de la cadena un peso liviano por medio de un gancho de alambre delgado, este peso representa la carga. Lleve la carga a la vertical que pasa por el punto crítico y ajuste la flecha de tal forma que permita una luz aproximada de 6 mts., entre el suelo y el cable.
- 7) Obtenida la condición anterior se ancla el otro extremo de la cadena con un chinche.
- 8) Se mueve la carga al punto medio y se lee la magnitud de la flecha en este punto. Esta deflexión se denomina D_c y es la que se emplea para el cálculo de la tensión máxima como se verá más adelante.

Para evitar confusiones en cálculos posteriores se empleará la siguiente nomenclatura para el cómputo de tensiones y cargas en cables aéreos:

- A — Longitud de un espacio inclinado.
- D — Deflexión en el punto medio de un cable no cargado.
- Dc — Deflexión en el centro del espacio producida por una carga concentrada.
- E — Diferencia de elevación entre los soportes.
- H — Componente horizontal de la tensión del cable.
- L — Longitud del cable en el espacio.
- P — Peso de la carga concentrada.
- S — Longitud horizontal del espacio.
- T — Tensión en el cable.
- w — Peso por metro de cable.

2 . Cálculo de Tensiones de un Cable Aéreo

A . Tensiones en un Cable Aéreo no Cargado.

Un cable suspendido por sus dos extremos y sujeto al esfuerzo de su propio peso forma una curva característica llamada "catenaria".

La ecuación de la catenaria referida a un sistema de ejes se expresa de la manera siguiente:

$$Y = \frac{m}{2} (e^{x/m} + e^{-x/m}) = m \cdot \cos \text{hip} \frac{x}{m}$$

donde:

$$m = \frac{\text{Componente horizontal de la tensión } H}{\text{Peso por unidad de cable } w} = \frac{H}{w}$$

e = Base de logaritmos Neperianos.

Como la ecuación de la catenaria involucra funciones hiperbólicas que complican los cálculos matemáticos, entonces asumiendo que el peso del cable en vez de ser proporcional a la longitud del arco de la curva es aproximadamente proporcional a su proyección horizontal la ecuación de la curva se convierte en la ecuación de una parábola, lo cual simplifica los cálculos. Esta aproximación difiere muy poco del resultado correcto en el caso de una catenaria en tensión soportada por sus extremos.

Partiendo del principio que el peso es proporcional a la proyección horizontal se va a calcular la tensión en los soportes de un cable aéreo

horizontal. Refiriéndose a la figura 13 en estado de equilibrio se toman momentos en el vértice "O", como las tensiones son iguales en los soportes basta analizar la mitad de la curva, por lo tanto:

$$\sum Mc = 0 = H \cdot D + \frac{wS}{2} \times \frac{S}{4} - \frac{wS}{2} \times \frac{S}{2} \text{ de donde,}$$

$$H \cdot D = \frac{wS^2}{4} - \frac{wS^2}{8} - \frac{wS^2}{8} \text{ luego}$$

$$H = \frac{wS^2}{8D}$$

$$\frac{T_A^2}{A} = H^2 + V^2 \text{ donde } V = \frac{wS}{2}$$

$$\text{Asumiendo que } \frac{D}{S} = Z \text{ se tiene que } H = \frac{wS}{8Z}$$

$$T_A = \sqrt{\left(\frac{wS}{8Z}\right)^2 + \left(\frac{wS}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4w^2 S^2 + 64 w^2 S^2 Z^2}{64 \cdot 4Z^2}}$$

$$T_A = \sqrt{\frac{w^2 S^2 (1 + 16Z^2)}{64Z^2}} = \frac{wS}{8Z} \sqrt{1 + 16Z^2}$$

$$= \frac{wS^2}{8D} \sqrt{1 + \frac{16 D^2}{S^2}}$$

Como en la práctica solo interesan computos de cables aéreos cargados, se omite el análisis de cables no cargados en espacio inclinado.

La ecuación que más se asemeja a la catenaria es la parábola, por lo tanto la longitud de cable entre los soportes se calculará como una curva parabólica.

La longitud exacta de una curva parabólica está dada por la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{S^2 + 16 D^2} + \frac{S^2}{8D} \log^e \frac{4D + \sqrt{S^2 + 16 D^2}}{S}$$

Sin embargo en la práctica se emplea la siguiente fórmula aproximada:

$$L = S + \frac{8D^2}{3S} + \frac{32 D^4}{5S^3}$$

Cuando la relación $\frac{D}{S}$ es menor que $\frac{1}{10}$ se puede emplear la siguiente fórmula:

$$L = S + \frac{8 D^2}{3S}$$

En las dos últimas fórmulas S es la cuerda entre los soportes, sea espacio horizontal o inclinado.

B — Tensiones y cargas en un cable aéreo con una carga concentrada

Para calcular la carga que puede ser transportada a lo largo de un cable aéreo es necesario ante todo determinar las tensiones a que queda sometido el cable.

En las investigaciones realizadas en el Noroeste de los Estados Unidos con respecto a la ingeniería de cables suspendidos, han desarrollado las fórmulas de tensiones que se emplean en Norteamérica para computar la capacidad de carga en cables aéreos de uso forestal.

La figura 14 muestra un cable aéreo inclinado cargado en el punto medio y las fórmulas correspondientes a las tensiones del cable producidas por su propio peso y por la carga en esta posición.

Con los principios hasta aquí analizados acerca de cables aéreos transportadores es posible entrar a calcular la capacidad de carga de un cable en suspensión.

Para evitar confusiones en el proceso de estos cálculos primero se explicará los pasos consecutivos que se deben seguir y luego aparecerá un formulario especial para efectuar este tipo de cálculos. Para acla-

rar cualquier duda se ha efectuado un ejemplo numérico con datos reales sobre las características de los cables fabricados en el país así como el peso de las maderas nativas.

Como se ha mencionado previamente el procedimiento para calcular la capacidad de carga de una línea aérea requiere una determinación gráfica para hallar la máxima deflexión permitida cuando el cable está cargado, la cual se obtiene por medio del Gráfico de Deflexiones y una determinación matemática de la capacidad de carga, empleando el formulario elaborado para este fin.

Los pasos consecutivos para el cómputo de la capacidad de carga de un cable aéreo son:

- 1) Sobre el "gráfico de deflexiones" determinar la máxima deflexión permitida en el punto medio del espacio cuando el cable está cargado en este punto. Esta deflexión se denomina D_c (ver Fig. 12).
- 2) Elegir un factor de seguridad (F.S.) que no debe ser menor de 3. El límite elástico de un cable de acero es aproximadamente la mitad de la carga a la ruptura, lo cual significa que si el cable trabaja con un factor de seguridad de 2 o menos ocurrirán permanentes deformaciones y elongaciones de la línea. Factores de seguridad mayores de 3 se recomiendan en cuanto sea posible para alargar la vida del cable.
- 3) Hallar la carga de trabajo segura para el F.S., dado que es igual a:
Carga a la ruptura en toneladas.

F. S.

- 4) Se calculan los ángulos α y ϕ , conforme lo indican las fórmulas correspondientes a la figura 14.
- 5) Se halla la tensión máxima en el soporte superior debida al peso del cable, esta tensión se denomina "T debida a w" o simplemente T_w (en toneladas), ver fórmulas correspondientes a la figura 14.
- 6) Se halla la tensión máxima en el soporte superior producida por cada tonelada de carga concentrada en el punto medio, esta tensión se denomina "T por ton. de P" o simplemente T_p (en toneladas), ver fórmulas correspondientes a la figura 14.
- 7) Se halla la resistencia dejada para P. que es igual: carga a la ruptura menos T_w (en toneladas).
- 8) Se halla el P permitido o sea:
(P permitido) x (T por ton. de P.) = Resistencia dejada para P.
de donde:

Cálculo de Capacidad de Carga:

Carga de trabajo segura (ya conocida)	_____	toneladas
Menos "T debida a w"	_____	toneladas
Resistencia dejada para P	_____	toneladas
Resistencia dejada para P		
P permitido =	_____	toneladas
T por ton. de P.		
P disponible para trozas = P permitido — (—) peso carro— =	_____	ton.
P disponible		
Volumen =	_____	mts ³ por viaje.
Peso / mts ³		

El siguiente ejemplo ilustra la manera de efectuar los cálculos en problemas de este tipo.

Problema:

En la instalación de un cable aéreo para transportar madera se conocen los siguientes datos:

- a) Datos del cable (obtenidos del folleto de EMCO-CABLE)
 - diámetro = 1 pulgada, Construcción 6 x 19 C.S.
 - carga a la ruptura = 45,9 toneladas.
 - Peso del carro-portacargas = 0,4 toneladas (asumido).
- b) Datos obtenidos del "Gráfico de deflexiones".
 - Longitud del espacio horizontal = S = 300 metros.
 - diferencia de elevación entre soportes = E = 120 metros.
 - deflexión con carga en S/2 = Dc = 20 metros.
- c) Datos de la madera.
 - Trozas para aserrío.
 - peso aproximado = 1.100 kgs./mt³.
- d) Se pregunta, ¿qué carga de trozas puede transportar este cable?

Solución:

- a) Se clige un factor de seguridad de 3.
- b) Se colocan todos los datos conocidos en el formulario de cálculos.
- c) Se procede a calcular los ángulos, tensiones y cargas conforme lo indican los cálculos del formulario siguiente:

UNIVERSIDAD NACIONAL — INSTITUTO FORESTAL

Forma de computar tensiones y cargas en cables aéreos de espacio simple.

Datos del Cable y Accesorios

Diámetro 1 pulgada, Construcción 6 x 19 c.s. Preformado

Peso 2.38 kgs./mt. lineal

Carga a la ruptura 45.90 toneladas

Factor de seguridad (F.S.) 3

$$\text{Carga de trabajo segura} = \frac{\text{carga a la ruptura}}{\text{F. S.}} = 15,30 \text{ tonelada}$$

Peso del carro 0.4 toneladas

Datos Obtenidos del "Gráfico de Deflexiones"

Longitud del espacio horizontal (S) 300 mts.

Diferencia de elevación entre soporte (E) 120 mts.

Deflexión con carga en S / 2 o sea Dc = 20 mts. = 66.6%

Cálculo de Angulos y Tensiones

$$\text{Tag } \alpha = \frac{40 - 120}{300} = -0,267; \quad \alpha = 14^{\circ} 56'; \quad \cos \alpha = 0,966$$

$$\text{Tag } \theta = \frac{40 + 120}{300} = 0,533; \quad \theta = 28^{\circ} 04'; \quad \cos \theta = 0,882$$

$$\text{Sen } (\theta + \alpha) = \text{Sen } \frac{(28^{\circ} 04' - 14^{\circ} 56')}{2,38 \times 300^2} = \text{Sen } \frac{13^{\circ} 08'}{214.200} = 0,267$$

$$T \text{ debida a } w = \frac{8 \times 20 \times 0,882}{1 \times 0,966} = \frac{141}{0,966} = 17,52 \text{ toneladas}$$

$$T \text{ por ton. de p.} = \frac{0,227}{0,227} = 4,26 \text{ toneladas}$$

Cálculo de Capacidad de Carga

Carga de trabajo segura 15.30 toneladas

Menos "T debido a w" 1.52 toneladas

Resistencia dejada para P 13.78 toneladas

$$P \text{ permitida} = \frac{\text{Resistencia dejada para P } 13,78}{T \text{ por ton de P } 4,26} = 3,23 \text{ toneladas}$$

F disponible para las trozas = P permitida 3.23-peso carro 0,4 = 2,83 ton.

$$\text{Volumen} = \frac{F \text{ disponible } 2,830}{\text{peso / mts.}^3 1,100} = 2,57 \text{ mts}^3 \text{ por viaje}$$

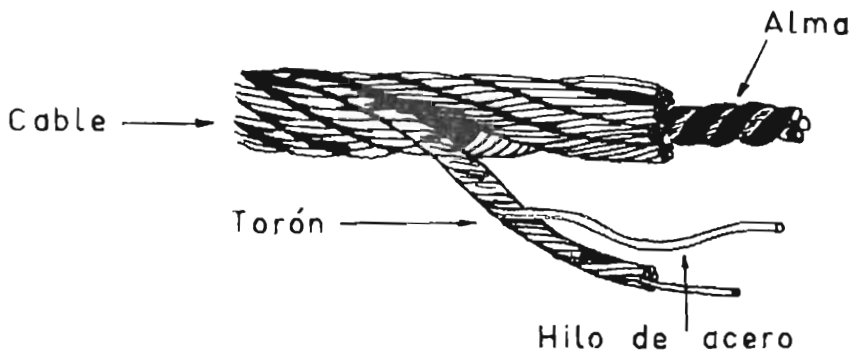


Fig. 1. - Estructura de un cable

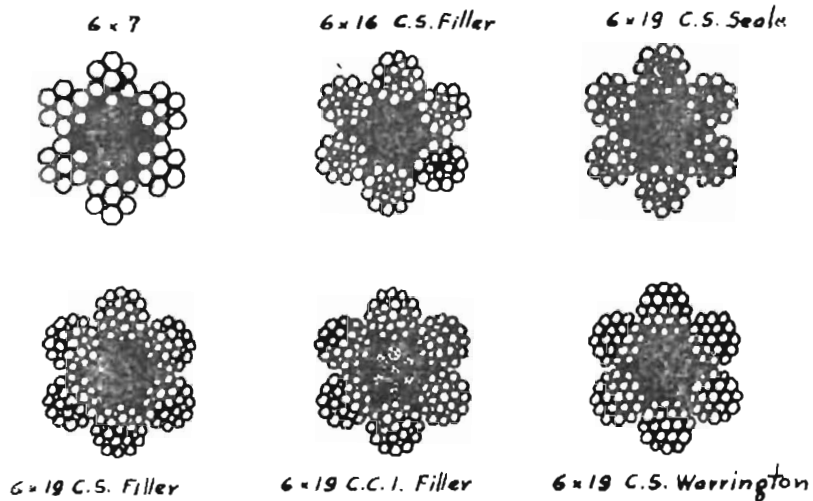


Fig. 2. - Construcciones de cable de acero



Trenzado regular derecho



Trenzado regular izquierdo

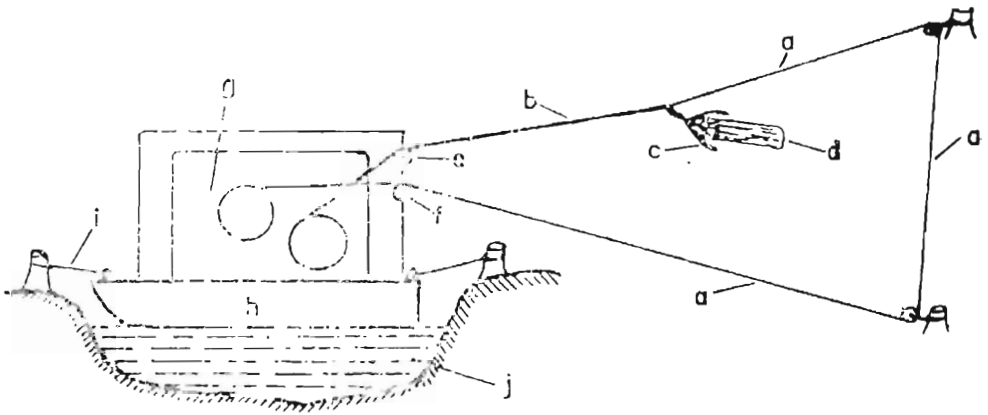


Trenzado Lang derecho



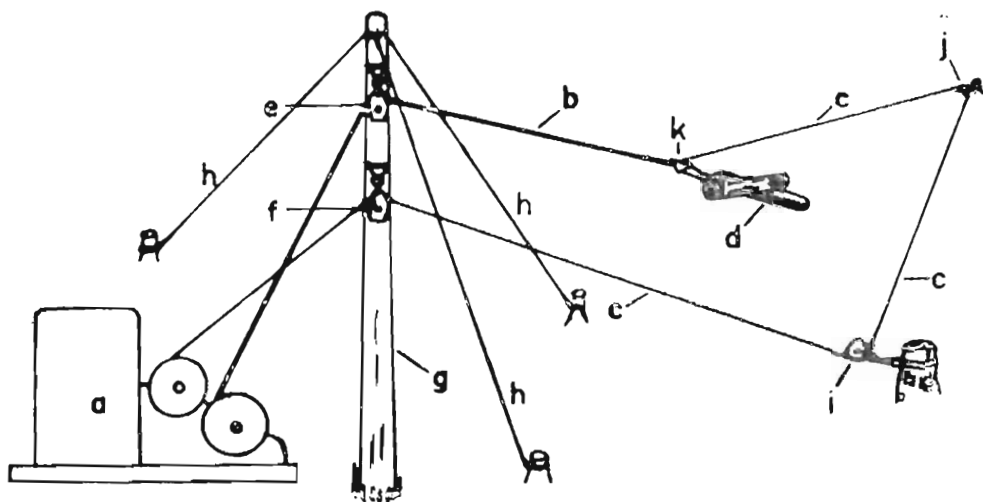
Trenzado Lang izquierdo

Fig. 3. - Diseños de cables de acero



- a - línea de vuelta
- b - línea principal
- c - embudo
- d - treza
- e - polea de la línea principal
- f - polea de la línea de vuelta
- g - winche
- h - planchón
- i - línea de sujeción
- j - río o canal

Fig. 4. - Sistema "va y viene bajo"



- a - winche
- b - línea principal
- c - línea de vuelta
- d - trozas
- e - polea de la línea principal
- f - polea de la línea de vuelta
- g - árbol mástil
- h - líneas de sujeción
- i - polea esquinera
- j - polea trasera
- k - unión de las dos líneas

Fig. 5. - Sistema "va y viene alto"

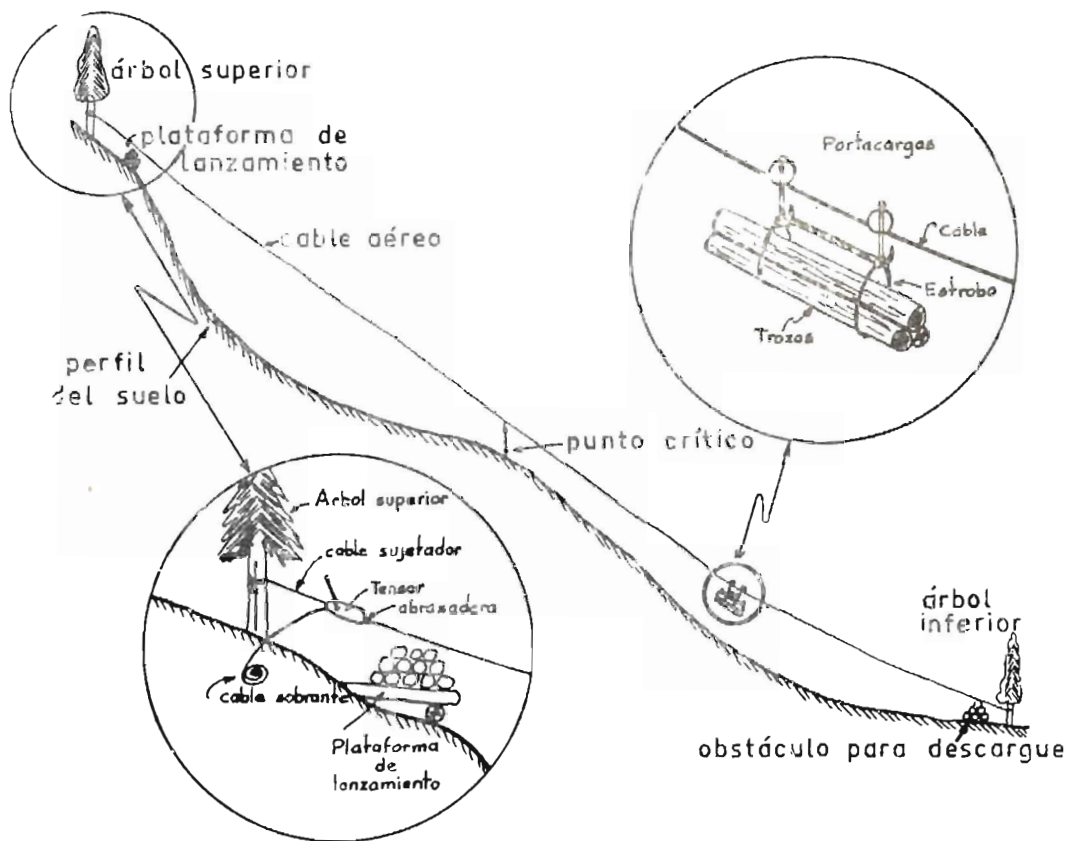
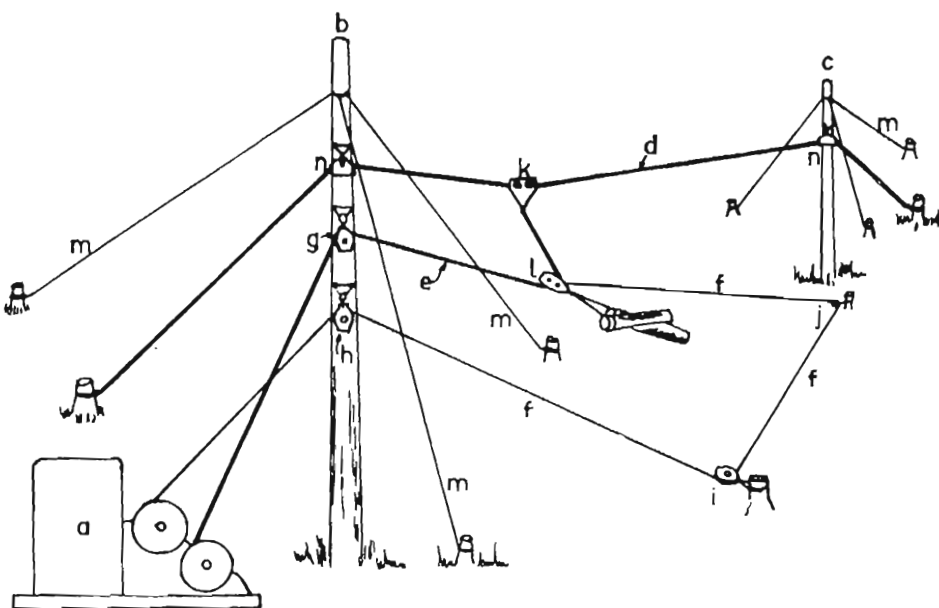
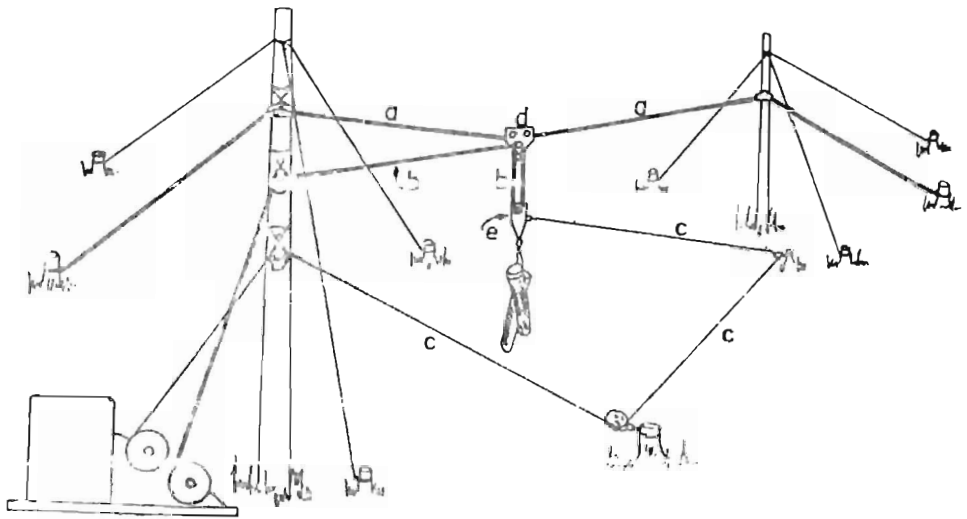


Fig. 6. - Sistema simple de gravedad



- a - winche
- b - árbol mástil anterior
- c - árbol mástil posterior
- d - cable aéreo
- e - línea principal
- f - línea de vuelta
- g - polea de la línea principal
- h - polea de la línea de vuelta
- i - polea esquinera
- j - polea trasera
- k - carro portacargas
- l - polea de izar
- m - líneas de sujeción
- n - soportes del cable aéreo

Fig. 7. - Sistema "North Bend"



- a - cable aéreo
- b - línea principal
- c - línea de vuelta
- d - carro portacarga
- e - polea de izar

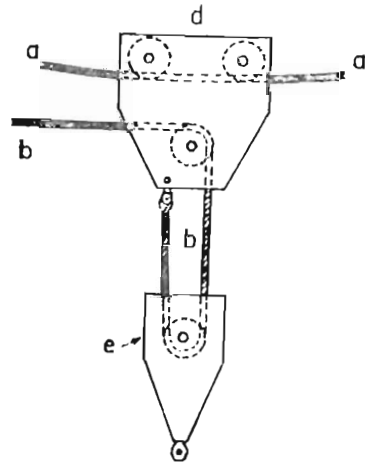
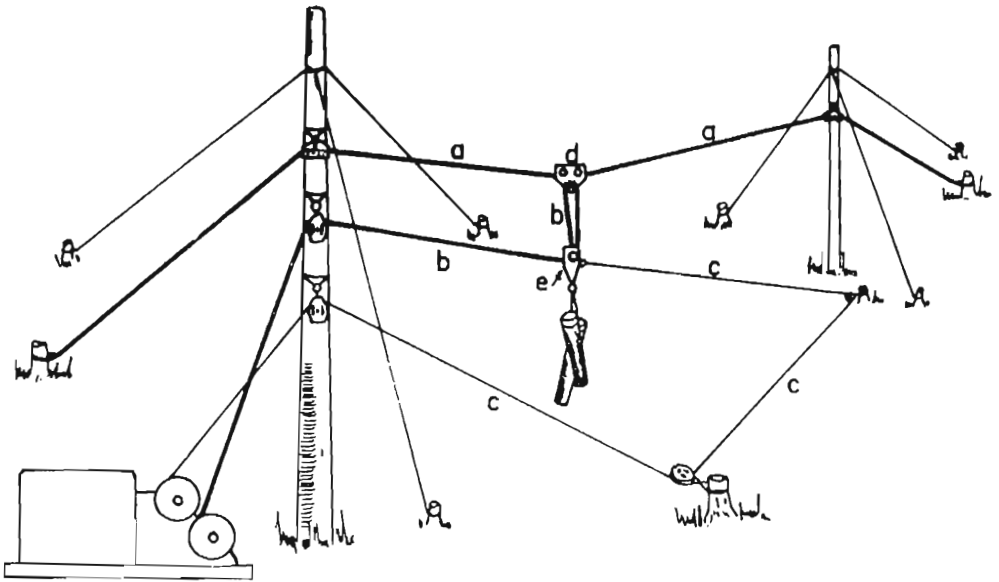


Fig. 8. - Sistema "North bend modificado" (1)



- a - cable aéreo
- b - línea principal
- c - línea de vuelta
- d - carro portacarga
- e - polea de izar

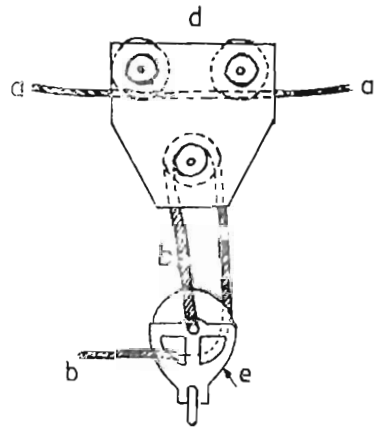


Fig. 9. - Sistema "North Bend Modificado" (2)

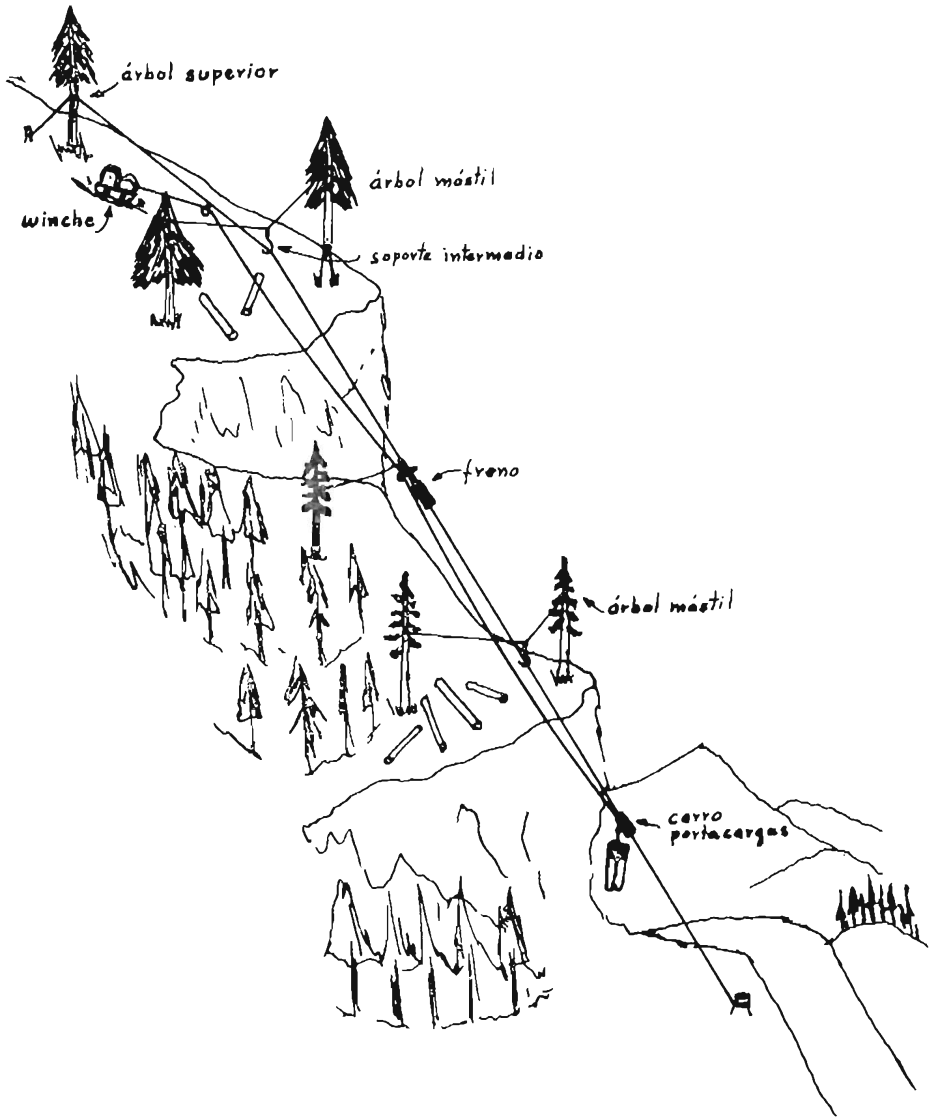


Fig. 10. - Sistema Wyssen

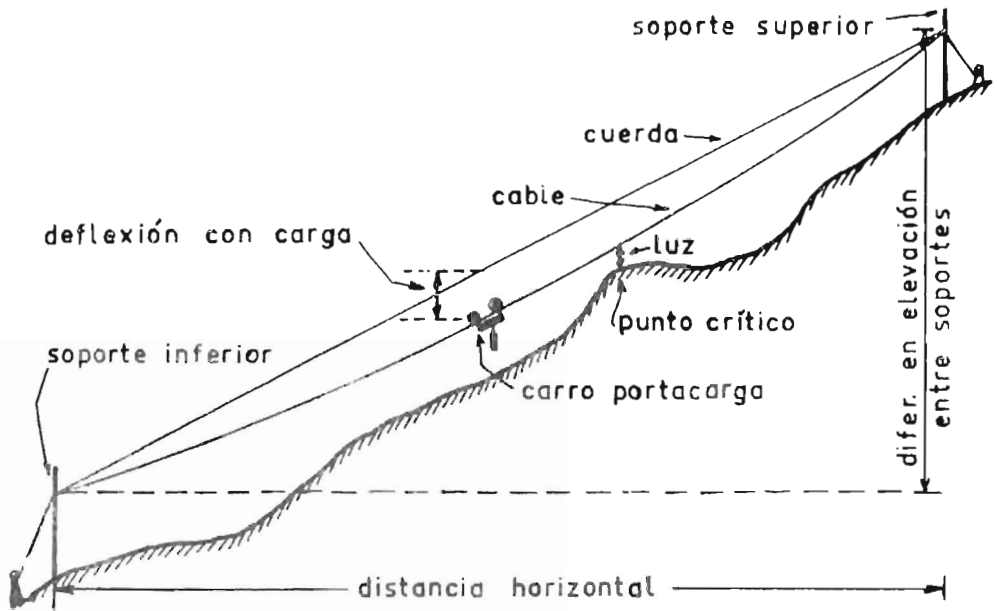


Fig. 11. - Perfil típico de un cable aéreo

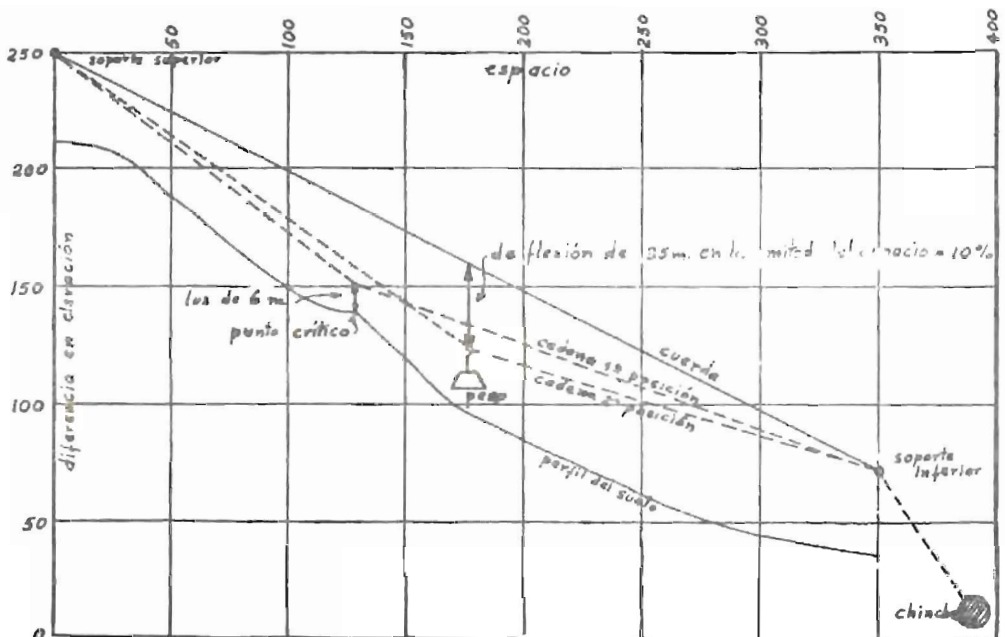
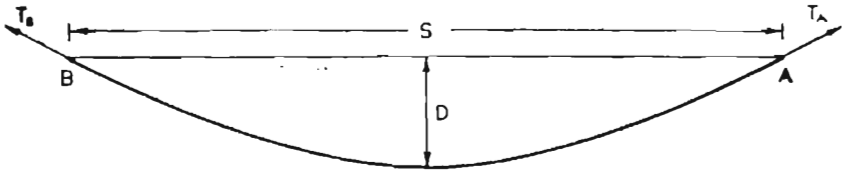
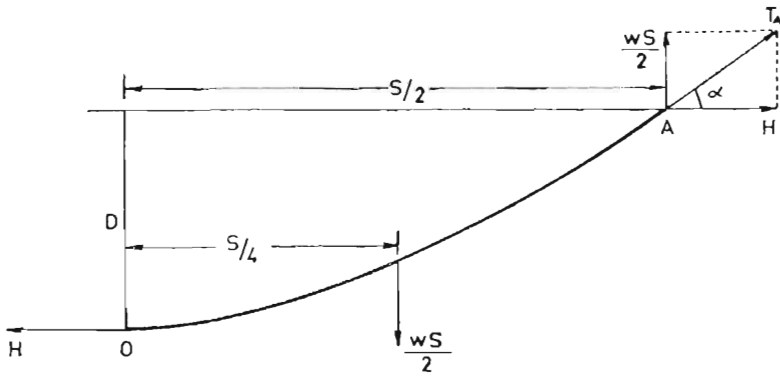


Fig. 12. - Gráfico de deflexiones

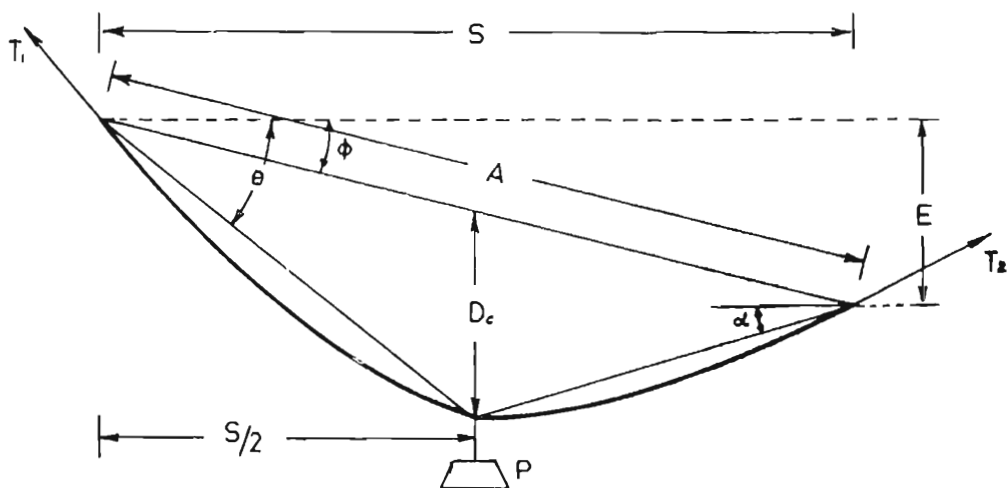


13-A



13-B

Fig. 13. - Cable aéreo horizontal "No cargado"



Fórmulas para hallar los ángulos (como puede ser demostrado analíticamente):

$$\tan \alpha = \frac{2D_c - E}{S} \qquad \tan \theta = \frac{2D_c + E}{S}$$

α es (+) o (-) cuando el vértice está por debajo o por encima del soporte inferior.

Fórmulas para computar las tensiones en los soportes:

$$T_1 = T_{1w} + T_{1p} = \frac{wS^2}{8D_c \cos \theta} + \frac{P \cos \alpha}{\sin(\theta \pm \alpha)}$$

$$T_2 = T_{2w} + T_{2p} = \frac{wS^2}{8D_c \cos \alpha} + \frac{P \cos \theta}{\sin(\theta \pm \alpha)}$$

Fig. 14. - Cable aéreo inclinado en el punto medio