

DL 08 T (153)C.

MFN: 250

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, Centro América

"DISEÑO DE PUENTES COLGANTES PARA PASO DE
TUBERIAS DE CONDUCCION DE AGUA"

TESIS

Presentada a la Junta Directiva
de la
Facultad de Ingeniería
de la
Universidad de San Carlos de Guatemala

por

RICARDO ENRIQUE CATALAN CUELLAR

Al conferírsele el título de

INGENIERO CIVIL

Guatemala, Febrero de 1970

**JUNTA DIRECTIVA
DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Decano:	Ing. Amando Vides Tobar
Vocal Primero:	Ing. Marco Antonio Cuevas
Vocal Segundo:	Ing. Francisco Ubieta B.
Vocal Tercero:	Ing. Adolfo Behrens
Vocal Cuarto:	Br. Alfredo Bonatti
Vocal Quinto:	Br. Eliseo Osorio
Secretario:	Ing. Héctor Centeno B.

**TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO**

Decano:	Ing. Amando Vides Tobar
Vocal Segundo:	Ing. Francisco Ubieta
Examinador:	Ing. Enrique Torrebiarte
Examinador:	Ing. Luis Felipe Mérida
Secretario:	Ing. Héctor A. Centeno

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala establece, presento a vuestra consideración mi trabajo de tesis titulado:

**"DISEÑO DE PUENTES COLGANTES PARA PASO DE
TUBERIAS DE CONDUCCION DE AGUA"**

Tema que me fue asignado por la Junta Directiva de la
Facultad de Ingeniería

DEDICO ESTE ACTO:

A mis padres:

**Salvador Catalán Z.
María Francisca Cuéllar de Catalán**

A mi esposa:

María Antonieta Barrios de Catalán

A mi hija:

Tania Maritza Catalán Barrios

A mis hermanos:

**Carlos
Amanda**

A mis familiares y parientes

A mis amigos en general

CONTENIDO

Introducción	1
CAPITULO I:	
1.1 Tipos de puentes colgantes para paso de tuberías de conducción de agua más comúnmente usados	3
1.2 Elementos principales a considerar en el diseño	7
1.3 Análisis de los puentes colgantes	27
CAPITULO II:	
2.1 Factores determinantes en el diseño	31
2.2 Especificaciones de diseño	32
CAPITULO III:	
3.1 Ejemplo de diseño de un puente colgante para paso de tubería de conducción de agua	33
3.1.1 Tirantes verticales	37
3.1.2 Cable principal	39



3.1.3 Torres	40
3.1.4 Anclajes	47
3.2 Presupuesto	50
CAPITULO IV:	
4.1 Comparación económica con otras soluciones	57
CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFIA	63

INTRODUCCION

Siendo el agua uno de los elementos indispensables para el consumo humano, deben considerarse los factores que puedan alterar sus condiciones de potabilidad. Por esta razón, debe tenerse un sistema de abastecimiento seguro, no sólo para que el agua no falte en ningún momento, una de cuyas causas podría ser la rotura de tuberías, sino que también que el agua que se proporcione a las comunidades no sea vehículo trasmisor de enfermedades. Otra causa que podría alterar la seguridad del sistema de abastecimiento es la contaminación del agua tratada, que podría presentarse al atravesar la tubería de conducción por debajo del lecho de una corriente de agua a la cual han sido vertidas las aguas de una o varias poblaciones y/o los desechos de una o varias fábricas.

En una carretera los puentes constituyen las obras de arte; en un proyecto de introducción de agua las obras de arte de las líneas de conducción lo constituyen los puentes colgantes.

Debido a la configuración topográfica de la República de Guatemala, que es cruzada por una cadena de montañas y volcanes, suelen presentarse a menudo problemas en las tuberías de conducción de agua potable, ya que es necesario salvar obstáculos naturales tales como barrancos, ríos, etc.

Este trabajo de tesis tiene como objetivo principal presentar la forma más adecuada para hacer el diseño de un

puente colgante para paso de tuberías de conducción de agua, analizando los diversos factores que influyen en el mismo.

En el desarrollo del trabajo se irá dando a conocer los elementos principales de que consta un proyecto de esta naturaleza; luego se presenta un ejemplo ilustrativo, haciendo notar que el mismo se hará suponiendo que la tubería está horizontal y que los soportes están a un mismo nivel ya que se considera que es el caso más común en nuestro medio; para los otros casos, es decir cuando los soportes están en planos horizontales diferentes, pero siguiendo los mismos principios básicos que para el diseño de un paso horizontal.

En el capítulo donde se desarrolla el ejemplo se incluye el presupuesto del mismo tanto de los materiales como de la mano de obra, para poder así obtener el costo por unidad de longitud del puente, es decir el costo unitario, para luego hacer una comparación con los costos unitarios de otras soluciones.

En el curso del desarrollo del presente trabajo se presentan esquemas ilustrativos y fotografías, los cuales tienen como fin hacer más clara la descripción.

CAPITULO I

1.1 TIPOS DE PUENTES COLGANTES PARA PASO DE TUBERIAS DE CONDUCCION DE AGUA MAS COMUNMENTE USADOS:

Los diversos tipos de puentes colgantes pueden ser clasificados y agrupados de varias maneras; sin embargo la principal clasificación es la siguiente: (1)

- a) Por el tipo de sistemas de suspensión
 - b) Por el método de rigidez del sistema de suspensión
 - c) Por el anclaje del sistema de suspensión
- a) Por el tipo de sistemas de suspensión: Los puentes colgantes pueden ser clasificados así:
- a.1) Cadenas de eslabones forjados
 - a.2) Cadenas de barras de ojo o argollas
 - a.3) Cables de alambre
 - a.4) Otra miscelánea de arreglos

En el presente trabajo se considera únicamente el sistema de cables de alambre.

- b) Por el método de rigidez del sistema de suspensión, los puentes colgantes pueden ser clasificados así:

(1) "CONSIDERACIONES ACERCA DEL USO DE PUENTES COLGANTES CORTOS EN CAMINOS DE ACCESO". Meza Duarte, Raúl. Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Agosto de 1969.

b.1) Sin rigidez o flexibles: Es aquel que carece de un sistema que le proporcione rigidez, por lo que el cable asume la curva de equilibrio de la carga aplicada, es indudablemente el más sencillo y el de más bajo costo.

El Departamento de Carreteras del Estado de Oregón de E.U.A., establece que los puentes sin rigidez pueden ser usados bajo las siguientes condiciones:

a) En estructuras forestales, cuando la carga viva es insignificante.

b) En construcciones pesadas de luces largas, donde la relación de carga estática a carga móvil es tan grande que la rigidez es innecesaria.

Al decir sin rigidez, no significa que sean completamente flexibles, puesto que la tubería por sí le proporciona cierta rigidez, la cual es siempre menor que la rigidez total que necesita el puente. La tubería trabaja así como una viga continua, la cual transfiere las cargas muerta y viva al resto de la estructura.

Dados los usos que recomienda el Departamento de Carreteras mencionado anteriormente, en el presente trabajo se consideran únicamente los puentes colgantes del tipo sin rigidez. Uno de éstos propósitos es justificar el uso de estos puentes en los pasos de tuberías de conducción de agua, siempre que su solución sea la más conveniente, tanto económica como funcionalmente.

b.2) Con rigidez integral: Comúnmente se designa este tipo como "encadenado"; emplea miembros tirantes pro

pios de sistema de suspensión, derivando una rigidez suficiente sin el empleo de rigidez externa, es decir que el sistema de suspensión actúa también como sistema de rigidez, no siendo necesario el empleo de armaduras (figura 1.1). Este tipo de puente no es usado para pasos de tuberías de conducción de agua.

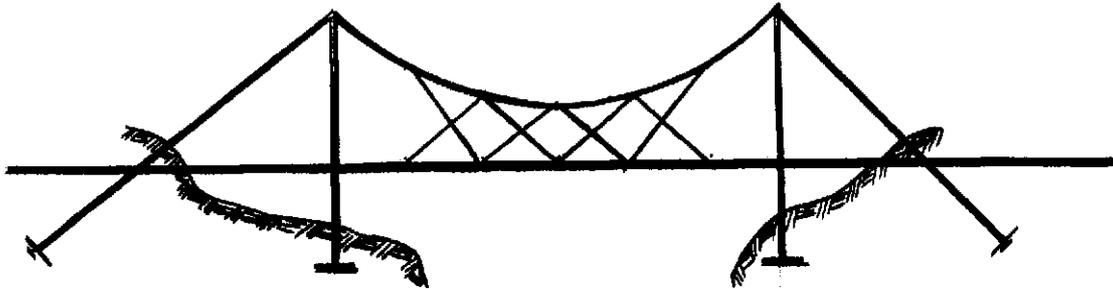


FIG. Nº 1.1

b.3) De tablero rígido: obtiene su rigidez empleando armaduras o vigas, cuya función principal es restringir la deformación del cable bajo carga viva, absorber las cargas concentradas en las juntas, y transmitir las al cable a través de los tirantes verticales o péndolas sobre una amplia área de distribución. Este tipo de puente puede subdividirse de acuerdo al número de articulaciones usadas en el sistema de rigidez, así: (2)

- b.3.1) Sin articulaciones o continuos.
- b.3.2) Con una articulación.
- b.3.3) Con dos articulaciones.
- b.3.4) Con tres articulaciones.

No se entrará en mayores detalles respecto de este tipo de puente colgante, puesto que tampoco es usa

(2) "A PRACTICAL TREATISE ON SUSPENSION BRIDGES". D. B. Steinman. John Wiley & Sons, Inc. 1,949.

do en el fin que se propone en el presente trabajo.

Algunos autores (3) y (4), hacen además una clasificación más general en cuanto a la posición de los extremos:

- a) Extremos en un mismo plano horizontal. (figura 1.2)
- b) Extremos en diferentes planos horizontales. (figura 1.3)

La diferencia entre las dos clasificaciones anteriores, podrá verse posteriormente cuando se analicen las fórmulas a emplear en cada caso.

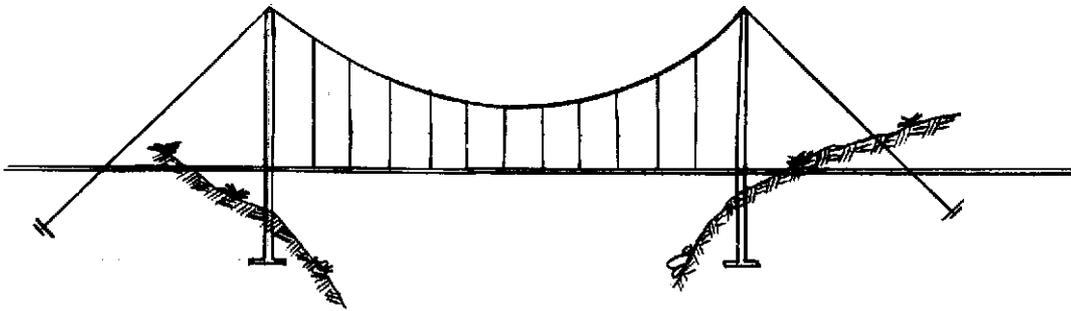


FIG. 1.2

- (3) "WIRE ROPE HANDBOOK" Sheffield Division. Armco Steel Corporation. 1,963.
- (4) "THE THEORY OF SUSPENSION BRIDGES". Pugsley, Sir Alfred. Edward Arnold (Publishers). 1,957.

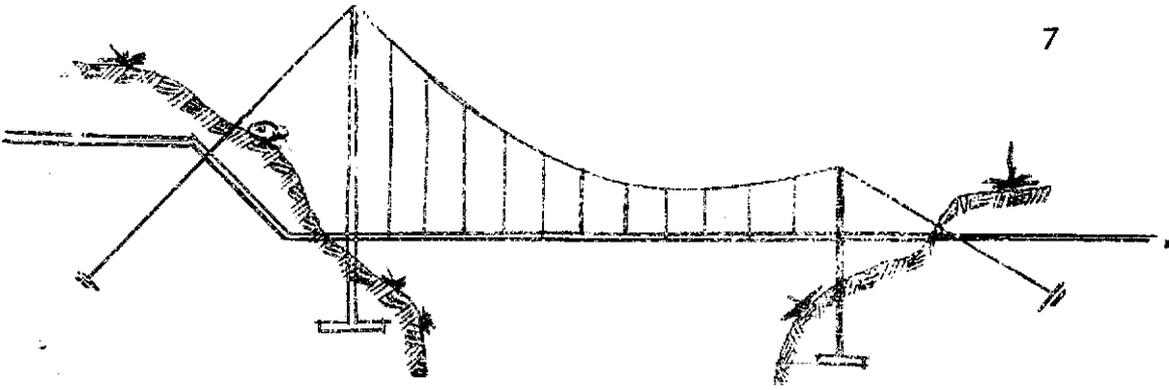


FIG. 1.3

La simbología empleada será identificada posteriormente cuando se consideren las fórmulas que se emplearán en el diseño.

1.2 ELEMENTOS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO:

Los elementos principales que se considerarán en el diseño de un puente colgante para paso de tuberías de conducción de agua depende del tipo de puente que se emplee, según la clasificación hecha en el capítulo anterior. Sin embargo, existen partes constitutivas que son generales en cualquier puente colgante y además esenciales para que el mismo funcione como puente colgante. Dichos elementos son los siguientes:

- a) Cable principal
- b) Tirantes verticales o péndolas
- c) Torres
- d) Anclajes
- e) Accesorios de los cables

- f) Accesorios de la tubería
- g) Otros

1.2.ā) CABLE PRINCIPAL:

En primer lugar se procederá a describir lo que es un cable (5). Se dice que un cable es un conjunto de alambres con un arrollamiento espiral, de modo que formen un todo más o menos grueso y apto para resistir, fundamentalmente la tensión. El alambre empleado en la fabricación de cables es un hilo de acero que suele definirse por su diámetro y características del material con que está fabricado. Algunos cables están formados por un alma, metálica o textil, y un trenzado de alambres en torno a ella.

Si un cable suspendido en sus extremos está sometido a cargas verticales, éste tomará la forma del polígono funicular de equilibrio de las cargas aplicadas(2). El cable se considera perfectamente flexible, es decir que el mismo no ofrece resistencia a la flexión, o la misma es tan pequeña que puede considerarse despreciable sin cometer errores graves.

Para una carga uniformemente distribuida, el cable principal adoptará la forma de una parábola, según la demostración que se hará próximamente. En el caso de los puentes colgantes para paso de tuberías de conducción de agua, el peso de la tubería y el agua se consideran cargas uniformemente distribuidas, despreciándose el peso de los tirantes verticales o péndolas, siendo por consiguiente el cable principal de forma parabólica.

Para determinar la ecuación de la parábola (1), se con

(5) "STRUCTURAL ENGINEERS HANDBOOK". Smith Ketchum, Milo. 3a. Edición. McGraw-Hill, 1,924.

sidera una parte AB del cable como un cuerpo libre (figura 1.4). Se toma como origen de coordenadas el punto más bajo del cable A, designando por H la tensión en este punto. La tensión en un punto cualquiera B se designará por T. La porción del cable AB está en equilibrio bajo la acción de tres fuerzas: H, T y la carga vertical wx que actúa en el punto medio D de la distancia entre A y C. Puesto que estas tres fuerzas están en equilibrio tienen que ser concurrentes; por lo tanto, la línea de acción de T pasa por D. Las ecuaciones de equilibrio son:

$$F_x = T \cos \theta - H = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$F_y = T \sin \theta - wx = 0 \dots\dots\dots (2)$$

Eliminando T en (1) y (2):

$$\tan \theta = \frac{wx}{H}; \text{ pero } \tan \theta = \frac{2y}{x}$$

$$\frac{2y}{x} = \frac{wx}{H}$$

Luego:

$$y = \frac{wx^2}{2H} \dots\dots\dots (3)$$

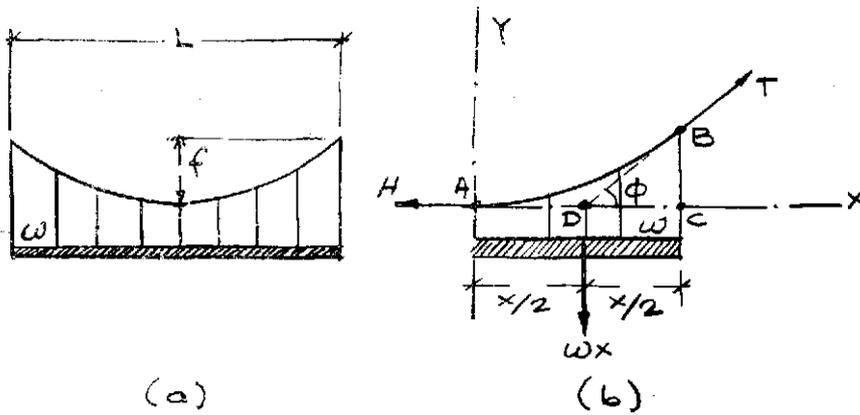


FIG. 1.4

La curva es pues, una parábola con el vértice en A y eje vertical.

Eliminando ϕ de (1) y (2), tenemos:

$$T = \sqrt{H^2 + (wx)^2} \dots\dots\dots (4)$$

Al aplicar las ecuaciones que anteceden lo que nos interesa es la tensión en el punto de apoyo, por ser el punto donde la tensión es máxima. Por lo tanto, si se designa por L la luz y f el valor máximo de y (la flecha), de las ecuaciones (3) y (4) se deduce:

$$H = \frac{wL^2}{8f} \dots\dots\dots (5)$$

Por consiguiente:

$$T = \sqrt{H^2 + (\frac{1}{2} wL)^2}$$

$$T = \frac{1}{2} wL \sqrt{1 + \frac{L^2}{16 f^2}} \dots\dots\dots (6)$$

También:

$$T = \frac{w \cdot L^2}{8f} \sqrt{1 + 16 n^2} \dots\dots\dots (6')$$

Donde: $n = f/L$

Para determinar la longitud total del cable, se usa la fórmula general (1), (2) y (6), de una curva cualquiera por medio de la ecuación:

$$S = \int \sqrt{1 + \frac{(dy)^2}{dx^2}} dx$$

De la ecuación (3) podemos deducir:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{wx}{H}$$

Por consiguiente:

$$S = 2 \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \frac{w^2 x^2}{H^2}} \cdot dx$$

Sustituyendo por su valor $H = wL^2/8f$ de la ecuación (5), tenemos:

$$S = 2 \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \frac{64 f^2 x^2}{L^4}} \cdot dx$$

Una fórmula aproximada para obtener la longitud de la curva puede obtenerse desarrollando la fórmula anterior e

(6) "CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL". Granville, Smith y Longley. Traducción al español. 1,959. U. T.E.H.A.



integrándola término a término, nos daría el siguiente resultado:

$$S = L \left(1 + \frac{8}{3} n^2 - \frac{32}{5} n^4 + \dots \right) \dots \dots \dots (7)$$

Para pequeños valores de las flechas será suficiente escribir la fórmula anterior así:

$$S = L \left(1 + \frac{8}{3} n^2 \right) \dots \dots \dots (7')$$

La siguiente tabla da los valores de S comparando las fórmulas (7) y (7'):

n = f/L	S/L	
	fórmula (7)	fórmula (7')
.05	1.00663	1.00663
.075	1.01480	1.01480
.1	1.02606	1.02603
.125	1.04023	1.04010
.15	1.05712	1.05676
.175	1.07652	1.07566
.2	1.09823	1.09643

La deflexión del cable Δf puede determinarse diferenciando la ecuación (7) con respecto a L y f respectivamente, obteniendo las ecuaciones siguientes:

$$\Delta l = 1/15(15 - 40 n^2 + 288 n^4)\Delta L \dots \dots \dots (8)$$

$$\Delta l = 16/15 n (5 - 24 n^2)\Delta f \dots \dots \dots (9)$$

Igualando las dos ecuaciones anteriores obtenemos:

$$\Delta f = \frac{15 - 40 n^2 + 288 n^4}{16 n (n - 24 n^2)} \Delta L \dots\dots\dots (10)$$

Por consiguiente la deflexión Δf puede calcularse por medio de las ecuaciones (9) y (10) al conocerse S/L y ΔL

El cambio de longitud en el cable debido a un cambio de temperatura t en el mismo, y el cual tiene un coeficiente de expansión igual a alfa (α), será:

$$\Delta s = \alpha t \cdot \Delta L$$

o sea:

$$\Delta l = \alpha t \cdot l \dots\dots\dots (11)$$

(1) La elongación elástica será:

$$\Delta L = \frac{H L}{E A} (1 + 16/3 n^2) \dots\dots\dots (12)$$

En la ecuación anterior A es el área de la sección transversal del cable y E es el módulo de elasticidad del mismo.

Para valores pequeños de Δf , el cambio en la tensión horizontal H , se obtiene por medio de la ecuación siguiente:

$$H = - \frac{H}{f} \Delta f \dots\dots\dots (13)$$

Es recomendable que cuando los puentes colgantes carezcan de un sistema que les proporcione rigidez suficiente, como en el caso de los que sirven para el paso de tuberías de conducción de agua, la flecha del cable sea lo me

nor posible; esto se hace con el objeto de disminuir lo más posible las deflexiones del cable cuando está sometido eventualmente a carga viva, la cual estará constituida por el paso de personas que puedan utilizarlo como medio de salvar determinado obstáculo.

Para una luz de 40 metros, se asume una flecha de 4.70 metros, la cual nos da una relación flecha-cable de:

$$n = f/L = \frac{4.70}{40} = 0.1175$$

Para una luz de 60 metros, se asume una flecha de 5.00 metros lo cual nos da una relación flecha-cable de:

$$n = f/L = \frac{5.00}{60} = 0.0833$$

En su obra el Dr. D. B. STEINMAN, (2) da dos ecuaciones para calcular el desplazamiento "e" y la deflexión f del cable. (fig. 1.5)

$$e = \left(\frac{1}{2} + \frac{w}{p} - \sqrt{\frac{w}{p} + \left(\frac{w}{p} \right)^2} \right) L \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta f = - \left(\frac{2e}{L + 2e} \right)^2 f \dots\dots\dots (15)$$

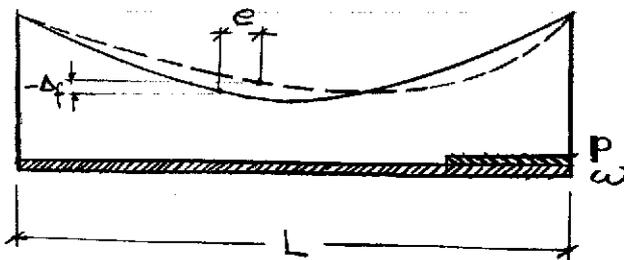


FIG. 1.5

Así mismo, la longitud total del cable incluyendo los tirantes inclinados (ver fig. 1.6) está dada por la siguiente ecuación:

$$S + 2S_1 = L \left(1 + \frac{8}{3} n^2 - \frac{32}{5} n^4 \right) + 2 S_1 \sec. \phi_1 \quad (16)$$

La elongación total del cable para un cambio de temperatura t será:

$$\Delta S = \alpha t (s + 2S_1) \dots\dots\dots (17)$$

La elongación total del cable debido a la deformación elástica, según la ecuación (12) será:

$$S = \frac{H}{E A} \left[L \left(1 + \frac{16}{3} n^2 \right) + 2 L_1 \sec^2 \phi_1 \right] \dots\dots\dots (18)$$

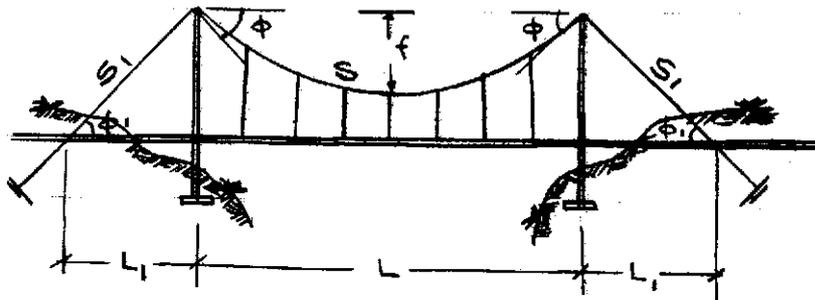


FIG. 1.6

Si el cable se desliza sobre los apoyos en las torres, la deflexión de la flecha (Δf) se puede obtener substituyendo los valores anteriores de Δl en la ecuación (9).

En el texto "WIRE ROPE HANDBOOK" (3), existen ecuaciones similares a las dadas por el Dr. D. B. Steinman; de esta manera, la longitud total del cable en el tramo entre los soportes o torres es la siguiente:

$$L = \frac{l^2}{2d} \left[\sqrt{\tan^2 \alpha \cdot \sec^2 \alpha} + \log_e (\tan \alpha + \sec \alpha) \right] \quad (19)$$

La nomenclatura es diferente a la empleada en las fórmulas anteriores, por lo que para mayor claridad se especifica en la fig. 1.7 en la cual:

- L = longitud del cable suspendido entre las torres
- l = la mitad de la luz
- d = deflexión bajo carga
- α = ángulo del cable a su esfuerzo máximo

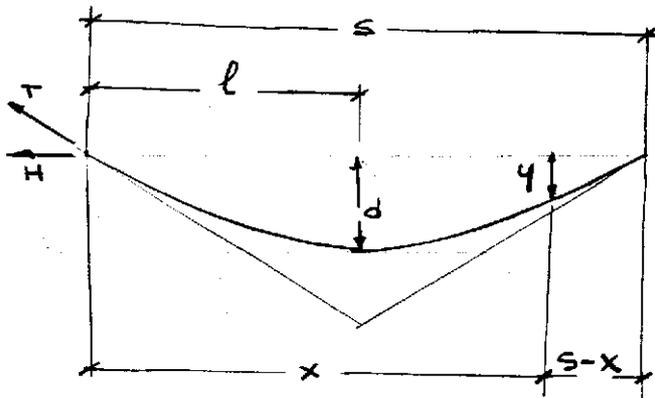


FIG. 1.7

1.2.b) TIRANTES VERTICALES O PENDOLAS:

Los tirantes verticales o péndolas son los miembros verticales que soportan la tubería directamente y los cuales van ligados al cable principal por medio de accesorios adecuados que se describirán posteriormente en el inciso 1.2.e). El espaciamiento entre péndolas queda a criterio del diseñador, aunque es recomendable que el mismo sea de dos metros, ya que un espaciamiento mayor incrementa el momento flexionante en el tramo y por consiguiente sus secciones respectivas, aumentando a la vez el peso lo que dificulta el montaje de la tubería.

Las péndolas podrán ser de barras circulares de acero, cables de acero o barras de perfiles torsionados. Cualquiera de las tres alternativas es factible, pero debe escogerse la que sea de más fácil obtención en la plaza.

Debido a la naturaleza de los puentes, las péndolas estarán sometidas a cambios de inclinación, tanto longitudinal como transversalmente, por lo cual se recomienda que las uniones deben ser articuladas para anular los esfuerzos flexionantes, que son los que ocasionarían estos movimientos.

Para determinar el área requerida para las péndolas, se considera que ésta carga un tramo de carga uniformemente distribuida, de una longitud igual a la separación de las mismas; el valor de la carga entre el esfuerzo del acero es la sección de las péndolas. Este proceso se verá más objetivamente cuando entremos al diseño propiamente dicho.

Como se demostró anteriormente, el cable principal bajo una carga uniformemente distribuida se considera de forma parabólica; por consiguiente, la longitud de las péndolas será también variable, es decir que serán mayores en los

extremos y menores en el centro de la luz. Para calcular su longitud, pueden usarse cualquiera de las dos ecuaciones siguientes que nos dá el "WIRE ROPE HANDBOOK" (3), que se basan en la ecuación de la parábola.

$$y = \frac{4 dx}{S^2} (S - x) \dots\dots\dots (20)$$

$$\text{ó } y = \frac{wx(S - x)}{2 H} \dots\dots\dots (21)$$

Respecto a la nomenclatura, ver la figura 1.7

En las ecuaciones (20) y (21):

w = carga muerta por pie de longitud

H = componente horizontal del esfuerzo en el cable

Las longitudes de las péndolas se calculan asumiendo que la de la péndola central es conocida (m_1) así como también es conocida la longitud de la flecha (f), por consiguiente conocemos la dimensión: $m_1 + f$. Luego haciendo variar los valores de "x" en las ecuaciones anteriores, obtenemos los respectivos valores de "y". Si a $m_1 + f$ le restamos los valores encontrados de "y", obtendremos por consiguiente las longitudes de las péndolas. Ver fig. 1.8

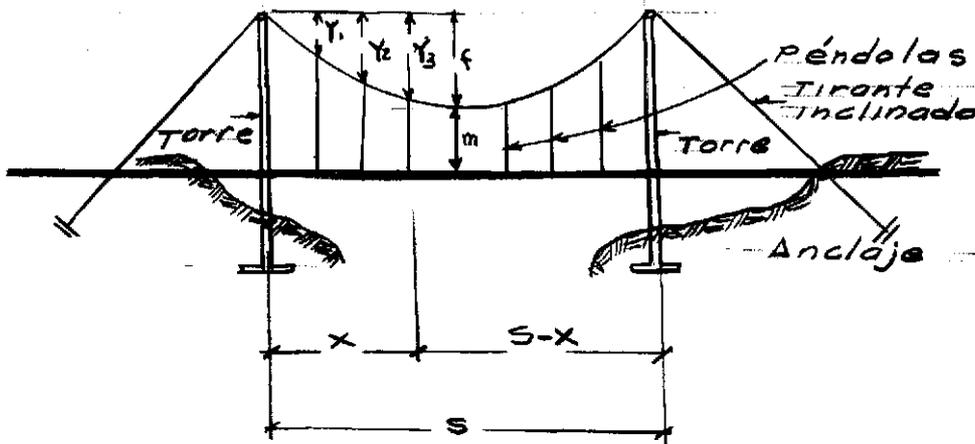


FIG. 1.8

1.2.c) TORRES

Las torres son los miembros verticales sujetos a flexo-compresión que están colocadas en los extremos de la luz del puente colgante. La altura de las mismas será de acuerdo a las condiciones topográficas del terreno y en el caso en que las mismas estén colocadas en un mismo plano horizontal la altura sobre el nivel de la tubería será de: $m_1 + f$, en donde la altura de m_1 será convencional tal como se dijo anteriormente.

Estos miembros pueden ser de acero estructural de secciones recomendadas por el MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION (7) en cuyo caso se colocan sobre una fundación que generalmente es de mampostería, que debe ser construida de antemano y que constituye la subestructura

(7) MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION. A.I.S.C. sexta edición, 1,967.

del puente. Las torres pueden construirse también de concreto reforzado formando una sola unidad con la subestructura, que estará constituida por una zapata, diseñada de acuerdo a la naturaleza del terreno y siguiendo las especificaciones del REGLAMENTO DE LA A.C.I. (8).

Antes de proceder a la construcción de las torres, debe tenerse especial cuidado en la selección de los puntos, los cuales deberán estar perfectamente definidos y alineados con relación a la línea de conducción de agua, para evitar los cambios bruscos de la corriente que pueda provocar una fuerza impulsiva adicional.

La subestructura y los anclajes pueden construirse simultáneamente ya que ambos elementos son completamente independientes y de la misma naturaleza.

Las torres también están provistas de accesorios adecuados en la parte superior, los cuales deben quedar fijos y perfectamente centrados a fin de que la fuerza se transmita axialmente. Estos accesorios serán descritos e ilustrados en el inciso 1.2.e).

1.2.d) ANCLAJES:

Los anclajes constituyen la seguridad de un puente colgante, y por consiguiente el diseñador debe poner especial interés en los mismos; su construcción debe ser cuidadosamente supervisada. Después de construídos deben recibir una constante atención y mantenimiento.

Los anclajes o muertos, como también suele llamarse-

(8) REGLAMENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO. (ACI 318-63).

les, deben ser diseñados para resistir la tensión de los tirantes inclinados que son una prolongación del cable principal. Sobre los mismos actúa tres tipos de fuerzas: la tensión del cable, el empuje del suelo sobre el anclaje y su peso propio. La tensión del cable a su vez se descompone en dos fuerzas: una vertical hacia arriba que es contrarrestada por el peso propio; y otra horizontal que es contrarrestada por la fricción entre el anclaje y el suelo. Esta fuerza horizontal es la que tiende a voltear el anclaje por el momento de volteo, el cual debe contrarrestar por medio de un momento estabilizante que lo origina el peso propio. Es por esta razón que los muertos o anclajes, resultan masivos, por lo que es más económico construirlos de mampostería o concreto ciclópeo, aunque en algunos casos pueden construirse cajones de concreto reforzado dentro del cual se introducen piedras con el objeto de aumentarle el peso.

Los anclajes en muy raras ocasiones (1), pueden estar constituidos por roca natural, siempre que éstas pertenezcan a un banco grande y profundo, resultando mucho más económicos que los tipos anteriores. La cimentación del anclaje en roca, puede ser en gradas o con taludes para aumentar la resistencia al deslizamiento. Para obtener una seguridad adicional al deslizamiento, se pueden usar cilindros de acero incrustados en la roca, para que sirvan como barras de trabazón.

Cuando no se pueda obtener una cimentación adecuada para los anclajes, pueden ser usados pilotes verticales o inclinados, como se hace en las cimentaciones arcillosas.

Hay varios sistemas de conectar el cable al anclaje, quedando a discreción del diseñador el que considera más adecuado; sin embargo, se describirá un sistema que ha dado resultados satisfactorios. El sistema consiste en que el cable está conectado a dos barras de acero (fig. 1.9) y (fig.

1.10), trasmitiéndoles la tensión, estas a su vez están conectadas a una plancha de acero fundido, llamada zapata de anclaje, la cual transmite la tensión al anclaje. Las barras deben tener libertad de movimiento dentro del anclaje, para evitar los esfuerzos flexionantes como consecuencia del movimiento del cable.

Al construir el anclaje, la zapata de anclaje y las barras necesarias, deben ser colocadas de manera que las últimas sobresalgan, para que posteriormente se conecte el cable o cables según el caso. Para conectar el cable o las barras, se debe fundir al extremo de éste una pieza cilíndrica de acero, la cual debe estar provista de un agujero a cada lado; el diámetro de éstos agujeros debe ser ligeramente mayor que el diámetro de las barras de anclaje, ya que éstas no van roscadas sino únicamente pasan a través de la pieza cilíndrica.

En el proceso de construcción de los anclajes, no se requiere un conocimiento especial. Solamente debe ponerse especial cuidado en su localización, la cual debe quedar en el lugar previsto en el diseño. Debe tomarse en cuenta que durante su construcción se colocará en su interior la zapata de anclaje y las barras que salen de ella (fig. 1.9). Este conjunto debe quedar perfectamente alineado con el cable principal y las torres. También debe ser objeto de especial atención, el que las barras de anclaje tengan la misma inclinación de los tirantes laterales respecto de la horizontal.

Como se dijo, al principio, los anclajes o muertos, constituyen los puntos de apoyo del puente colgante, por lo cual debe diseñarse dos, uno en cada extremo del cable principal. La tensión en el tirante inclinado T_1 , será la misma que la tensión máxima del cable, y su componente vertical será anulada por el peso propio del anclaje y la com-

ponente horizontal será anulada por la fricción del suelo y por la presión pasiva del mismo. Para determinar la presión o empuje del suelo se emplearán las fórmulas de Rankine:

$$E = \frac{1}{2} w h^2 \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} \times a \dots \dots \dots (22)$$

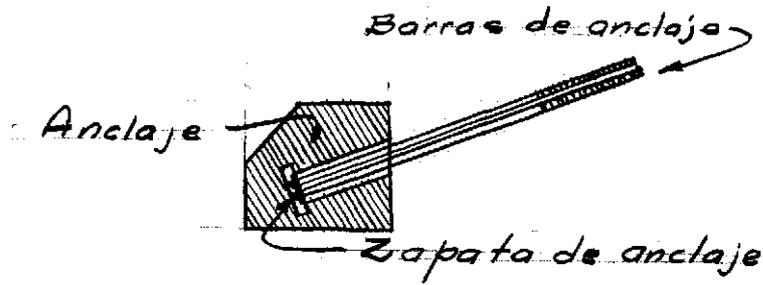


FIG. 1.9

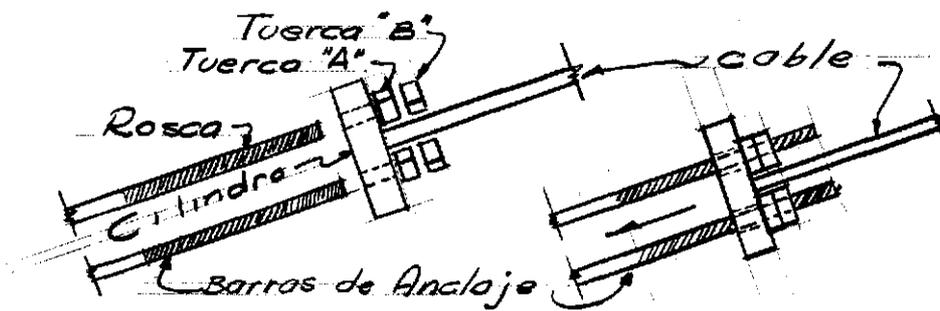


FIG. 1.10

1.2.e) ACCESORIOS DE LOS CABLES:

Los accesorios de los cables, son elementos que sirven para protegerlo adecuadamente en las conexiones de unos con otros, evitando así su pronto deterioro y por consiguiente prolongando su vida útil.

Existe una gran variedad de accesorios para la conservación adecuada de los cables, y los mismos se colocan según lo exijan las condiciones de trabajo; en todo caso, queda a criterio del diseñador escoger aquellos en la mejor forma posible, debiendo el supervisor de la construcción velar porque los mismos sean colocados perfectamente.

En cualquier catálogo de cables existe un gran variedad de accesorios; como una ilustración se adjunta una serie de dichos elementos que se usan más frecuentemente en un puente colgante para paso de tuberías de conducción de agua. Se pueden mencionar los siguientes: tensores (turn-buckles), grilletes de anclaje (anchor shackles), ganchos corredizos (sliding hooks) ganchos de ojo elevadores (eye hoist hook), guardacabos (thimbles), abrazaderas o grapas (wire rope clips), amarres en los anclajes (cable bridge sockets), etc.

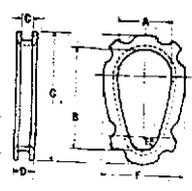
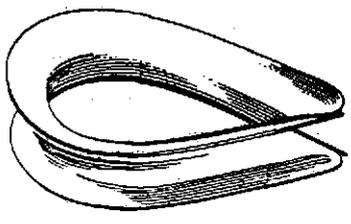
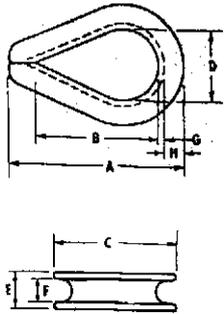
En las siguientes hojas aparecen algunos esquemas de accesorios.

1.2.f) ACCESORIOS DE LA TUBERÍA:

Como en los cables, en la tubería deben colocarse accesorios, siendo los principales aquellos que sirven para sostenerla al cable principal a través de los tirantes verticales o péndolas. Estos pueden consistir en abrazaderas adecuadas o bien puede arrollarse directamente las péndolas a la tubería, empleando para el caso los accesorios que aparecen en las hojas anteriores.

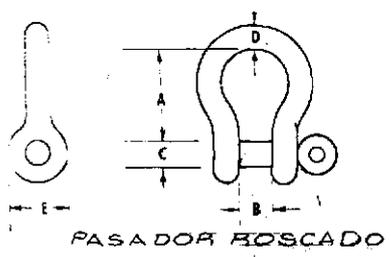
Es recomendable colocar a cada extremo de la tubería, uniones articuladas con el objeto de anular los momentos flexionantes debido a cambios excesivos de temperatura.



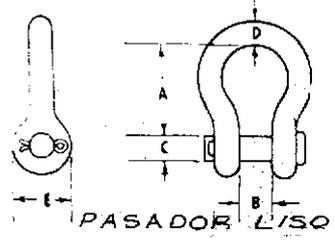
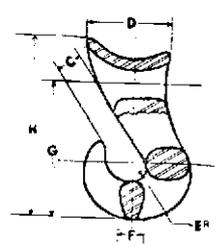


DESLIZABLE

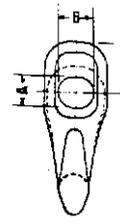
GUARDACABOS



PASADOR ROSCADO



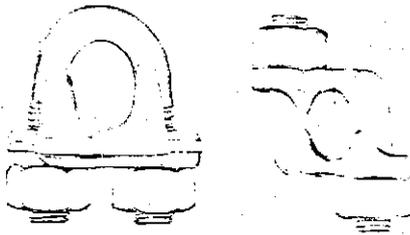
PASADOR LISO



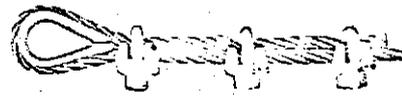
GRILLETES DE ANCLAJE

GANCHOS CORREDIZOS





ABRAZADERAS O GRAPAS



CORRECTO

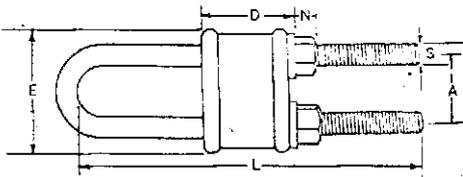


INCORRECTO

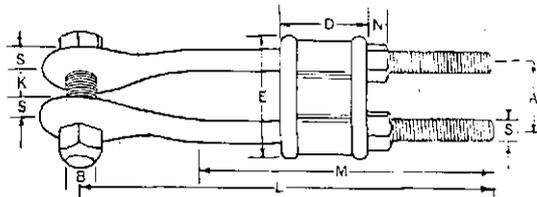
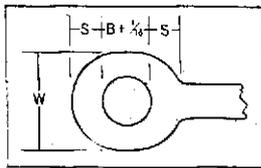


INCORRECTO

COLOCACION DE LAS ABRAZADERAS

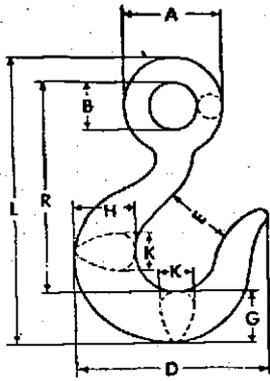


TIPO ABIERTO

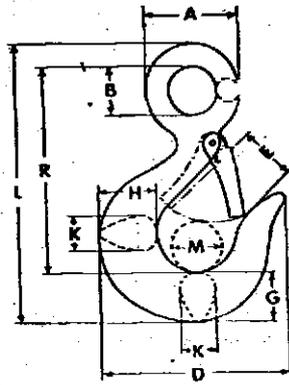


TIPO CERRADO

TIPOS DE AMARRE A LOS ANCLAJES



CORRIENTE

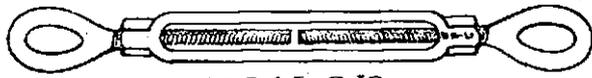


DE SEGURO

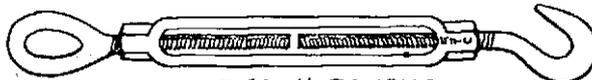
GANCHOS ELEVADORES



DOBLE GANCHO

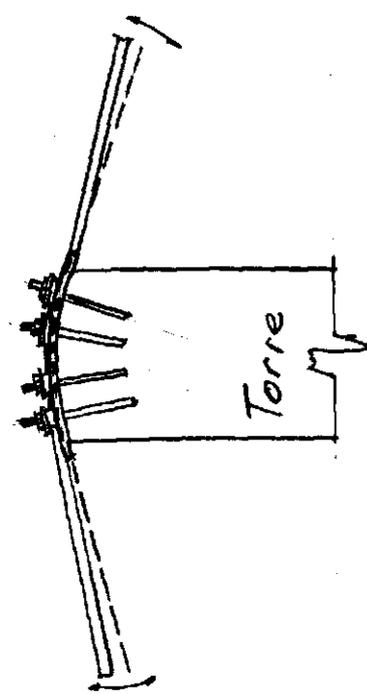
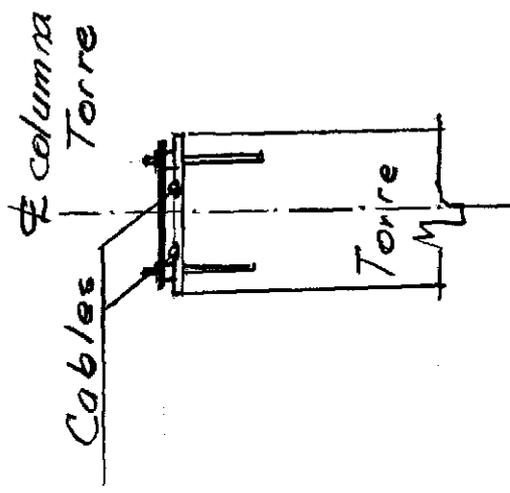


DOBLE OJO



OJO Y GANCHO

TENSORES



MONTURA FIJA EN LA TORRE

Con relación a los accesorios para la tubería, existe una gran variedad de marcas y catálogos, entre los cuales se puede mencionar los siguientes:

WALWORTH. Walworth Company of Canada, Ltd.
 Mc. MASTER. Mc. Master Carr Supply Co. Chicago, Illinois. E. U. A.
 CLOW. James B. Clow & Sons. Chicago, Illinois, E. U. A. etc.

1.2.g) OTROS:

Entre los otros elementos que pueden formar parte de un puente colgante para uso de tuberías de conducción de agua, están los cables de viento, que son cables colocados a ambos lados de la tubería y que se deben anclar a muer-tos o anclajes secundarios que deben diseñarse igual que los anclajes principales; debido a que el esfuerzo en el cable es muy pequeño en relación al esfuerzo del cable principal, los anclajes resultarán de dimensiones más pequeñas que los anclajes principales.

Estos cables de viento se diseñarán según la presión lateral que ejerza el viento y el área de contacto del mismo con el puente, dándonos una fuerza horizontal uniformemente distribuida en su longitud, que será equilibrada a dichos cables.

Los cables de viento disminuyen además el balanceo del puente porque se supone que la tensión lateral de la estructura aumenta (2). Con una inclinación de 1:10, el incremento a la resistencia lateral de deslizamiento es de 1%.

Con relación a las oscilaciones debidas al viento, Sir Alfred Pugsley en su obra (4) dice: "A través de la historia

de los puentes colgantes, ellos tienden a oscilar bajo cargas dinámicas y de viento y se han hecho algunas investigaciones referente a estas propiedades de vibración. El primer problema en este campo comprende las oscilaciones en un plano vertical. El tratamiento teórico de este problema lo hizo Rohr en 1,851 en su obra "ON THE OSCILLATIONS OF SUSPENSION CHAIN" y por E. J. Routh en su obra "ADVANCED RIGID DYNAMICS" en 1,905. Routh estableció ecuaciones de movimiento para el cable, entre las cuales merece mencionarse la de la frecuencia natural de un cable:

$$n = i \frac{v}{l}$$

En la ecuación anterior, i tiene los valores de 1, 1.5, 2, etc.

v = velocidad en el cable = $\sqrt{T/m}$

T = tensión en el cable = $m \cdot g \cdot y$

l = longitud del cable

Por su parte F. Arredondo en su obra "ESTABILIDAD DE PUENTES COLGANTES" (9), expresa lo siguiente: "Un enemigo reconocido de los puentes colgantes, quizá el principal, es el viento." Desde luego debe hacerse notar que su obra trata de los puentes colgantes para paso de vehículos, teniendo por lo tanto una sección lateral mucho mayor que la de los puentes colgantes para paso de tuberías de conducción de agua, sin embargo esto no quiere decir que en circunstancias extremas el viento sí pueda afectar a estos puentes. Recomienda por consiguiente "proyectar un puente para resistir sus efectos dinámicos, entendiendo por efectos dinámicos los de un viento constante actúan

(9) "ESTABILIDAD DE PUENTES COLGANTES" por Arredondo, F.

do en una estructura flexible de sección transversal convencional que produce una fuerza resultante sincronizada automáticamente en tiempo y dirección con los movimientos armónicos de la estructura, causando una amplificación progresiva de estos movimientos hasta llegar a amplitudes peligrosas y destructivas."

El mismo autor analiza el fenómeno de autoamplificación de la siguiente manera: "Los puentes colgantes pueden empezar a moverse con un viento y estos movimientos pueden aumentarse. Si ocurre este fenómeno de autoamplificación de las oscilaciones, las deformaciones en la estructura aumentarán hasta la rotura a menos que las fuerzas de impulsión se anulen o inviertan o que un amortiguamiento friccional o interno absorba la energía o que se dispongan elementos en la estructura que impidan o moderen las vibraciones."

1.3 ANALISIS DE LOS PUENTES COLGANTES:

(4) La primera teoría de la propiedad de los puentes colgantes fué publicada por W. J. M. Rankine en 1,858 en el libro "A MANUAL OF APPLIED MECHANICS". Las posiciones básicas del Método de Rankine son las siguientes:

- 1.- Que bajo la carga muerta total sobre el puente el cable es parabólico y la viga no está esforzada.
- 2.- Que cualquier carga viva aplicada en el tramo se distribuye al cable.
- 3.- Que el valor de q , es igual a la carga total dividida por el largo del tramo L .

$$q = W_v/L$$

Sin embargo, en el presente trabajo el análisis se hará de acuerdo a la "Teoría Elástica", la cual se basa en las siguientes suposiciones: (1) y (2)

- 1.- El cable se supone perfectamente flexible, tomando libremente la forma del polígono de equilibrio de las fuerzas suspendidas.
- 2.- La armadura se considera como una viga, inicialmente recta y horizontal, de momento de inercia constante y sujeta al cable en toda su longitud.
- 3.- La carga muerta de la armadura y el cable se asume uniformemente distribuida en proyección horizontal, de modo que la curva inicial del cable es una parábola.
- 4.- La forma y las ordenadas de la curva del cable se asume que permanecen inalterables durante la aplicación de las cargas.
- 5.- La carga muerta es soportada totalmente por el cable y no causa ningún esfuerzo en la armadura de rigidez. La armadura es afectada solamente por la carga viva y por los cambios de temperatura.

Esta última suposición se basa en los ajustes durante el proceso de construcción, los que implican una regulación de las péndolas cuando las condiciones asumidas de carga muerta y de temperatura se realizan.

Leyendo detenidamente cada una de las suposiciones anteriores, se puede determinar que el análisis de los puentes colgantes se basa exclusivamente en la 1a., 3a., y 4a. suposiciones ya que las dos restantes se basan especialmente a la rigidez del sistema.

Las fórmulas que se emplearán en el diseño han sido analizadas anteriormente, sin embargo, existen otras de uso más frecuente y que serán empleadas en el ejemplo de un diseño.

CAPITULO II

2.1 FACTORES DETERMINANTES EN EL DISEÑO:

En este capítulo se tratará de dar a conocer los factores determinantes en el diseño de un puente colgante; un factor determinante en el diseño es la luz "L" entre las torres, ya que ésta afecta directamente los valores de las fuerzas "H" y "T" como puede verse en las fórmulas (5), (6) y (6'), razón por la cual puede decirse que para una misma carga uniformemente distribuida "w", el puente que tenga mayor longitud tendrá una mayor sección en los cables, en los anclajes y en las torres.

Otro factor determinante en el diseño será el diámetro y clase de tubería que se usará, ya que una tubería de hierro fundido es mucho más pesada que una de asbestos-cemento, de dos tuberías de diferente diámetro, la de diámetro mayor pesará más, tanto por su propio peso como por el mayor peso del agua que conduce. En las ecuaciones (5), (6) y (6') se observa que "w" afecta directamente el resultado.

Un factor determinante en el diseño de los anclajes lo constituirá la naturaleza del suelo, ya que según la ecuación dada por Rankine, fórmula (22), el equivalente líquido "W" está en función directa con la resistencia del suelo y éste a su vez afecta directamente el valor del empuje "E".

El Dr. Steinman da las siguientes proporciones económicas para los puentes colgantes: "La relación entre los tra



mos de los lados y el tramo central debe ser alrededor de $1/4$ cuando los tirantes laterales inclinados están tensos, y alrededor de $1/2$ cuando los tramos laterales están suspendidos. Relaciones más pequeñas tienden a originar mayores esfuerzos y secciones en los tirantes inclinados que en el cable principal. La longitud de los tramos laterales está también controlada por las condiciones existentes, tales como las elevaciones relativas y la situación de los anclajes."

"La relación económica entre la flecha y la luz del tramo entre las dos torres, es alrededor de $1/9$ si los tirantes inclinados son rectos, y alrededor de $1/8$ si los tirantes laterales están suspendidos. Para luces grandes las relaciones anteriores pueden ser menores como $1/10$ a $1/12$ ".

2.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO:

En cuanto a las especificaciones de diseño de los cables, se tomarán las dadas en la Sección 2 del WIRE ROPE HANDBOOK, 1,963, ya que en la República de Guatemala no se cuenta con especificaciones de diseño propias.

Respecto a las especificaciones de diseño de las torres, se usarán las del MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION, del American Institute of Steel Construction, 1,967, si se construyen de acero estructural. O bien las del REGLAMENTO DE CONCRETO REFORZADO (ACI 318-63), si se construyeran de concreto reforzado.

CAPITULO III

3.1 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN PUENTE COLGANTE PARA PASO DE TUBERIA DE CONDUCCION DE AGUA:

En este ejemplo se considerará que la luz entre las dos torres es de 40 metros. Siguiendo las recomendaciones dadas por el Dr. D. B. Steinman la relación más económica entre la flecha y la luz entre las dos torres debe ser alrededor de $1/9$; por lo tanto,

$$n = 1/9$$

$$n = f/L$$

$$f = L.n$$

$$f = 40 \times 1/9$$

$$f = 4.44 \text{ metros}$$

También se asumirá que la péndola central tiene una longitud de 1.00 m., y que el espaciamiento entre péndolas es de 2.00 metros, siguiendo la recomendación dada en 1.2.b).

Así mismo se considerará que la parte superior de las dos torres están en el mismo plano horizontal, y que las mismas tienen una altura sobre la tubería de: $4.44 + 1.00 = 5.44$ metros.

La tubería de conducción de agua será de 4" de diámetro y de hierro fundido.

Se considerarán las dos columnas o torres de la misma

longitud, con el fin de simplificar el diseño.

Los tirantes inclinados serán rectos y siguiendo las recomendaciones dadas por el Dr. Steinman, la relación entre los tramos laterales y el tramo central para este caso debe ser alrededor de $1/4$, o sea:

$$\frac{L_1}{L} = \frac{1}{4}$$

$$\therefore L_1 = L \cdot \frac{1}{4}$$

$$L_1 = 40.00 \times \frac{1}{4}$$

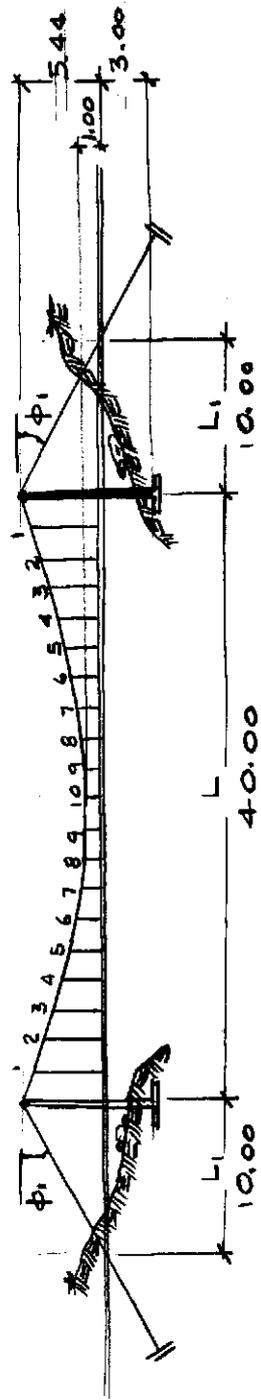
$$L_1 = 10.00 \text{ metros}$$

El ángulo de inclinación de los tirantes inclinados laterales, puede determinarse analíticamente así:

$$\tan \theta_1 = \frac{5.44}{10.00} = 0.544$$

$$\therefore \theta_1 = 28^\circ 33'$$

Este ángulo θ_1 , se considerará que es el mismo para los dos tirantes laterales, es decir que existe simetría en todo el puente, como puede observarse en la figura 3.1.



Scale: 1:50

FIG. 3.1

La altura de las columnas en la estructura del puente se asumirá que sea de 3.00 metros, porque así lo exigen las condiciones topográficas del terreno.

Debido a la poca área longitudinal de contacto con el viento, en el presente caso, se considerará despreciable. Sin embargo es conveniente saber el procedimiento que se debe seguir en el caso que el diámetro de la tubería sea considerable:

Área de contacto con el viento = Diám. tubería x Longitud entre torres

$$\text{Área de contacto con el viento} = \frac{4''}{12 \text{ pulg/pie}} \times 131.20 \text{ pies} = 44 \text{ pies}^2$$

Vientos de 60 k/h se ha comprobado experimentalmente que producen una presión de 15 lbs/pie²; si esta cantidad se multiplica por el área de contacto, se obtiene

una fuerza de 656 # que debe de distribuirse como mínimo en dos cables de viento, soportando cada uno una tensión de 328 # de tensión si los mismos se colocaran perpendicularmente a la tubería; pero como se colocan diagonales absorberán solamente un porcentaje de la misma. En el presente ejemplo el efecto del viento se considera despreciable.

Tomando en consideración que en un momento determinado alguna persona utilice el puente para pasar de un extremo al otro, se considerará una carga viva de 20 #/pie².

Las cargas se tomarán en el sistema únicamente para facilidad en la lectura de las tablas de diseño.

Las cargas que se considerarán en el diseño son las siguientes:

CARGAS VERTICALES:

1.- Carga muerta:

En primer lugar se considerará el peso propio de la tubería de 4" de diámetro de hierro fundido, la cual según la tabla 12-4 del libro ANALISIS Y CONTROL DE COSTOS DE INGENIERIA (10), es de 10.57 libras por pie lineal, incrementándose éste valor por el peso de los accesorios; por lo tanto se adoptará 12 #/pie. En segundo lugar actúa el peso del agua, considerándola completamente llena de agua el peso de un pie lineal de longitud será: peso/pie = volumen x peso unitario del agua

$$\text{Volumen} = \text{Area transversal} \times \text{Longitud} = 0.0875 \text{ pies}^3$$

$$\text{Peso/pie} = 0.0875 \text{ pies} \times \begin{matrix} 62.4 \text{ \#/pie} \\ \text{tomaré} \end{matrix} = \begin{matrix} 5.46 \text{ \#/pie} \\ 5.50 \text{ \#/pie} \end{matrix}$$

(10) "ANALISIS Y CONTROL DE COSTOS DE INGENIERIA". Ing. Amando Vides Tobar. 1,964.

Total de cargas muertas: $12.00 + 5.50 = 17.50 \text{ \$/pie}$

2.- Carga viva:

Es probable que el puente para el paso de la tubería de conducción de agua sea usado por personas para trasladarse de un extremo hacia el otro, si no se coloca algún obstáculo que lo impida; por consiguiente debe de considerarse una carga viva de $13.50 \text{ \$/pie lineal}$ *

CARGAS HORIZONTALES:

Tal como se dijo anteriormente, la carga horizontal crítica en los puentes colgantes para paso de vehículos, donde la sección longitudinal es grande, es el viento y no el sismo. Sin embargo, para puentes de sección pequeña como los de este ejemplo, no se tomarán en consideración estas cargas.

3.1.1 TIRANTES VERTICALES O PENDOLAS:

Estos serán cordones de acero galvanizado del tipo 1 x 7 especificado en la sección 2 del "WIRE ROPE HANDBOOK". La sección de los cordones se ilustra en la fig. 3.2

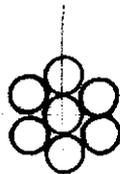


Fig. 3.2

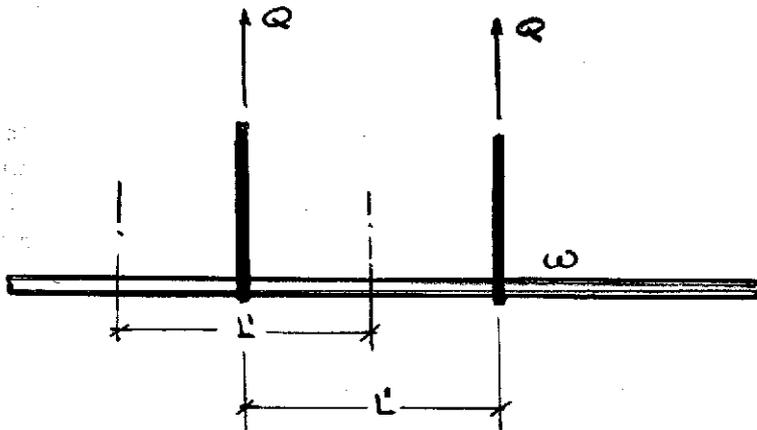
* La carga de $13.50 \text{ \$/pie lineal}$ resulta considerando el peso de 150 \# por persona espaciadas 11 pies. Queda a discreción del diseñador variar adecuadamente estas dimensiones.

Las péndolas son diseñadas a tensión y resisten una carga uniformemente distribuida igual a: $W = 1.5 w_m + 1.8 w_v$

$$W = 1.5 \times 17.50 + 1.8 \times 13.50$$

$$W = 50.55 \text{ \#/pie}$$

La carga anterior se distribuye en una longitud igual a la que separa las péndolas o sea de 2.00 metros = 6.56 pies.



$$Q = W \times L'$$

$$Q = 50.55 \times 6.56$$

$$Q = 331.61 \text{ \#}$$

FIG. 3.3

Asumiendo que el esfuerzo de tensión del acero (f_t) sea igual a 20,000 #/pulg², el área mínima de la sección del cordón será:

$$A = Q/f_t$$

$$A = 331.61/20,000$$

$$A = 0.017 \text{ pulg}^2$$

Con este valor del área mínima, vemos que la que debemos usar es la de un diámetro de 3/16" (área = 0.0276"²). En la sección enunciada al principio vemos que este cordón tiene una resistencia de 1,150 #, valor que satisface

ampliamente a la tensión producida.

3.1.2 CABLE PRINCIPAL:

Para el cable principal se podrán usar cualquiera de las múltiples secciones que aparecen en el WIRE ROPE HANDBOOK, quedando a criterio del diseñador escoger la más adecuada que se encuentre en plaza.

Para el diseño, se necesita conocer en primer lugar el valor de la tensión máxima "T" en el cable, que se puede calcular por medio de la ecuación (6').

$$T = \frac{W \cdot L^2}{8f} \sqrt{1 + 16 n^2}$$

$$T = \frac{50.55 \times (131.20')^2}{8 \times 14.56'} \sqrt{1 + 16 (1/9)^2}$$

$$T = 8,157.56 \text{ \#}$$

$$A = T/f_t$$

$$A = 8,157.56/20,000$$

$$A = 0.408 \text{ pulg}^2$$

Existen dos alternativas: usar dos cables de 9/16" y
 área = 0.6328 pulg²

usar un cable de 3/4" y
 área = 0.5625 pulg²

El peso de los dos cables de 9/16" es de 1.06" #/pie

El peso de un cable de 3/4" es de 0.95 #/pie

Considero que la mejor solución será la de usar dos ca

bles de 9/16", ya que cada cable de 9/16" pesa 0.53#/pie, haciendo más fácil su montaje por ser más livianos.

3.1.3 TORRES:

Las torres que sostienen el cable principal son columnas verticales las cuales pueden ser fabricadas de concreto reforzado o de acero estructural. En cualquiera de las dos alternativas deben de considerarse las dos fuerzas que ocasionan los mayores esfuerzos en sus miembros, y son la carga axial "V" que trasmite el cable a cada una de las torres y con un valor igual a

$\frac{wL}{2}$; y la variación de la tensión horizontal "H", que se puede calcular por la ecuación (13) o por: $T \cdot \cos \theta_1$.

Cálculo de la carga axial:

$$V = W \cdot L/2$$

$$V = 50.55 \times 131.20/2$$

$$V = 3,316.08 \#$$

Cálculo de la variación de la tensión horizontal:

$$\Delta H = T \cdot \cos \theta_1$$

$$\Delta H = 8.157.56 \times 0.87840$$

$$\Delta H = 7,165.60 \#$$

En el presente ejemplo, las torres las diseñare de acero estructural, siguiendo las reglas para el diseño plástico del

"PLASTIC DESIGN IN STEEL" (11)

La longitud total de la columna será de 8.44 metros (27.68 pies).

Además se debe considerar el peso propio de la columna; el mismo será asumido de 20 #/pie, o sea que el peso total de la torre es de: $20 \times 27.68 = 533.60 \text{ #}$.

En la figura 3.4 se muestra un cuerpo libre de la torre.

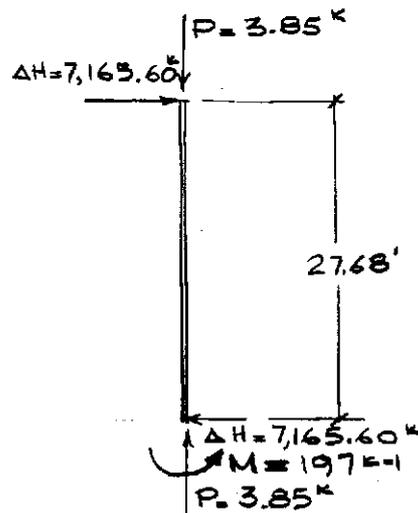


FIG. 3.4

Después de una serie de tanteos, se determinó que la sección adecuada de la columna, tomada de la página A-41

(11) "PLASTIC DESIGN IN STEEL". American Institute of Steel Construction. 1,967.

del texto (11), fue una 14 WF 30 que tiene las siguientes características:

$$P = 3.85 \text{ kips} \quad d/w = 48.8$$

$$r_x = 5.83''$$

$$r_y = 1.46''$$

$$P_y = 291 \text{ kips}$$

Deben hacerse los siguientes chequeos:

$$(a) \quad L/r_x \leq 120$$

$$\frac{27.68 \times 12}{5.83} = 57 < 120 \text{ OK.}$$

$$(b) \quad P \leq 0.60 P_y$$

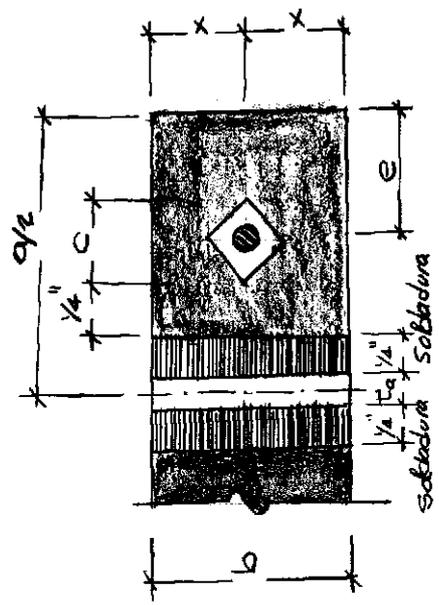
$$0.60 \times 291 = 174.6 > 3.85 \text{ OK}$$

$$(c) \quad \frac{2P}{P_y} + \frac{L/r}{70} \leq 1.00$$

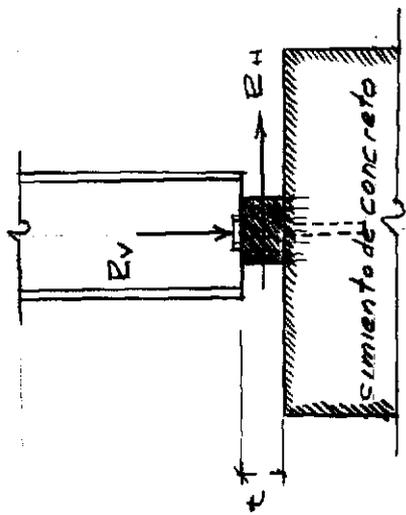
$$\frac{2 \times 3.85}{291} + \frac{57}{70} = 0.841 < 1.00 \text{ OK}$$

Tal como se dejó asentado en el capítulo 1.2.c., estas torres van colocadas sobre una fundación que generalmente es de mampostería.

Sin embargo deben de diseñarse los detalles correspondientes al pie de la columna, para lo cual se seguirán las recomendaciones dadas por el MANUAL OF STEEL - CONSTRUCTION, (7). Ver figura 3.5



(b)



(a)

FIG. 3.5

Datos:

$$R_v = P/1.65$$

$$R_v = (3.32 + 0.53)/1.65$$

$$R_v = 2.33 \text{ kips}$$

$$R_h = H/1.65$$

$$R_h = 7.17/1.65$$

$$R_h = 4.36 \text{ kips}$$

$$f'_c = 3,000 \text{ p.s.i.} = 3.0 \text{ ksi}$$

$$f_y = 33,000 \text{ p.s.i.} = 33.0 \text{ ksi}$$

$$f_c = 0.25 f'_c = 750 \text{ p.s.i.} = 0.75 \text{ ksi}$$

$$f = 20,000 \text{ p.s.i.} = 20.0 \text{ ksi}$$

PERNOS:

Para corte se usa un mínimo de 2 pernos. AISC págs. 4-4 a 4-7. Por lo tanto la fuerza sobre cada perno será de:

$$R_v/2 = 2.18 \text{ kips}$$

El perno más pequeño para corte simple, es el de 5/8" y resiste 3.07 kips, por consiguiente adoptaremos DOS PERNOS DE 5/8".

PLANCHA:

Se asumirá que el concreto tiene una calidad de 3,000 p.s.i.

$$A_c = R_v/f_c$$

$$A_c = 2.33/0.75$$

$$A_c = 3.07 \text{ pulg}^2$$

El área de los dos pernos, considerando que los agujeros deben hacerse 1/8" mayores, será de 0.88^2 pulg^2 . Por lo tanto el área mínima de la plancha será de: $3.07 + 0.88 = 3.95 \text{ pulg}^2$. Es decir el producto $a \times b$ (largo \times ancho) de la plancha debe ser mayor de 3.95 pulg^2 . Ver fig. 3.5 (b)

La dimensión larga ("a") será igual a:

$$a = t_a + 2\left(\frac{1}{4}\right) + 2\left(\frac{1}{4}\right) + c + 2e$$

$$\text{AISC 4-87 para } D = 5/8" \quad \therefore c = 1 \frac{1}{2}"$$

$$\text{AISC 1-14 para } 14\text{WF30} \quad \therefore t_a = 5/16"$$

$$\text{AISC 5-37 para } D = 5/8" \quad \therefore e = 1 \frac{1}{8}"$$

$$a = 5/16 + 2\left(\frac{1}{4}\right) + 2\left(\frac{1}{4}\right) + 1 \frac{1}{2} + 2\left(1 \frac{1}{8}\right)$$



$$a = 5 \frac{1}{16} \text{ "}$$

adoptar

$$a = 5 \frac{1}{2} \text{ "}$$

La dimensión corta ("b") será igual a:

$$b = 2x = 2e \quad (\text{tabla 1.16.5 pag. 5-37 AISC})$$

$$b = 2 \left(1 \frac{1}{8} \text{ "}\right)$$

$$b = 2 \frac{1}{4} \text{ "}$$

adoptar

$$b = 2 \frac{1}{2} \text{ "}$$

ESPESOR DE LA PLANCHA:

(Ver figura 3.6)

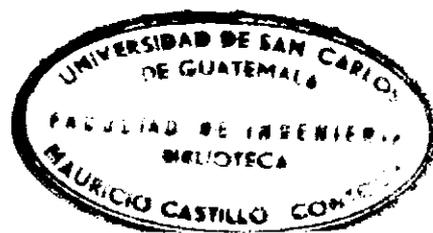
$$M = w \cdot L^2 / 2 = \frac{4.125 \times (2.75)^2}{2} = 15,597.67 \text{ #} \cdot \text{"}$$

$$S = M / f_s = \frac{15,597.67}{20,000} = 0.780$$

$$S = \frac{1}{6} b \cdot h \dots\dots\dots \text{ para secciones rectangulares}$$

$$0.78 = \frac{1}{6} \cdot 5 \frac{1}{2} \text{ "} \cdot t^2$$

$$\therefore t = 0.923 \text{ "}$$



adoptar $t = 1.00''$

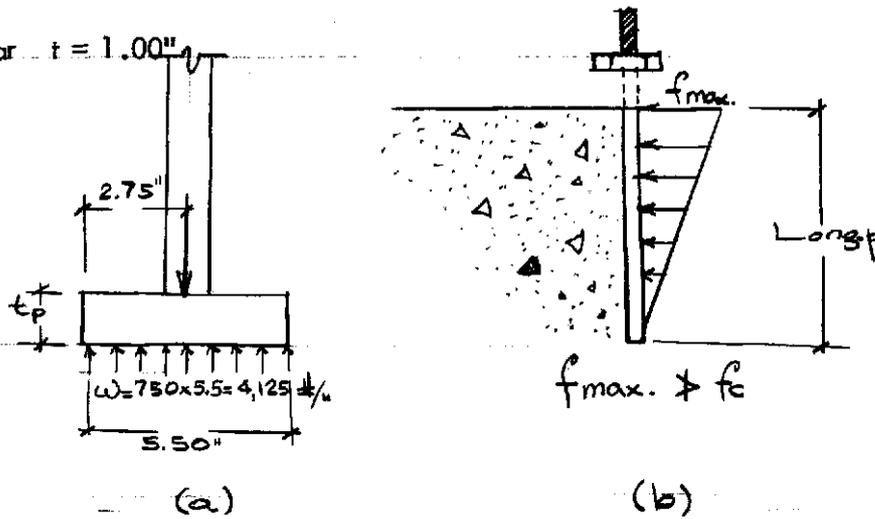


FIG. 3.6

LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO DEL PERNO:

Como vimos anteriormente cada perno resiste 2.18 kips
 $= 2,180 \#$

El esfuerzo máximo del perno será:

$f_c \times \text{Diám. perno}$

$$750 \times 0.625 = \dots = 468.75 \#/\text{pulg}^2$$

$$\frac{468.75 \times \text{long}_p}{2} = 2,180$$

$$\therefore \text{long}_p = 50''$$

La plancha irá soldada a la columna con soldadura de $1/4''$ y de una longitud de $2\frac{1}{2}''$.

RESUMEN DEL DISEÑO DE LAS TORRES:

Sección de las torres.....	14 WF 30
Pernos del pie de la torre.....	5/8"
Plancha de acero de 5½" por 2½".....	espesor = 1.00"
Longitud de los pernos empotrados...	.50"

La longitud de empotramiento de los pernos puede reducirse si se aumenta el diámetro de los mismos, el procedimiento de diseño será el mismo anterior, variando por consecuencia las dimensiones de la plancha.

3.1.4 ANCLAJES:

Los anclajes se diseñarán del tipo externo o sean descubiertos; los dos serán iguales debido a la simetría del puente, y por lo tanto de la tensión en el cable de los tirantes laterales.

Por ser iguales los ángulos ϕ y ϕ_1 la tensión T_1 , es igual a la tensión en el cable principal es decir de 8,157.56#.

Los anclajes o muertos se diseñarán de concreto y se usará la teoría de Rankine para el cálculo del empuje de T suelo.

La forma y dimensiones asumidas inicialmente aparecen en la figura 3.7, debiendo hacerse un chequeo de las mismas para ver si satisfacen las condiciones del problema y en caso contrario hacer los cambios necesarios.

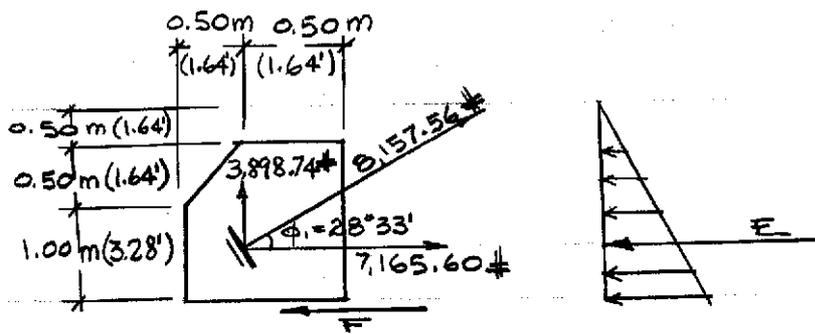


FIG. 3.7

1o.- CALCULO DEL EMPUJE:

$$\text{Empuje} = \frac{1}{2} w \cdot h^2 \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \times a$$

en la ecuación anterior:

w = peso unitario del suelo = 120 #/pie³ (asumido)

h = altura del muro = 2.00 m = 6.56 pies

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo = 30° (asumido)

a = ancho del anclaje = 1.00 m = 3.28 pies

$$E = \frac{1}{2} \cdot 120 \cdot (4.92)^2 \cdot \frac{1 + 0.500}{1 - 0.500} \cdot 3.28$$

$$E = 14,293.58 \#$$

2o.- CALCULO DE F:

Peso del concreto:

$$W_1 = \text{Volumen de concreto} \times 150 \text{ libras/pie}^3$$

$$W_1 = 7,276.50 \text{ libras}$$

Peso de la tierra:

$$W_2 = \text{Volumen de la tierra} \times 120 \text{ libras/pie}^3$$

$$W_2 = 529.39 \text{ libras}$$

Peso total:

$$W = W_1 + W_2$$

$$W = 7,805.89 \text{ libras}$$

De donde:

$$F = u (W - 3,898.74)$$

$$F = 0.5 (7,805.89 - 3,898.74)$$

$$F = 1,953.58 \text{ libras}$$

3o.- CHEQUEO POR DESLIZAMIENTO:

$$\frac{E + F}{7,165.60} \geq 1.5$$

$$\frac{14,293.58 + 1,953.58}{7,165.60} = 2.27 > 1.5 \text{ OK}$$

Como se puede observar, la relación está dentro de los límites establecidos, lo cual nos indica que las dimensiones asumidas inicialmente son satisfactorias.

3.2 PRESUPUESTO:

Para determinar el presupuesto del puente, debemos calcular en primer lugar el volumen de materiales; de esta manera se empezará a determinar la longitud de cable principal y de las péndolas. Para estos cálculos se emplearán las ecuaciones dadas en el Capítulo I. En segundo lugar se verán los precios y la mano de obra que se utilizará. Finalmente se hará el resumen para poder determinar el costo unitario del puente colgante para una tubería de 4" de hierro fundido.

LONGITUD DEL CABLE PRINCIPAL:

Por medio de la ecuación (16), se puede determinar la longitud total del cable principal, debiendo recordar que el mismo está constituido por dos de 9/16" así mismo debe considerarse un 5% más de longitud, como factor de seguridad por cualquier pérdida imprevista.

De la ecuación (16):

$$S + 2S_1 = L (1 + 8/3 n^2 - 32/5 n^4) + 2 L \sec. \theta_1$$

En donde:

$$L = 40.00 \text{ m} = 131.20 \text{ pies}$$

$$n = 1/9$$

$$L_1 = 10.00 \text{ m} = 32.80 \text{ pies}$$

$$\sec \theta_1 = 1/\cos \theta_1 = 1/0.87840 = 1.13843$$

$$\therefore S + 2S_1 = 210.08 \text{ pies}$$

$$5\%(S + 2S_1) = \frac{10.50 \text{ pies}}{220.58 \text{ pies}}$$

Como son dos cables:

Longitud total de los dos cables es 441.16 pies, para fines de presupuesto tomaré 450 pies.

LONGITUD DE LAS PENDOLAS:

La longitud de las péndolas se calcularán mediante el procedimiento descrito en 1.2.b), haciendo uso de la ecuación (20) en la cual el valor de "x" es variable. Debe tomarse en factor de seguridad de 15% más de longitud debido a que las péndolas van sujetadas por medio de accesorios como abrazaderas o grapas y guardacabos, los cuales se ilustran en el capítulo 1.2.e). Para una mayor simplificación en el cálculo, se hace un resumen en forma de cuadro de la longitud de las péndolas las cuales están numeradas como se observa en la figura 3.1.

Péndola	x		S - x pies	4 f/S ²	y pies	Long. de Pénd.	N ^o de Pénd.	Long. Pénd. x N ^o Pénd.
	m.	pies						
1	2	6.56	124.64	0.00338	2.76	15.08	2	30.16
2	4	13.12	118.08	"	5.23	12.61	2	25.22
3	6	19.68	111.52	"	7.42	10.42	2	20.84
4	8	26.24	104.96	"	9.31	8.53	2	17.06
5	10	32.80	98.40	"	10.91	6.93	2	13.86
6	12	39.36	91.84	"	12.22	5.62	2	11.24
7	14	45.92	85.28	"	13.24	4.60	2	9.20
8	16	52.48	78.72	"	13.96	3.88	2	7.76
9	18	59.04	72.16	"	14.40	3.44	2	6.88
10	20	65.60	65.60	"	14.56	3.28	1	3.28

Longitu total = 145.50 pies

$$15\% (145.50) = \frac{21.83}{167.33 \text{ pies}}$$

Para los efectos de presupuesto tomaré 170.00 pies de cable de 3/16".

VOLUMEN DE CONCRETO:

El volumen de concreto será de 55 metros cúbicos.

LONGITUD DE LA TUBERIA:

La longitud total de la tubería de 4" HF será de 60 m = aprox. 200 pies.

LONGITUD DE LAS TORRES:

La longitud de las torres para fines de presupuesto será de 20 m = aprox. 65 pies de 14 WF 30

ACCESORIOS:

Para el presupuesto se tomará el valor de los accesorios para los cables como un 30% de costo de los mismos, - por carecer de un precio más o menos fijo en el mercado ya que actualmente estos precios están sufriendo muchas variaciones. Así mismo para los accesorios de la tubería se tomará el 30% del costo de ésta. Los accesorios de las torres se tomarán como un 30% del costo de las mismas.

RESUMEN DE MATERIALES:

		Unidad	Costo Unitario	Costo Total
TUBERIA DE 4" HF	200	pies	Q. 1.35	Q. 270.00
CABLE DE 9/16"	450	"	0.30	135.00
CABLE DE 3/16"	170	"	0.15	25.50
ACERO ESTRUCTURAL 14 WF 30	65	"	3.50	227.50
CONCRETO DE 3,000 lbs/pulg ²	55	m ³	22.00	1,210.00
ACCESORIOS:				
En cable de 9/16"	---	---	-----	40.50
En cable de 3/16"	---	---	-----	7.65
En acero estructural	---	---	-----	68.25
En tubería de 4" HF	---	---	-----	81.00

COSTO TOTAL DE MATERIALES: Q.2,065.40

COSTO DE LA MANO DE OBRA:

El costo de la mano de obra del montaje del cable, generalmente se cotiza por unidad de peso (1), y en nuestro caso se asumió el siguiente:

Precio unitario del montaje = Q.0.35/kg.
 Peso del cable de 9/16" = 450 pies x 0.92 kg/pie = 414 kg.
 Peso del cable de 3/16" = 170 pies x 0.31 kg/pie = 55 kg.
 Costo total del montaje del cable = (414 + 55) x 0.35 =
 Q.164.15

El costo de la mano de obra del montaje de las torres, generalmente se cotiza en igual forma, por unidad de peso:

Precio unitario del montaje de las torres = Q.0.50/kg.
 Peso del acero estructural 14 WF 30 = 65 pies x 13.63 kg/
 pie = 886 kg.
 Costo total del montaje de las torres = 886 x 0.50 = Q.443.00

El costo de la mano de obra de la colocación del concreto (10), será de Q.5.00/m³:

Costo total de la colocación del concreto = 55 m x Q.5.00/
 m³ = Q.275.00

Colocación de la tubería de 4" HF considerando la em
 plomadura de los mismos (10), Q.0.15/pie:

Costo total de la colocación de la tubería de 4" HF = 0.15
 x 200' = Q.30.00

El costo de la excavación estructural (10), será de
 Q.0.95/m , para la excavación a mano de 1.50 a 2.50 me
 tros de profundidad:

Costo de la excavación estructural = $60 \text{ m}^3 \times \text{Q.}0.95 =$
 $\text{Q.}57.00.$

Este costo incluye el valor del relleno estructural.

RESUMEN DE LA MANO DE OBRA:

Montaje de los cables.....	Q. 164.15
Montaje de las torres.....	443.00
Colocación del concreto.....	275.00
Colocación de la tubería de 4" HF.....	30.00
Excavación y relleno estructural.....	57.00
COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA:	<u>Q. 969.15</u>

COSTO TOTAL DE PUENTE COLGANTE:

Materiales.....	Q. 2,065.40
Mano de obra.....	969.15
	<u>Q. 3,034.55</u>

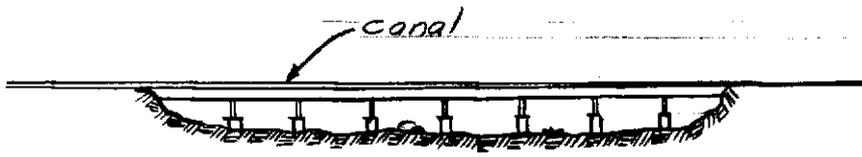
COSTO UNITARIO: $\frac{\text{Q. } 3,034.55}{60 \text{ m}} = \text{Q.}50.60/\text{m} = \text{Q.}15.45/\text{pie}$

CAPITULO IV

4.1 COMPARACION ECONOMICA CON OTRAS SOLUCIONES:

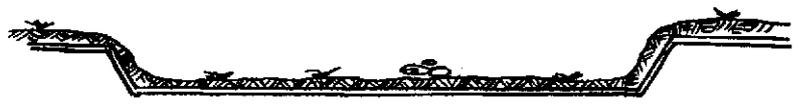
La comparación económica con otras soluciones, debe hacerse con base en los costos unitarios, haciendo una comparación entre las otras alternativas que pudieran existir para salvar una depresión del terreno, una carretera o un río.

Estas alternativas pueden consistir en construir un puente canal, tal como se ilustra en la figura 4.1. Esta alternativa no es conveniente hacerla cuando se trata de líneas de conducción de agua potable ya que la misma es conducida a través de la tubería a una presión determinada que se rompería al quedar expuesta la superficie libremente; por lo que considero que el puente canal puede compararse económicamente con un puente canal colgante, ya que como se puede observar en la figura, dicho puente está soportado por columnas, las cuales serían de gran altura en las depresiones grandes, resultando por consiguiente antieconómicas y de laboriosa construcción. Además la tubería considerada en el diseño es de 4" de diámetro, por lo tanto debería de compararse con un canal de una sección equivalente que conduzca el mismo caudal, y sería de dimensiones muy pequeñas como para intentar hacer el diseño del mismo. Por consiguiente el puente colgante es lógicamente una mejor solución que el puente canal para las líneas de conducción de agua potable.



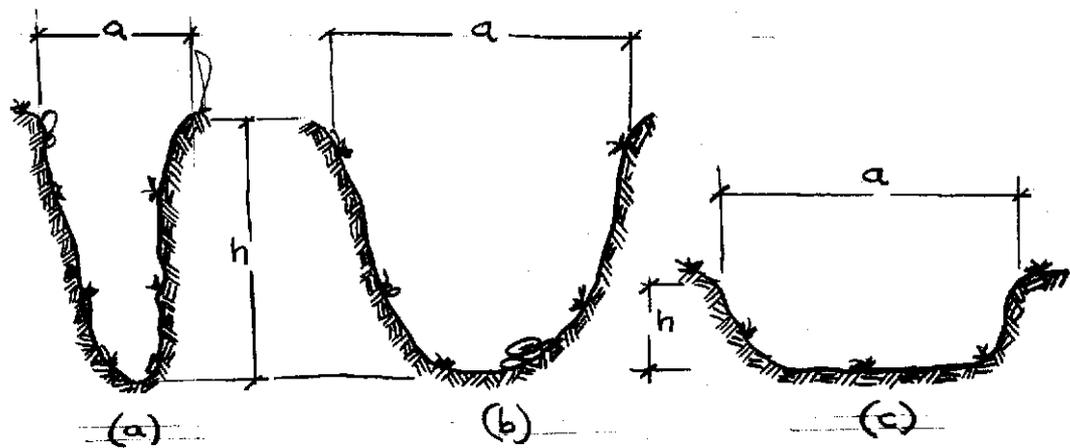
PUENTE CANAL

FIG. 4.1



SIFON INVERTIDO

FIG. 4.2



DEPRESIONES DE TERRENO

FIG. 4.3

En este caso la comparación se podría hacer no con un puente canal sino con un "puente tubería", donde se considerarán para la integración de costos los siguientes factores:

- 1) Altura total y número de columnas, que dependen de las condiciones del terreno.
- 2) Sección de las columnas, que depende de la separación entre columnas, de las cargas de diseño, altura, etc.
- 3) Accesorios de la tubería y de las columnas.
- 4) Costo de la mano de obra.

Otra alternativa sería usar la tubería como sifón invertido, tal como se ilustra en la figura 4.2; considero que con esta alternativa sí se puede hacer una comparación económica, siempre que las condiciones topográficas así lo permitan, ya que para salvar obstáculos demasiado profundos, y de longitud relativamente corta, figura 4.3.(a), será más recomendable la colocación de un puente colgante; no solamente porque resultaría más práctico sino porque el comportamiento hidráulico del flujo sería más uniforme. En el caso en que la relación entre el largo y la profundidad (l/h), figura 4.3(b), se va aproximando a la unidad, sí debe hacerse un estudio económico de la solución; considerando que por el fondo de la depresión no pase un río porque entonces debe calcularse la socavación que produce el mismo y enterrar la tubería, incrementándose el valor de "h" y aproximándose al caso de la figura 4.3(a). Debe ponerse especial cuidado cuando el río conduzca aguas contaminadas, producida por posibles descargas de aguas negras de alguna población situada aguas arriba, en cuyo caso debe descartarse el uso del sifón invertido, por el riesgo siempre presente de la contaminación del agua conducida en la mis

ma. Si por el fondo no pasa corriente de agua, resultaría más económico colocar sifón invertido ya que el costo unitario del mismo es aproximadamente de Q.5.60/m para tubería de 4" HF como puede verse en la integración de costos siguiente, mientras que el costo de un puente colgante es de Q.50.60/m.

MATERIALES:

1 metro de tubería de 4" HF.....	Q. 4.45
Otros materiales: concreto, ladrillos, etc...	<u>Q. 0.15</u>
TOTAL DE MATERIALES.....	Q. 4.60

MANO DE OBRA:

Excavación y Relleno.....	Q. 0.70
Colocación de la tubería.....	Q. 0.25
Prestaciones, imprevistas, etc.....	<u>Q. 0.15</u>
	Q. 5.60

Cuando suceda el caso en que la relación entre la longitud y la profundidad (a/h), figura 4.3(c), sea cada vez mayor y la depresión no esté constituida por un río, será más económico colocar la tubería como sifón invertido. En caso contrario, deberá hacerse el estudio económico comparativo, considerando como se dijo anteriormente la socavación del río, la profundidad, facilidad en la instalación, etc.

En general, el puente colgante tiene la gran ventaja que no necesita obra falsa, es de fácil construcción y después de construido es la estructura más segura conocida dentro de la ingeniería de puentes. El principal miembro es el cable y este tiene un alto factor de seguridad.

CONCLUSIONES

- 1o.- El diseño de los puentes colgantes para paso de tuberías de conducción de agua debe hacerse cuidadosamente para obtener resultados satisfactorios desde el punto de vista económico.
- 2o.- El problema principal que presentan los puentes colgantes es la fuga de divisas, porque la mayor parte de los materiales son importados.
- 3o.- El cálculo de la subestructura de un puente colgante es más simple que el de la subestructura de un puente tubería.
- 4o.- En general, no se recomienda el uso de puentes colgantes para tuberías de diámetro pequeño en tramos largos; se recomienda para paso de tuberías de diámetro grande en tramos pequeños.
- 5o.- Los puentes colgantes son más seguros que los pasos constituidos únicamente por la tubería sostenida por columnas por el riesgo de que éste último sistema sea utilizado eventualmente para el paso de personas.
- 6o.- Para salvar ríos o corrientes de agua que presenten contaminación por descargas de aguas negras o desechos industriales aguas arriba del punto de cruce, el paso con puente colgante es el más indicado.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- "CONSIDERACIONES ACERCA DEL USO DE PUENTES COLGANTES CORTOS EN CAMINOS DE ACCESO". Meza Duarte, Raúl. Tesis de graduación de Ingeniero Civil. Agosto de 1,969.
- 2.- "A PRACTICAL TREATISE ON SUSPENSION BRIDGES". Steinman, D. B. John Wiley & Sons., Inc. Segunda edición. 1,949.
- 3.- "WIRE ROPE HANDBOOK". Armco Steel Corporation, Sheffield Division, 1,963.
- 4.- "THE THEORY OF SUSPENSION BRIDGES". Pugsley, Sir Alfred. Edward Arnold (Publishers), Ltd. Primera edición 1,957.
- 5.- "STRUCTURAL ENGINEERS HANDBOOK". Ketchum, Milo Smith. 3a. Edición. McGraw-Hill. 1,924.
- 6.- "CALCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL". Granville, Smith y Longley. Traducción al español. 1,959. U.-T.E.H.A.
- 7.- "MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION". American Institute of Steel Construction. Sexta edición, 1,967.
- 8.- "REGLAMENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO". American Concrete Institute. ACI 318-63.

- 9.- "ESTABILIDAD DE PUENTES COLGANTES". Arredondo, F. Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento. Madrid, 1,949.
- 10.- "ANALISIS Y CONTROL DE COSTOS DE INGENIERIA". Vides Tobar, Amando. Primera edición 1,964.
- 11.- "PLASTIC DESIGN IN STEEL". American Institute of Steel Construction. 1,967.
- 12.- "ANALISIS COMPARATIVO DE POSIBLES OBRAS PARA SALVAR DEPRESIONES DEL TERRENO CON APLICACION EN EL PROYECTO DE RIEGO LA FRAGUA". López Sandoval, José Ricardo. Tesis de graduación de Ingeniero Civil. Julio de 1,969.



Ricardo Enrique Catalán Cuéllar

Vo. Bo.

Ing. Roberto Mayorga
Asesor

Vo. Bo.

Ing. Joaquín Lottmann
Jefe del Departamento
de Estructuras

I M P R I M A S E:

Ing. Amado Vides Tobar
Decano

