



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SUSTITUCIÓN Y REFORZAMIENTO DE TUBOS EN
LAS LÍNEAS 1 Y 2 DEL ACUEDUCTO DEL SISTEMA
CUTZAMALA, ESTADO DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:

SARA LUZ VALENZUELA CAMACHO

DIRECTOR DE TESIS:
M. I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA



Ciudad Universitaria

Noviembre 2014



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/134/2014

Señorita

SARA LUZ VALENZUELA CAMACHO

Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

"SUSTITUCIÓN Y REFORZAMIENTO DE TUBOS EN LAS LÍNEAS 1 Y 2 DEL ACUEDUCTO DEL SISTEMA CUTZAMALA, ESTADO DE MÉXICO"

INTRODUCCIÓN

I. ANTECEDENTES

II. MARCO TEÓRICO

III. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

IV. CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 3 de Septiembre de 2014

EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH

*A mis abuelitos
"Coca" y Alicia*

Índice general

Introducción	1
1. Antecedentes	3
1.1. Sistema Cutzamala	5
1.1.1. Historia	5
1.1.2. Descripción	7
1.1.3. Problemática	10
1.2. Historia del presfuerzo	12
1.3. Aplicaciones en México	17
2. Marco Teórico	29
2.1. Presfuerzo	29
2.1.1. Principios	29
2.1.2. Pretensado	34
2.1.3. Postensado	37
2.1.4. Materiales y Equipo	40
2.1.5. Sistema Freyssinet	45
2.2. Tubería de Concreto Presforzado (<i>Prestressed Concrete Cylinder Pipe</i> , PCCP)	54
2.2.1. Cargas y estados límite	58
2.2.2. Causas y modos de falla	61
2.2.3. Mantenimiento, monitoreo y detección de fugas	65
3. Alternativas de Solución	79
3.1. Sustitución de tubo	80
3.2. Reforzamiento exterior mediante presfuerzo	102
3.3. Comparativa	110

4. Conclusiones	113
A. Nomenclatura	115
B. Glosario	117
Bibliografía	125

Introducción

El problema del suministro de agua potable para consumo en la Ciudad de México es uno de los más complejos que enfrentan los ingenieros mexicanos, no es posible darle una solución única a tantos desafíos que van desde la escasez de agua potable hasta inundaciones, es un problema que abarca todas las disciplinas de la ingeniería civil.

En este trabajo se pretende comparar dos métodos de rehabilitación de las tuberías de las líneas 1 y 2 del Sistema Cutzamala, a fin de saber cuando es conveniente aplicar cada uno, y con esto proponer una mejora en el servicio de mantenimiento a dicho sistema.

En el capítulo de Antecedentes se da una visión general de lo que es el Sistema Cutzamala, para después describir el problema del desgaste de las tuberías, y cómo se ha enfrentado hasta ahora esta situación. Después se habla de la historia del presfuerzo, para dar una idea de los diferentes problemas que ha resuelto esta tecnología, y se hace énfasis en los usos que se le han dado en nuestro país.

En el segundo capítulo se explica el principio del presfuerzo y sus dos modalidades: pretensado y postensado. Además se da una descripción de los materiales y equipos que se utilizan en la fabricación e instalación de los elementos pretensados.

En este mismo capítulo se explica la composición y diseño de la tubería de concreto presforzado, que es una de las que se utilizan en las líneas 1 y 2 del Sistema Cutzamala, y para la cual fue diseñada la tecnología de reforzamiento exterior mediante presfuerzo externo, que se describe en el capítulo 3. Se hace hincapié en explicar las posibles causas de falla en este tipo de elementos, siendo la corrosión la principal de ellas, así como las medidas preventivas con las que cuenta el Sistema Cutzamala para la prevención de rupturas y monitoreo del desgaste de estos elementos.

En el tercer capítulo se describen las dos tecnologías propuestas para la

rehabilitación de las tuberías de concreto presforzado de las líneas 1 y 2 del Sistema Cutzamala, con el fin de comparar sus ventajas y desventajas, para finalmente en las conclusiones dar una propuesta de aplicación de cada una de ellas de acuerdo con el nivel de mantenimiento que requiera la tubería.

Capítulo 1

Antecedentes

Es en el año 1325 que los mexicas se establecieron y fundaron la ciudad de Tenochtitlán en la cuenca del Valle de México, debido a que es una cuenca cerrada, se generó la concentración de grandes volúmenes de agua, dando origen a un sistema lagunario, el cual ha tenido cambios como resultado del asentamiento de un número de personas cada vez mayor.

Para hacer uso de dicho espacio, lograr su beneficio, comodidad y evitar inundaciones, se realizaron grandes obras hidráulicas como lo son: construcción de calzadas y diques para prevenir inundaciones; construcción de túneles y canales para desfogar las aguas pluviales y descargas del uso público; construcción de drenajes semi y profundos para desalojar aguas residuales, etc. (Barocio, 2005).

Sin embargo, el sistema lacustre resultó insuficiente para satisfacer las necesidades de la creciente población. Por lo que para abastecer de agua potable a la población de la Ciudad de México, hacia fines del siglo pasado, se contaba con más de 1,100 pozos someros localizados en la ciudad, número que se fue incrementando por la perforación de pozos profundos municipales y de pozos particulares (Barocio, 2005; Barrientos, 1999).

Ante el acelerado hundimiento del subsuelo de la Ciudad de México motivado por la extracción de agua y los cambios en la estructura de los suelos, en los años cincuenta se suspendieron los permisos para perforar pozos particulares y se cancelaron muchos pozos municipales ubicados en el centro de la ciudad. Para sustituir el caudal de los pozos clausurados y satisfacer la creciente demanda de agua potable, en 1951 se inauguró el Sistema del Río Lerma constituido por 234 pozos ubicados en el Estado de México.

De 1974 a 1975 se extrajeron, del Sistema del Río Lerma, caudales máxi-

mos de alrededor de $14 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo, debido al abatimiento de los niveles freáticos y a la dotación de un caudal para el riego agrícola en la zona del valle de Lerma (que es la zona de extracción), el gasto recibido por el Distrito Federal se fue reduciendo (Barrientos, 1999).

En 1970 la ciudad contaba con cerca de 7 millones de habitantes, y su área conurbada crecía rápidamente hasta alcanzar los 2 millones de habitantes, en la cuenca del Lerma los recursos hídricos comenzaban a agotarse y el acuífero del Valle de México presentaba problemas de sobreexplotación (Espinoza, 2006).

Por lo que, en 1972 se crea la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM)¹, adscrita a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), encargándose de operar cinco sistemas de pozos con una aportación de $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$ a la Ciudad de México, además del caudal entregado a las poblaciones asentadas en el Estado de México. En este mismo año, la CAVM inicia los estudios para abastecer a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) de agua potable proveniente de las cuencas Libres-Oriental, Tula-Taxhimay, Alto y Bajo Tecolutla, Alto y Bajo Amacuzac y Alto Cutzamala (Barrientos, 1999).

A fines de la década de los setenta, la CAVM decide, con base en los estudios realizados desde 1972, que la cuenca alta del río Cutzamala en el Estado de México, disponía de las mejores condiciones en cuanto a la calidad del agua y caudales excedentes, y por tanto sólo requeriría del cambio de uso de generación eléctrica a suministro de agua potable (Barrientos, 1999). El gobierno mexicano decidió entonces, transformar el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán construido sobre el curso del río Balsas y originalmente con el propósito de generar energía eléctrica, en almacén de agua para satisfacer la creciente demanda de la Ciudad de México.

Cabe señalar que las obras realizadas entre 1976 y 1994 para adaptar lo que sería el Sistema Hidráulico Cutzamala a sus nuevas funciones, más que afectar a la población o al medio ambiente en la región, propiciaron la formación de nuevos centros de población, en los alrededores del canal Donato Guerra (Mesas de San Martín y Cabecera de Indígenas) en los municipios de Donato Guerra y Villa de Allende, así como la expansión de los asentamientos preexistentes en sitios dispersos a lo largo del canal de conducción (Salazar y Tesillo, 2004).

La construcción del Sistema de Agua Potable Cutzamala inicia en 1976.

¹Cuyo predecesor es la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.

Su ejecución se plantea en tres etapas consecutivas, inaugurándose la primera de ellas en 1982, entrando en operación la segunda y tercera en 1985 y 1995, respectivamente (Barrientos, 1999).

En el 1996 se hicieron los primeros estudios para aprovechar los escurrimientos del río Temascaltepec, proyecto que se canceló en el 2000 por considerarse que no resolvería el problema de desabasto (Espinoza, 2006; Hidalgo, 2000).

Finalmente en el 2013 se anunció un nuevo proyecto, la tercera línea del Sistema Cutzamala, que se pretende permita ofrecer mayor seguridad al sistema y sea utilizada cuando se realicen trabajos de mantenimiento para así evitar el corte del suministro (Excelsior, 2013).

1.1. Sistema Cutzamala

1.1.1. Historia

Primera Etapa

Entró en operación en 1982 aportando 4,000 l/s de la presa Villa Victoria, en el Estado de México. Estas aguas se conducen por el canal Ing. Héctor Martínez de Meza (con longitud de 13 km), a la planta potabilizadora Los Berros, localizada cerca de Valle de Bravo a una altitud de 2,540 msnm, y a partir de ahí el agua se conduciría por gravedad a la Zona Metropolitana del Valle de México (Espinoza, 2006; Salazar y Tesillo, 2004).

Segunda Etapa

Esta entró en operación en 1985, y consistió en el aprovechamiento del agua de la presa Valle de Bravo (ubicada a 1768 msnm) en el Estado de México y aportando un gasto de 6,000 l/s; hasta la planta potabilizadora Los Berros por medio de tres plantas de bombeo (2, 3, 4).

Estas plantas de bombeo estn equipadas con tres conjuntos motor-bomba-
vlvula esférica con capacidad unitaria de 4,000 l/s, y motores con una potencia que llega a los 16, 500 kw, para elevar el agua a una altura de 822 m.

La infraestructura para la conduccion del agua desde la presa Valle de Bravo hasta la planta potabilizadora Los Berros, tiene una longitud de 29 km y est constituida por una tubera de concreto presforzado de 2.50 m de diametro y tramos de acero con dimetros que fluctan entre 1.83 y 3.17 m hasta

la caja repartidora y el canal Donato Guerra; este ltimo tiene una longitud es de 7.50 km y es de seccin trapezoidal revestida de concreto, con plantilla de 3.0 m de ancho y una profundidad de 3.0 m, con taludes 1.5:1.0 y pendiente de 0.0002..

Para introducir los 6 mil l/s de esta etapa al Valle de México, se construyó el túnel Analco-San José (de 16 km de longitud), en su construcción se aprovecharon dos lumbreras del túnel del Sistema Lerma y se excavó una tercera en Dos Ríos, con profundidades de 210 m las dos primeras y de 30 metros la última; en ésta se alojó la estructura de bifurcación para la conducción del agua hacia los municipios conurbados del Estado de México, mediante el Ramal Norte-Macrocircuito y hacia el Distrito Federal por el Ramal Sur-Acuaférico (Espinoza, 2006; Salazar y Tesillo, 2004).

Tercera Etapa

Esta etapa está integrada por los subsistemas Chilesdo y Colorines para un aprovechamiento total de 9 m³/s.

El subsistema Chilesdo (localizado a 2395 msnm), se encuentra en operación desde 1993, aporta un metro cúbico por segundo en promedio y hasta 5 metros cúbicos en épocas de avenidas; el sistema capta las aguas del río Malacatepec en la presa Chilesdo y eleva el líquido más de 300 m hasta la planta potabilizadora a través de una planta de bombeo (la número 6).

En tanto, Colorines (localizado a 1600 msnm), aprovecha las aguas de las presas Tuxpan y el Bosque, en el Estado de Michoacán, e Ixtapan del Oro, en el Estado de México mediante la presa derivadora Colorines, para un suministro de 8 m³/s en promedio. Con la operación de este subsistema se pudo atender los incrementos anuales en la demanda hasta 1999, además de que permitirá abatir los rezagos existentes y reducir la sobreexplotación del acuífero hasta en 2.4 m³/s, mediante la cancelación de pozos en el Valle de México.

Se construyó la planta de bombeo 1 para elevar el agua a 1100 msnm hasta la planta potabilizadora (ubicada a 700 msnm). Con la terminación de la tercera etapa, 19 m³/s de agua (gasto de diseño) se entregarían en total para abastecer a diez municipios conurbados del Estado de México y al poniente de la Ciudad de México (Espinoza, 2006; Salazar y Tesillo, 2004). Cabe señalar que el gasto máximo que en realidad se puede abastecer con el Sistema Cutzamala apenas llega a 14 m³/s.

Cuarta Etapa

Cuarta etapa (o proyecto Temascaltepec).

Debido a la creciente demanda de agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en 1996 se proyectó la ampliación del Sistema Cutzamala para aprovechar los escurrimientos del río Temascaltepec que nace en la vertiente occidental del Nevado de Toluca, y que abarcaría parcialmente a los municipios de Valle de Bravo, Zinacantepec, Temascaltepec y San Simón de Guerrero (Salazar y Tesillo, 2004).

Este proyecto se canceló en el 2000 pues carecía de estudios de impacto ambiental, además tenía un costo de 8 mil millones de pesos y hubo una fuerte oposición social (Hidalgo, 2000).

Tercera línea

En el 2013, con un presupuesto de 4 mil 800 millones de pesos, comenzó el proceso para construir la Tercera Línea del Sistema Cutzamala que, como ya se mencionó, entre otros beneficios podrá utilizarse como vía alterna de suministro durante el mantenimiento del actual sistema, sin disminuir el abasto de agua potable a la población (Universal, 2014).

1.1.2. Descripción

El sistema Cutzamala es un sistema hidráulico de almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua potable para la población e industria del Distrito Federal y el Estado de México, se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 18 denominada Río Balsas (GIT, 2013).

Consta de 7 presas principales, como se puede observar en la Figura 1.1, en los vasos de las presas Villa Victoria, Valle de Bravo, Chilesdo, Colorines, Ixtapan, Del Bosque y Tuxpan, se capta el agua que se genera en la cuenca del río Cutzamala, los gastos aprovechables en Villa Victoria y Valle de Bravo son debidos a cuencas propias, y en lo que respecta a Colorines, recibe agua proveniente de la presa Del Bosque -y sus filtraciones- y de la presa Tuxpan. En su conjunto, las siete presas proporcionan al Sistema un gasto medio de $14.96 \text{ m}^3/\text{s}$ (Barrientos, 1999; CONAGUA, 2014c).

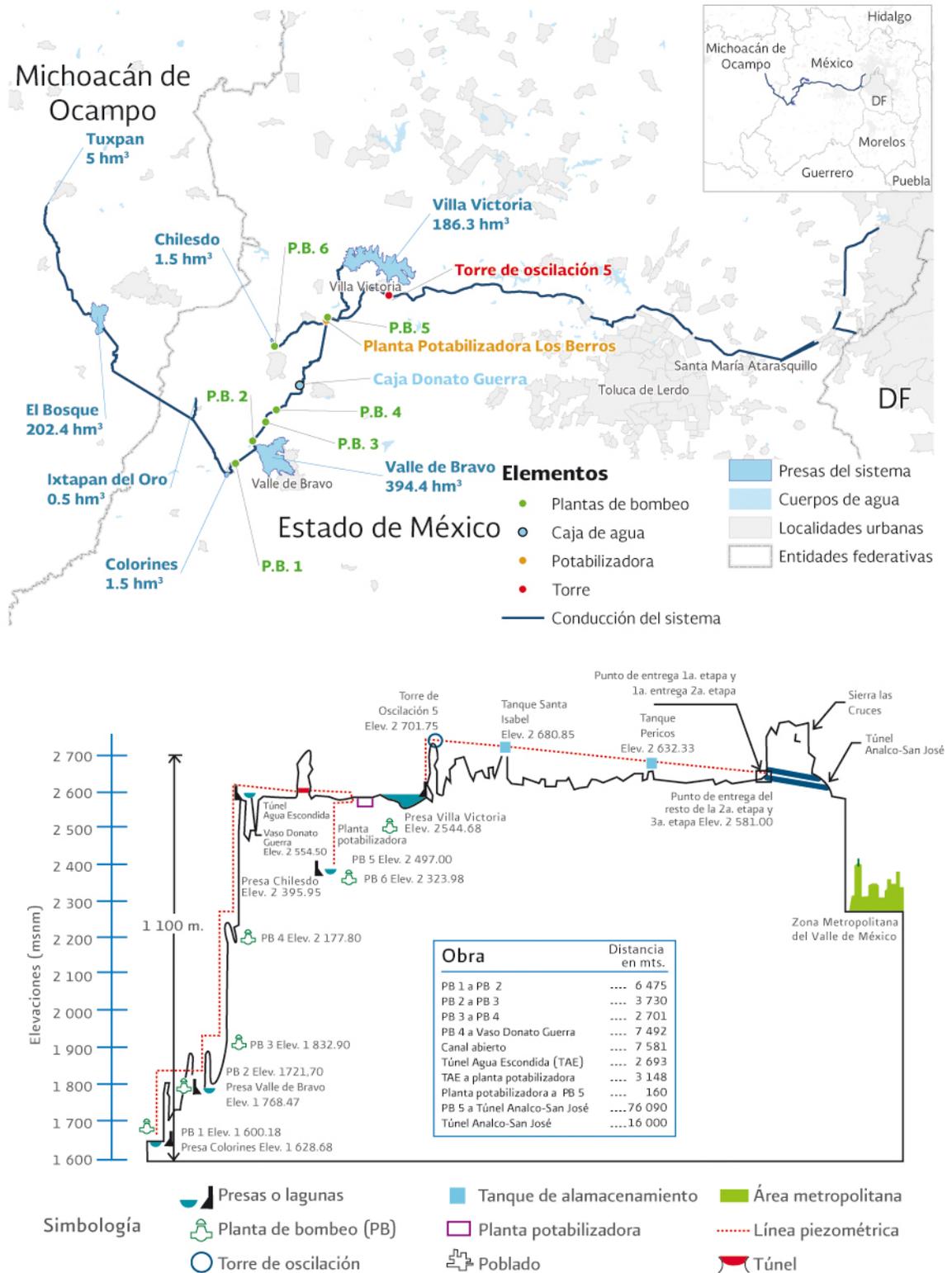


Figura 1.1: Sistema Cutzamala (CONAGUA, 2014c).

Tabla 1. Presas del Sistema Cutzamala (Barrientos, 1999; CONAGUA, 2014c)

Nombre oficial	Capacidad al NAMO (hm^3)	Entidad Federativa	Tipo de presa
Villa Victoria	185.72	Estado de México	Almacenamiento
Valle de Bravo	394.39	Estado de México	Almacenamiento
Chilesdo	1.5	Estado de México	Derivadora
Colorines	1.5	Estado de México	Derivadora
Ixtapan del Oro	0.5	Estado de México	Derivadora
El Bosque	202.40	Michoacán	Almacenamiento
Tuxpan	5.0	Michoacán	Derivadora

También cuenta con un acueducto cuya longitud supera los 250 km, de los cuales 133.8 km realizan la conducción de agua cruda desde las presas hasta la Planta Potabilizadora y, a partir de este punto hasta su entrega en la ZMCM, 117 km realizan la conducción de agua potable.

La conducción del agua potable inicia en la Planta Potabilizadora construida en el municipio Los Berros del Estado de México, realizándose a través de 77 km de tubería de concreto; 16 km del túnel Analco-San José, donde se ubica la lumbrera Dos Ríos que realiza la distribución del agua a los municipios conurbados del Estado de México y al Distrito Federal, a través de los túneles Ramal Norte de 12.5 km y Ramal Sur de 11.5 km, respectivamente (Barrientos, 1999).

El diámetro interior en las dos líneas de tubería de concreto es de 99" (2.51 m), con longitudes estándar de 4.88 m y 7.32 m (GIT, 2013).

Tabla 2. Desarrollo de la conducción de agua potable (Barrientos, 1999)

Tramo	Longitud (km)
Planta Potabilizadora-Túnel "Analco-San José"	77.0
Túnel "Analco San José"	16.0
Ramal Norte	12.5
Ramal Sur	11.5
TOTAL	117.0

Debido a que las cuencas de las presas se localizan por debajo del nivel de la Ciudad de México y de la orografía de la región en la que se asienta el Sistema, fue necesaria la construcción de seis plantas de bombeo.

En el tramo comprendido entre las Presas Colorines y Valle de Bravo, se construyó la Planta de Bombeo 1, con una capacidad instalada para suministrar $20 \text{ m}^3/\text{s}$ y vencer una altura de 157 m. En el tramo comprendido entre la

Presa Valle de Bravo y la Planta Potabilizadora, se construyeron las Plantas de Bombeo 2, 3 y 4, con capacidad instalada para brindar un gasto de 24 m³/s y vencer desniveles de 122, 350.4 y 350 m, respectivamente. Al inicio de la conducción del agua potabilizada, final del proceso de la Planta Potabilizadora, se construyó la Planta de Bombeo 5, con una capacidad instalada de 29.1 m³/s, con la finalidad de prever futuras ampliaciones del Sistema, elevando el agua 174.2 m. Finalmente, en el tramo correspondiente entre la Presa Chilesdo y la Planta Potabilizadora se construyó la Planta de Bombeo 6, cuya capacidad instalada proporciona al Sistema 5.1 m³/s, venciendo 213.2 m de altura.

Además, con la finalidad de regular el régimen y cambiar las condiciones hidráulicas durante la conducción, se construyeron el Cárcamo Regulador “Donato Guerra”, para efectuar el cambio de régimen de bombeo a gravedad, - el cual se ubica al inicio del canal del mismo nombre-, y los tanques de seccionamiento “Santa Isabel” y “Pericos”, para disminuir la presión hidráulica en la tubería, los cuales se ubican a 17 y 53 km, respectivamente, de la Planta de Bombeo 5.

Para realizar la dotación de agua potable a los municipios del Estado de México y a la Ciudad de México, se construyó la estructura denominada Estación Distribuidora “Dos Ríos”. El sistema cuenta con dos conexiones para dotar de agua potable a otros sistemas, la primera ubicada en el Tanque Pericos, para el sistema de agua potable de la Ciudad de Toluca, y la segunda en el cruce del Sistema Lerma, por medio de la cual puede suministrar el flujo de agua a la Ciudad de México (Barrientos, 1999).

1.1.3. Problemática

El concreto es un material poroso que permite la entrada y transporte, de los líquidos y los gases procedentes del exterior. Esta porosidad se debe al agua, que es necesaria para hacer fluida la mezcla y conseguir una buena hidratación del cemento. Durante el fraguado, el agua sobrante que contiene el concreto puede quedar en el interior del mismo o bien evaporarse, dejando una red de canales de variados tamaños, por los que los agentes externos pueden llegar a dañar tanto al concreto como al acero.

La interacción entre el concreto y el medio ambiente es el principal factor de deterioro de las estructuras de concreto armado. Actualmente la preocupación por la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado es mayor, y los estudios que se realizan al respecto se han incrementado.

El principal agente agresivo para el concreto es el agua, ya que actúa como medio de transporte al interior del concreto (Sosa, 2012).

El Sistema Cutzamala aporta el 17% del abastecimiento de la Cuenca del Valle de México, que se complementa con el Sistema Lerma (5%) con la extracción de agua subterránea (58%), con ríos y manantiales (3%) y reúso del agua (7%) (CONAGUA, 2013a). Este proyecto comenzó en los años setenta y a la fecha se sigue desarrollando debido a la creciente demanda de la población del Distrito Federal y de la zona conurbada. Ha requerido diferentes sistemas de mantenimiento para su correcta operación; un problema latente en las líneas de conducción (1 y 2) han sido los daños que se han detectado mediante diversos estudios de inspección a los acueductos, arrojando cada estudio severos puntos de corrosión en los tubos, que genera una gran pérdida de líquido (GIT, 2013).

Hasta ahora, la solución a esto ha sido la sustitución de los tubos con mayor índice de corrosión por piezas nuevas. Estas sustituciones de tubo se hacen en los llamados fines de semana largos, las fechas usuales de cambio de tubería son cercanas a los siguientes días, dependiendo el calendario de cada año:

1. Febrero 1, 2 y 3;
2. Marzo 14, 15 y 16;
3. Abril 18, 19 y 20 (Semana Santa);
4. Mayo 1, 2 y 3;
5. Septiembre 12, 13 y 14;
6. Octubre 31, 1 y 2 de noviembre;
7. Noviembre 14, 15 y 16;
8. O el que la Dirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento elija (CONAGUA, 2014a).

Además de estos mantenimientos rutinarios, existen los paros de emergencia que se dan cuando hay una falla súbita del tubo, usualmente debido al fenómeno de corrosión acelerada sobre el alma de acero, en estos casos se cierra la línea en donde se va a realizar la sustitución de emergencia, reduciendo así el abasto total de este sistema al Valle de México. (CONAGUA, 2013d)

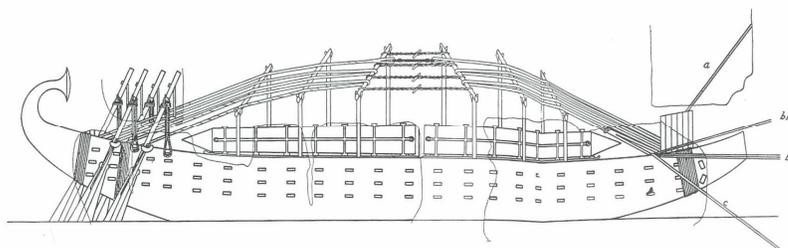


Figura 1.2: Barcaza egipcia presforzada torciendo cuerdas (Gasparini, 2014).

1.2. Historia del presfuerzo

Existen varios ejemplos en la historia del uso de la idea básica del presfuerzo en distintas tecnologías anteriores al nacimiento del presfuerzo moderno. El ejemplo más antiguo de presfuerzo son los botes utilizados por los egipcios que, haciendo uso de postes y cuerdas, lograban pretensar su estructura para evitar que el casco tuviese una curvatura negativa (Figura 1.2). También los vikingos utilizaban el prefuerzo para comprimir sus cubiertas y bordas mediante tirantes de madera (Figura 1.3) (Gasparini, 2014; Orts, 2010).

Otros ejemplos son: la construcción de barriles (Figura 1.4), donde un cincho metálico comprime las duelas de madera para así poder contener líquidos; y la catedral de Santa María de la Flor en Florencia, Italia, ésta fue diseñada por Filippo Brunelleschi, y debido a las dimensiones de su cúpula, requirió una precarga, inducida con el uso de cadenas de hierro y madera, en su base (Figura 1.5) (Lafferty, 2011; Orts, 2010).

Desde 1866 hubo varios ensayos y patentes de concreto presforzado sin mucho éxito pues aún no se habían investigado lo suficiente los efectos de la retracción y fluencia de concreto, y no se disponía de acero de alta resistencia y concreto de alta calidad (IMCYC, 1986; Orts, 2010).

Se considera a Eugene Freyssinet (1879-1962), Figura 1.6, como el “padre” del concreto presforzado moderno, quien en 1908 construyó un arco experimental en el que incorporó tendones presforzados, en 1928 obtuvo su primer patente, y en 1930 utilizó el presfuerzo durante la construcción del puente Plougastel en Francia. Su primera publicación sobre la materia, se tituló *Una revolución en el arte de la construcción*, idea que fue considerada como quijotesca en su tiempo (Hewson, 2003; IMCYC, 1986).

En Alemania, Dyckerhoff y Widmann usaron barras postensionadas du-

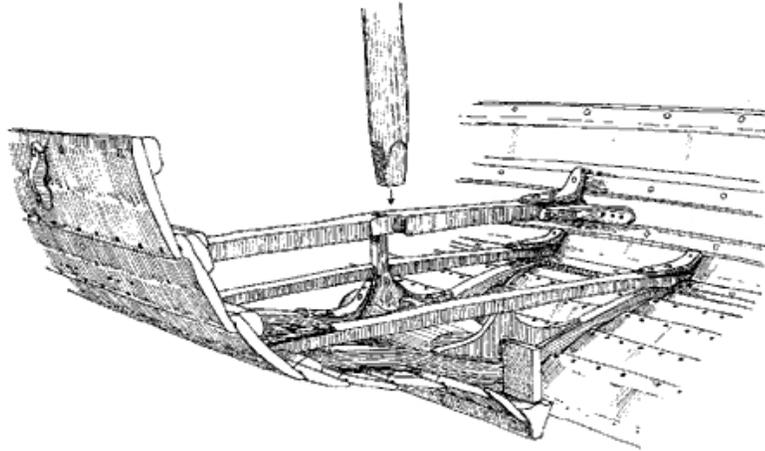


Figura 1.3: Pretensado de un buque vikingo. Imagen tomada de: <http://www.regia.org/Ships1.htm>.



Figura 1.4: Construcción de un barril. Imagen tomada de: <http://www.waitrose.com/>.

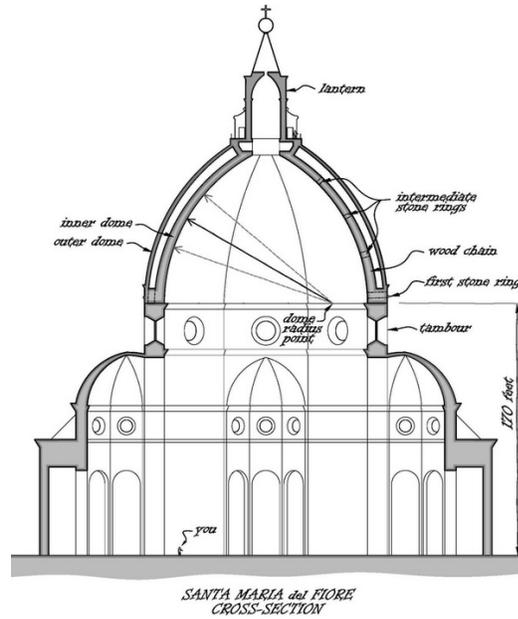


Figura 1.5: Corte de la catedral Santa María de la Flor en Florencia, Italia (Lafferty, 2011).



Figura 1.6: Eugene Freyssinet. Foto tomada de: <http://www.efreyssinet-association.com/>.

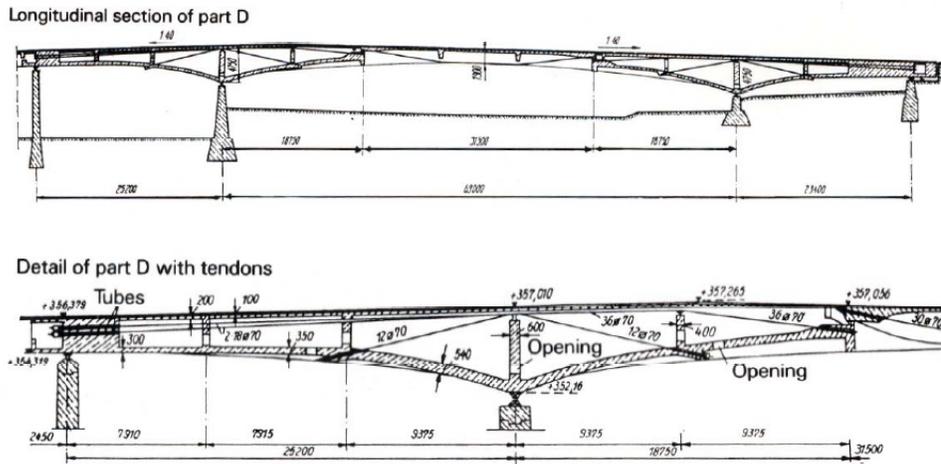


Figura 1.7: Diagrama del puente Aue Bahnhofsbruecke (Ayats, 2014).

rante la construcción de un arco de un puente en Aiseben en 1927. Pero los primeros puentes de concreto presfuerzo se construyeron hasta mediados de los treinta, entre otros: el puente Oued Fodda en Algeria (1936), el puente Aux en Sajonia (1936) y el puente Oella en Alemania (1938) (Hewson, 2003).

De 1936 a 1937, el ingeniero alemán Dischinger construyó el puente Aue (Figuras 1.7 y 1.8), para lo cual empleó barras de acero exteriores al concreto. Dischinger estudió intensamente, la retracción y fluencia del concreto, con lo que consiguió expresar matemáticamente su magnitud y dependencia del tiempo, lo que permitió hacer predicciones mediante el cálculo (Ayats, 2014).

En 1939 el Ing. Freyssinet produjo un sistema de anclaje seguro mediante cuñas cónicas, y posteriormente construyó seis puentes en Marne, Francia entre 1945 y 1950, con los que estableció la técnica. El primero de estos es el puente Luzancy, con un marco de 55 m de longitud; los cinco restantes son cada uno de 73 m de longitud con un marco cuya losa se curva hacia el centro, donde tiene una profundidad de 1 m. Uno de estos puentes, el puente Annet, se muestra en la Figura 1.9. Las losas son o de sección rectangular o un arreglo de vigas T, con el presfuerzo siendo usado verticalmente en los armados, así como horizontalmente a lo largo de la losa (Hewson, 2003).

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, durante el periodo de reconstrucción, existía una escasez de acero que contribuyó al desarrollo y uso del concreto presfuerzo. Durante este periodo Eugene Freyssinet continuó diseñando muchos otros nuevos puentes de concreto presfuerzo.



Figura 1.8: Puente Aue Bahnhofsbruecke. Foto tomada de: <http://commons.wikimedia.org/>.



Figura 1.9: Fotografía del Puente Annet en Francia, autor Jacques Mossot.

Gustave Mangel desarrolló, entre 1940 y 1942, un procedimiento de anclaje mediante el cual dos alambres se tensaban simultáneamente y se anclaban con una simple cuña de metal en cada extremo, con este método construyó varias estructuras en Bélgica (Hewson, 2003; Orts, 2010).

E. Hoyer en Hamburgo desarrolló el “procedimiento de concreto con cuerdas de acero”, el cual se puede considerar como el origen del sistema empleado en la prefabricación industrializada de viguetas.

En Inglaterra, L. G. Mouchel y sus socios, en colaboración con la Prestressed Concrete Company, usaron el concreto presforzado para varios proyectos que incluían, entre otros, puentes. En Alemania, Fritz Leonhardt fue un líder en el desarrollo del concreto presforzado (Hewson, 2003; IMCYC, 1986).

En 1945 Freyssinet desarrolló y patentó su anclaje de fricción cónica. Después de 1945 otros sistemas, tales como el producido por Mangel-Blaton, el BBRV (desarrollado por los ingenieros suizos Birkenmaier, Brandestini, Ros y Vogt) y el Lee-McCall, comenzaron a aparecer, conforme el concreto presforzado se hizo popular (IMCYC, 1986; Orts, 2010).

En 1952, en una reunión de Cambridge, fue creada una sociedad internacional bajo el nombre *Fédération Internationale de la Précontrainte* (FIP). El objetivo principal de este grupo de ingenieros era el de diseminar el mensaje acerca del concepto relativamente desconocido de la construcción con concreto presforzado, lo cual se llevaría a cabo alentando la integración de grupos nacionales en todos los países que tuvieran particular interés en el asunto y facilitando un foro internacional para el intercambio de información. La Gran Bretaña y algunos otros países europeos contaban ya con su propio grupo (el Prestressed Concrete Development Group o PCDG), cuya labor había sido emprendida por The Concrete Society (IMCYC, 1986).

En los años siguientes el desarrollo se caracterizó principalmente por el aumento en la capacidad de los elementos tensores, y por la racionalización de los procedimientos constructivos, especialmente en la construcción de puentes (Orts, 2010).

1.3. Aplicaciones en México

El concreto presforzado se utiliza en elementos estructurales que van desde una vigueta para casa habitación, hasta trabes para puentes de grandes claros; con aplicaciones tan variadas como durmientes para vías de ferrocarril, tanques de almacenamiento y rehabilitación de estructuras dañadas



Figura 1.10: Tanque circular para almacenamiento de agua. Atizapán, Estado de México (Fuente: página de Internet de TICONSA).

(ANIPPAC, 2014). A continuación presentaremos algunas de las estructuras en las que se ha utilizado el concreto presforzado en México:

Tanques de almacenamiento de agua o silos. Se puede usar el presfuerzo en estructuras para almacenar grandes volúmenes de líquidos donde el postensado cumple la importante tarea de evitar fisuras en el concreto haciendo herméticas dichas estructuras. O para reforzar silos con cables envainados y engrasados, con un lubricante solvente al agua, para que el tensado no se dificulte, después de tensados deben ser inyectados con lechada de cemento (Hernández, 1992).

En México, Grupo Ticonsa construyó en 1999 el tanque circular para almacenamiento de agua en Atizapán, Estado de México (Figura 1.10).

Estadios y graderías. La prefabricación en estadios y auditorios es ideal; ya que permite fabricar elementos con geometrías singulares y repetitivas como es el caso de las gradas, aportando reducción en el tiempo de construcción. Además, el presfuerzo garantiza un comportamiento estructural adecuado durante la aplicación de cargas dinámicas (TICONSA, 2014).



Figura 1.11: Estadio Azteca, Ciudad de México (Fuente: página de Internet de SEPSA).

Un buen ejemplo de esto es el Estadio Azteca en la Ciudad de México construido por SEPSA en 1963, Figura 1.11. Es el estadio cubierto más grande del mundo y cuyas gradas son elementos pretensados (ANIP-PAC, 2014).

Túneles. Mediante elementos prefabricados es factible generar un arco. Siguiendo los principios del mismo a cada elemento que forma el arco se le llama dovela. Estas dovelas prefabricadas se manejan del ancho necesario para dar al arco la luz requerida de proyecto. Estos elementos son colocados sobre su cimentación a base de candeleros y en su clave (punto más alto de unión entre dovelas) se deja la preparación para realizar la conexión entre prefabricados.

Durante 2007 y 2008 SEPSA aplicó este sistema en proyectos requeridos para los estados de Guerrero e Hidalgo tanto en desvío de aguas como en generar pasos vehiculares (Figuras 1.12 y 1.13) (SEPSA, 2014).

Edificios. En edificios, como la Torre Skalia (Figura 1.14), se pueden utilizar sistemas como las losas postensadas, que consisten en crear dentro de la estructura un esfuerzo interno que actúe en sentido opuesto a los producidos por las diferentes cargas aplicadas, lo que disminuye la carga actuante y de diseño. El presfuerzo proporciona una mayor ca-



Figura 1.12: Túnel Independencia en Pachuca, Hidalgo (Fuente: página de Internet de SEPSA).



Figura 1.13: Construcción del túnel Chilpancingo en Guerrero (Fuente: página de Internet de SEPSA).



Figura 1.14: Torre Skalia en Guadalajara, Jalisco (Freysinet). Foto tomada de Revisiones de Guadalajara, <http://revisionesgdl.com/>.



Figura 1.15: Instituto Mexicano del Petróleo en el Distrito Federal (Fuente: página de Internet de TICONSA).

pacidad y resistencia a las estructuras, comprime la sección transversal de concreto, reduciendo la cantidad de acero de refuerzo necesario. Las grandes ventajas del sistema son:

- Posibilidad de construir losas planas, sin travesaños peraltados.
- Reducción del espesor total de las losas.
- Aumento de la distancia entre apoyos.
- Disminución del peso total de la estructura.
- Mayor vida útil con mantenimiento mínimo.
- Protección del acero contra la oxidación (Freyssinet de México, 2014a).

También se han construido estructuras totalmente prefabricadas como el Instituto Mexicano del Petróleo, en el año de 1983 (Figura 1.15), posee dos elementos típicos: columnas con brazos en forma de cruz y travesaños losas en sección T (TICONSA, 2014).



Figura 1.16: Puente *San Marcos* en Puebla (Fuente: página de Internet de Freyssinet).

Puentes.

- Puentes en doble volado (Ver Figura 1.16).

Cada voladizo está formado por dovelas prefabricadas o coladas en sitio, las cuales son colocadas en voladizo con respecto a la anterior, y solidarizadas a la precedente mediante presfuerzo. Después del postensado este voladizo se vuelve autoportante y sirve de apoyo para construir las dovelas subsecuentes. Las ventajas del sistema son las siguientes:

- Eliminación de obra falsa.
- Posibilidad de dejar libre para circulación el claro a cruzar.
- Reducción y mayor aprovechamiento de moldes de cimbrado.
- Aumento del rendimiento de mano de obra, ciclos repetitivos.
- Posibilidad de trabajar simultáneamente en varias pilas.
- Rapidez en el avance de obra.

- Puentes atirantados (Ver Figura 1.17).

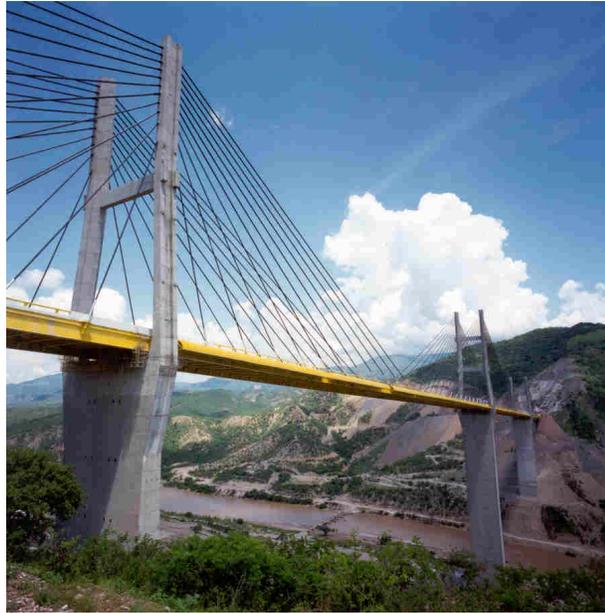


Figura 1.17: Puente *Mezcala* en Guerrero (Fuente: página de Internet de Freyssinet).

Las técnicas modernas de atirantamiento han permitido la construcción de puentes con claros hasta 1100 mts. En el sistema de tirantes Freyssinet, se usan torones protegidos por galvanización, cera y vaina individual que se caracterizan por:

- Gran resistencia mecánica.
- Gran rigidez y una singular esbeltez.
- Resistencia a la fatiga excepcional.
- Notable resistencia a la corrosión.
- Gran facilidad de instalación con el sistema denominado Iso-tensión.
- Sus innovaciones técnicas para su tensado, ajuste y sencilla sustitución.

Consiste en la fabricación de la superestructura por medio de elementos sucesivos en un área localizada atrás del estribo y orientada según el eje del puente, para después lanzarla hacia su posición definitiva mediante una traslación longitudinal. La solución em-



Figura 1.18: Puente *Chiapas* en Chiapas (Fuente: página de Internet de Freysinet).

pujada se justifica:

- Por la altura de la barranca u otro tipo de accidente topográfico.
 - Para trabajar simultáneamente superestructura y subestructura.
 - Sistema constructivo más rápido de puentes especiales.
- Puentes empujados (Ver Figura 1.18).
 - Puentes lanzados (Ver Figura 1.19).

El sistema consiste en colocar la superestructura con una viga de lanzamiento autoportante que descansa sobre los apoyos del puente pudiéndose desplazar de manera autónoma de un claro al siguiente.

Las ventajas del sistema son:

- Supresión de obra falsa.



Figura 1.19: Puente *La Ardilla* en Oaxaca (Fuente: página de Internet de Freyssinet).

- Utilización en puentes con pilas de gran altura, en los que las grúas no tienen la capacidad de montaje.
- Rapidez de montaje, permitiendo montar normalmente un claro cada semana.
- Protección del entorno natural, debido a que el montaje se realiza por la parte superior.

(Freyssinet de México, 2014a)

Otros. En 1993, durante los trabajos de rectificación geométrica de la Catedral Metropolitana, SEPSA bajo la supervisión del Dr. Fernando López Carmona, desarrolló los anclajes para recibir cables de presfuerzo; mediante los cuales se lograba que un tensor mantuviera en conjunto a las cúpulas de la Catedral, durante el desplazamiento que experimenta la misma, durante su nivelación (SEPSA, 2014).

La necesidad de transporte en la Ciudad de México hizo necesaria la construcción del sistema de transporte colectivo, Metro, el cual en sus diferentes etapas ha utilizado diversos elementos prefabricados para

las líneas que actualmente posee, en la página de Internet del Grupo TICONSA se pueden consultar algunos de estos trabajos (ANIPPAC, 2014).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Presfuerzo

El concreto presforzado también puede definirse como concreto precomprimido, porque a un miembro de concreto, antes de empezar su vida de trabajo, se le aplica un esfuerzo de compresión en aquellas zonas donde se desarrollarán los esfuerzos de tensión bajo cargas de trabajo (IMCYC, 1986). Es decir, consiste en crear deliberadamente esfuerzos permanentes en un elemento estructural para mejorar su comportamiento de servicio y aumentar su resistencia.

Las definiciones y conceptos que se dan en esta sección sobre el diseño de elementos de concreto presforzado están basadas en la práctica de la ingeniería mexicana, en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004) y sus Normas Técnicas Complementarias (NTC-C), en los reglamentos del *American Concrete Institute* (ACI, 1995) y de Ontario (1992), y en los manuales *Prestressed Concrete Institute* (PCI), *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) Estándar (1996) y *AASHTO Load and Resistance Factor Design* (LRFD) (1994) (ANIPPAC, 2014).

2.1.1. Principios

La Figura 2.1 muestra los esfuerzos en distintas vigas y como se agrietan en las secciones donde se ubica la tensión. Esto ocurre por la sencilla razón de que, aunque el concreto es resistente a la compresión, es débil en tensión. Existen dos formas de contrarrestar la tensión:

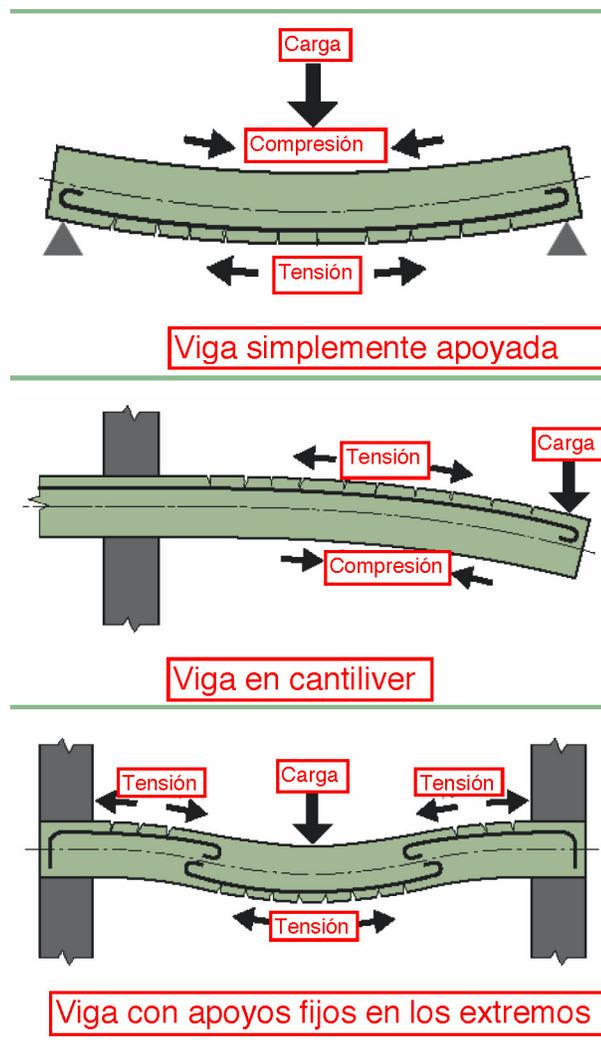


Figura 2.1: Esfuerzos en las vigas (CCAZ, 2010).

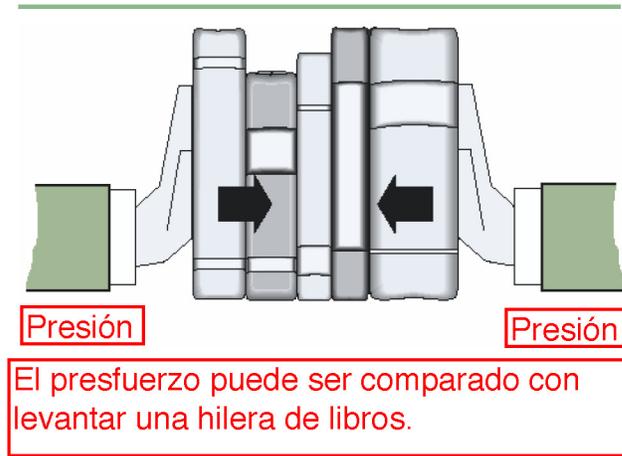


Figura 2.2: El presfuerzo puede ser comparado con levantar una hilera de libros (CCAZ, 2010).

1. **El empleo de refuerzo.** Se coloca refuerzo en las zonas donde se desarrollarán los esfuerzos de tensión. El refuerzo absorbe toda la tensión y el agrietamiento en el concreto se podrá mantener dentro de los límites aceptables.
2. **El empleo de presforzado.** Los esfuerzos de compresión introducidos en las zonas donde se desarrollan los esfuerzos de tensión bajo la carga, resistirán o anularán estos esfuerzos de precompresión; no podrán presentarse agrietamientos en la parte inferior de la viga (IMCYC, 1986).

El principio fundamental del concreto presforzado, se puede ejemplificar cuando una persona transporta una hilera de libros presionando en los costados, como se muestra en la Figura 2.2. La resistencia a la tensión de la hilera de libros es nula, pero en cuanto se aplica una presión suficiente, toda la hilera puede levantarse en conjunto. Si la presión se utiliza cerca del extremo superior, se descubrirá que la “unidad” no es muy estable y tenderá a abrirse en la parte inferior. Si la presión se aplica abajo de la mitad de la altura, será posible colocar más libros en su parte superior, de tal manera que dicha unidad también soportará una carga. Mientras mayor sea la carga que se coloca encima, mayor será la presión requerida en cada extremo.

Esta idea se puede utilizar en una estructura cuando es necesario salvar un gran claro; para ello se izan unidades prefabricadas de concreto sobre

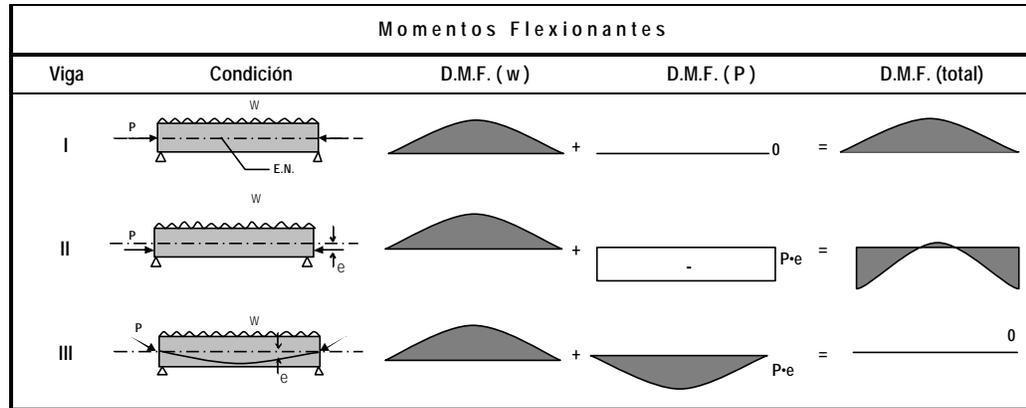


Figura 2.3: Momentos flexionantes a lo largo de vigas presforzadas simplemente apoyadas (ANIPPAC, 2014).

una obra falsa, luego se presionan contra otras, se retira la obra falsa, y si se mantiene la presión, así se tendrá un miembro capaz de soportar cargas (IMCYC, 1986).

Para entender mejor este principio, en la Figura 2.3 se muestran los diagramas de momentos debidos a una carga vertical, W , y a la fuerza de presfuerzo, P , para una viga simplemente apoyada. Aunque la carga vertical y la fuerza de presfuerzo son las mismas para las tres vigas, los diagramas de momento difieren entre sí debido a las distintas condiciones de la fuerza de presfuerzo (ANIPPAC, 2014).

Viga I. Tiene presfuerzo axial, es decir, el centro de gravedad de los torones se encuentra en el eje neutro de la sección. El presfuerzo así colocado no provoca ningún momento en la sección por lo que desde este punto de vista no hay ventajas al colocar presfuerzo axial.

Viga II. El presfuerzo produce un diagrama de momento constante a lo largo del elemento debido a que la trayectoria de la fuerza P es recta y horizontal, pero está aplicada con una excentricidad, e . Con esto se logra contrarrestar el momento máximo al centro del claro provocado por la carga vertical. Sin embargo, en los extremos el momento provocado por el presfuerzo resulta excesivo ya que no existe momento por cargas verticales que disminuya su acción. Un diseño adecuado deberá corregir este exceso de momento.

		Esfuerzos							
Viga	Condición	AL CENTRO DEL CLARO				EN EL EXTREMO			
		Carga (W)	Presfuerzo Axial	Presfuerzo Excéntrico	Total	Carga (W)	Presfuerzo Axial	Presfuerzo Excéntrico	Total
I			-	+ 0 =		0 -		+ 0 =	
II			-	+	=	0 -		+	=
III			-	+	=	0 -		+ 0 =	

Figura 2.4: Esfuerzos al centro del claro y en los extremos de vigas simplemente apoyadas con y sin excentricidad (ANIPPAC, 2014).

Viga III. Se tiene una distribución de momentos debida al presfuerzo similar a la curva provocada por la carga vertical; el presfuerzo así colocado, con excentricidad pequeña en los extremos y máxima al centro del claro, contrarresta eficientemente el efecto de las cargas en cada sección de la viga.

Los diagramas de esfuerzos para las secciones al centro del claro y en los extremos de las mismas tres vigas se muestran en la Figura 2.4

Viga I Aunque solo axialmente, el comportamiento de la viga sí mejora con el presfuerzo. Esto debido a que el presfuerzo provoca compresiones que disminuyen las tensiones provocadas por W en la fibra inferior de la sección. En los extremos tiene sólo de compresión.

Viga II y III Al centro del claro los esfuerzos de tensión son todavía menores debido al momento provocado por el esfuerzo excéntrico. Y en los extremos, la viga III tiene esfuerzos sólo de compresión; y la viga II presenta esfuerzos de tensión y compresión debidos a la existencia de presfuerzo excéntrico, estos esfuerzos son mayores que los de las vigas I y III y en general mayores también que los esfuerzos permisibles.

En conclusión el acero de presfuerzo disminuye tanto los esfuerzos de tensión como los momentos en la sección al centro del claro. Los efectos

secundarios del presfuerzo, como los momentos y esfuerzos excesivos en los extremos de la viga II, pueden suprimirse o inhibirse con procedimientos sencillos encamisando los torones o con técnicas similares (ANIPPAC, 2014).

2.1.2. Pretensado

El pretensado, es el método de presfuerzo en el cual primero se tensa al acero entre los muertos de anclaje, y posteriormente el concreto es colocado alrededor del acero en moldes que dan la forma al elemento (Figura 2.5 y Figura 2.6). Cuando el concreto ha alcanzado suficiente resistencia a la compresión, se libera al acero de los muertos de anclaje, transfiriendo la fuerza al concreto a través de la adherencia existente entre ambos. Los elementos pretensados más comunes son: viguetas, trabes, losas y gradas aplicados a edificios, naves, puentes, gimnasios y estadios principalmente (ANIPPAC, 2014; IMCYC, 1986).

Sólo se puede transmitir presfuerzo por medio del acortamiento elástico. Los tendones se diseñan para realizar esta transmisión del esfuerzo al concreto, para lo cual se requiere una longitud de transferencia adecuada. Por ejemplo, en vigas en voladizo, durmientes para ferrocarril y conexiones rígidas de columnas; debe realizarse un momento alto a corta distancia, para lo cual es conveniente tener una longitud de transferencia corta. En cambio en trabes, vigas, losas y prácticamente casi todo el concreto pretensado, es conveniente contar con una longitud de transferencia relativamente larga, ya que una longitud corta ocasiona altos esfuerzos transversales de tensión en el bloque extremo, y puede incluso, ocasionar agrietamientos entre los grupos de torones en el extremo de la trabe (Gerwick, 1978).

Es conveniente usar el pretensado cuando se requiere un gran número de unidades similares prefabricadas, normalmente se lleva a cabo en la planta donde ya han sido previamente construidas mesas permanentes de tensado (IMCYC, 1986).

Ya que el anclaje se da por adherencia, la acción del presfuerzo en el concreto es interna por lo que debe preverse que el acero quede libre de cualquier material, tal como el aceite o grasa de los moldes, que interfiera con la adherencia (ANIPPAC, 2014; IMCYC, 1986). Debido a que los tendones pretensados se encuentran presforzados antes del colado, deben estar rectos entre los puntos de apoyo. Cuando se requiere una curva específica para el tendón, ésta se puede aproximar esforzando el tendón sobre silletas o bajo “fijaciones”, las cuales pueden ligarse al piso o empujarse desde arriba

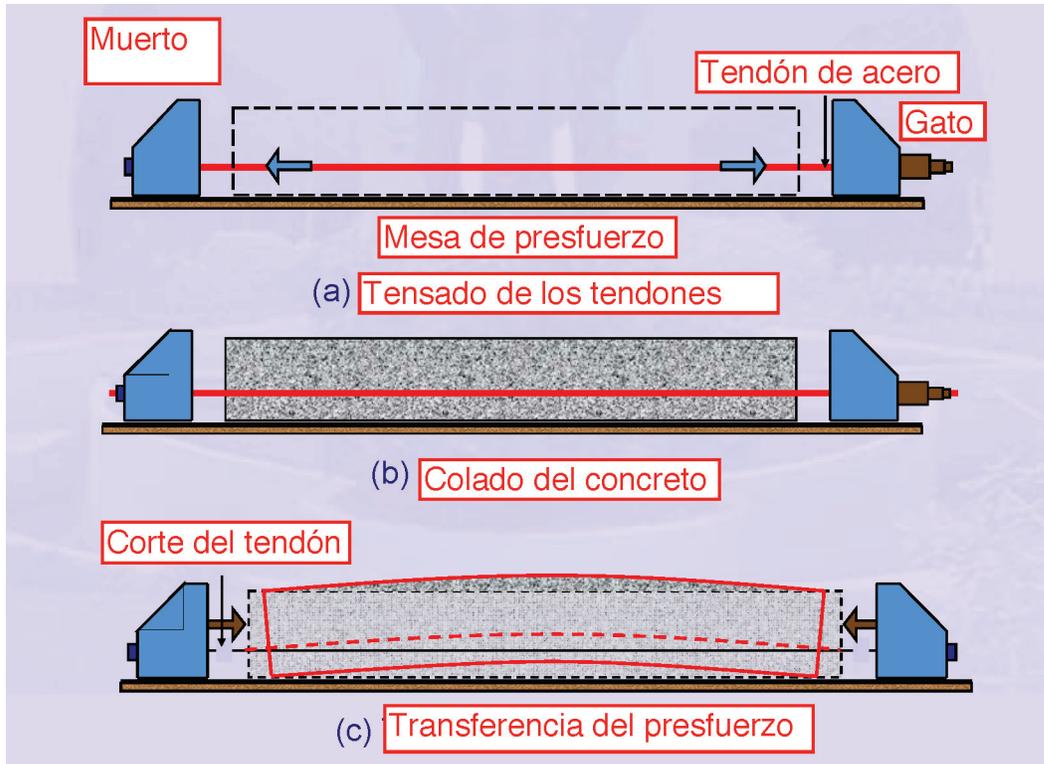


Figura 2.5: Etapas del pretensado (Sengupta, 2014a).

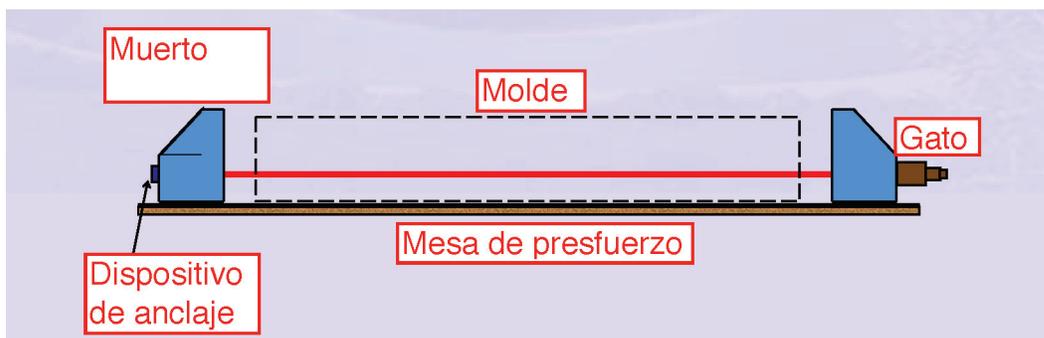


Figura 2.6: Dispositivos del pretensado (Sengupta, 2014a).

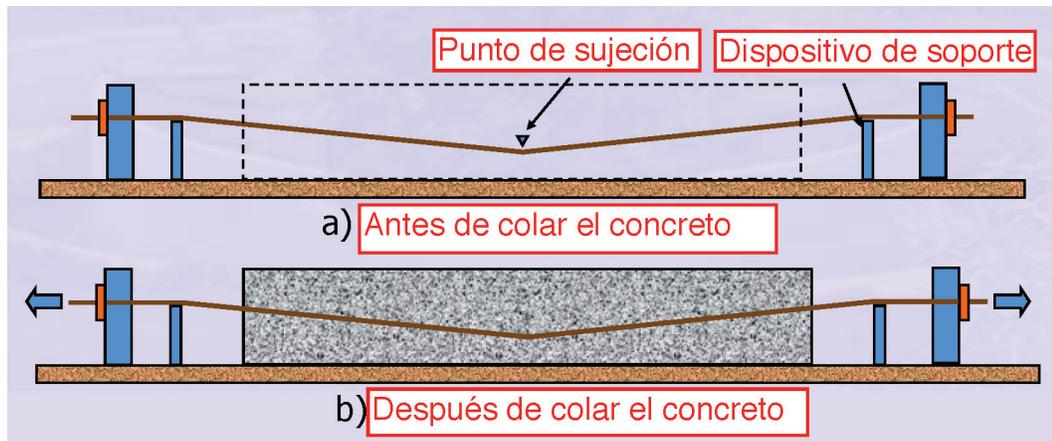


Figura 2.7: Curvado de tendones (Sengupta, 2014a).

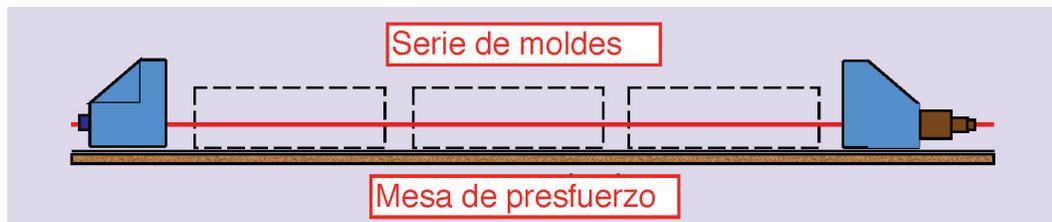


Figura 2.8: Representación esquemática de la producción en serie (Sengupta, 2014a).

(Gerwick, 1978).

En la Figura 2.7 se muestra una posible trayectoria de estos tendones; y en la Figura 2.8 un ejemplo de la producción en serie en mesas de gran tamaño, en varios casos mayores de 80 m de longitud (ANIPPAC, 2014).

El método de producción que da mayor precisión es aquel en el que se prefuerzan los tendones en forma recta hasta un valor calculado previamente, posteriormente se empujan hacia abajo o hacia arriba para darles la forma parabólica deseada (este movimiento aumenta el prefuerzo en los tendones). Si los cálculos y el procedimiento son adecuados, el prefuerzo final será igual al deseado; esto puede confirmarse y ajustarse, aplicando longitudinalmente gatos al tendón (Gerwick, 1978).

Se deben emplear vibradores, ya sea internos o externos, para obtener una compactación completa del concreto. Si los vibradores internos no se manejan

adecuadamente, pueden provocar la aparición de bolsas de agua adyacentes al acero tensado, lo que reducirá la adherencia efectiva. Los vibradores externos no tienen este problema, pero requieren que los moldes sean mucho más rígidos.

Como ocurre con cualquier concreto, el curado es necesario y es un proceso que en ocasiones se acelera mediante la introducción de vapor bajo una cubierta apropiada. Una vez que se hayan separado las unidades en la mesa de producción a gran escala, podrán ser apiladas pero deberán manejarse con gran cuidado, izarse en los puntos correctos y colocarse siempre adecuadamente unas encima de otras (IMCYC, 1986).

Cabe señalar que, durante el formado de los torones, si alguna de las fijaciones falla, la energía almacenada actúa como un arco y la fijación se convierte en un proyectil. Por lo que este tipo de trabajos deben hacerse a un lado del miembro para que el trabajador no tenga que exponer ninguna parte de su cuerpo por encima de la fijación. De igual forma, durante el colado, algún vibrador puede golpear una fijación, por tanto, las posiciones de éstas deben marcarse cuidadosamente para que no se exponga el obrero que realiza el vibrado (Gerwick, 1978).

2.1.3. Postensado

En el postensado, se tensan y anclan los tendones en los extremos de los elementos después de que el concreto ha alcanzado su resistencia necesaria. Previo al colado del concreto se dejan ductos perfectamente fijos con la trayectoria deseada, esto permite variar la excentricidad dentro del elemento a lo largo del mismo para lograr las flechas y esfuerzos deseados, lo que a su vez permite diseñar con mayor eficiencia elementos hiperestáticos y evitar esfuerzos en los extremos del elemento. Una vez que el acero de presfuerzo haya sido tensado y anclado, los ductos se rellenan con mortero o lechada (Figuras 2.9 y 2.10).

En este método de presfuerzo, la acción es externa y los tendones se anclan al concreto con dispositivos mecánicos especiales (anclajes), generalmente colocados en los extremos del tendón.

El postensado puede emplearse para elementos fabricados en planta, a pie de obra o colados en sitio. Usualmente se emplea en vigas de grandes dimensiones, dovelas de puentes, vigas hiperestáticas, cascarones y tanques de agua, entre otros (ANIPPAC, 2014).

Si los tendones se localizan dentro de la sección de concreto, se colocarán

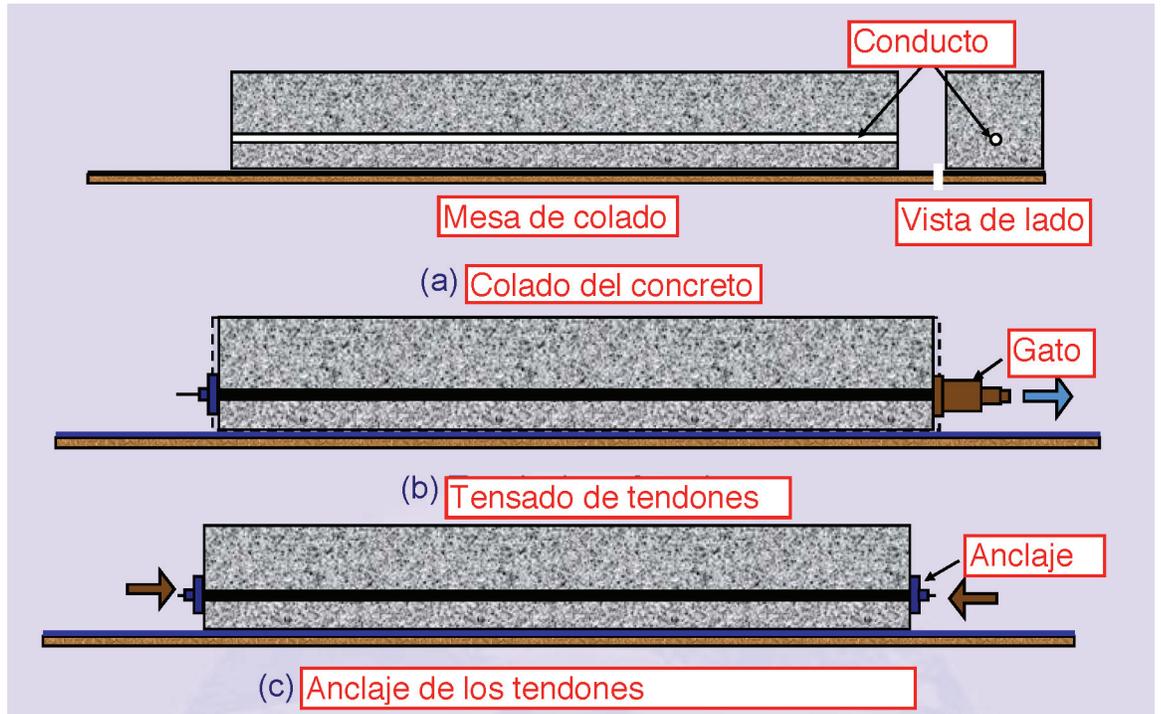


Figura 2.9: Etapas del postensado (Sengupta, 2014b).

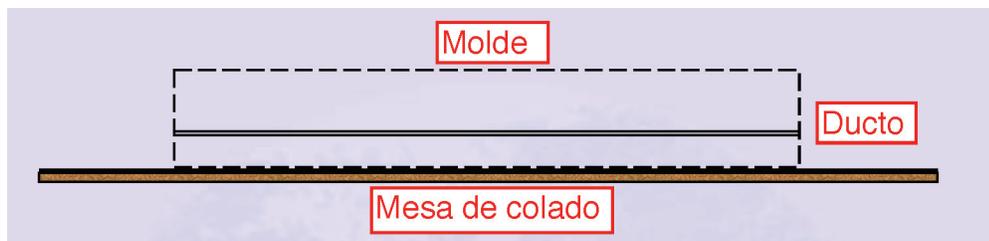


Figura 2.10: Dispositivos del pretensado (Sengupta, 2014b).

con un perfil curvo, por lo que el encamisado debe quedar sujeto con el perfil necesario. Estos ductos deben colocarse en forma precisa y sujetarse al acero de refuerzo. El anclaje permanente en los extremos de los ductos se fija en el extremo del molde.

Si los tendones quedan al exterior de la unidad de concreto, se proporcionarán silletas deflectoras en los lugares apropiados. El ejemplo más común es el de los tubos y tanques que se enrollan con alambre; el núcleo de concreto se envuelve con alambre tensado y se ahoga después en mortero de concreto; este mismo principio se ha aplicado a vigas y otros miembros estructurales, particularmente en vigas circulares y trabes circulares de apoyo para techos tipo domo (Gerwick, 1978; IMCYC, 1986).

El concreto se vaciará una vez que los moldes se encuentren ensamblados. Es esencial que las unidades aún no presforzadas se “curen” apropiadamente para evitar el agrietamiento por contracción durante el proceso de endurecimiento. Una vez que el concreto ha adquirido resistencia suficiente, se tensan los tendones, anclándolos por un extremo, o tirando con los gatos desde ambos extremos simultáneamente. En el postensado es muy importante verificar tanto la extensión del tendón como la carga. Para esto, deberán vigilarse la carga aplicada y la extensión que produce, de tal manera que cualquier irregularidad en el ritmo de la extensión para una cierta rapidez de los incrementos de carga puede ser rápidamente revelada. Si en alguna parte del ducto queda atorado el tendón, la magnitud de la extensión disminuye, lo cual indica una falla y es en este momento cuando debe actuarse para su corrección (IMCYC, 1986).

Una vez que los tendones han sido tensados y anclados, generalmente se llenan los ductos de una lechada coloidal de cemento introducida a presión. El objeto principal de la lechada endurecida es el de evitar la corrosión de los tendones, así como proporcionar adherencia entre los tendones y el concreto (IMCYC, 1986). Los tendones, también, se pueden colocar previamente dentro de envolturas de plástico o fibra de vidrio, después de recubrirlos con un compuesto bituminoso apropiado, posteriormente el tendón se coloca dentro de las cimbras, colando y dejando fraguar el concreto y presforzando después dicho tendón. Este método se adapta muy bien a losas planas y delgadas, en donde los ductos ocupan parte considerable de la sección transversal, y se facilita la colocación del tendón en la forma irregular característica del movimiento de las losas planas, por lo que es muy económico (Gerwick, 1978).

El presfuerzo puede aplicarse en etapas para así mantener los esfuerzos a niveles adecuados durante todas las etapas del montaje. En este proceso se

presfuerzan algunos tendones al montarlos, mientras que otros se dejan sin presforzar hasta una etapa posterior del montaje, o hasta que se cuele parte de la cubierta o toda ella. Los tendones que se presfuerzen en diferentes etapas deberán estar en ductos separados, para reducir al mínimo los problemas de fricción y de protección contra la corrosión.

Los diversos sistemas de tensado requieren equipos diferentes. Independientemente del sistema que se utilice, los anclajes son permanentes y forman parte de la unidad de corta longitud; su costo (así como los ductos y la lechada) sobrepasa con mucho el ahorro que se tenga en los tendones de acero en comparación con el pretensado (IMCYC, 1986).

Finalmente, cabe mencionar que en ocasiones se desea aprovechar las ventajas de los elementos pretensados pero no hay capacidad en las mesas de colado para sostener el total del presfuerzo requerido por el diseño del elemento, o puede ser que por las características particulares de la obra resulte más conveniente aplicar una parte del presfuerzo durante alguna etapa posterior a la fabricación. Ante estas dos situaciones es posible dejar los tendones ahogados en el elemento pretensado, para postensarlos posteriormente en planta, a pie de obra o montado en el sitio según convenga (ANIPPAC, 2014).

2.1.4. Materiales y Equipo

El concreto y los cables de presfuerzo constituyen sistemas que pueden considerarse teóricamente conectados externamente, aún si en la práctica es más conveniente confinar el sistema de cables en el interior de la sección de concreto. Esta independencia teórica permite estudiar separadamente las propiedades de ambos materiales (IMCYC, 1986).

Concreto

El concreto que se usa en estructuras presforzadas tiene una mejor calidad y mayor resistencia, que el usado en construcciones ordinarias; con valores de f'_c entre 350 y 500 kgf/cm^2 , siendo 350 kgf/cm^2 el valor más usual. Se necesita que tenga estas características para que se pueda hacer la transferencia del presfuerzo cuando el concreto ha alcanzado una resistencia de 280 kgf/cm^2 .

Esta mayor calidad y resistencia usualmente permite ahorros significativos en peso propio, y los grandes claros se vuelven técnica y económicamente

posibles. Además, las deflexiones y el agrietamiento del concreto pueden controlarse y hasta evitarse mediante el presfuerzo.

Para que la contracción del concreto sea mínima, la relación agua-cemento debe ser la mínima con revenimientos no mayores a 10 cm. Además, para que se tenga una menor contracción, se deben utilizar agregados duros y densos de baja absorción y módulo de elasticidad alto.

Para propósitos de diseño, se tomará un valor promedio de deformación unitaria por contracción, ε_c , de 0.0002 a 0.0006 para las mezclas de concreto usuales en elementos presforzados, pero puede variar desde cero, para condiciones muy húmedas, hasta 0.001, valor que establecen las NTC-C.

Dado que el concreto presforzado utiliza concretos tipo I, las NTC-C establecen como valor de módulo de elasticidad, E_c , en kgf/cm^2

$$E_c = 14,000\sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

La relación de Poisson, relación entre la deformación transversal y longitudinal debida a una compresión en la dirección longitudinal, varía de 0.15 a 0.20. Este comportamiento puede modificar sensiblemente el presfuerzo en elementos con presfuerzo biaxial.

El flujo plástico en el concreto depende de varios factores como: la magnitud de las cargas permanentes, las proporciones de la mezcla, la humedad, las condiciones de curado y la edad del concreto cuando comienza a ser cargado. La deformación de compresión ocasionada por el flujo plástico tiene un efecto importante en el presfuerzo provocado por la disminución o pérdida de la fuerza efectiva.

En las NTC-C se propone la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de deformación axial diferido final C_f ,

$$C_f = \frac{\delta_f - \delta_i}{\delta_i} \quad (2.2)$$

donde δ_f y δ_i son las deformaciones final e inicial, respectivamente; cuando éstos valores se desconocen se supondrá $C_f=2.4$.

Acero de Presfuerzo

Es el material que provoca de manera activa los esfuerzos y momentos que contrarrestan a los causados por las cargas. Hay tres formas comunes de acero de presfuerzo: alambres, torón y varillas de acero de aleación.

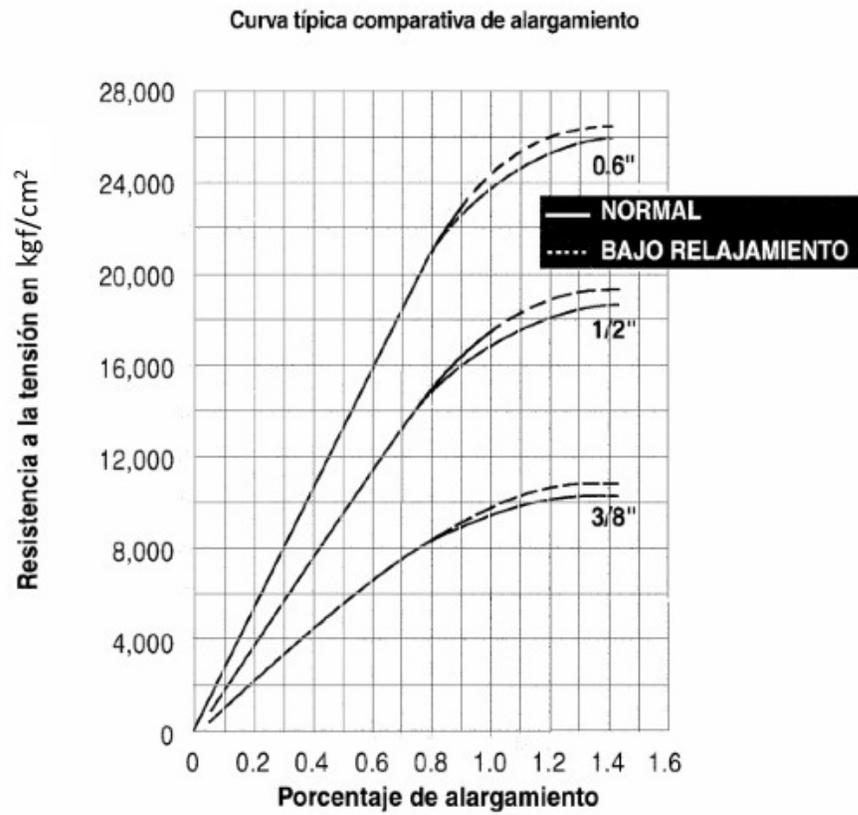


Figura 2.11: Curva fuerza-deformación para tres torones de distinto diámetro (ANIPPAC, 2014).

La Figura 2.11 muestra una gráfica resistencia-deformación para torones con distinto diámetro. Después del inicio de la fluencia del acero, los alambres muestran una fluencia gradual y la curva continúa creciendo hasta la falla.

Las varillas de aleación tienen características similares a aquellas de los alambres redondos o de los torones, pero sus límites proporcionales y resistencias son de 30 a 40 por ciento menores. El esfuerzo de servicio final, una vez que se han presentado todas las pérdidas, será entre 15 y 30 por ciento menor que el esfuerzo de tensado.

Para torones y varillas el módulo de elasticidad está entre 1'900,000 y 1'960,000 kgf/cm². Para alambres redondos lisos el módulo de elasticidad es semejante al del refuerzo ordinario, esto es, alrededor de 2'000,000 kgf/cm².

Acero de Refuerzo

La resistencia nominal de este acero es $f_y=4,200$ kgf/cm². Es común el su uso en elementos de concreto presforzado con el fin de:

- aumentar ductilidad;
- aumentar resistencia;
- resistir esfuerzos de tensión y compresión;
- resistir cortante y torsión;
- restringir agrietamiento por maniobras y cambios de temperatura;
- reducir deformaciones a largo plazo;
- confinar al concreto.

Etapas de un elemento presforzado

El diseño de elementos de concreto presforzado consiste en:

1. Proponer un elemento que sea funcional y económicamente óptimo para determinadas acciones y características geométricas de la obra, de acuerdo a los conocimientos y experiencia del diseñador;
2. Realizar el diseño, proporcionando los aceros de presfuerzo y refuerzo para que tengan un comportamiento adecuado durante todas sus etapas dentro del marco de un reglamento vigente.

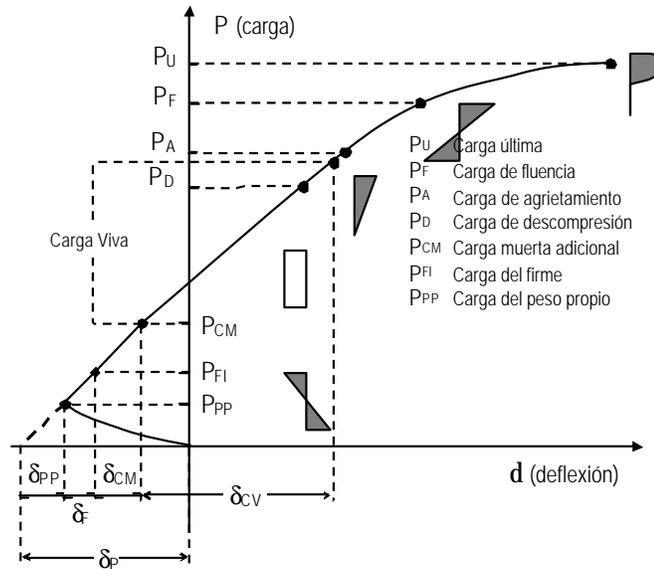


Figura 2.12: Gráfica carga-deflexión de una viga presforzada típica (ANIP-PAC, 2014).

En la Figura 2.12 se muestran esquemáticamente en una gráfica carga-deflexión el proceso de cargas de un elemento presforzado típico y el estado de esfuerzos correspondientes a cada etapa en la sección de momento máximo. A medida que el elemento es cargado con el firme y la sobrecarga muerta, la contraflecha disminuye hasta que, generalmente con la presencia de la carga viva, se presenta una flecha hasta el punto de descompresión (cuando las tensiones se presentan en la fibra inferior del elemento), para finalmente sobrepasar la fluencia y llegar a la carga última.

Etapa de Transferencia. Tiene lugar cuando se cortan los tendones en elementos pretensados o cuando se libera la presión del gato en los anclajes en el concreto postensado. Es cuando se transfieren las fuerzas al concreto (usualmente ya ha alcanzado el 80% de su resistencia). Dado que la acción del presfuerzo solo es contrarrestada por la del peso propio del elemento, en esta etapa se presentará la contraflecha máxima (Figura 2.12).

Estado Intermedio. En esta etapa se hace el transporte y montaje del

elemento. Se debe de tener especial cuidado en la colocación de apoyos temporales, ganchos y dispositivos de montaje para no alterar la condición estática para la que fue diseñado el elemento.

Etapa Final. Aquí se considerarán las condiciones de servicio tomando en cuenta esfuerzos permisibles, deformaciones, agrietamientos, y las condiciones de resistencia última para que así además de alcanzar la resistencia adecuada se obtenga una falla dúctil. En esta etapa ya han ocurrido todas las pérdidas de presfuerzo y en la mayoría de los casos el elemento presforzado se encuentra trabajando en conjunto con el firme colado en sitio, lo que incrementa notablemente su inercia y resistencia (ANIPPAC, 2014).

2.1.5. Sistema Freyssinet

En 1943, bajo el nombre de *Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte* (STUP), fue creado el Grupo Freyssinet por el Ing. Eugene Freyssinet, inventor de la técnica que lleva su nombre. Actualmente está presente en más de 50 países (Orts, 2010).

Freyssinet de México S.A. de C.V. llegó a México en los años cincuenta, no fue posible que se estableciera de manera permanente, pero dejó ciertos equipos de postensión en el país. Se fundó oficialmente el 28 de noviembre de 1964 con dos funciones principales:

1. Venta del servicio de presfuerzo (postensado).
2. Proyecto y Diseño Estructural para apoyar la actividad del presfuerzo.

La empresa Freyssinet de México, S.A. de C.V se crea el 6 de septiembre de 1976, y opera hasta el día de hoy. De acuerdo con su página de Internet, las principales actividades que desarrollan son:

1. Venta del servicio de presfuerzo (postensado).
2. Proyecto y diseño estructural para apoyar la actividad del presfuerzo. Sin embargo, actualmente Freyssinet no ofrece este servicio ya que la Ley de Obras Públicas prohíbe que una misma empresa realice el proyecto y los trabajos de ejecución. Es por eso que el proyecto y diseño son realizados por Euro Estudios, S.A. de C.V., empresa filial de Freyssinet hasta el año 1996, cuando fue vendida por Europe Etudes Gecti al Grupo SIMECSOL.

3. A partir de 1984, se inició una actividad complementaria: la reparación y reforzamiento de puentes y estructuras en general, la cual a lo largo de los años se convirtió en una de las actividades más importantes de la empresa.
4. Venta de productos y servicios Freyssinet Internacional. Fabricación de materiales para el consumo local de postensado y para la exportación en América Latina y el Caribe.
5. Servicio de perforación y de colocación de anclajes para la estabilización de taludes, así como la inyección de suelos, concreto lanzado, micropilotes, etc., responsabilidad del departamento de Geotecnia.
6. Muros mecánicamente estabilizados siguiendo el procedimiento Freyssisol.

Además de esto, a partir de septiembre de 1999, con la adquisición de Tierra Armada, se comercializaron muros mecánicamente estabilizados siguiendo el procedimiento de Tierra Armada, así como la bóveda Techspan (Freyssinet de México, 2014a).

A continuación se mencionan los 4 componentes “clásicos” del Sistema Freyssinet, y posteriormente mencionaremos los productos que comercializan actualmente.

Acero. Inicialmente sólo se utilizaba cables de torones en paralelo, habiendo disponibles solo tres tamaños que eran el 18-0.498, 12-0.498 y el 12-0.701. El primer dato indica el número de unidades por cable y el segundo el diámetro de cada uno de ellos en centímetros. Después se hizo uso de cables grado ASTM (American Society for Testing and Materials) (Solís, 1997).

El Cable Freyssinet esta formado por varios alambres o cordones paralelos de acero de alto límite elástico. Según el esfuerzo deseado se utilizan alambres o cordones de distintos diámetros y en número variable. Se alojan en vainas de chapa, tubos delgados de acero o tubos de material plástico que los aíslan del hormigón, y están generalmente formados por doce alambres (Figura 2.13).

Las unidades Freyssinet se designan por el número de elementos (alambres o cordones), la letra ϕ para los alambres, T para los cordones o

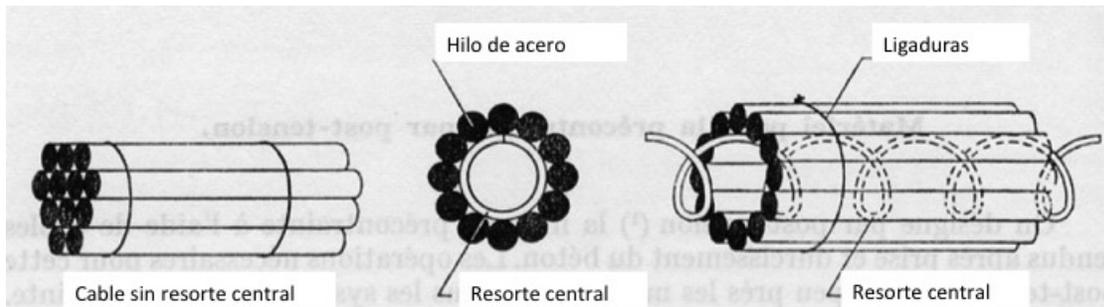


Figura 2.13: Tendón Freyssinet evolucionado (Ayats, 2014).

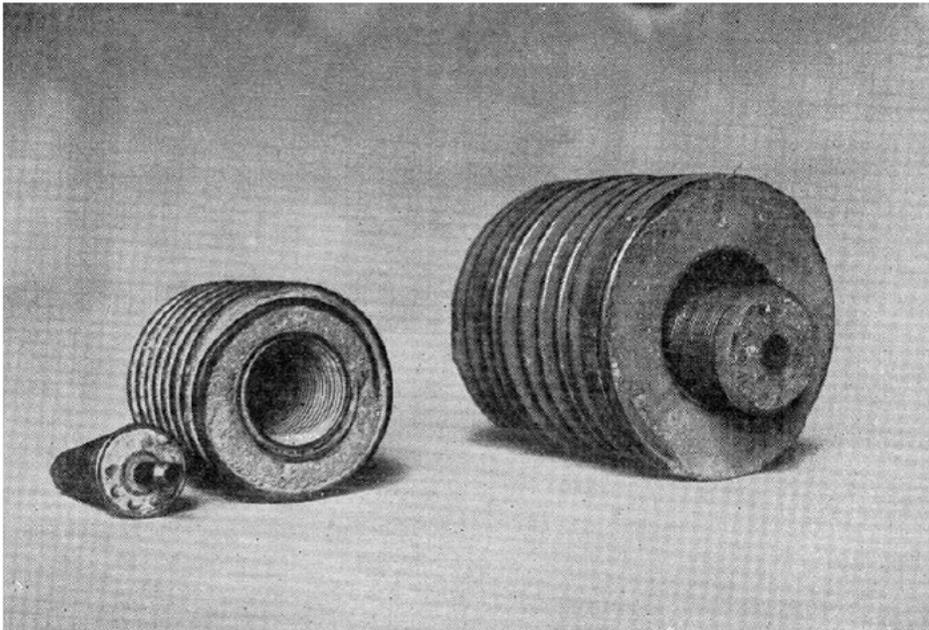


Figura 2.14: Primer anclaje del Sistema Freyssinet (Ayats, 2014).

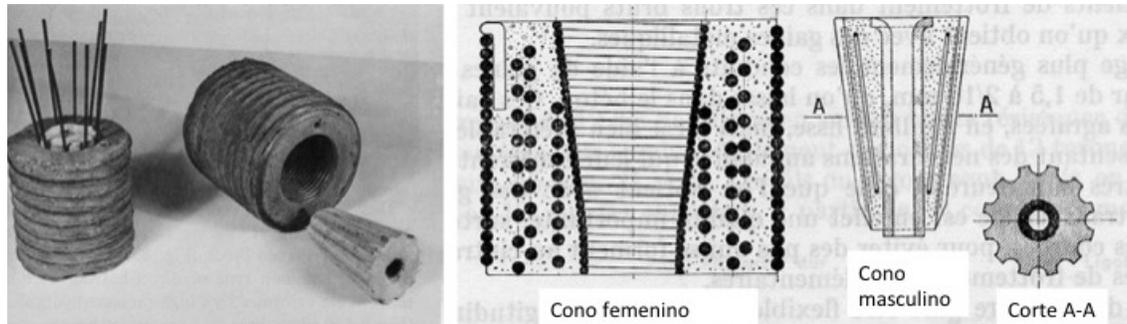


Figura 2.15: Primera evolución. Anclaje Freyssinet (Ayats, 2014).

B para las barras, y el diámetro del acero en milímetros. Por ejemplo, $12\phi 7$, designa un cable de 12 alambres de 7 mm (Lacroix, 1978).

Anclajes. El primer Sistema Freyssinet se diferencia por la forma cónica del elemento que asegura doce alambres que componen un tendón (Figura 2.14). La primera evolución del Sistema Freyssinet se muestra en la Figura 2.15 (Ayats, 2014).

Los cables tradicionales Freyssinet, formados de 12 alambres o 12 cordones, se anclan a los elementos llamados conos de anclaje que comprenden.

1. El cono hembra, que es un cilindro de concreto altamente reforzado, con un orificio en forma cónica ubicado en el centro y cuyo interior está recubierto con alambre enrollado en forma helicoidal.
2. La parte denominada macho, que consiste en un tapón de concreto, ranurado de tal forma que separa los torones en forma uniforme alrededor de su perímetro y los acuña contra el interior del cono hembra.
3. Ocasionalmente, una placa de reparto de acero o fundición (Lacroix, 1978; Solís, 1997).

Los conos macho y hembra actúan a modo de cuña en el anclaje de todos los torones del cable en forma simultánea, evitando el deslizamiento de los mismos (Solís, 1997).

El anclaje activo es el que se encuentra en el extremo desde donde se efectúa el postensado, es decir, desde el lugar en que se encuentra

dispuesto el gato tensado. De igual forma definiremos al anclaje muerto, como al ubicado en el lado opuesto al activo. Por regla general, los conos de anclaje se disponen en los extremos del cable, por si se debe traccionar por los dos extremos, como por si es por uno sólo (Lacroix, 1978; Solís, 1997).

Cuando la puesta en tensión de un cable deba realizarse por un solo extremo, normalmente se coloca en la extremidad opuesta un cono ordinario llamado de autobloqueo (Lacroix, 1978).

Gatos. Para cada unidad de pretensado existe un gato de puesta en tensión apropiado:

1. Para los cables formados por 12 alambres ó 12 cordones se utilizan los gatos Freyssinet que poseen doble efecto: traccionar el cable en una o varias etapas; hundir el cono macho en su sitio para conseguir el bloqueo.

Para esto, los gatos poseen un circuito de tensión y un circuito de bloqueo (Lacroix, 1978). Por ejemplo, los alambres, después de acomodarse en los canales del cono macho se abren en abanico y se anclan a pares en la periferia del gato hidráulico de tensado (Figura 2.16). El tendón se tensa una vez, y cuando se alcanza el alargamiento requerido, un segundo circuito hidráulico del gato acciona un pistón interior que empuja al cono macho dentro del cono hembra para asegurar los alambres (Figura 2.17). Una vez realizado el postensado, la presión en el pistón principal y en el pistón interior se deja escapar gradualmente, y se retira el gato para volver a repetir la operación en otro elemento (Ayats, 2014; Solís, 1997).

2. Para las unidades del tipo monogrupa se utilizan gatos especiales equipados con resortes que mantienen las clavijas en su sitio durante la puesta en tensión y aseguran el autoanclaje de cada cordón, cuando se vacía el circuito de tensión (Lacroix, 1978).

Lechada. Proporciona la liga entre los cables y el concreto, y se inyecta en los ductos a través de un pequeño orificio que se encuentra en el tapón macho. Antes de realizar esta operación, deberán taparse todas las posibles aberturas existentes entre el acero y las partes que forman

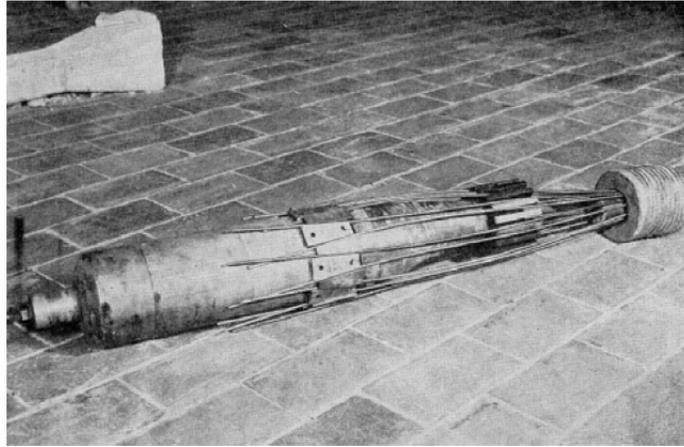


Figura 2.16: Gato hidráulico Freyssinet (Ayats, 2014).

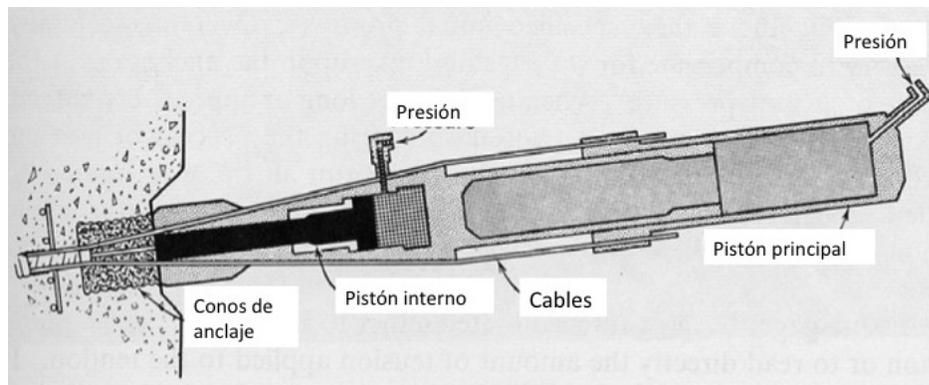


Figura 2.17: Gato hidráulico de doble acción Freyssinet (Ayats, 2014).

el anclaje: cono macho y hembra. La obturación se realiza con el fin de evitar las fugas y a la vez poder alcanzar en los ductos una presión de 5 a 9 kg/cm^2 .

Actualmente, en el folleto *El Pretensado Freyssinet* se manejan los siguientes productos:

- **Pretensado de gran potencia de la gama C.** El sistema de pretensado de la gama C, ver Figura 2.18, ha sido diseñado y certificado para distintos tipos de aplicaciones, se puede utilizar en pretensados interiores o exteriores para estructuras de concreto, acero, madera o mampostería. Los anclajes están formados por:
 - Cuñas que garantizan un anclaje eficaz con esfuerzos estáticos o dinámicos.
 - Bloques de anclaje de acero circulares y con perforaciones troncocónicas.
 - Tromplacas de anclaje de hierro fundido y varias capas para una mejor difusión del esfuerzo de pretensado en el concreto.
 - Un capot permanente opcional.
- **Anclajes de la gama F para elementos finos.** Los anclajes de la gama F, ver Figura 2.19, están compuestos por:
 - Un cuerpo de anclaje embebido en el concreto que cumple la función de cabeza de anclaje y pieza de difusión.
 - Cuñas que garantizan el anclaje de los cordones.
 - Elementos de protección definitiva de las cuñas, constituidos por capots PEAD (o metálicas) y rellenos de grasa.

Los anclajes de la gama F están diseñados para el pretensado de elementos finos (losas, forjados, etc.). Se utilizan para:

- El pretensado no adherente.
 - El pretensado adherente.
- **Componentes comunes de las gamas C y F.**

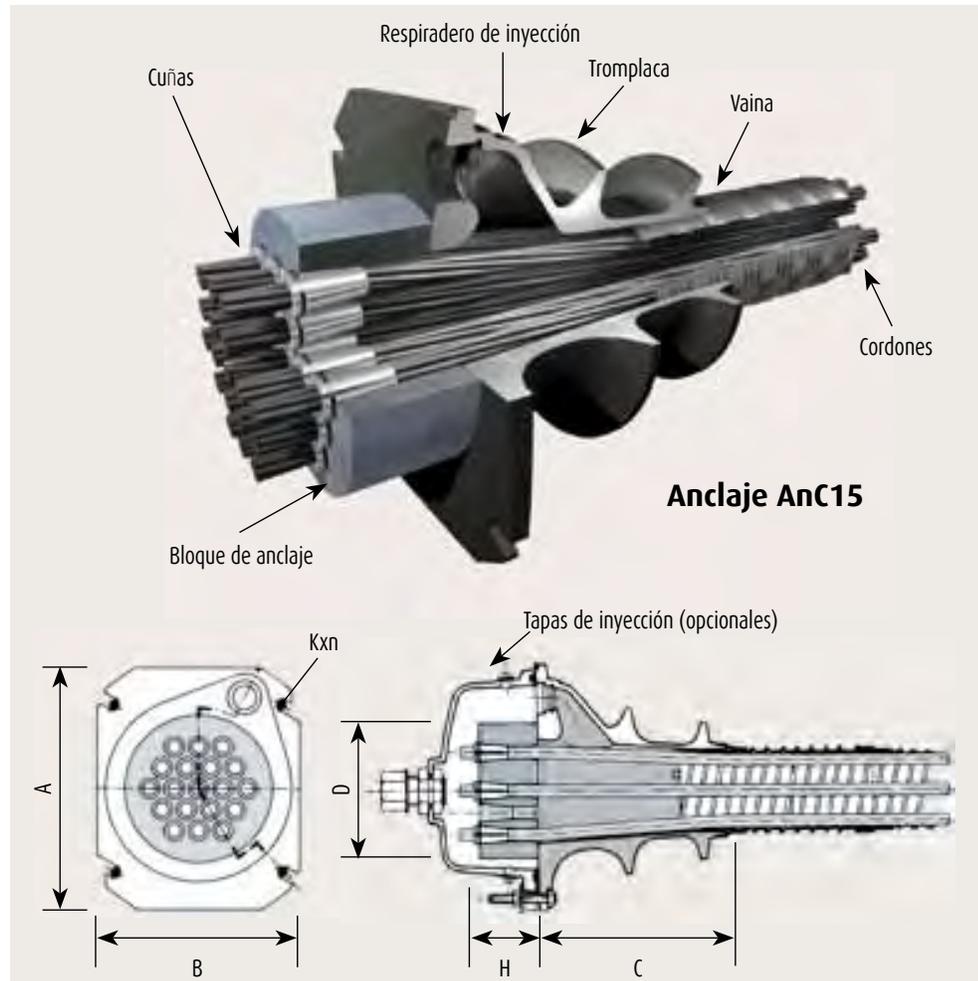


Figura 2.18: Partes del Anclaje C (Freyssinet S.A., 2014).

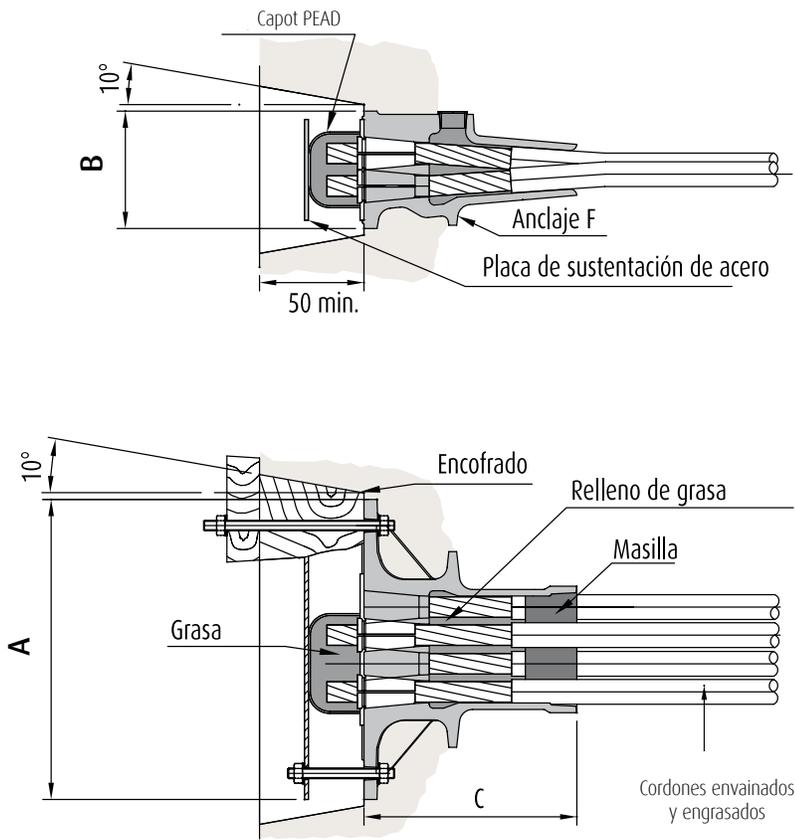


Figura 2.19: Partes del Anclaje F (Freyssinet S.A., 2014).

1. Cordones de pretensado.
2. Conductos de pretensado interior.
3. Conductos de pretensado exterior.
4. Productos de inyección.

■ **Instalación.** La instalación del sistema Freyssinet se divide en estas cuatro fases principales:

1. Colocación de los conductos y las placas de anclaje.
2. Enfilado de los cordones y colocación de los anclajes.
3. Tensado.
4. Inyección y sellado (Freyssinet S.A., 2014).

2.2. Tubería de Concreto Presforzado (*Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP*)

La tubería enterrada empleada en el sistema Cutzamala es del tipo de concreto presforzado, ésta puede ser con cilindro de acero (PCCP, Figura 2.20) o sin cilindro de acero, en este trabajo hablaremos de la primera.

El cilindro de acero se sella (1.5 mm de espesor) mediante soldadura continua y se ahoga en concreto; en la parte interna se encuentra recubierto por una capa de concreto de 5 cm de espesor (2 pulg); y en su parte exterior se cubre por una segunda capa de concreto de 10 cm de espesor (4 pulg), (Figura 2.21). Esta última capa se encuentra precomprimida por una helicoide de alambre de alta resistencia (espiras de presfuerzo) y posteriormente protegido por una capa densa de mortero (León, 2004).

A continuación se describen las partes que componen al PCCP:

1. Refuerzo



Figura 2.20: PCCP (Callejas, 2011).

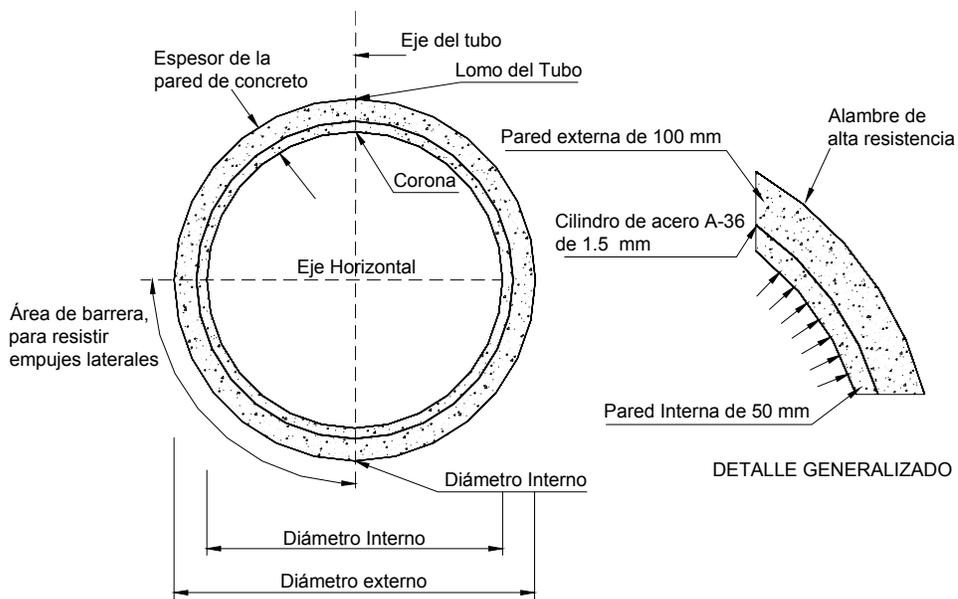


Figura 2.21: Sección transversal del tubo de concreto presforzado (León, 2004).

a) Alambre;

- Debe cumplir con la Norma Mexicana NMX-B-293.
- El diámetro del alambre y su espaciamiento deben producir el presfuerzo requerido en el núcleo, debe tomarse en consideración la deformación elástica o plástica del concreto y acero.
- El esfuerzo de aplicación del alambre de alta resistencia no deberá exceder del 75 % de la resistencia mínima de ruptura.
- El espaciamiento máximo no debe exceder lo indicado en la norma aplicable, y el mínimo será aquel que produzca un claro de $0.5\text{ cm}(3/16\text{''})$ en los alambres.
- El diámetro mínimo del alambre es de $5\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ ($0,196\text{''}$), el cual debe tener una resistencia mínima a la tensión de 1716 N/mm^2 .

b) Cilindro

- El acero de éste debe cumplir con la Norma Mexicana NMX-B-281.
- Cuando el cilindro esté terminado, con sus anillos de junta completamente soldados, debe ser sujeto a una prueba hidrostática y debe ser hermético.
- Se deben inspeccionar cuidadosamente todas las juntas mientras éste se encuentre bajo presión, y si existe alguna fuga, se repara y nuevamente se somete el cilindro a presión.
- La presión será tal que no rebase el 0.9 del límite elástico del acero del cilindro.
- La soldadura debe efectuarse mediante un proceso aprobado.
- En el cilindro y alambre puede usarse acero de diferente calidad al indicado en las especificaciones, siempre y cuando en el diseño del tubo se tomen en cuenta las propiedades físicas de los materiales.

2. Núcleo

- No debe ser comprimido hasta que el concreto alcance la resistencia especificada.
- La compresión inicial en el concreto producida por el presfuerzo, no debe exceder el 55 % de la resistencia a la compresión del concreto al momento de enrollar el alambre.

3. Juntas

- Son tipo espiga y campana, están hechas de anillos de acero soldados al cilindro con un sello de hule, para garantizar que permanezca hermética bajo cualquier condición normal de servicio como asentamientos, contracciones o expansiones.
- El anillo espiga debe tener una ranura capaz de alojar y confinar el empaque.
- La profundidad mínima de enchufe es la necesaria para permitir que la junta se abra con una deflexión angular de 1° , sin que existan fugas en los tubos con diámetro hasta de 1200 mm o bien, una deflexión mínima de 40 minutos en diámetros mayores.
- El acero de la campana debe cumplir con la Norma Mexicana NMX-B-248.
- El empaque cumple con la Norma Mexicana NMX-T-021-SCFI, y deber ser de hule natural o sintético con una textura que asegure la hermeticidad de la junta permanentemente. Además debe tener una sección uniforme, y llenar con la ranura de la espiga cuando se instale la tubería. Cabe señalar que no se toma en cuenta el mortero del cemento en el junteo para garantizar la hermeticidad de la junta.

4. Concreto

- El cemento debe cumplir con la Norma Mexicana NMX-C-414.
- Los agregados deben estar compuestos por partículas resistentes y durables, limpias y libres de materia orgánica.
- El agua usada para el concreto debe ser limpia y libre de cantidades deletéreas de ácidos, álcalis o materia orgánica
- El concreto usado en la fabricación del tubo debe constar de cemento Portland, arena y piedra triturada o grava natural cuidadosamente proporcionados para producir alta densidad y resistencia.
- El concreto debe colarse en moldes verticales de acero, contruidos de tal forma que el molde interior, el exterior, los anillos y el refuerzo sean concéntricos. Además, se deben de vibrar adecuadamente durante el colado.

- El concreto debe tener una resistencia promedio de 317 kgf/cm^2 (4500 psi) a los 28 días en cilindros de prueba estándar, de 15.2 cm de diámetro por 30.5 cm de longitud (6" \times 12"), curados en forma similar al tubo.
- Los cilindros deben probarse de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE, el promedio de 10 pruebas consecutivas de los cilindros representativos de cada mezcla, debe ser igual o mayor que la resistencia especificada y no más del 20 % tendrán resistencia inferior.

5. Recubrimiento

- Este debe aplicarse a las 72 horas de haber sido presforzado el núcleo
- Una máquina lanza el mortero contra la superficie exterior del núcleo para producir un recubrimiento denso sobre el alambre tenso.

6. Piezas Especiales

- Son diseñadas para resistir la misma carga de trabajo que los tubos adyacentes, también se construyen de concreto reforzado con cilindro de acero (Callejas, 2011).

2.2.1. Cargas y estados límite

Las cargas consideradas para el diseño de los PCCP enterrados son (AwwaRF, 2013; Callejas, 2011):

1. **Presión de trabajo (P_W).** Está basada en el gradiente hidráulico para un flujo de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y con la elevación del tubo a lo largo de la línea.
2. **Carga hidráulica estática.** Usualmente está basada en el nivel de elevación hidráulica del tanque y del tubo a lo largo de la línea.
3. **Presión transitoria (P_t).** Ocurre como resultado de la apertura y cierre de válvulas.

4. **Peso del tubo (W_p).** Es calculado en base a la geometría y pesos unitarios del material.
5. **Peso del fluido (W_w).** Es calculado en base a la geometría del tubo y peso del agua.
6. **Peso del suelo (W_e).** Es calculado en base a la altura del relleno.
7. **Fuerza del presfuerzo.** La fuerza del presfuerzo es calculada siguiendo el procedimiento estándar AWWA C304, basado en el área del cable de presfuerzo y los esfuerzos residuales después de la deformación elástica, contracción, movimientos del concreto y la pérdida de relajación del cable.
8. **Presión de poro (P_{gw})**
9. **Presión de vacío (P_v)**
10. **Carga viva de la superficie (W_t)**

Los estados límites considerados por el riesgo de falla de los tubos con cables rotos, son los siguientes (Callejas, 2011):

1. **Estado Límite de Servicio.** Aquel en el que la presión correspondiente marca el inicio del agrietamiento, o fisuras visibles longitudinales, en el núcleo de concreto del tubo.
2. **Estado Límite de Daño.** Aquel en el cual hay agrietamientos estructurales que exponen el cilindro de acero de los tubos al medio ambiente causando su corrosión y perforación o ruptura con el tiempo. En tuberías con cilindro de acero, las fisuras estructurales resultan en fugas de líquido. Hay un incremento de 30 ksi¹ en los cables adyacentes a la región con cables rotos.
3. **Estado Límite de Resistencia.** Se vencen las resistencias de interconexión y del núcleo exterior agrietado en la región de cables rotos. También hay un vencimiento de la resistencia pasiva del suelo circundante y el esfuerzo del cable se incrementa 60 ksi.

¹1 ksi = 1000 psi = 70.31 kgf/cm²

Las combinaciones de carga propuestas para el diseño son (AwwaRF, 2013):

Para cargas permanentes cuando el tubo está vacío

1. $1,4(W_e + W_p)$
2. $(W_e + W_p) + 1,6W_t$

Para operación normal:

3. $1,4(P_W + W_e + W_p) + 1,0W_W$
4. $1,2(P_W + W_e + W_p) + 1,0W_W + 1,6W_t$

Para combinaciones que involucran presión al vacío o transitorias

5. $1,2(W_e + W_p) + 1,0W_W + 1,2P_W + 1,2P_t$
6. $1,2(W_e + W_p) + 1,2(P_g w + P_v)$ con $1,2P_v \geq -14,7$ psi

La resistencia requerida de acuerdo a estas combinaciones de carga, será determinada de las acciones estructurales en dirección circunferencial y longitudinal del tubo. Los efectos estructurales de los cambios de temperatura (ΔT) se considerarán en las combinaciones (5) y (6) con coeficiente 1.2 para ΔT .

Los coeficientes en las combinaciones antes mencionadas con una guía del ASCE Standard 7-10 (2010) y el juicio del ingeniero para los promedios y variaciones (incertidumbre) de las cargas. En particular:

- Un coeficiente de 1.4 es aplicado a la suma de las “cargas permanentes”. En las combinaciones (1) a (3). Este coeficiente se reduce a 1.2 en otras combinaciones cuando se suma con otras cargas “a corto plazo”.
- Las combinaciones de carga (3) y (4) son las básicas de las “condiciones de operación”. Un coeficiente de 1.4 es aplicado a P_w , lo que es consistente con el coeficiente que se usa en las cargas por gravedad. Como W_W es esencialmente determinístico, se le puede asignar un coeficiente de 1.0. La carga viva W_t está combinada con las cargas normales de operación y multiplicada por un coeficiente de 1.6, esto basado en el ASCE 7-10 para 50 años de servicio y un valor del índice de confiabilidad (β) de 3.

- Las combinaciones (5) y (6) son condiciones de servicio no frecuentes. Las presiones al vacío ocurren bajo cargas transitorias y se ha asumido conservadoramente $W_W = 0$ bajo esta condición. Si P_t o P_v son especificados como eventos extremos, el factor de carga puede considerarse igual a uno, y las cargas pueden tratarse como las fuerzas por viento, sismo o fuego son tratadas en el ASCE 7-10, con factores iguales a 1.0 y valores nominales especificados como los máximos posibles. Sin embargo, si han sido obtenidas por el análisis de ciertos escenarios que pueden no ser tan poco frecuentes, se debe de usar un coeficiente más alto. El ingeniero debe seleccionar el coeficiente que sea consistente con el método de análisis usado para la determinación de las presiones transitorias. Como la probabilidad de que P_t y P_v ocurran en un mismo lugar es cero, no aparecen en la misma combinación de carga.
- Como los efectos por temperatura surgen y se abaten lentamente, se deben de tratar junto con las cargas permanentes y de servicio. Un coeficiente de 1.2 en este tipo de acciones es suficiente (AwwaRF, 2013).

2.2.2. Causas y modos de falla

La definición de falla utilizada por el *United States Bureau of Reclamation* en el estudio realizado por *American Water Works Association Research Foundation* (AwwaRF) en 1995 es: “Falla está definida como que requiere de una acción (reparación, reemplazo, o ambas) después de instalada para corregir una deficiencia en la tubería de las unidades afectadas” y “el término falla es sinónimo de tasa de reparación y reemplazo”.

Similar a la población humana, cada sección de tubería individual tiene un nacimiento (manufactura) y una muerte que es afectada por su herencia (diseño, fabricante, materiales, etc), los eventos en su nacimiento (construcción, instalación), y su estilo de vida (operación, mantenimiento, etc.). Para propósitos de este estudio, falla se definirá como la pérdida de la utilidad de la sección de tubería o reducción en la confianza de que la sección de tubería permanezca en servicio, después de descubrir una deficiencia en la sección de tubería. Esto incluye reparación, reemplazo, o reducción en la presión de operación.

La falla más común en los PCCP con cables rotos (Figuras 2.22 y 2.23), ocurre por un efecto cascada: existe una sobrepresión \rightarrow el recubrimiento se rompe \rightarrow los cables son expuestos al agua \rightarrow los cables se corroen y rompen



Figura 2.22: Espiras de presfuerzo rotas por la acción de la corrosión (León, 2004).



Figura 2.23: Falla local en la tubería enterrada (León, 2004).

→ la presión es transferida al cilindro → el núcleo se rompe → el cilindro se oxida y falla.

El trabajo de los PCCP del Sistema Cutzamala es aceptable ante la carga de diseño máxima, ya sea para un estado sin alambres rotos o para un máximo de 39 espiras rotas (ó 70 cm de longitud), ya que esto no provoca el efecto cadena (León, 2004).

La falla de la tubería de concreto presforzado es usualmente repentina. La fricción cortante del núcleo de concreto es excedida, simultáneamente aparecen las rupturas de tensión del cilindro oxidado. La falla a presión es menor a la resistencia última del cilindro, pues está limitada por varios factores que incluyen variaciones en el grosor del cilindro, excentricidades en la soldadura, resistencia de la soldadura, esfuerzos de flexión en la transición al más rígido núcleo con presfuerzo funcional. Si el tubo tiene fuerzas longitudinales aplicadas a través de la junta, estas fuerzas se suman al problema.

La falla de los cables presforzados, y especialmente el número de cables presforzados funcionales, debe ser reconocido como una advertencia de que la tubería esta operando con un margen de seguridad reducido y que su vida útil restante es finita (AwwaRF, 2008).

Las fallas en la tubería de concreto presforzado pueden ocurrir circunferencial o longitudinalmente. El proceso en el modo de falla circunferencial inicia con la corrosión y consiguiente rompimiento de los cables, o el rompimiento de los cables debido a la fragilización por hidrógeno, seguido por el rompimiento y delaminación del recubrimiento, pérdida del presfuerzo conforme se corroen y rompen los cables, rompiéndose posteriormente el núcleo, exponiendo el cilindro de acero al medio ambiente, corrosión del cilindro de acero, y eventual ruptura.

El comienzo de la afectación en el modo de falla circunferencial puede estar relacionado con el diseño, manufactura, instalación, operación, o ambiente agresivo. Una vez que la corrosión inhibió las propiedades de alta alcalinidad del mortero de cemento (ya sea por rompimiento y/o delaminación o pérdida de alcalinidad de la cubierta), la corrosión del cable puede comenzar. En adición a la corrosión, la fragilización por hidrógeno de los cables con alta resistencia a la tracción, puede ocurrir y ocasionar el progresivo rompimiento de los cables. La pérdida del presfuerzo en el núcleo está asociada al rompimiento de cables, que puede llevar al rompimiento de éste.

La falla longitudinal ocurre típicamente debido a la inadecuada restricción de movimiento en los codos, tees o divisiones (yees); asentamientos diferenciales del suelo; o movimientos del terreno debido a explosiones o sismos. El

efecto de Poisson de esfuerzos circunferenciales de presión interna y cargas termales también contribuyen a los efectos longitudinales. El proceso de falla longitudinal comienza con el movimiento del tubo que resulta en la abertura de las juntas o en el rompimiento circunferencial del núcleo de concreto, exponiendo el cilindro de acero a la corrosión, cediendo y rompiéndose el cilindro de acero, fallando el núcleo externo de concreto. El proceso puede resultar en la fisura o ruptura y puede ocurrir con o sin la corrosión del cilindro de acero.

Las causas de la falla de los PCCP se pueden dividir en 5 categorías: diseño, manufactura, instalación, ambiente, y operación.

- **Deficiencia en el diseño.** La deficiencia en el diseño incluye la selección inapropiada del tipo de tubería para la exposición al ambiente, e inadecuado diseño estructural de la tubería resultando de las deficiencias de, ya sea la metodología o de las cargas. Un diseño inadecuado puede también ser resultado del diseño inapropiado de la protección contra la corrosión para la exposición al medio ambiente.
- **Deficiencia en la manufactura.** La deficiencia en la manufactura incluye uso de material inapropiado en el proceso de fabricación, proceso de fabricación inapropiado tal como la soldadura, o etiquetado inapropiado de la tubería manufacturada, e inapropiado control de calidad.
- **Deficiencias en la instalación.** Deficiencias en la instalación que han causado fallas en el pasado incluyen: base y relleno inadecuado, instalación de la tubería incorrecta, daño de la cobertura durante el traslado, suministro e instalación, o instalación inadecuada de la resticción al movimiento.
- **Ambiente adverso.** El ambiente adverso es la causa más común de agotamiento de la tubería de concreto presforzado. La tubería instalada en ambientes agresivos puede requerir medidas de protección adicionales, por ejemplo aquellos con suelo altamente corrosivo, condiciones severamente ácidas, dióxido de carbono agresivo o corrientes eléctricas derivadas.
- **Operación.** La operación inapropiada de las líneas de tubería pueden causar grandes esfuerzos en la tubería resultando en el agotamiento del núcleo, y el agrietamiento de la capa protectora, así como el rompimiento de alambres. La causa de falla por mala operación más común

es permitir grandes presiones transitorias en la tubería, o grandes cargas de tierra o carga viva más grandes de aquellas para las cuales fue diseñada. Otra operación común para las líneas de tubería que son protegidas catódicamente, es una protección catódica incorrecta que típicamente causa una rápida tasa de rompimiento de cables (AwwaRF, 2012).

2.2.3. Mantenimiento, monitoreo y detección de fugas

Después de más de 20 y 30 años de operación y servicio de las Líneas 1 y 2 respectivamente, los diferentes factores que intervienen en el deterioro de los tubos (presiones de trabajo: gradiente hidráulico, carga hidráulica y presiones transitorias; cargas de gravedad: peso propio del tubo, peso del fluido, peso del suelo y la fuerza de presfuerzo; y externos: cercanía a las líneas de alta tensión, composición química del suelo), han desarrollado una serie de deterioros en ambas líneas provocando que la composición estructural disminuya en sus capacidades, y alertando al organismo operador a implementar diversos estudios y trabajos de campo a fin de detectar las ubicaciones de los tubos que han sufrido daños en la estructura además de protegerlos contra la corrosión (Callejas, 2011).

De acuerdo con los términos de referencia de la convocatoria a la licitación pública nacional No. PO16101036-003-13 para la contratación de obra pública, cuyo objeto es: “Estudio para el diseño e instalación de la protección catódica en 4.6 kilómetros de cada una de las líneas de conducción 1 y 2 del Sistema Cutzamala 2013, Estado de México”, algunos de los estudios y trabajos realizados al Sistema Cutzamala involucrados con el diseño e instalación de protección catódica incluyen los siguientes:

- En 1982, la Comisión de Aguas del Valle de México inicia los estudios de resistividad y análisis de suelos a lo largo de la línea de conducción para conocer la agresividad del suelo hacia las tuberías de Concreto Presforzado del Sistema Cutzamala. En 1992 y 1993 el Instituto Mexicano del Petróleo instala 103 estaciones de monitoreo de potenciales sobre la línea 1 y 33 sobre la línea 2. De 1994 a 1996 se realizan 10 monitoreos de potenciales. En 1997 y 1998, se realizan 8 monitoreos de potenciales, se instala 6 estaciones nuevas y se revisa físicamente los tubos de 10 estaciones, en 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011 y 2012

se continúan los trabajos de Monitoreo de Potenciales y rehabilitación de estaciones.

- En octubre del 2001 ante una fuga de agua a la altura del km 49+000, el Laboratorio de Pruebas Equipos y Materiales (LAPEM) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), concluyó que fue por causa del fenómeno de la corrosión. El Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó en el 2002 el estudio denominado “Bases para el desarrollo de un sistema de apoyo al control de riesgo de falla en los tubos de concreto presforzado del Sistema Cutzamala”.
- En junio del 2002, LAPEM de la CFE con el fin de definir una metodología para conocer el estado en que se encuentra la línea 1 del acueducto Cutzamala analiza dos tramos de 88 m mediante la determinación de la velocidad de corrosión en cada uno de los tubos, (24 en total). En 2002 LAPEM realiza pruebas de la velocidad de corrosión en 7.3 km del Acueducto, correspondiente a 1000 tubos. Para validar los resultados obtenidos con la metodología de LAPEM de la CFE en el 2003 se descubren y revisan físicamente 12 tubos considerando los diferentes valores obtenidos en las corrientes de corrosión y en 2003 y 2004 realiza pruebas de velocidad de corrosión en 45.6 Km. de la línea 1. En base a la información obtenida en estos estudios, de 2003 a la fecha se han revisado físicamente más de 180 tubos, realizando reforzamientos con medias silletas en 25 tubos afectados estructuralmente y se tienen detectados afectaciones por corrosión en 26 tubos programados para repararse, todos en la línea 1 del acueducto.
- En 2005 se realiza simultáneamente el estudio de Monitoreo Acústico en 20 km sobre la línea 1 del Acueducto Cutzamala, para validar la tecnología propuesta, y se realiza la detección de fugas en 12 km sobre la línea 2 mediante el Sistema denominado Sahara.
- En 2006 se realiza el estudio de monitoreo acústico en 20 km sobre la línea 2 con objeto de revisar parte de las tuberías que no se han revisado por otro tipo de metodología y/o sistema, también se realiza el estudio de detección de fugas mediante el Sahara en un tramo de 20 km de la línea 2 considerado como crítico.
- En 2007 se realizó otro estudio de monitoreo acústico en la línea 1 y en

la línea 2 en 20 kilómetros y se realizó una inspección electromagnética en 871 metros en la línea 1.

- En esta inspección electromagnética en la línea 1 se detectaron 31 tubos que presentan cables rotos, de ellos sólo 3 requieren reparaciones en corto tiempo, el resto presentan menos de 5 espiras afectadas, dichos resultados coinciden con los estudios ya realizados por este Organismo de Cuenca.
- En enero de 2008 al tratar de reparar un tubo ubicado en el km 25+214 de la línea 1 del acueducto, se detectó que su estado de deterioro era avanzado por lo que se decidió sustituirlo antes de que tuviera una falla catastrófica.
- En julio de 2008 se inspeccionó de forma electromagnética 12.8 km de la línea 1, del km 25+150 al 37+950 detectándose 309 tubos con acero de refuerzo roto, de los cuales se recomienda en una primera etapa sustituir 6 y reparar 10, efectuando en noviembre del mismo año la sustitución de cuatro tubos, por otra parte se realizó la inspección electromagnética en 2.2 km la línea 2 del km 35+775 al km 37+975, detectando 29 tubos con espiras rotas.
- En noviembre de 2008 se realizó la inspección electromagnética en 21.6 Km de la línea 1 del Sistema Cutzamala del km 37+997 al Tanque Santa Isabel, detectando 192 tubos con espiras rotas, de los cuales se recomienda en una primera etapa sustituir 6 y reparar 14.
- En 2009 se realizó la inspección electromagnética en la línea 2, entre los tanques Pericos y Santa Isabel del km 24+500 al km 60+040.
- En 2009 se instaló la protección catódica con ánodos de sacrificio de magnesio en tres secciones con mayor número de tubos con cables rotos de las líneas 1 y 2 del Sistema Cutzamala en los tramos del cruce con las líneas de alta tensión (del 26+537 al 28+723), cruce con gaseoductos de Pemex (del 30+369 al 32+533) y el tramo con alto nivel freático (del 33+781 al 35+467) para una longitud de 6 km en cada una de las líneas 1 y 2 entre el tanque Pericos y el Cefereso.
- En 2010 se realizó la instalación de la protección catódica con ánodos de sacrificio de zinc en cuatro secciones con mayor número de tubos

con cables rotos de las líneas 1 y 2 del Sistema Cutzamala en los tramos siguientes: 2,027 metros del tanque Pericos (km 24+510) al km 26+537, 1,646 metros del km 28+723 al km 30+546, 1,248 metros del km 32+533 al km 33+781 y 1,579 metros del km 35+467 al km 37+046 (CONAGUA, 2014b).

Protección catódica

Cómo ya se mencionó los PCCP tienen una capa de mortero que protege el acero de presfuerzo (espiras). Cuando el mortero se encuentra mal proporcionado o existe una disminución en el potencial de hidrógeno (pH) por la acción de un agente agresivo, se disuelve esta capa y se originan grietas que facilitan el paso del agua retenida en el suelo, reduciendo desde luego la alcalinidad del mortero. Lo que facilita que se dé la corrosión en las espiras, que conduce a la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, y a la subsecuente delaminación y exfoliación (León, 2004).

La corrosión de acero es la destrucción del metal por reacciones químicas o electroquímicas (o ambas) con su medio ambiente. La protección catódica es el método de reducir o eliminar la corrosión de un metal, haciendo que la superficie de éste, funcione completamente como cátodo cuando se encuentra sumergido o enterrado en un electrólito. El cátodo es aquel electrodo donde se desarrolla la reacción de reducción y prácticamente no ocurre corrosión alguna.

Las estructuras corroídas presentan áreas anódicas (éstas son aquellas donde la estructura se oxida). Por lo tanto, si todas las áreas anódicas se pudieran convertir en catódicas, la estructura completa funcionaría como un cátodo y la corrosión sería eliminada (Sosa, 2012).

Los componentes de un sistema de protección catódica con corriente impresa son:

1. Un nodo dispersor;
2. Una fuente de corriente continua y;
3. El cable portador de la corriente (ILCE, 2014).

En la Figura 2.24 se presenta un esquema de la protección de una tubería enterrada en el suelo.

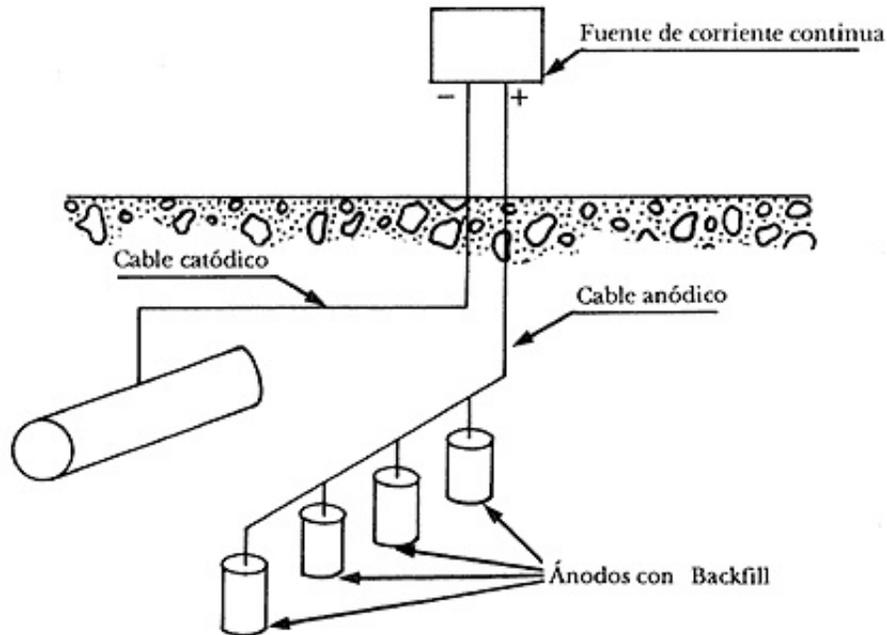


Figura 2.24: protección Catódica (ILCE, 2014).

Tecnología de Emisión Acústica

La Tecnología de Emisión Acústica (AET) está basada en las emisiones acústicas hechas por el alambre de acero presforzado cuando libera su energía al romperse o deslizarse una espira. La Figura 2.25 muestra una ruptura de cable, como se encuentra más cerca del acelerómetro 1 el sonido de este evento será detectado primero por éste, y después por el acelerómetro 2. La diferencia en tiempos de llegada entre los dos hidrófonos nos dará la ubicación del evento usando la ecuación mostrada en la misma figura.

El sistema de detección por emisión acústica usado en el Sistema Cutzamala es el AH-4 Pipeline Test System y consiste en cuatro componentes principales:

1. Acelerómetros. Dos o más acelerómetros son utilizados para detectar la emisión acústica de la tubería. El sensor está compuesto de materiales de cerámica y está diseñado para las frecuencias de las señales acústicas que acompañan al deterioro activo de tuberías PCCP. Estos sensores son instalados en la superficie exterior del tubo estando en operación la línea (Figura 2.26).

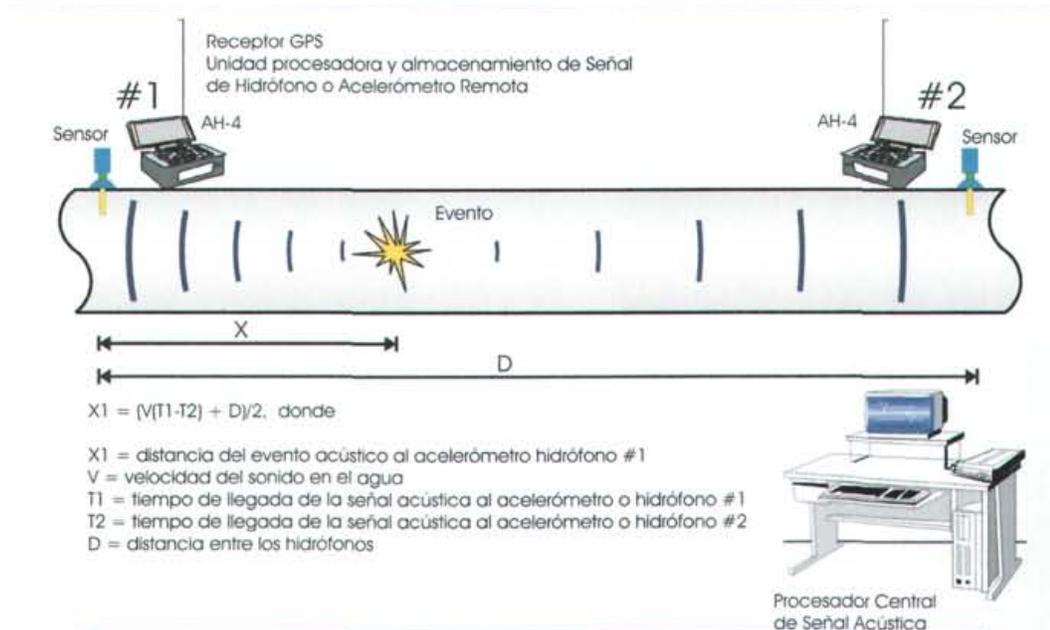


Figura 2.25: Sistema de detección de emisión acústica (Callejas, 2011).

De acuerdo a los resultados de pruebas de calibración hechas en el 2005 en la línea 1 del Sistema Cutzamala, el espaciamiento entre los acelerómetros puede ser de hasta 1200 pies (365 m), pero la distancia efectiva se debe reducir donde el ruido de fondo es excesivo, o donde las condiciones no son óptimas.

2. Procesador de señal. Las señales de los acelerómetros son monitoreadas por una computadora (Procesador Remoto de Señal Acústica o RASP), la cual recibe las señales y las filtra con una serie de parámetros, posteriormente graba todas aquellas que caigan dentro de los parámetros especificados en un disco especial de almacenaje, para que después sean clasificadas (Figura 2.27).
3. Cronómetro de precisión. Es la antena y procesador del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que están incorporados al RASP. Este componente proporciona la ubicación del acelerómetro por medio de su latitud y longitud, para que no haya duda sobre donde estaba ubicado el instrumento cuando la información fue grabada; y sirve como un reloj muy preciso que determina el tiempo de viaje de la señal con



Figura 2.26: Instalación de un acelerómetro en el lomo del tubo (Callejas, 2011).



Figura 2.27: Procesador de señal AH-4 (Callejas, 2011).



Figura 2.28: Diagrama del equipo RFTC (Pure Technologies, 2014).

una precisión mayor a la millonésima de segundo (o microsegundo).

4. Sistema de Análisis de Información. El cuarto componente del sistema AH-4 es el Procesador Central de Señal Acústica (CASP) que se encuentra ubicado lejos de los sitios de estudio. La información del RASP es transferida al CASP. El CASP es una computadora con programas propios que procesa y ayuda en el análisis de la información grabada por el RASP (Callejas, 2011).

Tecnología Electromagnética RFTC

Es una tecnología no-destructiva que ayuda en la localización del deterioro de los PCCP, identificando las áreas que requieren mantenimiento preventivo o sustitución de tubos. El principal objetivo de esta tecnología de Inspección es la detección y evaluación de señales electromagnéticas indicando epiras rotas en los PCCP.

El procedimiento de inspección es relativamente rápido y usualmente se realiza a una velocidad de paso normal de quien anda dentro de la tubería. Para realizar la inspección se requiere dejar de operar la línea y vaciar la tubería en la sección o secciones que serán inspeccionadas. El equipo de inspección es ensamblado dentro de la tubería, y a medida que el equipo avanza a través de la tubería va recolectando los datos.

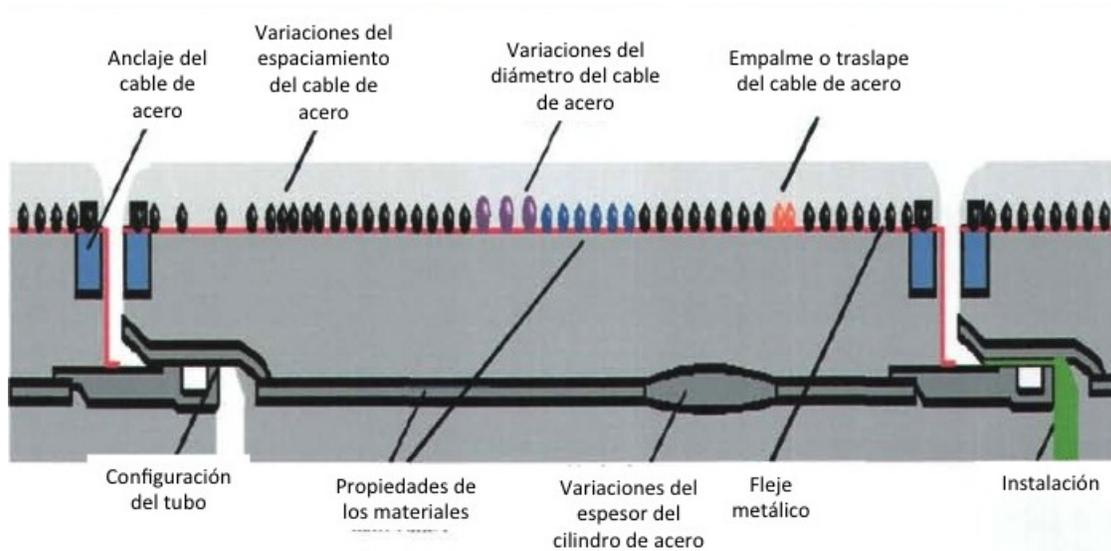


Figura 2.29: Características de fabricación de los PCCP (Callejas, 2011).

El equipo de inspección es esencialmente un transmisor y receptor de radio (Figura 2.28) donde los cables de acero de presfuerzo actúan como una antena secundaria, aumentando la señal. Cuando los cables de acero de presfuerzo están rotos, la señal recibida estará distorsionada.

La ventaja principal del método electromagnético es su capacidad de localizar y estimar cables rotos en las secciones individuales de tubos de concreto presforzado, también tiene la capacidad de determinar cuáles tubos no tienen pérdida de presfuerzo en el acero. Aunque el número de cables rotos por sí mismo no indica si una sección de tubo dada fallará, con un análisis estructural esta información puede ser utilizada como base para una estrategia de manejo de riesgos.

Como el sistema es sensible a todo material Electromagnético contenido dentro del tubo, es posible que una señal pudiera detectar algo más que no fuese un cable roto, y en algunas ocasiones estas señales pueden conducir a un “falso positivo”, que indique cables rotos donde no los hay. Esto se da en muy raras ocasiones donde las variaciones de las propiedades del PCCP (Figura 2.29), son tales que dan lugar a un “falso positivo” (Callejas, 2011).



Figura 2.30: Medición y localización de cables con discontinuidades (Callejas, 2011).

Verificación en campo

Las verificaciones y validaciones de campo proporcionan la retroalimentación para refinar los procedimientos de análisis e incrementar la exactitud en el número de cables rotos. Conociendo el número real de cables rotos, así como la configuración real de varios tubos, se puede refinar los procedimientos de análisis y las predicciones de espiras rotas.

Debido a que hay una amplia variación en los métodos de construcción y diferentes tipos de tubería de concreto presforzado, hay también diferentes métodos de verificación y validación, sin embargo, lo importante es mantener documentado el método o métodos utilizados junto con sus resultados, a fin de ser comparados más adelante con las señales electromagnéticas.

Por lo que para propósitos de la tecnología electromagnética, la verificación de campo determina la localización real y número de cables rotos reales en una región, en un tubo dado y cómo puede ser realacionada a la ubicación y número de cables rotos proporcionada por el análisis (Figura 2.30).

Para realizar el análisis, para cualquier tubería inspeccionada, se toman una serie de hipótesis acerca de esa tubería que incluyen:

1. Los registros exactos del cliente que reflejen lo que realmente está en la tubería,
2. Que no se encuentre nada inusual acerca del proceso de fabricación de la tubería,
3. Que no se encuentre ningún accesorio desconocido dentro de la tubería,
4. Las propiedades de los materiales de los tubos sean uniformes y que hayan sido fabricados dentro de los estándares de la industria,
5. El tubo que sea seleccionado esté libre de defectos y antecedentes para la medición de la señal,
6. Que se seleccione la curva de calibración más parecida a las características estructurales de la tubería analizada para la cuantificación de cables rotos,
7. Las regiones de cables rotos, deben de ser con cables rotos consecutivos, sin tener cables rotos aislados o intermitentes.

Si alguna de esta hipótesis es incorrecta, los resultados pueden presentar desviaciones en la estimación de cables rotos.

Como ya se mencionó, existen diferentes métodos de verificación que pueden ser utilizados para revisar la predicción del número de cables rotos en base a las señales electromagnéticas. La elección específica del método de verificación dependerá en uno o más de los siguientes factores (Callejas, 2011):

- a) El tipo de tubo a ser verificado.
- b) Si el tubo tiene o no flejes metálicos para la protección catódica,
- c) Si el tubo ha sido removido o no de la tubería,
- d) Si el tubo está o no completamente vacío,
- e) La disponibilidad de equipo y recursos.

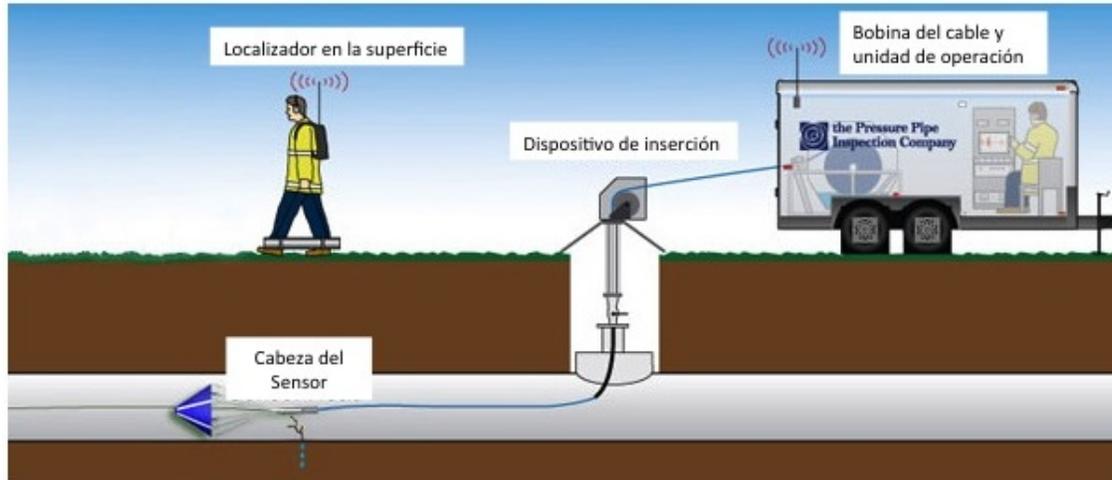


Figura 2.31: Diagrama del sistema Sahara (Pure Technologies, 2014).

Sahara: Detección de Fugas para Redes Complejas

Esta tecnología basa su sistema de detección en un sensor que introduce en la tubería y viaja a través de ésta con la corriente del agua. El sensor es una sonda acústica cuya velocidad se puede regular mediante un cable fijo. Además lleva un odómetro, que en todo momento registra su ubicación. Durante su recorrido a lo largo de la tubería, el sensor emite una señal acústica y a la vez cuantifica la manera en que ésta rebota en las paredes de la línea. Cuando el sensor capta una señal distintiva, envía en tiempo real la alerta a un equipo exterior, indicando detección de fuga (Figura 2.31). Una gran ventaja de Sahara es que no necesita paralizar la actividad de la tubería (Callejas, 2011).

Robot P-Wave

De acuerdo con el Comunicado de Prensa No. 510-13 de la CONAGUA, el 24 de agosto de 2013 se introdujo un robot en los ductos del Sistema Cutzamala, este equipo emite ondas electromagnéticas dentro del PCCP (Figura 2.32), y mide los cambios en el campo electromagnético para ubicar a las espiras rotas (CONAGUA, 2013c; Sosa, 2008).



Figura 2.32: Diagrama del sistema P-Wave (Pure Technologies, 2014).

Monitoreo con Fibra Óptica

El Sistema Cutzamala cuenta con un sistema de monitoreo en tiempo real del avance de corrosión en los acueductos, instalada en el 2011 (Urbacon, 2014).

Se le llama monitoreo a la técnica que combina la captura de datos de una estructura en puntos estratégicos con el análisis de información a través de registros en el tiempo; los datos se recopilan a través de una red sensorial no destructiva. Al analizar esta información se pueden detectar variaciones que se traducen en daños o degradación de la estructura. Esta información puede obtenerse de forma periódica o en tiempo real y con ello asociarla a deterioro, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, cambios en las variables del ambiente, así como a las propiedades físicas relativas a la carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones, dislocaciones y otros que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura. El monitoreo tiene por objeto dar el diagnóstico del estado de los materiales y de todas las partes que forman en conjunto a la estructura durante su vida útil.

Un sistema de sensores de fibra óptica se compone de:

1. Un emisor de luz (LASER o LED);
2. La fibra óptica como medio de transmisión;
3. Un elemento sensor o transductor;

4. Y un detector;

El transductor modula algunos de los parámetros del sistema óptico (intensidad, longitud de onda, fase, polarización, etc.) lo que da lugar a un cambio en las características de la señal óptica recibida en el detector. Este es un dispositivo capaz de transformar una señal luminosa en una señal eléctrica, la cual es más fácil de analizar. Una vez realizada la conversión óptico-eléctrica, la señal eléctrica resultante es registrada primero por el sistema de adquisición de datos y posteriormente tratada por el software del sistema para su representación gráfica (Arenas, 2011).

Por lo que la fibra óptica instalada en el Sistema Cutzamala permite efectuar pruebas no-destructivas para evaluar la condición de las tuberías mientras las mismas permanecen en operación. Además, se construyó la estación de monitoreo remota dentro del predio del tanque Santa Isabel (Urbacon, 2014).

De acuerdo a un comunicado del 26 de agosto del 2013, la CONAGUA informa que el sistema de detección por fibra óptica registra las condiciones de trabajo de cada tubo y determina la prioridad para sustituir los tramos averiados, existen 600 tubos bajo estricta vigilancia y de estos, 96 tienen una prioridad mayor (CONAGUA, 2013b).

Capítulo 3

Alternativas de Solución

Cuando una estructura, como los PCCP, presenta daños, se puede adoptar una de las siguiente medidas:

- (1) Demolición de la estructura dañada y/o sustitución del elemento dañado.
- (2) Control y seguimiento del avance del deterioro hasta llegar a una situación límite, pero sin intervenir en el proceso.
- (3) Actuar sobre el proceso de deterioro (Sosa, 2012).

Ya se habló de la medida (2) en la sección 2.2.3; en este capítulo se hablará primero sobre la medida (1), que se lleva a cabo todos los años, como se mencionó en el capítulo de Antecedentes; y después se hablará sobre un método de mantenimiento a base de presfuerzo externo, que se acaba de utilizar por primera vez en mayo del 2014, y que entraría como una medida del tipo del inciso (3).

Seleccionar la solución óptima para cada deterioro o problema específico en los PCCP es un problema complejo que involucra variables técnicas y económicas. Los elementos clave para la selección de un método de rehabilitación son:

- (a) La naturaleza exacta del problema (o problemas).
- (b) La presión hidráulica requerida para realizar la reparación.
- (c) Los materiales, dimensiones, y geometría de la tubería.

- (d) El tipo y localización de válvulas, piezas especiales y compuertas o cierres.
- (e) El tiempo en el que se puede dejar a la tubería fuera de servicio.
- (f) Factores propios del lugar.

El propósito del proceso de selección es considerar todos estos factores y llegar a la solución viable que sea más efectiva mediante un estudio costo-beneficio-tiempo. Idealmente el costo de la solución debe tomar en cuenta los costos de la reparación, de la interrupción del servicio, del mantenimiento a largo plazo y otros propios del “ciclo de vida” de la tubería (AwwaRF, 2001).

Existen varios tipos de reparación de un PCCP, sin embargo, aquí sólo se analizarán las dos soluciones mencionadas anteriormente.

3.1. Sustitución de tubo

El objetivo de este procedimiento es sustituir los tubos con mayor índice de corrosión por piezas especiales nuevas. A continuación se describen los trabajos realizados de acuerdo a la metodología de trabajo de Grupo Inmobiliario Tlahtoani S.A. de C.V.:

Preliminares.

Identificar el tubo a sustituir. El sitio de trabajo es señalado por la dependencia y se le indica al contratista cuál es el tubo a sustituir (Figura 3.1). El día del recorrido, la compañía contratista lleva a cabo una inspección física de los tubos a reemplazar. También se define la ubicación de la obra de desvío, instalación de oficinas móviles, carpa, sanitarios, ambulancias, maquinaria, desagües, y demás factores físicos y sociales que intervengan en la zona.

Instalación del campamento. Se instalará el campamento ubicado estratégicamente para poder monitorear todos los frentes (Figura 3.2).

Equipo de iluminación Los equipos de iluminación de las zonas de trabajo, sobre todo en el área de cambio de tubos, son luminarias



Figura 3.1: Trabajos preliminares: identificación del tubo a sustituir (GIT, 2013).

de tubo de acero con 4 lámparas de 1000 watts cada una, y cuentan con un ajuste de altura de hasta 5 m.

Equipo de seguridad, comunicación y señalización. Un ingeniero especialista en implementación de protocolos de seguridad se encarga de revisar en todo momento que sea ejecutado el plan de trabajo, para así disminuir los riesgos de accidentes.

Protocolo de seguridad. Debe de haber un protocolo de seguridad para llevar a cabos los trabajos, éste será puesto en marcha cuando se realicen obras al interior y exterior de la tubería, también se seguirá un plan de trabajo en espacios confinados.

Obra de desvío. Previo al inicio de los trabajos de excavaciones y sustituciones de piezas, se tendrá que realizar una obra de desvío de tráfico pesado (Figura 3.3), ya que el acueducto del sistema Cutzamala cruza por vías de comunicación importantes como la carretera Federal libre Toluca-Ixtlahuaca ó la carretera Federal libre Toluca-Zitácuaro, así como vías de menor importancia; habrá que desviar el tráfico que se genere en el camino de operación que está entre las dos líneas.

Para cada paro se realizarán obras de desvío con las siguientes



Figura 3.2: Trabajos preliminares: equipo de iluminación (GIT, 2013).



Figura 3.3: Trabajos preliminares: obra de desvío (GIT, 2013).



Figura 3.4: Excavación con equipo mecánico (GIT, 2013).

actividades a desarrollar (por frente de trabajo):

- Limpieza del terreno.
- Trazo y nivelación de la obra de desvío.
- Suministro y colocación de material.

Excavaciones. Todas las excavaciones se han contemplado para cualquier tipo de material y estado en el que se encuentre, hasta alcanzar el nivel de desplante de las tuberías y la contratista las mantendrá drenadas.

Excavación con equipo mecánico. Es realizada para cepas, drenes y sondeos, en material común, en seco y/o en presencia de agua (Figura 3.4). Todas las excavaciones con equipo mecánico ya incluyen combustible y operador con cambio de turno de 12 horas. Con antelación a la actividad principal de excavación, se realizarán los sondeos de verificación y posición del tubo.

La excavación mecánica se realizará hasta 50 cm antes del lomo de la tubería en base a las profundidades conocidas de algunos estudios. Y se continuará con la excavación a ambos lados de la tubería dejando el talud que evite los caídos al interior de la zanja. El material excavado se depositará fuera de la zanja de tal manera que no interfiera con la ejecución de los trabajos siguientes, se traspaleará el material para tener libertad de movimientos.



Figura 3.5: Excavación manual (GIT, 2013).

Los trabajos de excavaciones con equipo mecánico incluyen las rampas del acceso de los equipos, cuando sea representativo el volumen.

Excavación manual. Son los trabajos necesarios para extraer el material que se encuentra cubriendo y debajo de la tubería de 99” de diámetro del acueducto del Sistema Cutzamala. Una vez que las máquinas retroexcavadoras han proporcionado el espacio suficiente para que el personal inicie con la excavación manual se continuará con este procedimiento (Figura 3.5).

Previo a la remoción del material por medios manuales, se harán terraplenes a un lado de la zanja, disponiéndolo en forma que no interfiera con el desarrollo normal de los trabajos y la conservación de la excavación durante el tiempo que se requiera hasta la correcta instalación de las piezas especiales, las zanjas serán excavadas y cuidadosamente alineadas a los niveles señalados por el ingeniero especialista en instalación de tubos y el ingeniero especialista en implementación de protocolos de seguridad.

Las superficies de las excavaciones deberán ser afinadas en tal forma que cualquier punto de ellas no sobresalga más de lo que indique el ingeniero especialista en seguridad. El fondo y las dimensiones de la excavación serán las suficientes para las maniobras



Figura 3.6: Bombeo de achique (GIT, 2013).

de instalación de las piezas, se deberá descubrir por completo el tubo a reparar.

La excavación a mano en cepas está considerada para ejecutarse en cualquier clase de material en seco y/o en presencia de agua.

Bombeo de achique. La empresa considera el achique de agua con bomba autocebante, para desalojar el agua de los lugares donde se presenta nivel freático alto y/o agua de fugas del acueducto en el área donde se realicen los trabajos, para que sea posible que estos se ejecuten en seco (Figura 3.6).

Suministro de piezas especiales. Las piezas especiales suministradas y colocadas en el piso o dentro de una zanja, deberán alinearse tanto horizontal como verticalmente de acuerdo con lo ordenado por el ingeniero (Figura 3.7).

La compañía contratista suministrará en obra la pieza especial requerida de acuerdo al proyecto.

Con la pieza especial ya colocada en el piso o dentro de una zanja,



Figura 3.7: Suministro de piezas especiales (GIT, 2013).

se hará la instalación propiamente dicha, ya sea que se conecte a un tramo de tubería o a otra pieza especial, debiendo limpiar sus extremos y lubricar los anillos de sello en su caso. Se deberá vigilar en todo momento que no haya agua en la excavación durante el proceso de instalación de la pieza especial en zanja.

Para la unión de la pieza especial de concreto a tuberías del mismo material, se dejará la ranura, el lubricante que se empleará será el recomendado por el fabricante, en su caso, para facilitar la colocación de los sellos de hule.

Cierres de concreto. Son conductos cilíndricos huecos y sus accesorios, fabricados con concreto reforzado de acuerdo a las normas de la empresa fabricante para la conducción y distribución del agua. Cuando se trate de adaptadores especiales que requieran de anillos de sello, estos serán de hule natural o sintético o bien material suministrado por el fabricante de la tubería que asegure la hermeticidad de la junta en forma permanente. No se colocarán estos apoyados sobre piedras, calzas de madera o soportes provisionales de cualquier otra índole no autorizados.

Las piezas especiales o cierres de concreto y el adaptador con campana deslizante, deberá de venir acompañado con anillo de sello



Figura 3.8: Biseles (GIT, 2013).

o empaques y serán de hule natural o sintético o bien material suministrado por el fabricante de la tubería que asegure la hermeticidad de la junta en forma permanente.

Biseles. Son conductos cilíndricos huecos para deflexionar la trayectoria del acueducto y seguir las líneas y niveles que marca el proyecto (Figura 3.8).

Tubo de concreto. Es la instalación de conductos cilíndricos huecos (tuberías), fabricados con concreto presforzado de acuerdo a las disposiciones de un proyecto, para la conducción y distribución del agua.

Empaques de neopreno. Suministro de empaque de neopreno para tubería de concreto presforzado tipo “ICHSA” de 99” de diámetro; estos son dispositivos complementarios, de diferentes materiales, para la instalación y unión de tuberías (Figura 3.9).

Sellos metal plástico de 99”. Es una pieza circunferencial de material metal-plástico de patente, para colocar en el interior de la tubería, la cual es necesaria para la protección de juntas de la



Figura 3.9: Empaques de neopreno (GIT, 2013).

tubería para evitar fugas de agua por éstas (Figura 3.10).

Demoliciones y extracciones. Pueden ser:

Demolición de tubos de concreto.

Extracción de bisel.

Cuando la pieza está completamente descubierta y ya se ha limpiado, se procede a las siguientes actividades por frente de trabajo:

- Demolición de juntas de protección de la unión de tubo-tubo. Entre la unión de espiga con campana, el tubo tiene una junta de mortero en el perímetro exterior, se demuele con herramienta manual, cortando el concreto con cortadora de 14” y 16”, y rotomartillo eléctrico de 650 watts, cuidando no dañar el concreto y espiras del tubo aguas arriba y/o del tubo aguas abajo.
- Demolición de tubo con equipo neumático. Después de haber demolido las juntas de unión y retirado el mortero, se marca



Figura 3.10: Sellos metal plástico de 99" (GIT, 2013).

una franja en el tubo dañado de 1m, esta franja se ubicará a 1 m de la junta unión aguas arriba del tubo a reemplazar y será el área a demoler (Figura 3.11). Para los trabajos se utilizará rotomartillo, cortadora de concreto de 14 y el concreto será retirado con rompedora neumática, hasta quedar las espiras de acero descubiertas (Figura 3.12).

- Corte de lámina y espiras con equipo de oxicorte. Cuando las espiras se encuentran descubiertas y ya que se ha retirado todo el concreto del bisel, se prosigue a cortar las espiras de acero con equipo de oxicorte con cargas de óxido-acetileno, ver Figura 3.13, mangueras de 15 m.
- Extracción del producto de la demolición. Todo el material producto de la demolición, así como los segmentos de concreto serán retirados de la zanja a fin de mantener limpia el área.
- Desinstalación de segmentos de tubería de concreto presforzado. Se realizarán las actividades referentes a la desinstalación de segmentos que consiste en retirar los restos de tubo en los extremos como se observa en la Figura 3.14.
- Extracción del producto de la desinstalación de los segmentos. Durante la desinstalación de los segmentos se junta el material producto de la demolición que deberá ser retirado fuera del área de trabajo; los segmentos de piezas grandes serán

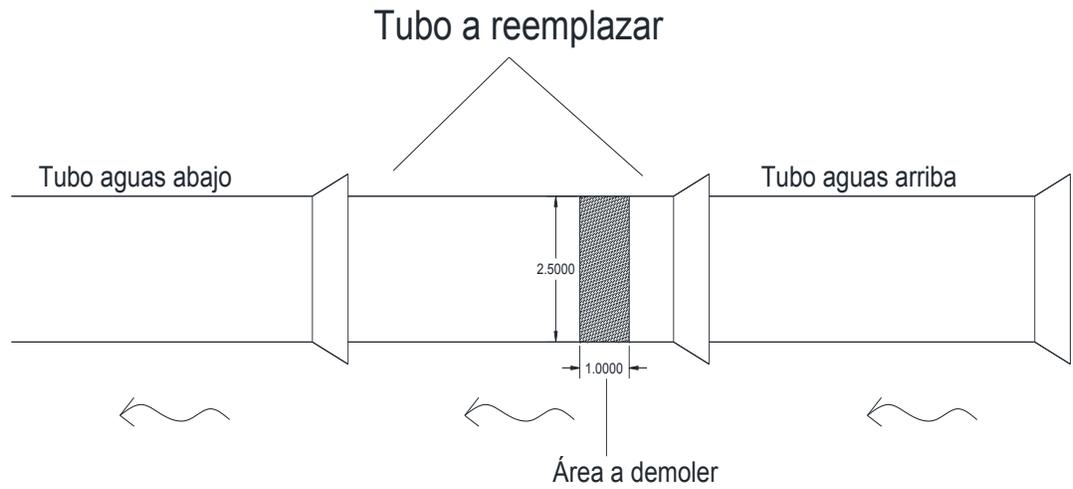


Figura 3.11: Ubicación de la franja en el tubo a demoler (GIT, 2013).



Figura 3.12: Demolición de tubo con equipo neumático (GIT, 2013).



Figura 3.13: Corte de lámina y espiras con equipo de oxicorte (GIT, 2013).

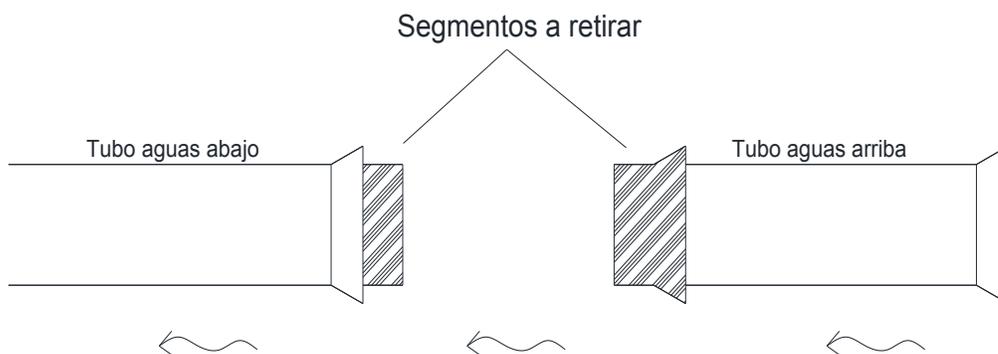


Figura 3.14: Diagrama de los restos de tubo a retirar (GIT, 2013).



Figura 3.15: Extracción del producto de la desinstalación de los segmentos (GIT, 2013).

extraídos con la grúa de 120 toneladas (Figura 3.15), y se pondrán en la plataforma del lowboy con el fin de ser trasladados al lugar que indique la dependencia; los segmentos pequeños serán extraídos con la retroexcavadora y cargados a un camión de volteo de 7 m³.

- Desacoplamiento de la espiga con la campana de la tubería. Implica el retiro de las piezas de lámina de acero, de los empaques existentes y la limpieza de las juntas.

Instalación de cierres, biseles, sellos y protección catódica.

Cierres de concreto. Son conductos cilíndricos huecos, fabricados con concreto reforzado de acuerdo a las disposiciones ordenadas por el ingeniero, para la conducción y distribución del agua.

1. Inspección visual. Se revisarán las superficies exteriores e interiores de las piezas a instalar, para detectar todas aquellas irregularidades como: escoria de soldadura, así como defectos profundos o aristas cortantes que alteren la tersura normal de acero; manchas de aceite, óxido o pintura vieja.



Figura 3.16: Aplicación de pintura en las piezas especiales (GIT, 2013).

2. Limpieza de las áreas de conexión. Se hará una limpieza auxiliar previa o complementaria del cierre que consiste en corregir todo tipo de defectos encontrados en las piezas; Por medio de limpieza manual, rasquetas, espátulas o cepillos de alambre, deben quitarse salpicaduras de cemento, pintura vieja y mal adherida, así como los defectos que alteren la tersura normal de la superficie de concreto; también se limpiarán las áreas de contacto de los tubos a las que se conectará el cierre.
3. Aplicación de pintura en las piezas especiales. A todas las piezas especiales que se suministrarán se les aplicará antes de su instalación 3 tipos de pintura (Figura 3.16), que son:
 - a) *Recubrimiento Primario.* Es una capa de primario de zinc 100 % inorgánico auto curante, base solvente sobre la superficie ya preparada de acuerdo a la especificación PEMEX RP-4 tipo B, de norma 4.411.01 y 3.411.01 de Petróleos Mexicanos.
 - b) *Pintura de protección.* Para evitar que los tramos de tubería y piezas especiales de concreto presforzado de 99” de diámetro que se van a colocar, se oxiden y darles mayor

tiempo de vida útil, se les hará la aplicación de la pintura definitiva, deberán protegerse exteriormente, mediante la aplicación de una capa de pintura protectora.

- c) *Aplicación de recubrimiento de acabado.* Este recubrimiento se hará con una aplicación de acabado epóxico catalizado de altos sólidos a base de resinas epóxicas, solventes y pigmentos (componentes epóxicos), de acuerdo a la especificación PEMEX RA-26 de norma 4.411.01 3.411.01 de Petróleos Mexicanos.
4. Colocación de cierre. Previo a la instalación del cierre se deberá colocar una plantilla de grava.
Antes de presentar o colocar los adaptadores de concreto y el cierre y/o campana deslizante de acero, la empresa hará limpieza manual en las campanas y/o espigas del tubo colocado, posteriormente en las espigas y/o campanas se le aplicará jabón neutro para que sirva como deslizante al colocar los segmentos de tubería.
Para sustituir un tubo de 4.88 m; 5.00m ó 7.32 m. de longitud y 99” de diámetro, se colocarán dos adaptadores de concreto y una pieza central con campanas deslizantes de acero de 99” de diámetro.
 5. Junteos. Una vez instalado el cierre de 99” de diámetro, se procederá con:
 - a) *Junteo exterior.* El cual consiste en la colocación de una manta en el perímetro del tubo, amarrada en sus extremos con alambre recocido, que hace las veces de cimbra, para posteriormente colocarle mortero cemento-arena en proporción 1:2, con aditivo acelerante de fraguado (Figura 3.17).
 - b) *Junteo Interior.* Para el junteo interior se aplicará mortero cemento-arena en proporción 1:1, con aditivo acelerante de fraguado. Se requiere abrir la tapa de la brida para poder ingresar a la tubería, por lo que todo el personal que ingrese a la tubería contará con equipo de seguridad personal apropiado.
 6. Lubricación de las juntas. Para la unión de piezas especiales de concreto a tuberías del mismo material, se dejará la ranura



Figura 3.17: Junteo (GIT, 2013).

en la espiga de uno de ellos para alojar el anillo de sello. Si la unión es con tubería de acero o con piezas especiales de este material, se empleará el lubricante, para facilitar la colocación de los sellos en la unión.

7. Colocación de anillos de hule. Los anillos serán de hule que asegura la hermeticidad de la junta en forma permanente.
8. Colocación de tensores de acero. Con el fin de rigidizar la pieza se colocarán tensores de acero de 2 X 2, apoyados en los cartabones que sirven para colocar las campanas deslizantes de la pieza especial, soldándose antes de iniciar los rellenos (Figura 3.18).

Biseles y Tubos de concreto. Con la tubería ya colocada en el piso o dentro de una zanja, se hará la instalación propiamente dicha, ya sea que se conecte con otros tramos de tubería o a piezas especiales, debiendo limpiar sus extremos y lubricar los anillos de sello en su caso. Se deberá vigilar en todo momento que no haya agua en la excavación durante el proceso de instalación de tubería y piezas especiales en zanja.



Figura 3.18: Colocación de tensores de acero (GIT, 2013).

Sellos de metal plástico. El objetivo de la colocación de sellos es lograr la hermeticidad de la nueva tubería instalada, de 99” de diámetro, en la junta de unión y por el interior del tubo. Los sellos deberán ser colocados por la parte interna del tubo, ver Figura 3.19, después de haberse instalado correctamente las piezas, ya sean especiales, biseles o tubos; la instalación de los sellos será en las juntas unión de tubo antiguo y pieza nueva, y entre piezas nuevas, por lo regular se colocan 4 sellos en cada frente de trabajo.

Protección catódica. En caso de que los tubos a remplazar se encuentren ubicados dentro del tramo que tiene protección catódica (desde el tramo del Tanque Pericos en San Pablo Autópan, hasta el Tanque Santa Isabel), la compañía contratista realizará los trabajos relativos a la protección para darle continuidad a la tubería nueva (Figura 3.20).

Suministro y colocación de material de banco. Se revisará que el sitio donde se ejecutará el relleno esté libre de escombros y material indeseable, la dependencia hará la revisión del sitio y aprobará el inicio de este trabajo, que se hará con el cuidado necesario para no dañar la tubería. El material de relleno estará libre de troncos, ramas, raíces, materiales



Figura 3.19: Colocación de sellos metal plástico (GIT, 2013).



Figura 3.20: Instalación de la protección catódica (GIT, 2013).



Figura 3.21: Colocación de grava (GIT, 2013).

indeseables y partículas de tamaño grande.

Grava. Para formación de plantillas y acostillado, de la tubería de concreto presforzado de 99” de diámetro, incluye: suministro del material, carga, acarreo hasta el sitio de su utilización, descarga y el equipo necesario para su correcto acomodo. Estos trabajos están programados para realizarse previo a la instalación de las piezas especiales o tubos a reemplazar (Figura 3.21).

Tezontle. Para la formación de relleno hasta el lomo de la tubería de concreto presforzado de 99” de diámetro, incluye: suministro del material, carga, acarreo hasta el sitio de su utilización, descarga y el equipo necesario para su correcto acomodo.

El relleno con tezontle se ejecutará a los lados de la tubería con el objeto de dar un encamado correcto a todo el cuadrante inferior y se efectuará hasta 30 cm abajo del lomo del tubo.

Se hará la colocación de este relleno con máquina excavadora, y el acomodo del material se formará por capas horizontales de 20 cm de espesor, que sean compactadas con una bailarina (Figura 3.22).



Figura 3.22: Compactación de tezontle (GIT, 2013).



Figura 3.23: Colocación de tepetate (GIT, 2013).



Figura 3.24: Colocación de relleno (GIT, 2013).

Tepetate. Compactado al 90 % de la prueba proctor, para formación de acostillado y relleno, de la tubería de concreto presforzado de 99" de diámetro, incluye: suministro del material, carga, acarreo hasta el sitio de su utilización, descarga y el equipo necesario para su correcto acomodo, agua, compactación con equipo mecánico y/o neumático (Figura 3.23).

Relleno. Estos trabajos consisten en la colocación de material producto de la instalación como relleno final (Figura 3.24).

Cabe mencionar que los rellenos se deberán de colocar ya que la Dependencia haya hecho una verificación física de los trabajos y hayan dado la autorización de rellenar.

Al colocar el relleno se tendrá especial cuidado en que la maquinaria pesada no se posicione en la parte superior del tubo, por lo que solo se podrá maniobrar a los costados.

Es importante mencionar que todos los trabajos de relleno con material de banco y producto de la excavación, se realizarán posteriormente que se restablezca la línea, ya que nos servirá para realizar las pruebas de los trabajos realizados.

Regularización del terreno. Este trabajo consiste en el extendido y empareje del material sobrante de excavaciones posteriores a los rellenos, en el lugar donde se hayan realizado trabajos y que haya sido colocado el producto de excavaciones o desazolves efectuados en drenes.

Comprende el retiro del material producto de la excavación, con equipo mecánico hasta 20 m del eje de la excavación, el acarreo libre hasta 20 m, la limpieza de caminos, drenes, cunetas y canales que se hayan obstruido con el material producto de la excavación, el extendido del material sobrante de la excavación con equipo mecánico, el emparejamiento del terreno, en el lugar de la excavación, la mano de obra, la herramienta y el equipo necesario para ejecutar la regularización del terreno.

Si al mover el material producto de la excavación se obstruye algún dren, canal o camino, la empresa hará la limpieza correspondiente para dejarlos en estado operable, así mismo se hará el extendido y empareje del material sobrante de las excavaciones realizadas con una máquina retroexcavadora.

Retiro de instalaciones. Ya finalizados los trabajos de preliminares, suministros, demoliciones y colocaciones, se prosigue a:

- Asegurarse que el ducto se encuentre desalojado completamente, mediante el uso de registro de accesos y salidas del personal.
- Verificar que el área de trabajo se entregue limpia y sin escombros o basura.
- Verificar comportamiento de los trabajos realizados.
- Realizar un recorrido con la Dependencia para entregar el área de trabajo.
- Retirar candados en Tanque Santa Isabel y Tanque pericos.
- Retiro de maquinaria, equipo, mano de obra y herramienta menor del sitio de trabajo hacia almacén de la empresa.
- Retiro de instalaciones como: sanitarios, carpas, oficinas móviles, etc.

La desinstalación del campamento será después de que se reanude la línea.

3.2. Reforzamiento exterior mediante presfuerzo

En el mantenimiento al Sistema Cutzamala realizado del 1 al 3 de mayo de 2014, se utilizaron dos sistemas de rehabilitación de PCCP por medio de tendones, uno lo realizó Freyssinet y el otro la empresa Consultoría de Ingeniería para Soluciones Integradas (CISI). En este trabajo se hablará solo del primero, se puede consultar el otro en la página de Internet: <http://www.cisinet.com/tendones.php>.

El reforzamiento que se describe en esta sección es externo y forma parte de los dos tipos de reparaciones posibles que se manejan en Freyssinet a nivel mundial, siendo el otro un reforzamiento interno de la tubería (Freyssinet, 2014).

La finalidad de este sistema es el refuerzo activo de estructuras circulares con ayuda de armaduras compuestas por cinturones y apoyadas en el tubo que hay que reforzar (Freyssinet de México, 2014c).

Este sistema se utilizó por primera vez en 1999 en el sistema de agua potable de Libia, donde Freyssinet trabajó en cooperación con *The Great Man Made River Authority* (autoridad encargada de construir y operar el sistema de agua potable de Libia). Los objetivos que se plantearon al desarrollar este procedimiento de postensado son:

- El presfuerzo adicional debe restaurar las características mecánicas de la tubería sin importar cual sea el presfuerzo que tenga.
- El sistema se debe diseñar con una vida útil de 50 años.
- Debe ser económico (Elnakhat, 2006).

Las tecnologías desarrolladas por Freyssinet utilizadas en este tipo de reforzamiento son:

Cinturones (*DURALOOP*).

Están formados por torones envainados y engrasados introducidos en una vaina general de polietileno de alta densidad (PEHD), en cuyo vacío anular se inyecta lechada de cemento o resina epóxica de acuerdo a las necesidades.

Las armaduras se protegen individualmente con ayuda de una capa de grasa y una vaina de PEHD extruido en torno al torón, de modo que se garantiza el deslizamiento del torón sin adherencia a la estructura.

El hecho de inyectar la lechada de cemento antes de tensar el cable permite lograr un revestimiento perfecto del torón envainado y engrasado y una mejor distribución de la presión sobre el hormigón. De este modo el torón desnudo queda perfectamente protegido frente a la corrosión mediante dos barreras:

- La vaina individual, rellena con grasa para evitar que circule la humedad, y
- La vaina exterior de PEHD, a la que se inyecta la lechada de cemento.

El poliducto exterior no se rompe al tensado debido a la inyección de lechada o resina entre el torón autoprotegido y el Poliducto exterior de PHED, quedando protegido el torón en todo momento.

Hay tres barreras de protección: Grasa de torón autoprotegido, inyección (lechada o resina), Poliducto exterior de PHED.

La resistencia dieléctrica de materiales aislantes es: HDPE = 200 KV/cm

Anclaje (*2MX15*, Figura 3.25).

El anclaje está formado por un cuerpo que se apoya en la estructura que hay que reforzar. Desempeña las siguientes funciones:

- Anclaje de torones,
- Guía de los torones desde el conducto hasta el anclaje,
- Conexión con la vaina genérica y el torón engrasado envainado, que se garantiza por medio de piezas de PEHD que también permiten fijar el tubo de inyección de la lechada de cemento,
- Protección contra la oxidación de las zapatas y su entorno, lo que se consigue con ayuda de tapones PEHD rellenos de grasa, y
- Protección frente a la oxidación en el interior de los anclajes por medio de la inyección de grasa a través de los engrasadores atornillados al anclaje.

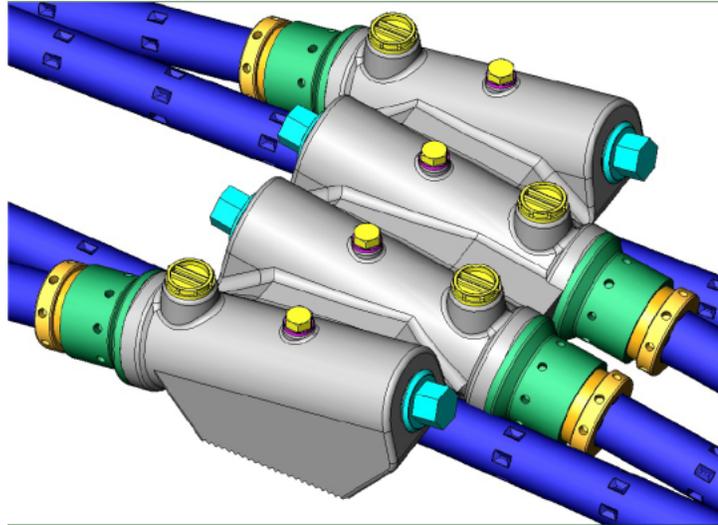


Figura 3.25: Anclaje 2MX15 [45]

El anclaje se adapta perfectamente a las estructuras que requieren una gran densidad de pretensado con cinturones muy próximos. Se beneficia de un innovador diseño patentado: los torones se introducen en los orificios cilíndrico-cónicos sin pasar por la cámara curva. Permite disponer de un pretensado de gran capacidad gracias a que las distancias entre los ejes de los orificios cilíndrico-cónicos son muy reducidas. El anclaje puede anclar, según las necesidades:

- Dos cinturones (una vuelta completa por cinturón alrededor del tubo).
- Dos cinturones dobles (dos vueltas completas por cinturón alrededor del tubo). Gracias a dos espacios vacíos dispuestos en la zona de apoyo, el anclaje permite que el torón anclado pueda efectuar un primer giro en torno al tubo, pasar bajo el anclaje y, a continuación, efectuar un segundo giro antes de anclarse.

Recompactación de arena Freyssinet.

Después de la excavación y tensado de los tendones, la parte inferior de la sección de tubo presforzada debe de rellenarse y re-compactarse para que vuelva a soportar al PCCP y no haya asentamientos. Freyssinet utiliza una técnica de recompactación de arena patentada, que comprime



Figura 3.26: PCCP con reforzamiento externo Freyssinet. Fuente: autoría propia.

a la arena debajo del tubo para tener una presión uniforme y soporte adecuado de éste. Esta técnica de reparación es la única que evita asentamientos del tubo y se puede utilizar tanto en tubos vacíos como en tubos en servicio (lleno de agua) (Freyssinet, 2014; Freyssinet de México, 2014c).

En el documento *Procedimiento Reforzamiento Tubería Cutzamala Freyssinet*, se describe el procedimiento seguido para este tipo de solución (Figura 3.26), que también requiere de los trabajos preliminares, excavaciones, suministro y colocación de material de banco, relleno, regularización del terreno y retiro de instalaciones, descritos en la sección anterior. Las actividades son las siguientes:

1. Excavación por debajo de tubería en franja central. Se excavan aprox. 2.5 m de longitud en una altura de 20 cm del material por debajo del tubo para el paso de los cinturones.



Figura 3.27: Armado de plataforma. Fuente: autoría propia.

2. Colocación de plataforma de trabajo a todo lo largo del tubo a reforzar (Figura 3.27).
3. Limpieza del tubo. Se realiza limpieza de material adherido al tubo producto del relleno (Figura 3.28).
4. Habilitado de torón y vainas de PEHD. Se procede al corte a la longitud requerida.
5. Preparación de anclajes. Se realiza el trazo y colocación de anclajes sobre el tubo (Figura 3.28).
6. Colocación de cinturones y anclajes en tubo franja central. Colocación de vueltas dobles por anclaje alrededor del tubo (Figura 3.29).
7. Aplicación de precarga a cinturones franja central para ajuste en tubo a reforzar (Figura 3.30). Se realiza el ajuste de los cinturones al cuerpo del tubo por medio de una presión aplicada con gatos hidráulicos.
8. Vibro compactación de relleno por debajo de tubo franja central (Figura 3.31). Antes de pensar en excavar en alguna franja central se realiza el relleno por debajo de la franja central del tubo.



Figura 3.28: Limpieza de tubo y preparación de anclajes. Fuente: autoría propia.



Figura 3.29: Colocación de cinturones. Fuente: autoría propia.



Figura 3.30: Aplicación de precarga (1 tonelada). Fuente: autoría propia.



Figura 3.31: Compactación de arena. Fuente: autoría propia.



Figura 3.32: Inyección de resina epóxica. Fuente: autoría propia.

9. Inyección de resina epóxica en cinturones franja central (Figura 3.32). Por medio de una bomba de inyección se rellena cada uno de los cinturones con resina epóxica.
10. Excavación por debajo de tubo en franja extrema izquierda.
11. Colocación de cinturones y anclajes en tubo franja extrema izquierda.
12. Aplicación de precarga a cinturones franja extrema izquierda para ajuste en tubo a reforzar.
13. Vibro compactación de relleno por debajo de tubo franja extrema izquierda.
14. Inyección de resina epóxica en cinturones franja extrema izquierda.
15. Tensado de torones franja central y extrema izquierda (Figura 3.33). Cuando la resina epóxica tiene la resistencia requerida, se procede al tensado de los torones por medio de gatos hidráulicos de manera simultánea en cada uno de los anclajes.



Figura 3.33: Tensado final de torones. Fuente: autoría propia.

16. Sello de anclajes e inyección de grasa. Después de realizado el tensado, se procede a realizar el corte de puntas del excedente de torones (Figura 3.34). Se colocan los tapones correspondientes en el anclaje (Figura 3.35), y se procede a la inyección de grasa en la recámara del anclaje.
17. Se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente para la franja extrema derecha. El material, así como el procedimiento constructivo del relleno sobre el tubo, se deberá seleccionar de manera que éste no dañe los anclajes ni las vainas de PEHD que forman los cinturones (Freyssinet de México, 2014b).

3.3. Comparativa

El método de sustitución de tubo tiene la ventaja de la experiencia, debido a que se viene realizando año con año; por lo mismo se cuenta, en todo momento, con los materiales y equipo necesarios para responder a las emergencias.

Sin embargo, este método forzosamente requiere de los cortes de agua a la

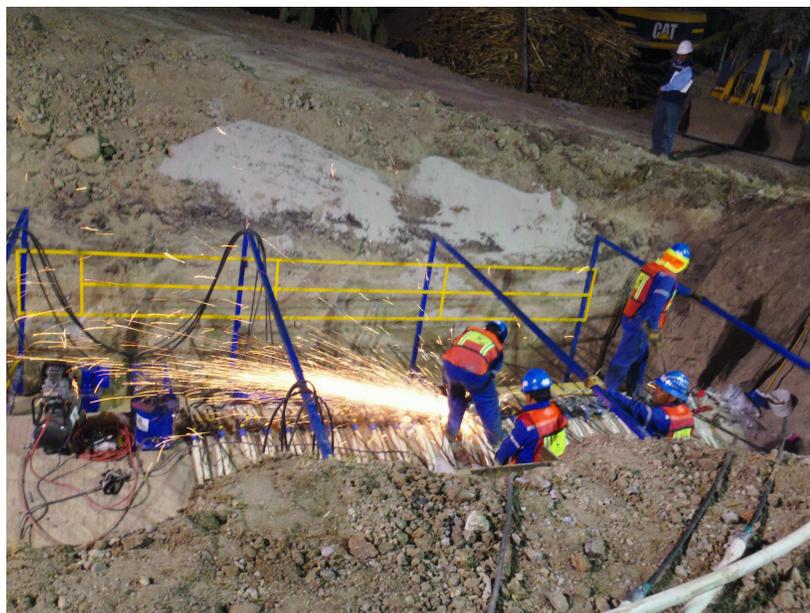


Figura 3.34: Corte de puntas excedentes. Fuente: autoría propia.



Figura 3.35: Colocación de tapones. Fuente: autoría propia.

Ciudad de México, y por tanto es limitado el tiempo en que se debe realizar, y en consecuencia el número de tubos que se pueden sustituir. Además tiene un costo mayor al del reforzamiento exterior mencionado en este trabajo.

En cuanto a tiempos de ejecución, tanto la sustitución de tubo como el reforzamiento exterior mediante presfuerzo tardan lo mismo, aunque el segundo, como ya se mencionó, puede trabajarse sin que se interrumpa el abasto de agua del Sistema Cutzamala (sólo se requiere una reducción en la presión). (Freyssinet de México, 2014c).

Sin embargo, dado que la tecnología utilizada por Freyssinet es europea, se necesita pedir los materiales (vainas y anclaje 2MX15) con tiempo, ya que no se fabrican en el país. Además esta tecnología es sólo para reforzar, es decir, para restituir o incrementar la capacidad estructural del PCCP, porque si la tubería tiene una fuga es necesario sustituir el tubo.

Capítulo 4

Conclusiones

- La demanda de agua potable de la Ciudad de México continúa creciendo, por lo que el abasto de ésta seguirá siendo un desafío para las autoridades e ingenieros mexicanos.
- El proyecto de la tercera línea del Sistema Cutzamala (que concluirá en el 2017), se espera permita realizar los mantenimientos a las líneas 1 y 2, sin que se tenga que interrumpir el suministro de agua.
- El presforzado ha hecho posible, tanto la aparición de nuevos métodos de construcción, como el que se diseñen enteramente nuevas estructuras, las que no hubiesen sido concebidas sin él. En México se ha hecho uso del concreto presforzado para construir todo tipo de estructuras, en este trabajo se expone como el presforzado está presente en el diseño y fabricación de los PCCP, en el monitoreo y análisis de su desempeño estructural, y en su reparación.
- Cabe señalar que no se analizaron todas las posibles formas de reparación de los PCCP, debido a la complejidad de la labor, a la falta de tiempo y de información. Sin embargo, se sugiere como trabajo a futuro, analizar otros sistemas de reparación, ya que algunos de ellos podrían ser mucho más económicos, y viables gracias a la construcción de la línea 3.
- En la comparativa entre los dos procedimientos de reparación de las líneas de tubería expuestos, se llegó a la conclusión de que el reforzamiento exterior mediante presfuerzo es una opción más económica que

la sustitución de tubo, que se podría utilizar para los casos donde haya menos de 39 espiras rotas, y cuya principal ventaja es la de no requerir de una interrupción en el suministro de agua para realizarse.

Apéndice A

Nomenclatura

C_f	Coficiente de deformación axial diferido o de flujo plástico
E_c	Módulo de elasticidad del concreto
f'_c	Resistencia del concreto a la compresión
f_y	Resistencia nominal del acero de refuerzo
$P_g w$	Presión de poro
P_t	Presión transitoria
P_v	Presión de vacío
P_W	Presión de trabajo
W_e	Peso del suelo
W_p	Peso del tubo
W_t	Carga viva de la superficie
W_W	Peso del fluido
δ_f	Deformación final
δ_i	Deformación inicial
ΔT	Cambios de temperatura
ϵ_c	Deformación unitaria longitudinal del concreto
β	Índice de confiabilidad

Apéndice B

Glosario

Acortamiento elástico. Es el cambio de volumen que se presenta en el concreto al aplicarle la precompresión durante el presforzado (Gerwick, 1978).

Alambres. Los alambres individuales se fabrican laminando en caliente lingotes de acero hasta obtener alambres redondos que, después del enfriamiento, pasan a través de troqueles para reducir su diámetro hasta su tamaño requerido. El proceso de estirado, se ejecuta en frío lo que modifica notablemente sus propiedades mecánicas e incrementa su resistencia. Posteriormente se les libera de esfuerzos residuales mediante un tratamiento continuo de calentamiento, hasta obtener las propiedades mecánicas prescritas. Los alambres se fabrican en diámetros de 3, 4, 5, 6, 7, 9.4 y 10 mm y las resistencias varían desde 16,000 hasta 19,000 kgf/cm². Los alambres de 5, 6 y 7 mm pueden tener acabado liso, dentado y tridentado (ANIPPAC, 2014).

Anclaje. Dispositivo para mantener los tendones bajo tensión, puede ser:

- Anclaje postensado (dispositivo permanente en los extremos del tendón).
- Anclaje pretensado (dispositivo temporal que mantiene la fuerza de tensión en el acero de presfuerzo) (IMCYC, 2013).

Anillo de hule. Es un elemento de hule natural y/o sintético que se usa como empaque hermético y flexible en las juntas o uniones de las tuberías para lograr su hermeticidad (IMCYC, 2012).

Barrilete. Componente del anclaje en cuyo interior se alojan las cuñas que sujetan el extremo del tendón de presfuerzo (IMCYC, 2013).

Cable. Puede referirse a un grupo de tendones (IMCYC, 1986), o a un tendón formado por varios alambres o torones que por lo general va al interior de un ducto (IMCYC, 2013).

Cama o banco. Conocido también como mesa, es el sitio que cuenta con las instalaciones adecuadas para fabricar los elementos pretensados, por medio del vaciado del concreto en los moldes o por el procedimiento de extrusión (IMCYC, 2013).

Comportamiento elástico. Convencionalmente y por razones prácticas, podemos considerar que la parte ascendente de la gráfica esfuerzo-deformación del concreto exhibe un comportamiento elástico, aunque se sabe que no siempre estas deformaciones son recuperables y la gráfica no es una línea recta perfecta. Esta consideración nos permite hacer diseños elásticos y fijar un módulo de elasticidad en función de la resistencia del concreto, f'_c (ANIP-PAC, 2014).

Concreto parcialmente presforzado. Concreto al que se le han introducido esfuerzos internos de magnitud y distribución tales, que los esfuerzos resultantes de las cargas (de servicio) se contrarrestan parcialmente hasta un nivel deseado, tomándose el remate de tales esfuerzos con acero de refuerzo (IMCYC, 2013).

Concreto presforzado. Concreto al que se le aplica una fuerza de compresión que produce esfuerzos internos de magnitud y distribución tales, que los esfuerzos resultantes de las cargas (de servicio) se contrarrestan hasta un nivel deseado (IMCYC, 2013).

Concreto reforzado. Para que el concreto resista tensiones se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio. El acero restringe el desarrollo de grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto. El uso del refuerzo no está limitado a la finalidad anterior. También se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir las deformaciones debidas a cargas de

larga duración y para proporcionar confinamiento lateral al concreto, lo que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión. La combinación de concreto simple con refuerzo constituye lo que se llama concreto reforzado. (González, 2005).

Concreto simple. Es un material pétreo, artificial, obtenido de la mezcla, en proporciones determinadas, de cemento, agregados y agua. El cemento y el agua forman una pasta que rodea a los agregados, constituyendo un material heterogéneo. Algunas veces se añaden ciertas sustancias, llamadas aditivos o adicionantes, que mejoran o modifican algunas propiedades del concreto. El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero es débil en tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural (González, 2005).

Contracción. Es el cambio sufrido en el volumen del concreto debido a la reacción química y al secado del agua contenida en la mezcla; parte de la contracción se presenta al fraguar el concreto, pero la mayor parte acontece durante el secado. (Gerwick, 1978).

Contracción por secado. Las mezclas de concreto contienen mayor cantidad de agua requerida para la hidratación del cemento. Esta agua libre se evapora con el tiempo. La velocidad y terminación del fraguado dependen de la humedad, la temperatura ambiente y del tamaño y forma del elemento. Uno de los efectos del fraguado del concreto es la disminución del volumen del mismo, lo que provoca pérdidas considerables de la fuerza de presfuerzo. Asimismo, la contracción provoca grietas que deben evitarse con acero de refuerzo y en algunos casos con fibras y aditivos (ANIPPAC, 2014).

Contra flecha. Es la deformación hacia arriba que sufre el miembro debida al presfuerzo. (Gerwick, 1978).

Deflector. Dispositivo empleado en la fabricación de elementos pretensados, el cual es colocado en el sitio donde se requiere cambiar la trayectoria de los tendones (IMCYC, 2013).

Deformaciones por flujo plástico. Debido a la presencia de esfuerzos permanentes, las partículas que forman el concreto experimentan un reacomodo que modifica las dimensiones de los elementos. Este fenómeno es co-

nocido como flujo plástico (ANIPPAC, 2014).

Ducto. Perfil tubular metálico, dentro del cual se alojan los tendones, empleado en elementos de concreto postensado (IMCYC, 2013).

Eliminador de adherencia. Material que recubre determinada longitud de un tendón para evitar que se adhiera el concreto (IMCYC, 2013).

Flujo plástico del concreto. Es la deformación inelástica que sufre el volumen de concreto bajo un esfuerzo sostenido, siendo más marcado durante la edad temprana de un miembro de concreto (Gerwick, 1978; IMCYC, 1986).

Inyección de lechada en los ductos. Operación de introducir la lechada requerida, mediante bombeo a presión, al interior de los ductos de los tendones (IMCYC, 2013).

Muerto de anclaje. Estructura pesada de concreto que sirve para equilibrar los esfuerzos temporales producidos por los dispositivos de anclaje de los tendones de presfuerzo (IMCYC, 2013).

Postensado. Es la imposición del presfuerzo, presforzando y anclando tendones al concreto ya fraguado. Comúnmente, los ductos se forman por medio de tubos dentro del cuerpo del concreto. Una vez que el concreto ha fraguado y alcanzado una resistencia suficiente, los tendones se insertan y se alargan por medio de gatos, después se les colocan anclas para transmitir a través de éstos la carga de los gatos a los extremos del miembro de concreto (Gerwick, 1978).

Presforzado externo. Es el que se aplica por medio de fuerzas como las suministradas por gatos apoyados sobre salientes localizados en los extremos del miembro de concreto o en puntos intermedios, cuando los extremos están restringidos por los apoyos (Gerwick, 1978).

Presforzado interno. Es aquel que se aplica a los tendones contenidos en el miembro de concreto o adyacentes a él (haciendo contacto), (Gerwick, 1978).

Presforzado por etapas. Es el método utilizado para aplicar la fuerza

de presfuerzo en dos o más pasos, lo cual se hace para evitar un sobreesfuerzo o agrietamiento del concreto durante la fase de construcción, antes de aplicar más carga muerta (Gerwick, 1978).

Presfuerzo. Es la imposición de un estado de esfuerzos en un miembro estructural -antes de ponerlo en servicio-, el cual le permitirá soportar mejor las cargas y fuerzas que se le apliquen durante el servicio, o cumplir mejor las funciones para las que fue diseñado (Gerwick, 1978).

Presfuerzo efectivo. Esfuerzo que persiste en los tendones después de que han ocurrido todas las pérdidas (IMCYC, 2013).

Presfuerzo parcial. Es una filosofía de diseño en la cual el grado de presfuerzo se mantiene intencionalmente bajo; por lo general, el propósito es suministrar una compresión residual (tensión nula) bajo cargas normales de servicio, pero permitiendo tensión y aún agrietamiento en menor grado bajo sobrecargas ocasionales (Gerwick, 1978).

Pretensado. Es la imposición de un presfuerzo por medio del esforzado de los tendones en contra de las reacciones exteriores, lo que se efectúa antes de que endurezca el concreto fresco; luego se deja que el concreto fragüe hasta un alto porcentaje de su resistencia última, entonces los tendones se sueltan para transmitir el esfuerzo al concreto (Gerwick, 1978).

Relajación del acero. Cuando al acero de presfuerzo se le mantiene en tensión experimenta un reajuste y rompimiento interno de partículas conocido como relajación. Esta relajación debe tomarse en cuenta en el diseño, ya que produce una pérdida significativa de la fuerza presforzante. Actualmente, la mayoría de los aceros son de baja relajación y son conocidos como Acero de Baja Relajación o LO-LAX, y deben de preferirse sobre los otros para evitar pérdidas excesivas (ANIPPAC, 2014).

Respiradero. Conductor tubular, por lo general de plástico, que se conecta herméticamente al ducto de postensado con salida al exterior para permitir la expulsión del aire o del agua. A la vez es un indicador de que la inyección de lechada ha sido completa (IMCYC, 2013).

Tendón. Son los elementos alargados o tensados que se utilizan para

dar la precompresión al concreto; pueden ser de alambre de acero de alta resistencia o de varillas de acero de aleación de alta resistencia (Gerwick, 1978).

Tendones con adherencia. Son los que están totalmente adheridos al concreto en toda su longitud; los tendones pretensados son casi siempre de este tipo. En esta clasificación se pueden considerar también los tendones postensados pequeños y de tamaño moderado que se colocan dentro de ductos con relleno. Los tendones exteriores pueden considerarse adheridos si se suministran estribos y relleno de lechada de cemento para transmitir totalmente el cortante en toda su longitud (Gerwick, 1978).

Tendones exteriores. Son los que permanecen fuera de la sección transversal del miembro de concreto al tiempo de colarlo; pueden ligarse después a dicho miembro por medio de concreto adicional o relleno de lechada de cemento. (Gerwick, 1978).

Tendones interiores. Son aquellos que se empotran dentro de la sección transversal del miembro de concreto y pueden ser pretensados o postensados. Por lo general se hará referencia a tendones postensados, localizados dentro de ductos ahogados en el concreto (Gerwick, 1978).

Tendones sin adherencia. Cuya fuerza se aplica al miembro de concreto sólo en los anclajes. Intencionalmente se evita la adherencia en toda su longitud; cuando un tendón postensado se introduce en un ducto, éste se puede rellenar con un compuesto bituminoso, envolverse con papel y después colocarse en las cimbras, colando y curando a continuación el concreto y estirando por último el tendón. En este caso puede existir hasta cierto grado una adherencia mecánica en los dobleces, pero el tendón se considera básicamente sin adherencia (Gerwick, 1978).

Transferencia. En concreto pretensado es la acción de transferir la fuerza del tendón al concreto del elemento estructural, al ser relevado el tendón de sus anclajes temporales extremos (IMCYC, 2013).

Torón. El torón se fabrica con siete alambres firmemente torcidos (Figura B.1) cuyas características se mencionaron en el párrafo anterior; sin embargo, las propiedades mecánicas comparadas con las de los alambres mejoran notablemente, sobre todo la adherencia. El paso de la espiral o hélice de torcido

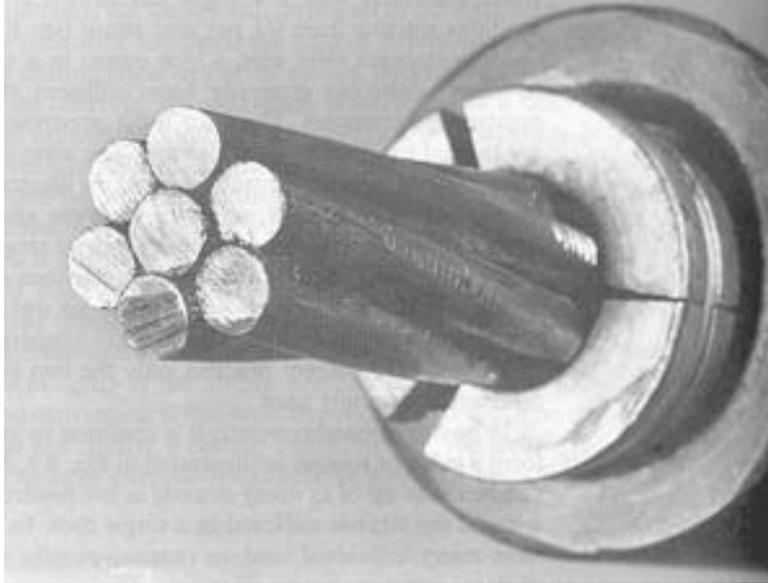


Figura B.1: Torón utilizado en concreto presforzado (ANIPPAC, 2014).

es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable. La resistencia a la ruptura, f_{sr} , es de 19,000 kgf/cm² para el grado 270K (270,000 lbf/pulg²), que es el más utilizado actualmente. los torones pueden obtenerse en un rango de tamaños que va desde 3/8" y de 1/2" con áreas nominales de 54.8 y 98.7 mm², respectivamente (ANIPPAC, 2014).

Tubo presforzado. Es aquel que se obtiene cuando el concreto del tubo primario, o núcleo, alcanza suficiente resistencia a la compresión, se le enrolla el acero de presfuerzo transversal que se reviste finalmente de concreto o mortero (IMCYC, 2012).

Tubo primario o núcleo. Es aquel constituido por un cilindro de concreto, el cual contiene el acero de presfuerzo longitudinal que se obtiene por centrifugación o colado vertical, al cual después se le coloca el acero de presfuerzo transversal y se reviste finalmente de concreto o mortero (IMCYC, 2012).

Tuberías de concreto presforzado sin cilindro de acero. Están formados por un tubo de acero primario o núcleo (que contiene el alambre de

pretensado longitudinal) el cual una vez que ha alcanzado suficiente resistencia a la compresión, se enrolla el alambre pretensado transversal y finalmente, se protege con un revestimiento de mortero, cemento o de concreto. La longitud de los tubos varía de 4 a 8 metros. El diámetro interno es de: 400, 500, 600, 750, 900, 1000, 1050, 1100, 1200, 1350, 1400, 1500, 1800, 2000, 2100, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 y 5000 mm. Los tubos tienen juntas del tipo de espiga y campana, hechas de concreto y con un sello de hule. Los tubos de concreto presforzado sin cilindro de acero no deberán presentar fugas ni filtraciones al someterse a una presión hidrostática en fábrica igual al 150 % de la presión de diseño. La presión de trabajo se estipula en los catálogos de los fabricantes (Esquivel, 2014).

Tuberías de concreto presforzado con cilindro de acero. Están constituidos de un cilindro de lámina de acero con anillos soldados a este en sus extremos, el cual previamente se somete a presión hidrostática y se ahoga en concreto, formándose así el tubo primario o núcleo. El tubo presforzado se obtiene cuando al tubo primario, una vez que ha alcanzado suficiente resistencia a la compresión, se le enrolla alambre pretensado transversal y se protege con un revestimiento de concreto, mortero o cemento. La longitud de los tubos varía de 4 a 8 metros. Los diámetros internos son los mismos indicados para los tubos sin cilindro de acero. Las juntas de los tubos deben ser de espiga y/o campana de anillos soldados al cilindro y con un sello de hule (Esquivel, 2014).

Varillas de acero de aleación. La alta resistencia en varillas de acero se obtiene mediante la introducción de algunos minerales de ligazón durante su fabricación. Adicionalmente se efectúa trabajo en frío en las varillas para incrementar aún más su resistencia. Después de estirarlas en frío se les libera de esfuerzos para obtener las propiedades requeridas. Las varillas de acero de aleación se producen en diámetros que varían de 1/2" hasta 13/8" (ANIP-PAC, 2014).

Bibliografía

ANIPPAC. Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas, 14 de agosto 2014. URL <http://www.anippac.org.mx/manual1.htm>.

Luis Martín Arenas. *Monitoreo con instrumentación a base de fibra óptica de la superestructura del puente Chiapas y validación de un modelo matemático*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2011.

American Water Works Association Research Foundation AwwaRF. *Rehabilitation of Water Mains*. American Water Works Association Research Foundation, 2001.

American Water Works Association Research Foundation AwwaRF. *Failure of Prestressed Concrete Cylinder Pipe*. United States Environmental Protection Agency, 2008.

American Water Works Association Research Foundation AwwaRF. *Best Practices Manual for Prestressed Concrete Pipe Condition Assessment: What Works? What Doesn't? Whats Next?* United States Environmental Protection Agency, 2012.

Water Research Foundation AwwaRF. *CFRP Renewal of Prestressed Concrete Cylinder Pipe*. United States Environmental Protection Agency, Water Environment Research Foundation, 2013.

Joan Ayats. Estado actual del pretensado y tendencias y retos del futuro, 14 de agosto 2014. URL <https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fpfc%2Fbitstream%2F2099.1%2F5547%2F3%2F02.pdf&ei=owPtU7rNCsiI8gHXt4CgDA&usg=AFQjCNEm8Ryp5PQwYUFxtFQZHnihQEca5w&sig2=NPj2Weyfi19AMeme1zr4HA>.

- Tom et al. Baas. Innovative joint proves successful in critical slipline project. *Pipelines 2011: A Sound Conduit for Sharing Solutions*, page 7, 2011.
- David Barocio. *Análisis de la problemática y propuestas de solución para lograr la sustentabilidad del recurso hídrico en la región administrativa aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de ingeniería, 2005.
- Edgar Martín Barrientos. *Diagnóstico de sistemas de abasto de agua potable ante desastres: El caso del Sistema Cutzamala*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1999.
- Eduardo Callejas. *Estudios de Gran Visión de sistemas de conducción de agua potable. Caso: Propuesta de construcción de la 3a línea del Sistema Cutzamala*. Tesis Profesional, Instituto Tecnológico de la Construcción, 2011.
- CCAZ. *Guide to Concrete Construction: Principles of Reinforced and Prestressed Concrete*. Cement and Concrete Association of New Zealand, 2010.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México*. Secretara de Medio Ambiente y Recursos Naturales, CONAGUA, 2013a.
- Comisión Nacional de Agua CONAGUA. Comunicado de prensa no. 521-13: Concluyen trabajos de reparación en el sistema cutzamala, agosto 26 2013b. URL <http://www.conagua.gob.mx/SalaPrensa.aspx?n1=3090&n2=Comunicados>.
- Comisión Nacional de Agua CONAGUA. Comunicado de prensa no. 510-13: Fuga en el sistema cutzamala, agosto 24 2013c. URL <http://www.conagua.gob.mx/SalaPrensa.aspx?n1=3067&n2=Comunicados>.
- Comisión Nacional de Agua CONAGUA. Comunicado de prensa no. 514-13: Aproximadamente 48 horas, duración de trabajos de reparación de la fuga en el sistema cutzamala, agosto 25 2013d. URL <http://www.conagua.gob.mx/SalaPrensa.aspx?n1=3076&n2=Comunicados>.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. Proyecto de convocatoria a licitación pública nacional no. po-016b00004-n16-2014 para la contratación de obra pública, cuyo objeto es: Sustitución y reforzamiento de tubos, así como supresión de fugas en las líneas 1 y 2 del acueducto del sistema

- cutzamala, de la to5 al túnel analco-san josé, estado de méxico, sobre la base de precios unitarios y tiempo determinado mediante el mecanismo de evauación de puntos y porcentajes, 9 de mayo 2014a.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. Convocatoria a lalicitación pública nacional no. po-016b00004-n16-2014 para la contratación de obra pública, cuyo objeto es: Estudio para el diseño e instalación de la protección catódica en 4.6 kilómetros de cada una de las líneas de conducción 1 y 2 del sistema cutzamala 2013, estado de méxico, sobre la base de precios unitarios y tiempo determinado mediante el mecanismo de evauación de puntos y porcentajes, 9 de mayo 2014b.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. Sistema cutzamala, 7 de agosto 2014c. URL http://coin.fao.org/coin-static/cms/media/6/12859473459080/17.cna-agua_potable_zona_metropolitana_25ago10.pdf.
- El Universal. Conagua estudia reducir afectaciones por trabajos en cutzamala, 23 de marzo 2014. URL <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2014/conagua-997521.html>.
- Ariadna Georgina Espinoza. *La gota que sí se agota: el sistema Lerma-Cutzamala en el Valle de México (Reportaje)*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, 2006.
- Nhilce Esquivel. Conducción, 25 agosto 2014. URL <http://www.scribd.com/doc/112045079/Conduccion>.
- Excelsior. En breve licitación de tercera línea de cutzamala: Conagua, 13 de noviembre 2013. URL <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2013/11/13/928537>.
- España Freyssinet S.A. El pretensado freyssinet, 14 de agosto 2014. URL <http://www.freyssinet.es/wp/wp/wp-content/uploads/2011/08/10-0900ca002-gamac.pdf>.
- S.A. de C.V. Freyssinet de México, 14 de agosto 2014a. URL www.freyssinet.com.mx.
- S.A. de C.V. Freyssinet de México. Procedimiento reforzamiento tubería cutzamala freyssinet, abril 2014b.

- USA Freyssinet. Durable pccp repair technologies, 14 de agosto 2014. URL <http://www.freyssinetusa.com/pdfs/brochures/Durable%20PCCP%20repair%20tech.pdf>.
- S.A. de C.V. Freyssinet de México. Sistema reforzamiento tubería cutzamala freyssinet, abril 2014c.
- Dario Gasparini. The prestressing of structures: a historical review, 14 de agosto 2014. URL <http://www.arct.cam.ac.uk/Downloads/ichs/vol-2-1221-1232-gasparini.pdf>.
- Ben C. Jr. Gerwick. *Construcción de estructuras de concreto presforzado*. Limusa, 1978.
- Grupo Inmobiliario Tlahtoani S.A. de C.V. GIT. *Metodología de Trabajo*. Licitación No. 16101036-001-13, 2013.
- Óscar y Francisco Robles González. *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. Limusa, 2005.
- José Luis Hernández. *Estudio de los sistemas de postensado utilizados en México*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1992.
- Nigel R. Hewson. *Prestressed concrete bridges: Design and Construction*. Tomas Telford Publishing, 2003.
- Claudia Hidalgo. Fue cancelada la cuarta etapa del cutzamala, 26 de abril 2000. URL <http://www.eluniversal.com.mx/estados/9932.html>.
- Michael y Peter Paulson Higgins. Fiber optic sensor for acoustic monitoring of pccp. *Pipelines 2006: Service to the Owner: Proceedings of the Pipeline Division: Specialty Conference*, page 8, 2006.
- Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa: La Ciencia para todos ILCE. Protección catódica por corriente impresa, agosto 7 2014. URL http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm.
- A. C. IMCYC, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. *Introducción al concreto presforzado*. Noriega Editores, 1986.

- A. C. IMCYC, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Tubos de concreto presforzado sin cilindro de acero para conducción y distribución de agua a presión, julio 2012. URL <http://www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2012/pdf/JULIO.pdf>.
- A. C. IMCYC, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Concreto hidráulico presforzado, terminología, marzo 2013. URL <http://www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2013/pdf/MARZO.pdf>.
- Roger y Albert Fuentes Lacroix. *Hormigón Pretensado: Concepción, Cálculo, Ejecución*. Editorial Técnicos Asociados, 1978.
- George Lafferty. Unequalled courage + genius, 6 de junio 2011. URL <http://florencedome.com/1/post/2011/06/the-genius-structural-system.html>.
- Tongjei y Eun-TAik Lee Lee. Retrofit of damaged prestressed concrete cylinder pipes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, page 8, 2013.
- Iván et al León. Modelación estructural pro esfuerzos de distensión de tubos de concreto presforzado para conducción de agua potable. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, page 17, 2004.
- Francisco Orts. *Aplicación del hormigón postensado en edificación*. Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- xxx Pure Technologies. Pure technologies, 14 agosto 2014. URL <http://www.puretechltd.com/>.
- Roger Raymond y Hassan Elnakhat. Repair of pccp by post tensioning. *Pipelines 2006: Service to the Owner: Proceedings of the Pipeline Division: Specialty Conference*, page 5, 2006.
- Alfonso Salazar y Tesillo. *El problema del agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y sus impactos sociopolíticos y ambientales en la Región del Río Cutzamala*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, 2004.
- Amlan y Devdas Menon Sengupta. Prestressed concrete structures: Pre-tensioning systems and devices, 14 de agosto 2014a. URL

http://nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/PreStressed_Concrete_Structures/pdf/1_Introduction/1.3_Pre-tensioning_Systems.pdf.

Amlan y Devdas Menon Sengupta. Prestressed concrete structures: Post-tensioning systems and devices, 14 de agosto 2014b. URL http://nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/PreStressed_Concrete_Structures/pdf/1_Introduction/1.4_Post-tensioning_Systems.pdf.

SEPSA, 14 de agosto 2014. URL <http://sepsacv.com/>.

Antonio Solís. *Sistemas de Postensado*. Tesis Profesional, UNAM, FES Acatlán, 1997.

Iván Sosa. Revisa robot el cutzamala, 21 de marzo 2008. URL http://economia.terra.com.mx/noticias/noticia.aspx?idNoticia=200803211837_INF_670712.

Miguel Ramón Sosa. *Efectos secundarios de la protección catódica por rociado térmico de zinc sobre estructuras de concreto armado*. Tesis profesional, UNAM, Facultad de Química, 2012.

Structural Technologies. Pipe rehabilitation - extending the life of critical pipelines, 2014. URL <http://www.structuraltechnologies.com/product/pipe-rehabilitation>.

TICONSA, 14 de agosto 2014. URL <http://www.grupoticonsa.com.mx/>.

S.A. de C.V. Urbacon. Sistema de monitoreo en tiempo real del avance de corrosión en los acueductos del sistema cutzamala, agosto 7 2014. URL <http://www.urbacon.com.mx/portfolio/sistema-de-monitorio-cutzamala/>.