

1

introducción

1. Introducción

1.1. Objetivo

Uno de los mayores avances en la construcción de puentes en los Estados Unidos en la segunda mitad del siglo veinte fue el desarrollo y uso del concreto pretensado. Los puentes de concreto pretensado, ofrecen un amplio rango de soluciones de ingeniería y una variedad de oportunidades estéticas. El objetivo de este Manual es proporcionar orientación a los individuos involucrados en la instalación o inspección de trabajos de post-tensionado para puentes de concreto post-tensionado incluyendo sistemas de post-tensionado, materiales, instalación y grouting de los tendones.

1.1.1. Beneficios del Post-Tensionado

La resistencia a tensión del concreto es sólo alrededor del 10% de su resistencia a compresión. Como resultado, los miembros planos de concreto son probablemente agrietados cuando se cargan. Con la finalidad de resistir los esfuerzos a tensión que el concreto plano no puede resistir, puede reforzarse con barras de refuerzo de acero. El refuerzo es seleccionado asumiendo que la zona en tensión del concreto no transporta ninguna carga y que los esfuerzos a tensión son resistidos solamente por las fuerzas a tensión en las barras de refuerzo. El miembro de concreto reforzado resultante puede agrietarse, pero puede transportar efectivamente las cargas de diseño (Figura 1-1).

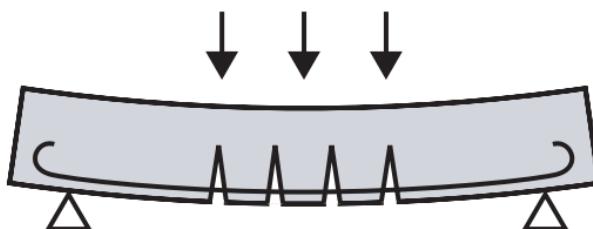


Figura 1-1: Viga de concreto reforzado bajo carga.

Aunque las grietas ocurren en el concreto reforzado, éstas son normalmente muy pequeñas y uniformemente distribuidas. Sin embargo, las grietas en el concreto reforzado pueden reducir la durabilidad a largo plazo. Introducir un medio de precompresión de las zonas de tensión de los miembros de concreto, para compensar los esfuerzos de tensión anticipados, reduce o elimina el agrietamiento produciendo puentes de concreto más durables.

1.1.2. Principio del Pretensado

La función del pretensado es colocar la estructura de concreto bajo compresión en aquellas regiones donde las cargas causan esfuerzo de tensión. La tensión causada por la carga primero tendrá que cancelar la compresión inducida por el pretensado antes que pueda agrietarse el concreto. La Figura 1-2(a) muestra claramente una viga de concreto reforzado de simple-tramo y una viga en voladizo agrietada bajo la carga aplicada. La Figura 1-2(b) muestra las mismas vigas descargadas con fuerzas pretensadas aplicadas esforzando los tendones de alta resistencia. Colocando el pretensado por debajo en la viga de simple-tramo y por encima en la viga en voladizo, la compresión es inducida en las zonas de tensión; creando un combado o contraflecha hacia arriba.

La Figura 1-2(c) muestra las dos vigas pretensadas luego que las cargas han sido aplicadas. Las cargas causan tanto en la viga de simple-tramo como en la viga en voladizo deflexión hacia abajo, creando esfuerzo de tensión en la parte inferior de la viga de simple-tramo y en la parte superior de la viga en voladizo. El Diseñador del puente balancea los efectos de la carga y el pretensado de tal manera que la tensión desde la carga es compensada por la compresión inducida por el pretensado. La tensión se elimina bajo la combinación de ambas y las grietas a tensión son prevenidas. También, los materiales de construcción (concreto y acero) son usados de forma más eficiente; optimizando materiales, esfuerzos y costos de construcción.

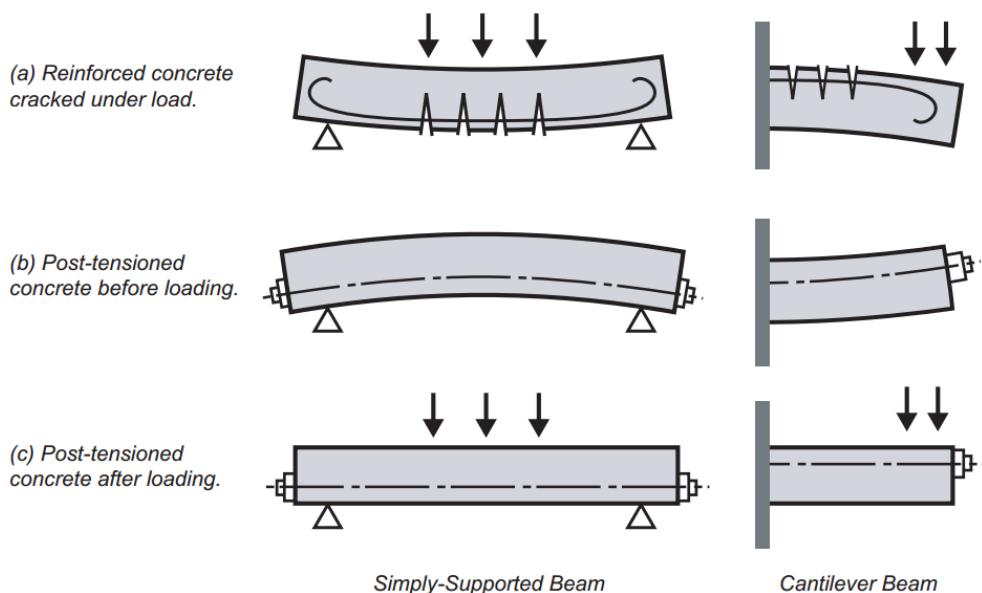


Figura 1-2: Comparación de vigas de concreto reforzado y pretensado.

El pretensado puede aplicarse a los miembros de concreto de dos maneras, pretensionándolos o post-tensionándolos. En los miembros pretensionados los torones pretensionados están tensionados en contra de los mamparos (bulkheads) restringidos antes que el concreto sea vaceado. Luego que el concreto haya sido colocado, permitiendo endurecer y alcanzar suficiente resistencia, los torones son liberados y sus fuerzas son transferidas al miembro de concreto. El pretensado mediante post-tensionado involucra la instalación y esforzado de los torones de pretensado o los tendones de barras sólo luego que el concreto haya sido colocado, endurecido y alcance una resistencia mínima a la compresión para aquella transferencia.

1.1.3. Operación del Post-Tensionado

Las fuerzas compresivas son introducidas en una estructura de concreto tensionando los tendones de acero de los torones (strands) o barras colocados en los ductos embebidos en el concreto. Los tendones son instalados luego que el concreto haya sido colocado y suficientemente curado a una resistencia a compresión inicial prescrita. Un jack (gato o gata) hidráulico es anexado a uno o a ambos extremos del tendón y es presurizado a un valor predeterminado mientras se apoya en contra del extremo de la viga de concreto. Esto induce una fuerza predeterminedada en el tendón y el tendón se alarga elásticamente bajo esta fuerza. Luego que el gateo esté completo, a la fuerza requerida, la fuerza en el tendón es transferida desde el jack al anclaje exterior.

Los tendones compuestos de torones son asegurados por cuñas (wedges) de acero que aprietan cada torón y se asientan firmemente sobre una placa de la cuña (wedge plate). La placa de la cuña lleva asimismo todos los torones y se apoya en un anclaje (anchorage) de acero. El anclaje puede ser una placa de apoyo simple de acero o puede ser una fabricación especial con dos o tres superficies de apoyo concéntricas que transfieren la fuerza del tendón al concreto. Los tendones de barras son generalmente enroscados y anclados por medio de tuercas esféricas que se apoyan contra una placa de apoyo cuadrada o rectangular vaceada en el concreto. Para una explicación de la terminología y acrónimos del post-tensionado, ver el Apéndice A.

Luego del esforzado, los torones o barras sobresalientes de los tendones permanentes son cortados usando una sierra de disco abrasiva. El oxicorte no deberá usarse ya que afecta negativamente las características del acero de pretensado. Aproximadamente 20 milímetros (3/4 de pulgada) se deja sobresalir desde las cuñas o una cierta longitud mínima de barra se deja más allá de la tuerca del anclaje de la barra. Los tendones son entonces "engROUTados" usando un grout basado en cemento. Este grout es bombeado a través de una entrada de grout en el ducto por medio de una bomba de grout. El grouting se realiza de forma cuidadosa bajo condiciones controladas usando salidas o sumideros de grout para asegurar que el anclaje del ducto y los cabezales del grout sean completamente llenados. Como protección final, luego del grouting, un anclaje puede ser recubierto por un cabezal de grout (grout cap) de calidad elevada contenido en un nuevo vertido permanente no metálico y/o concreto con una revestimiento sellado durable.

Las operaciones de post-tensionado y grouting requieren ciertos niveles de experiencia, como se resaltan en el Apéndice B.

1.1.4. Sistema de Post-Tensionado

Muchos sistemas propietarios de post-tensionado están disponibles. Muchos proveedores producen sistemas para tendones compuestos por cables (wires), torones o barras. Los sistemas más comunes que se encuentran en la construcción de puentes son los sistemas de múltiples torones para tendones de post-tensionado permanentes y sistemas de barras tanto para situaciones temporales como permanentes. Referirse a la literatura de los fabricantes o proveedores para los detalles de los sistemas disponibles. Las características claves de tres sistemas comunes (múltiples torones y tendones de barras) son ilustrados en las Figuras 1-3, 1-4 y 1-5.

1.2. Aplicaciones del Post-Tensionado Permanente

1.2.1. Puentes Vaceados-en-Sitio (CIP, Cast-in-Place) Sobre Falsos Puentes (Falsework)

Los puentes de este tipo tienen una sección transversal de la superestructura de construcción sólida o celular. Están construidos en el sitio encofrados que soportan un falso puente temporal (Figura 1-6). El falso puente crea la forma de la sección de concreto y cualquier abertura interna o diafragmas. El refuerzo y los ductos de post-tensionado son instalados en los encofrados y entonces el concreto es colocado, consolidado y curado. Cuando el concreto alcanza la resistencia suficiente, el post-tensionado es instalado y esforzado a fuerzas predeterminadas.

El post-tensionado longitudinal generalmente comprende tendones multi-torón suavemente drapeando un perfil diseñado. En tramos continuos, el perfil del tendón descansa en la parte inferior de la sección en la región a la mitad del tramo y se levanta hacia a la parte superior de la sección en los soportes interiores. En tramos simples y en los extremos de expansión de los tramos continuos, los anclajes de post-tensionado son ensamblados verticalmente de

modo que la resultante de la fuerza de anclaje del tendón pasa cerca del centroide de la sección. Un perfil drapeado de este tipo proporciona la distribución más efectiva de pretensado interno para este tipo de construcción.

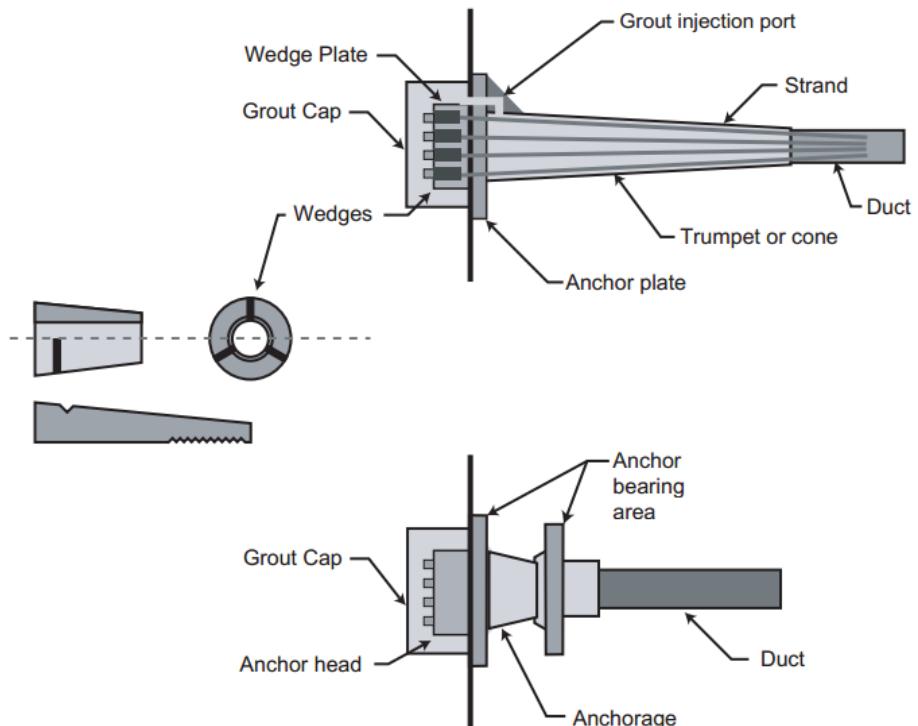


Figura 1-3: Hardware de anclaje de post-tensionado típico para tendones de torones.

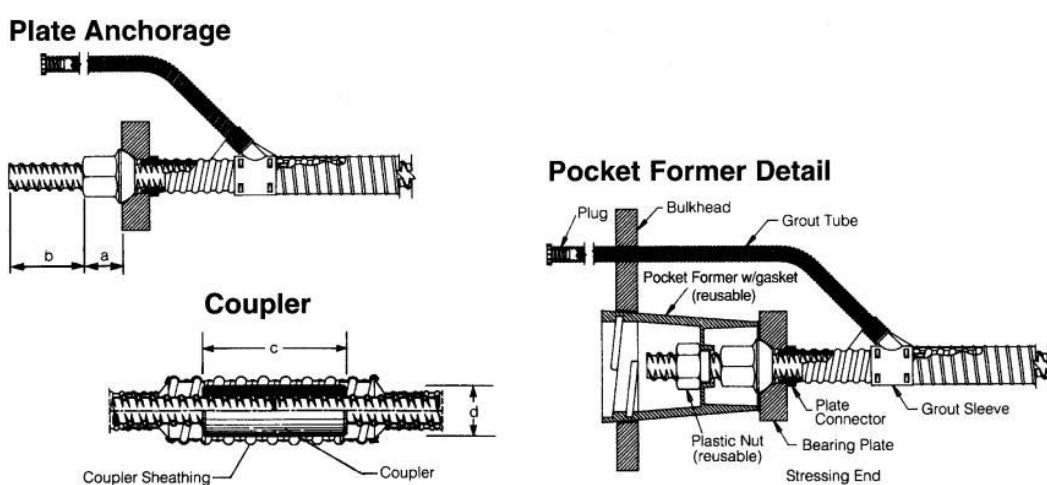


Figura 1-4: Hardware del sistema típico de barra post-tensionada (Courtesy of Dywidag Systems international).

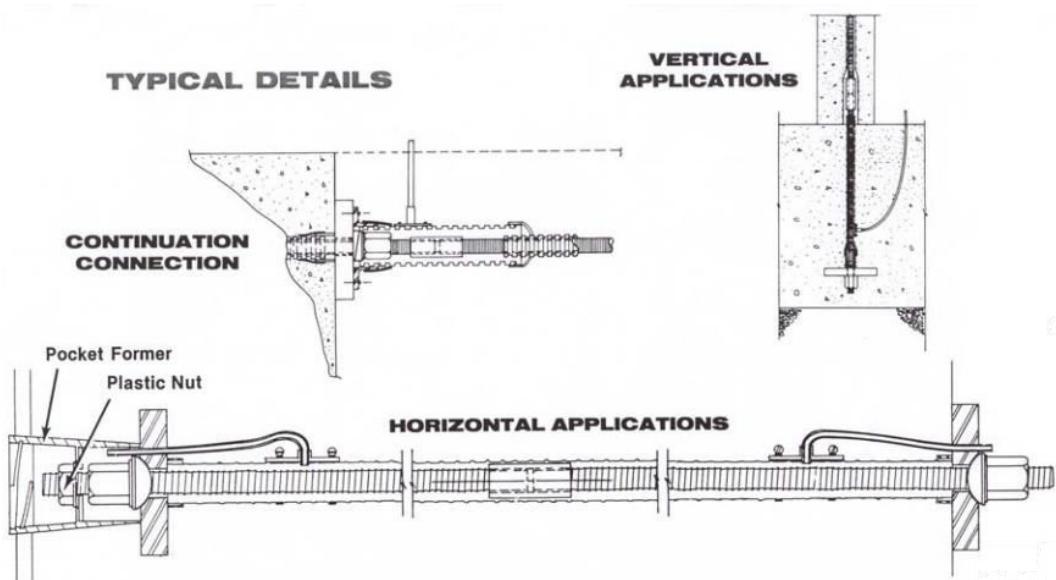


Figura 1-5: Hardware del sistema típico de barra post-tensionada (Courtesy of Williams Form Engineering Corporation).



Figura 1-6: Construcción post-tensionada vaceada-en-sitio en California.

1.2.2. Vigas Principales (Girders) Post-Tensionadas AASHTO, Bulb-T, y Empalmadas

Las vigas principales prefabricadas, post-tensionadas AASHTO y bulb-T son usualmente lo suficientemente pretensadas en la planta de prefabricación para transportar su propio peso al transportarlas al sitio de erección. En el sitio, las vigas principales son primero erigidas como tramos simples. Sin embargo, en los pilares interiores de una unidad de tres o cuatro tramos, se hacen continuos con juntas vaceadas-en-sitio que conectan los extremos de las vigas principales y forman diafragmas transversales reforzados.

Los ductos de post-tensionado vaceados en las almas son empalmados a través de las juntas vaceadas-en-sitio. Los ductos siguen una curva suavizada, drapeando el perfil a lo largo de cada línea de la viga principal, elevándose hacia la parte superior de las vigas principales en los pilares interiores y drapeando hacia el ala inferior en las regiones a

mitad del tramo. Antes que la losa del tablero se vacee, algunos o todos los torones que recorren la longitud total de la unidad multi-tramo son instalados y esforzados, haciendo cada viga principal-I de tramo simple en una serie de tramos continuos. Cuando la losa del tablero ha sido vaceada y curada, los tendones adicionales pueden ser instalados y esforzados en la sección total compuesta. Los tendones pueden estar anclados en una variedad de configuraciones en los extremos de cada unidad continua.

Los tramos grandes pueden construirse usando técnicas similares. Una sección en voladizo de viga principal de peralte variable sobre un pilar, puede empalmarse a una viga principal típica prefabricada en el tramo principal y en los vanos laterales. Un ejemplo es mostrado en la Figura 1-7.



Figura 1-7: Viga principal-I empalmada de sección variable de una unidad de tramo principal.

Los soportes temporales son necesarios en la ubicación del empalme en los tramos laterales. Los extremos de las vigas principales tienen refuerzo suave (mild) que sobresale para ayudar a asegurar la viga principal al concreto y ductos de cierre que empalan con aquellos componentes de la otra viga principal para acomodar los tendones sobre la longitud total de la unidad principal. Las secciones de la viga principal de peralte variable son colocadas sobre los pilares, alineadas con las vigas principales de los vanos o tramos laterales, y cierres vaceados. Generalmente, las vigas strong-back tipo (espalda fuerte) soportan la caída de las vigas principales del tramo principal mientras se vacea el cierre.

La secuencia para erigir y soportar temporalmente este tipo de construcción de viga principal-I se ilustra en la Figura 1-8. Luego que todos los cierres hayan sido vaceados y hayan ganada la resistencia suficiente, los tendones longitudinales de post-tensionado son instalados y esforzados. Para maximizar la eficiencia del post-tensionado, el esforzado por etapas o fases es necesario. Algunos de los tendones longitudinales son esforzados sobre la sección de la viga principal-I sola (esto es, mientras no sea compuesta). Los tendones restantes son esforzados luego que la losa del tablero haya sido vaceada y actúe sobre la sección total compuesta.

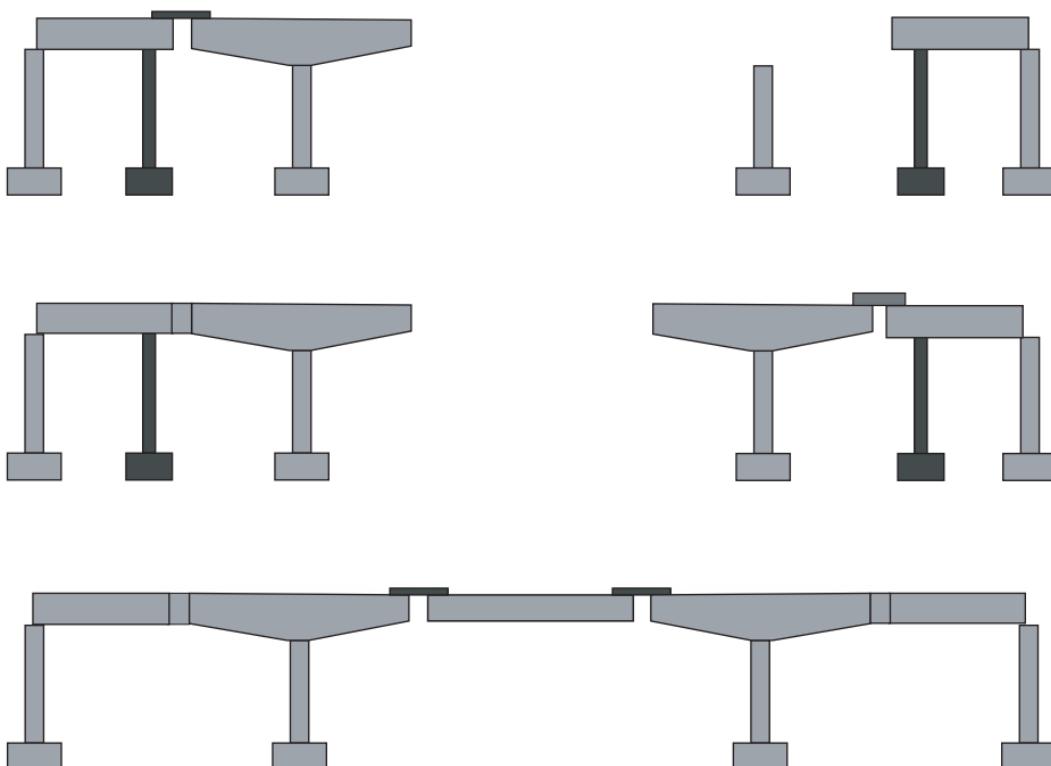


Figura 1-8: Secuencia de erección y soportes temporales para la viga principal-I empalmada.

1.2.3. Puentes Segmentales por Voladizos Balanceados Vaceados-en-Sitio

Un ejemplo de la construcción por voladizos balanceados vaceados-en-sitio (cast-in-place) usando encofrados móviles es mostrado en la Figura 1-9. Los encofrados móviles soportan el concreto hasta que han alcanzado una resistencia satisfactoria para el post-tensionado. El post-tensionado longitudinal comprende los tendones del voladizo en la losa superior en los soportes y los tendones de continuidad tanto en losa superior como en la losa inferior a través de las regiones a mitad del tramo.

La construcción por voladizos balanceados se adoptó para cuatro puentes sobre el Foothills Parkway en Tennessee por la Eastern Federal Lands Division de la Federal Highway Administration (Figura 1-10).

1.2.4. Puentes Segmentales por Voladizos Balanceados Prefabricados

La construcción segmental prefabricada por voladizos balanceados involucra la erección simétrica de los segmentos alrededor de un pilar de soporte. Cuando un segmento es elevado en posición, las caras contiguas emparejadas-vaceadas (match-cast) son revestidas con epóxico y las barras temporales de post-tensionado son instaladas y esforzadas para adjuntar el segmento al voladizo. Generalmente, después que un nuevo segmento

balanceado, es colocado sobre cada extremo del voladizo, los tendones de post-tensionado son instalados y esforzados desde un segmento sobre un extremo del voladizo hasta su contraparte en el otro extremo. En consecuencia, mientras los segmentos son agregados, más tendones en la parte superior del voladizo son agregados.



Figura 1-9: Construcción segmental vaceada-en-sitio usando encofrados móviles.



Figura 1-10: Foothills Parkway, Tennessee.

La Figura 1-11 muestra dos métodos típicos de colocación de los segmentos prefabricados en voladizos balanceados; usando grúas con torres de estabilidad en cada pilar y usando un gantry de lanzamiento por encima o superior. Cuando todos los segmentos han sido erigidos y los tendones esforzados, una junta de cierre se realiza a mitad del tramo. Los tendones de continuidad post-tensionados son instalados y esforzados a través del cierre para hacer los voladizos continuos.

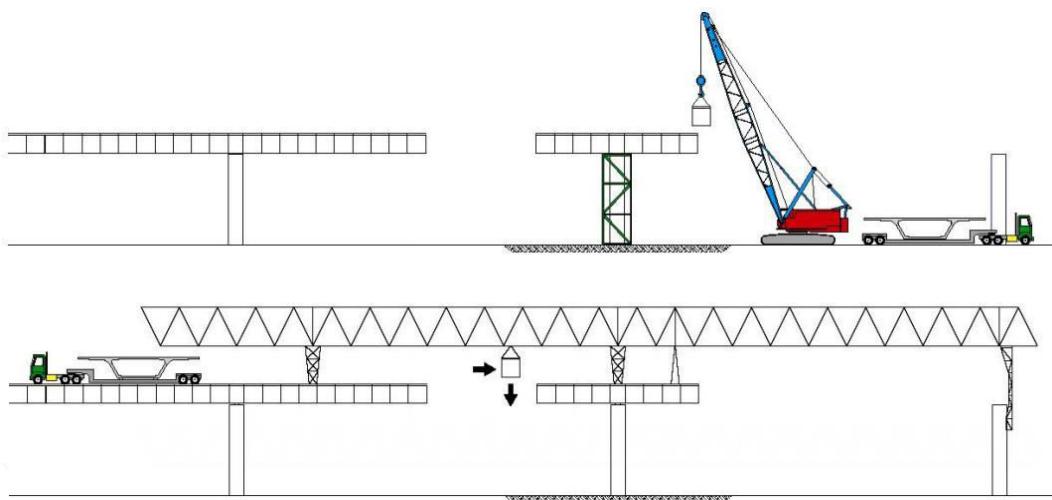


Figura 1-11: Construcción segmental prefabricada por voladizos balanceados.

1.2.4.1. Características Típicas de los Segmentos en Voladizo Prefabricados

La Figura 1-12 ofrece una perspectiva mostrando varias características de un segmento típico prefabricado en voladizo, la ubicación de los tendones y los anclajes. Estos se explicarán brevemente a continuación.

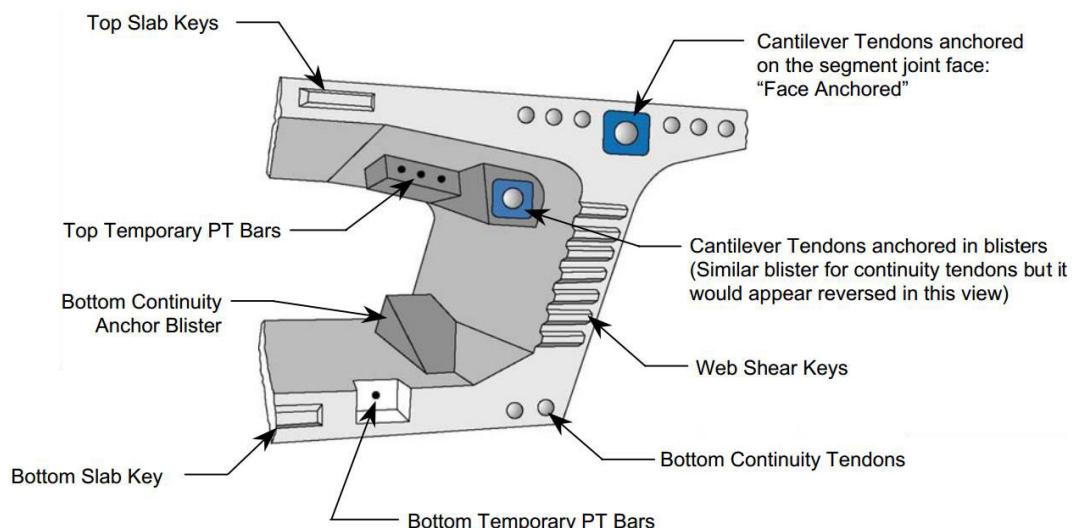


Figura 1-12: Segmento típico en voladizos balanceados.

1.2.4.2. Tendones del Voladizo (Cantilever Tendons)

Los tendones longitudinales de post-tensionado para la construcción en voladizos están contenidos dentro de la losa, generalmente espaciados en una simple capa sobre cada alma. Para tramos largos, una segunda capa de tendones en la sección variable engrosada de la losa superior puede requerirse. El patrón de disposición de los ductos es siempre el mismo en cada junta emparejada-vaceada y los ductos se desplazan lateralmente o hacia arriba o hacia abajo dentro de un segmento formando el perfil completo del tendón desde un anclaje (anchor) en un extremo del voladizo hasta aquel en el otro extremo. Los tendones terminan en anclajes por una elevación del ducto desde su fila en la losa hasta un anclaje (anchorage). Con respecto a cada segmento, los tendones del voladizo siempre anclan en la

misma ubicación. Esto puede ser en la cara extrema del segmento o dentro de un bloque de anclaje (o “blister”) en el interior del segmento.

1.2.4.3. Tendones de Continuidad (Continuity Tendons)

Para completar un tramo, los extremos de dos voladizos adyacentes son conectados por un cierre vaceado-en-sitio (cat-in-place) en o cerca de la mitad del tramo o de los tramos interiores. En los tramos extremos o exteriores, la junta de cierre está generalmente más cerca de la junta de expansión del extremo. Cuando el cierre de concreto alcanza la suficiente resistencia, los tendones longitudinales de post-tensionado (de continuidad) son instalados, tensionados y “enrutados”. La Figura 1-13 representa las ubicaciones y disposiciones típicas para los tendones de continuidad en la parte inferior a mitad del tramo.

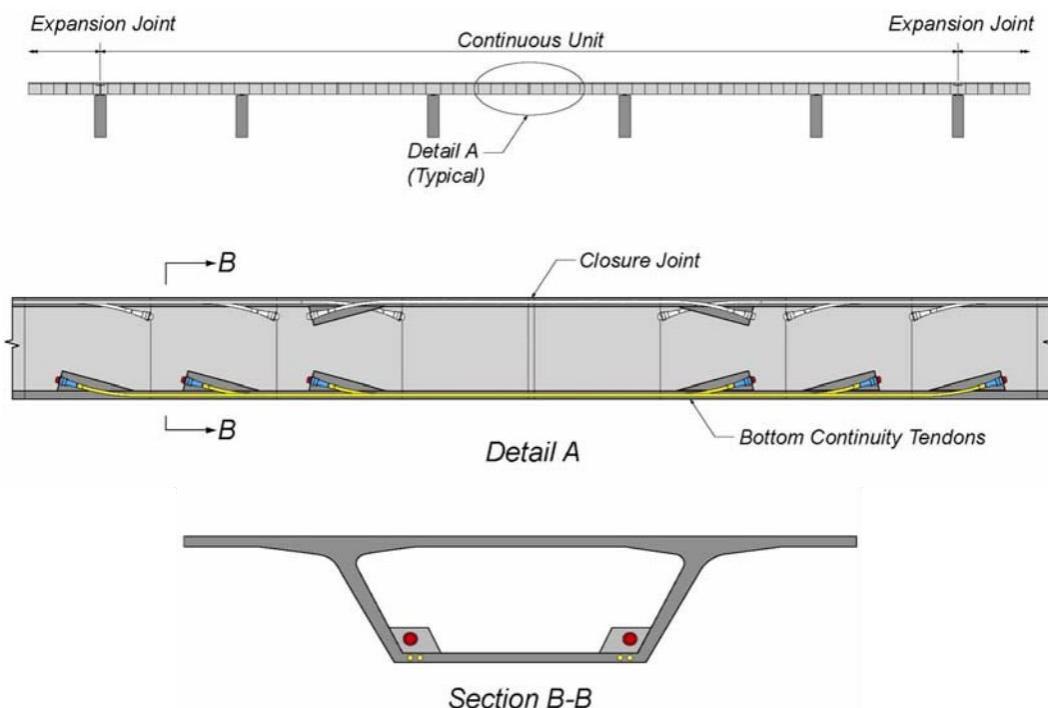


Figura 1-13: Tendones de continuidad en la parte inferior para la construcción por voladizos balanceados.

1.2.5. Puentes Segmentales Prefabricados Tramo-por-Tramo (Span-by-Span)

La construcción tramo-por-tramo involucra la erección de todos los segmentos de un tramo sobre un sistema de soporte temporal con juntas de cierre pequeñas vaceadas en uno o ambos extremos al lado de los segmentos sobre el pilar. La Figura 1-14 muestra fases típicas para la construcción tramo-por-tramo.

Los tendones, generalmente externos, son instalados y esforzados desde el pilar del segmento en un extremo del tramo hasta aquel en el otro extremo (Figura 1-15). Los tendones drapean entre los pilares, siendo anclados cerca a la parte superior de la sección sobre los pilares pero desviados hacia la parte inferior de la sección dentro de la región a mitad del tramo.

Con la finalidad de alcanzar continuidad con el siguiente tramo, los tendones desde un tramo se solapan con los tendones del siguiente en la parte superior del segmento pilar. En los extremos de cada unidad continua, los

extremos de los tendones se anclan en el diafragma del segmento junta de expansión con anclajes dispersos verticalmente y aproximadamente paralelos al alma del cajón.

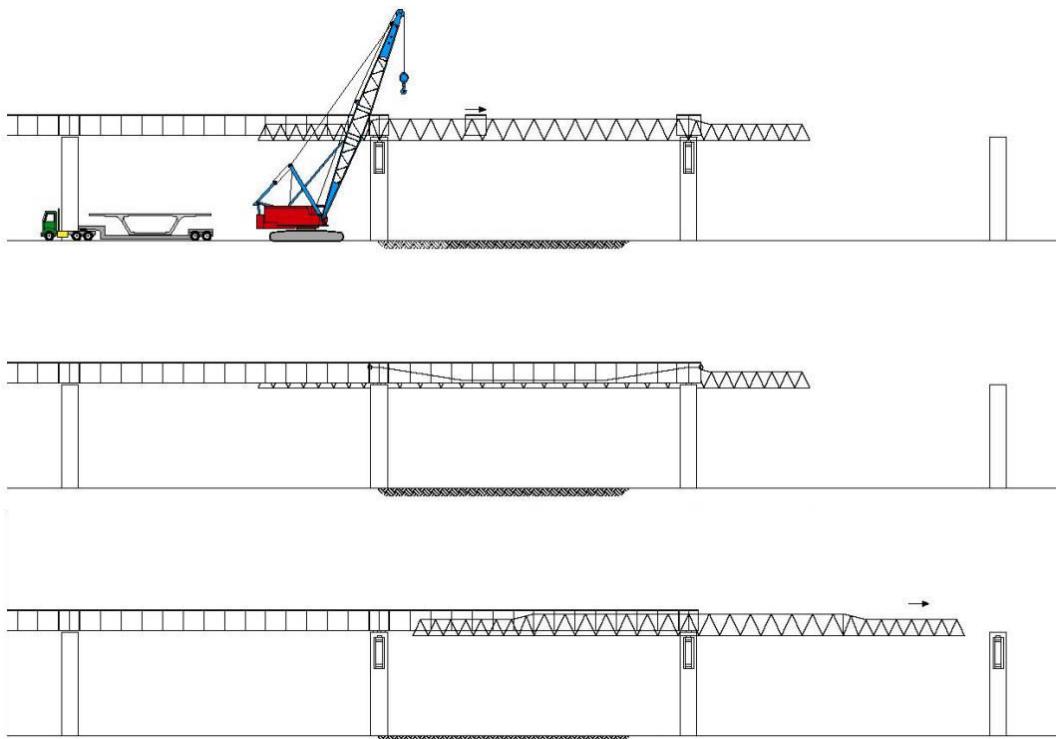


Figura 1-14: Construcción tramo-por-tramo.

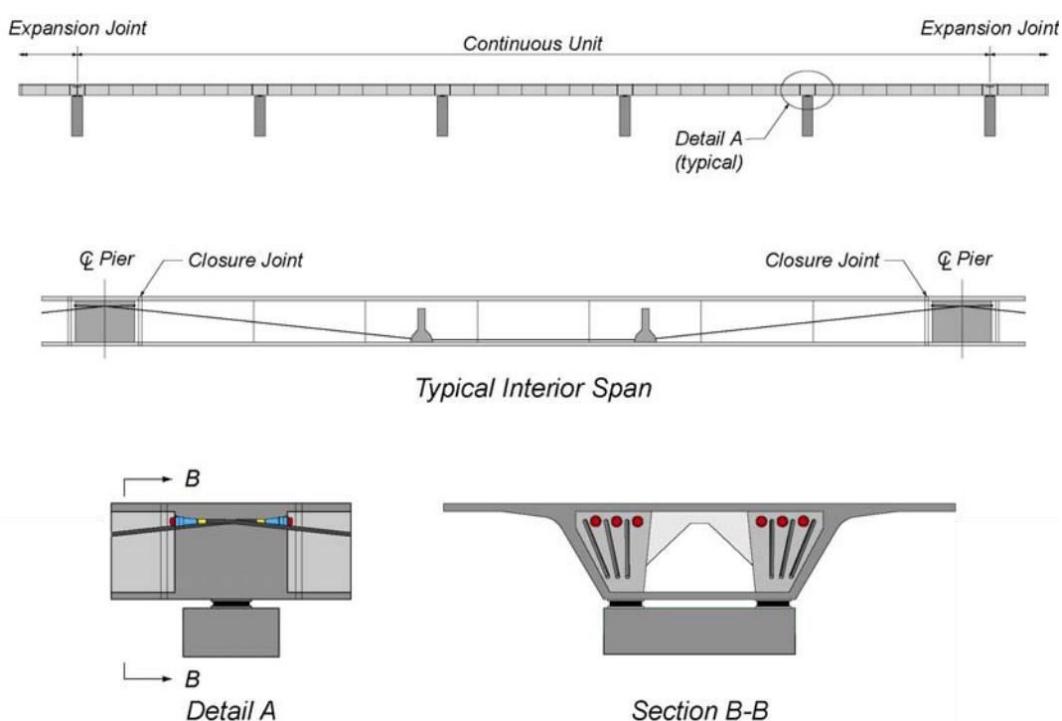


Figura 1-15: Post-tensionado del tramo interior para la construcción tramo-por-tramo.

1.2.6. Post-Tensionado Transversal de las Superestructuras

Para los tableros de los puentes, el post-tensionado transversal es usado en las losas sólidas vaceadas-en-sitio y para conectar transversalmente tramos hechos de losas prefabricadas-pretensadas colocadas lado-a-lado por medio de juntas longitudinales estrechas vaceadas-en-sitio. El post-tensionado transversal es frecuentemente usado en losas de tableros de cajones vaceados-en-sitio o prefabricados, diafragmas, viguetas transversales y aplicaciones similares. Para mayor información y ejemplos, ver el Apéndice C.

1.2.7. Post-Tensionado de las Superestructuras

Las subestructuras para las vigas principales-l AASHTO estándar, Bulb-Ts, vigas principales empalmadas, post-tensionadas vaceadas-en-sitio y muchas estructuras segmentales son típicamente construidas usando la construcción de concreto reforzado o armado. Sin embargo, para puentes grandes o para acomodar otras necesidades de construcción especial, las subestructuras post-tensionadas pueden ser apropiadas. Las subestructuras post-tensionadas pueden usarse para puentes de todo tipo de superestructura. Algunas de las más típicas aplicaciones son mostradas en las siguientes secciones.

1.2.7.1. Pilares Cabeza de Martillo (Hammerhead Piers)

Los tendones transversales post-tensionado usando torones y elementos de barras de tensión proporcionan un esquema efectivo de refuerzo para los Pilares Hammerhead (Figura 1-16). Esto es especialmente cierto para hammerheads grandes con voladizos significativos o donde el claro vertical restringe la profundidad disponible. Los tendones son internos al concreto y son esforzados y “engrutados” luego que el pilar de concreto ha alcanzado la resistencia suficiente.

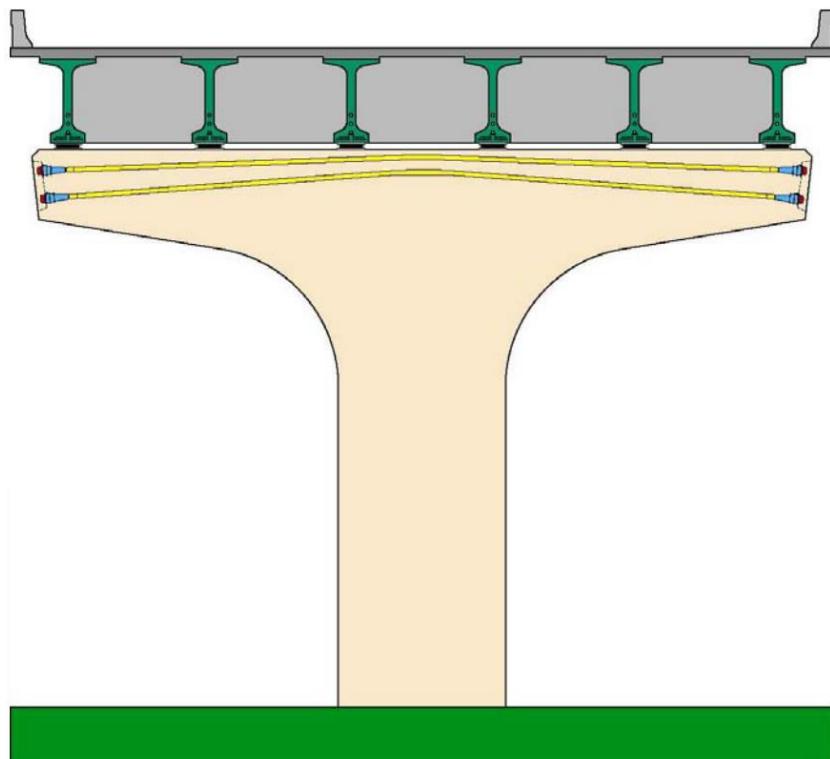


Figura 1-16: Post-tensionado en pilares hammerhead.

1.2.7.2. Pilares Tipo Silla de Montar (Straddle Bents)

Los straddle bents se requieren a menudo para soportar calzadas de niveles superiores en complejos intercambios multi-nivel (Figura 1-17). El claro vertical limitado a menudo restringe los peraltes o profundidades de los cabezales de los straddle caps, resultando en un post-tensionado más que miembros de concreto armado convencionales.

En un straddle bent típico, los tendones drapean a un perfil descrito que puede ser similar al drapeo en una viga simplemente apoyada, o puede elevarse sobre las columnas cuando una conexión monolítica se hace para transferir momentos en las columnas y proporciona acción tipo pórtico. Las columnas pueden ser armadas o post-tensionadas, dependiendo de la magnitud de las fuerzas y momentos inducidos en el pórtico.

Los tendones en los straddle bents son internos y “engrutados” durante la construcción. Sin embargo, es posible aplicar tendones externos de una forma similar para reparar, o rehabilitar una estructura dañada.

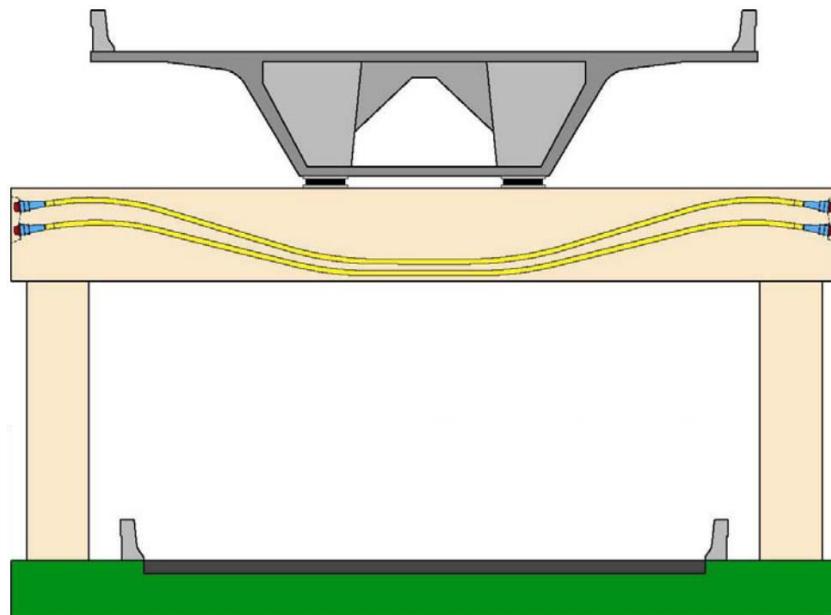


Figura 1-17: Post-tensionado en straddle bents.

1.2.7.3. Pilares en Voladizo (Cantilever Piers, C-Piers)

Los pilares en voladizo a menudo son usados en intercambios multi-nivel o en puentes de pasos elevados donde una columna concéntrica encajaría en un claro horizontal asociado con una calzada subyacente. Por eficiencia estructural y economía, un pilar típico en voladizo generalmente contiene post-tensionado transversal y vertical (Figura 1-18) más que solamente estar reforzado.

El detallado de los pilares en voladizo deberá proporcionarse para el desarrollo adecuado de las fuerzas del pretensado en el voladizo, columna y zapata. Los anclajes en las esquinas deben cruzar de manera efectiva oponiéndose a la tensión y desarrollar toda la pre-compresión alrededor del exterior del pilar. Una alternativa sería usar un tendón continuo más que dos tendones separados.

Los tendones son internos, esforzados y “engrutados” durante la construcción. Tendones externos similares pueden usarse para reparación o rehabilitación. La atención especial sería necesaria, sin embargo, para anclarlos y desarrollar fuerzas alrededor de la esquina superior y dentro de la zapata.

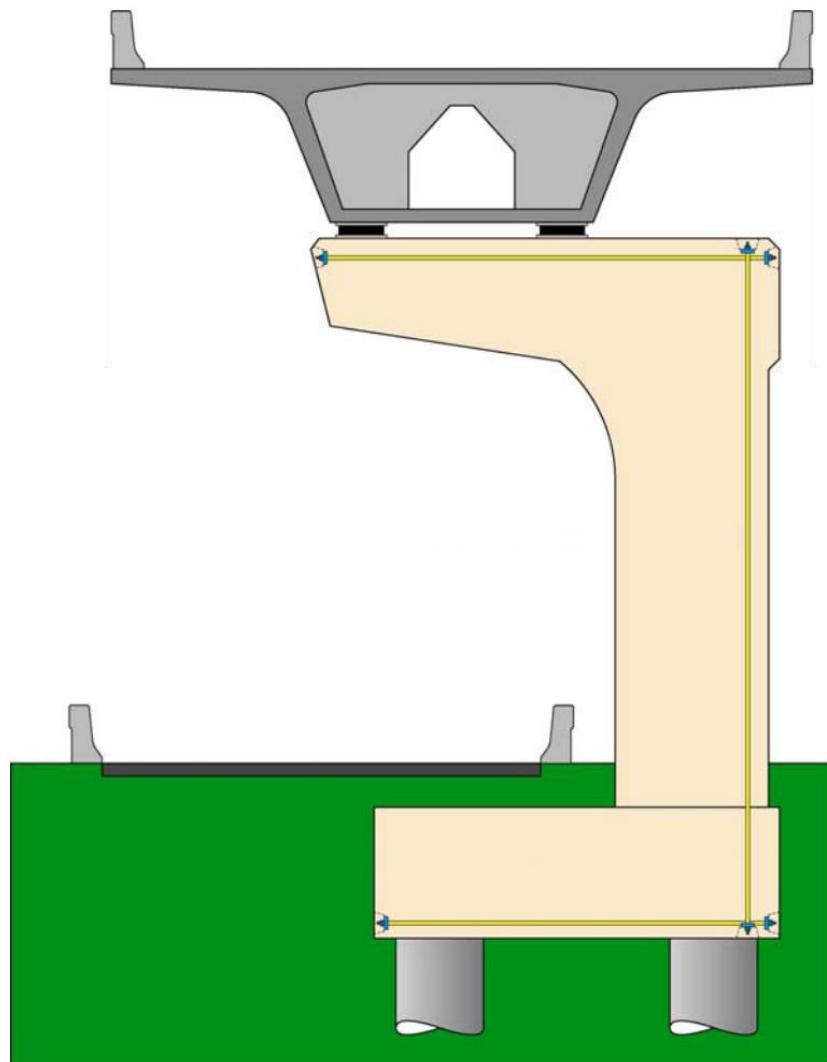


Figura 1-18: Post-tensionado en pilares en voladizo.

1.2.7.4. Pilares Prefabricados

Pilares segmentales de concreto de sección hueca, prefabricados han sido usados en varios proyectos. El post-tensionado vertical generalmente consiste de barras PT para alturas cortas y moderadas, hasta alrededor de 12 metros (40 pies). Los tendones los torones generalmente son necesarios para los pilares más altos. Las barras son típicamente ancladas en zapatas y se extienden a los cabezales de los pilares. Los tendones los torones son generalmente continuos y se extienden desde un anclaje en el cabezal sobre un lado del pilar, por debajo del pilar, enlaza a través de la zapata y sube al lado opuesto hasta otro anclaje en el cabezal. Las barras post-tensionadas son también usadas para asegurar temporalmente los segmentos prefabricados y comprimen el epóxico en las juntas, así como son erigidas antes de instalar los tendones de torones permanentes. Los segmentos prefabricados huecos, de

sección oval con una forma estética octogonal exterior con caras cóncavas, fueron usados para el Linn Cove Viaduct sobre el Blue Ridge Parkway en North Carolina (Figura 1-19).

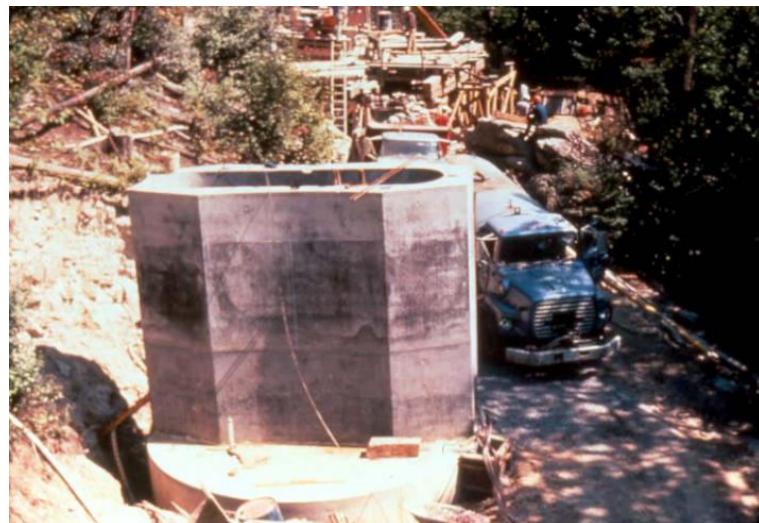


Figura 1-19: Pilares segmentales prefabricados huecos, Linn Cove Viaduct, North Carolina.

Los pilares segmentales prefabricados con una sección-I fueron usados para el Mid-Bay Bridge en Florida. Los pilares más altos fueron post-tensionado con tendones de torones, enlazando en forma de bucle a través de la cimentación (Figura 1-20).

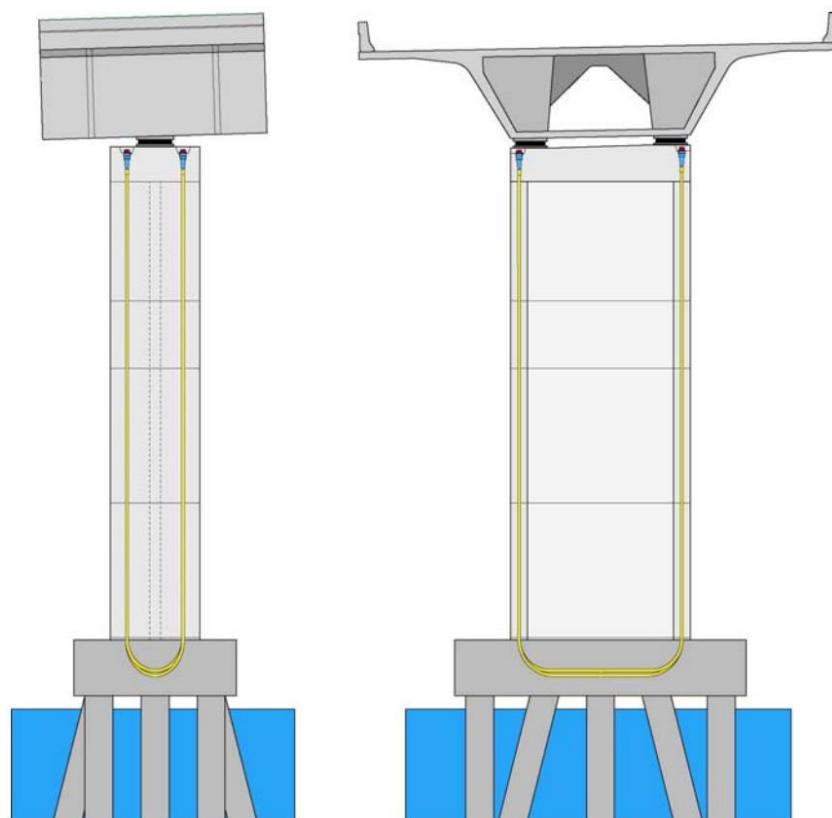


Figura 1-20: Pilares-I prefabricados.

1.2.7.5. Arcos Segmentales Prefabricados de Sección Tipo Cajón

Los segmentos prefabricados de concreto de sección tipo cajón hueco fueron usados para los nervios de los arcos principales del Natchez Trace Parkway Bridge en Tennessee (Figura 1-21). Estos fueron erigidos usando cables temporales atirantados a la columna central del pilar, que a su vez fueron balanceados anclando tie-backs (amarre posterior) en las laderas adyacentes. Las barras de post-tensionado temporal fueron usadas para asegurar cada nuevo segmento a aquel erigido previamente para comprimir la junta epóxica.



Figura 1-21: Arcos del Natchez Trace Parkwa, Tennessee.

1.2.7.6. Tendones Tranversales, Confinados en la Parte Superior de los Pilares

Las grandes cargas de apoyo concentradas en la parte superior de los pilares inducen esfuerzos locales de tensión transversal. Estos esfuerzos pueden ser resistidos por el refuerzo de acero suave (mild steel) o por post-tensionado transversal. Ya que las longitudes de los tendones son típicamente cortas, los tendones de barras son típicamente usados en esta aplicación. Condiciones especiales pueden exigir el uso de tendones de torones. Un ejemplo de esto son los tendones de post-tensionado transversal en la parte superior de los pilares elípticos grandes de la unidad del tramo principal del Sunshine Skyway Bridge en Florida. Tendones transversales internos multi-torón fueron usados en una disposición tipo gancho para proporcionar el pretensado transversal requerido.

1.3. Post-Tensionado Longitudinal Temporal (Barras) – Aplicaciones Típicas

1.3.1. Erección de los Segmentos Prefabricados en Voladizo

Las barras de post-tensionado temporal son una característica clave de la erección de voladizos prefabricados. En la erección de voladizos, cada nuevo segmento prefabricado agregado al voladizo es primeramente asegurado al segmento previo usando barras de post-tensionado temporal para exprimir la junta de epóxico y mantener el segmento hasta que los tendones principales del voladizo sean instalados. Las operaciones de construcción

son dispuestas para que sea posible levantar un segmento, aplicar el epóxico, instalar las barras temporales y exprimir la junta antes que el epóxico empiece a fijarse.

Dependiendo del tamaño del segmento, puede haber de cuatro a ocho barras temporales distribuidas alrededor de la sección transversal. En la mayoría de los puentes prefabricados en voladizo, hay al menos una barra PT temporal en un ducto en el ala de concreto del segmento. En algunos puentes, las barras PT temporales se anclan en bloques en la parte inferior de la losa superior y sobre la parte superior de la losa inferior. Alternativamente, las barras pueden instalarse en ductos dentro de las losas superior e inferior, y ancladas en bloqueadores (blockouts) en las juntas de los segmentos (Figura 1-22).

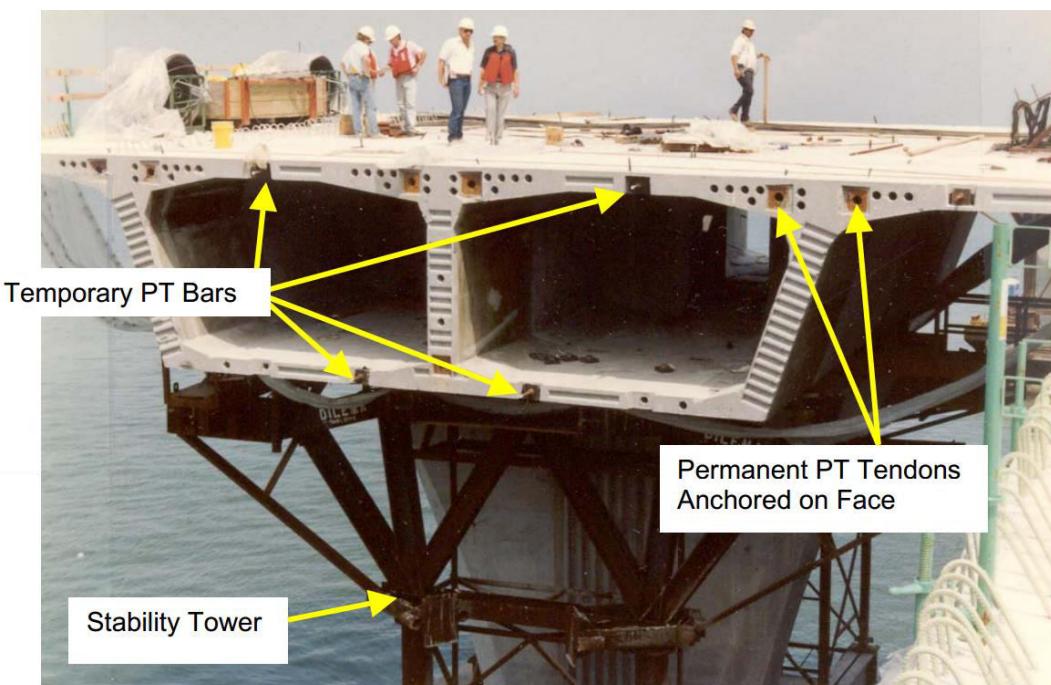


Figura 1-22: Barras PT temporales para la erección de los segmentos.

1.3.2. Cierre de las Juntas Epóxicas en la Erección Tramo-por-Tramo

Las barras PT Temporales se necesitan generalmente para la erección tramo-por-tramo con la finalidad de exprimir el epóxico. En tales casos, las barras pueden ser ancladas en bloques temporales (blisters) en el interior de la sección o en los diafragmas y desviadores, pasando a través de ellos en ductos. Usando un epóxico de fijación lenta, es posible erigir y pegar con epóxico varios segmentos de un tramo al mismo tiempo.

2

*Materiales y
componentes contenidos
del sistema de post-
tensionado*

2. Materiales y Componentes Contenidos del Sistema de Post-Tensionado

El desempeño satisfactorio de los puentes post-tensionados depende de la selección apropiada, diseño, especificación y fabricación de varios materiales y componentes que conforman el sistema post-tensionado. Este capítulo ofrece una guía general e información de los materiales y componentes. Alguna de la información en este capítulo es tomada de varias especificaciones de la industria e información de los fabricantes y proveedores. Las versiones más actuales de esta información deberán consultarse cuando se desarrolle los datos específicos del proyecto.

2.1. Acero de Pretensado

2.1.1. Torones y Barras (Strands and Bars)

2.1.1.1. Torones

Los torones para post-tensionado se hacen de cables de acero de resistencia a la tensión elevada. Un torón está compuesto de 7 cables individuales, con seis cables helicoidales enrollándose a una pendiente pronunciada alrededor de un cable central. Todos los torones deben ser de Grado 1860 MPa (270 psi) de baja relajación, torones de siete cables conforman los requerimientos del ASTM A 416 "Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven Wire Strand for Prestressed Concrete". El ASTM A 416 proporciona los requerimientos mínimos para las propiedades mecánicas (fluencia, resistencia a la rotura, elongación) y las tolerancias dimensionales máximas permisibles. Los torones de diferentes orígenes pueden reunir el ASTM A 416 pero no son necesariamente idénticos en todos los aspectos.

El torón está principalmente disponible en dos tamaños nominales, 13 mm (0.5 plg) y 15 mm (0.6 plg) de diámetro, con áreas nominales de sección transversal de 99 mm^2 y 140 mm^2 (0.153 y 0.217 pulgadas cuadradas), respectivamente. La mayoría del hardware (accesorios) del post-tensionado y equipo de esforzado está basado en estos tamaños. Las tolerancias de tamaño de los torones pueden resultar en torones siendo fabricados consistentemente más pequeños o más grandes que los valores nominales. Reconociendo esto, la industria ("Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", Post-Tensioning Institute, 1988) se refiere a la "Resistencia Última Mínima a Tensión" (Minimum Ultimate Tensile Strength, MUTS) que es la mínima fuerza especificada de rotura para un torón. La tolerancia de tamaño del torón puede también afectar la acción torón-cuña (strand-wedge) conduciendo a posiblemente deslizar la cuña si las cuñas y los torones están en extremos opuestos del rango de tolerancia del tamaño.

El torón conforme al ASTM A 416 es relativamente resistente a la corrosión por corrosión y fragilización por hidrógeno, debido al proceso de trefilado en frío. Sin embargo, debido a que la susceptibilidad a la corrosión aumenta con el aumento de la resistencia a tensión, es necesario tomar precauciones si el torón está expuesto a condiciones corrosivas tal como entornos marinos y soluciones que contienen cloruros o sulfatos, fosfatos, iones de nitrato o similares. En consecuencia, el ASTM A 416 requiere protección apropiada del torón a lo largo de la fabricación, envío y manipulación. La protección durante el proyecto, antes y después de la instalación, deberá especificarse en las especificaciones del proyecto, detalles, dibujos y documentos.

En los años recientes, varias innovaciones han sido desarrolladas con la finalidad de proporcionar protección adicional a la corrosión. Algunas de estas medidas incluyen:

- El torón con revestimiento plástico para los tendones no adheridos ha sido ampliamente usado en edificios, pero no generalmente en puentes en los Estados Unidos. Sin embargo, mono-torón engrasados y envainados están ahora disponibles para aplicaciones atirantadas o tendones externos para nuevas estructuras y la reparación de las antiguas.
- El torón con revestimiento epóxico, que reúne los mismos requerimientos que el ASTM A 416, está disponible y debe también ajustarse al ASTM A 882 "Standard Specification for Epoxy-Coated Seven Wire Strand". El torón con revestimiento epóxico está disponible sólo con un revestimiento externo, o como un revestimiento que también rellena completamente los intersticios entre los cables. El último es preferido para aplicaciones post-tensionadas o atirantadas. Cuñas especiales son requeridas que enganche el espesor del revestimiento y enganchen el torón; el acuñado de las cuñas se requiere generalmente.
- Los torones hechos de material de fibra (tales como fibras de carbono o de aramida) tienen aplicación limitada al post-tensionado hasta la fecha. Estos materiales compuestos ofrecen ventajas para una mayor resistencia a la corrosión, pero carece de la ventaja de un módulo de elasticidad elevado que es proporcionado rutinariamente por el acero y que es crucial para un buen comportamiento carga-deflexión de una estructura pretensada sin agrietamiento excesivo bajo cargas en servicio.
- Pocos fabricantes abastecen torones galvanizados. El calentamiento durante el galvanizado reduce la resistencia a tensión a alrededor de 1660 MPa (240 ksi). Este torón no es usado en puentes.

Los tendones en estructuras pretensadas de concreto no experimentan esfuerzo cíclico lo suficientemente significativo para inducir problemas de fatiga. La fatiga es sólo un problema en ciertas aplicaciones tales como los tirantes en los puentes atirantados donde las cargas de tráfico afectan significativamente los esfuerzos.

2.1.1.2. Barras

Las barras deberán ser Grado 1035 MPa (150 ksi), de resistencia elevada, la barra o varilla de rosca reúne los requerimientos del ASTM A 722, "Standard Specification for Uncoated High-Strength Steel Bar for Prestressing Concrete", barra tipo II. Las barras de roscas gruesas son usadas en la mayoría de las aplicaciones permanentes y temporales. Las barras de roscas finas están disponibles si fuera necesario para aplicaciones especiales. Es buena práctica limitar el nivel del esfuerzo y el número de re-usos para las aplicaciones temporales, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Ante la ausencia de tal información, se sugiere que para las barras nuevas, el esfuerzo no deberá exceder el 50% del MUTS y el número de re-usos sea menor que diez para aplicaciones tales como esforzado o levantamiento temporal.

Las barras de post-tensionado están disponibles en varios tamaños desde 16 mm (5/8 plg) a más de 50 mm (2 plg) de diámetro. Sin embargo, por conveniencia para la manipulación, instalación, y remoción y re-uso en aplicaciones normales para puentes post-tensionados, barras con diámetros de 32 mm (1 ¼ plg) o 35 mm (1-3/8 plg) son usadas típicamente.

Las barras no son tan fácilmente dañadas por la corrosión como los torones debido a su baja resistencia, mayor diámetro y relación más pequeña de superficie expuesta al área de la sección transversal. Las barras laminadas en caliente también adquieren una superficie oxidada natural por el proceso de laminado que mejora su protección. Sin

embargo, las barras necesitan protegerse durante periodos prolongados de exposición especialmente en entornos agresivos. El galvanizado por inmersión en caliente (hot-dip) y revestimiento epóxico están disponibles con protección a la corrosión si fuera necesario.

2.1.2. Envío, Manipulación y Almacenamiento

Todo el acero pretensado deberá ser protegido en contra del daño físico y corrosión en todo momento desde la fabricación hasta la instalación final y grouting. Deberá empacarse en contenedores para el envío, manipulación y almacenaje. Un inhibidor a la corrosión que prevenga el óxido deberá colocarse en el paquete o incorporarse en el portador tipo material de embalaje. El inhibidor de la corrosión no deberá tener efecto perjudicial sobre el acero o el grout o sobre la resistencia de adherencia del acero al grout. El portador del inhibidor tipo embalaje deberá estar conforme a la Federal Specification ML-P-3420. El embalaje dañado deberá reemplazarse o restaurado a su condición original.

Los contenedores de envío deberán marcarse claramente con un mensaje que contiene acero pretensado de alta resistencia, el tipo de cuidado necesario para la manipulación, el tipo y cantidad de inhibidor a la corrosión usado y la fecha que fue colocado, y cualquier otra precaución e instrucción de seguridad. Los torones deberán estar claramente identificados de que son torones de baja relajación (estabilizados) por los requerimientos del ASTM A 416 y el correspondiente número LOT con el cual la muestra de ensayo de control de calidad haya sido tomada. Los torones no diseñados así deberán rechazarse.

Los carretes de torones deberán ser examinados por el Contratista e inspeccionados por el CEI cuando se reciben por primera vez en el sitio y periódicamente durante el almacenamiento. Durante el uso, cualquier carrete en el que se encuentre que contienen cables rotos o corrosión deberá ser cuidadosamente examinado. Las longitudes de torones contenido cables rotos o corrosión deberán removese o descartarse. El acero pretensado deberá también protegerse durante la instalación en la estructura.

Las barras de post-tensionado tanto para aplicaciones permanentes como temporales deberán ser identificados de forma similar e inspeccionados por daño o excesiva corrosión. En cualquier momento durante la construcción, el inspector (CEI) deberá tener la autoridad de rechazar cualquier acero pretensado que haya sostenido daño físico o por corrosión.

2.1.3. Aceptación

Para asegurar que los materiales correctos son suministrados y usados, procedimientos de control de calidad específicos para la aceptación del material deberán estar en el lugar. Los procedimientos pueden diferir de Estado a Estado o de Propietario a Propietario. En algunos casos, un Propietario puede requerir que sólo los sistemas de post-tensionado a ser usados sean los que hayan sido aprobados y pre-calificados bajo el programa de calificación del Propietario. La pre-calificación de esta manera implica antes del envío y aprobación de los reportes de las pruebas y certificaciones.

Las muestras para las pruebas deberán ser proporcionadas en el sitio de trabajo por cada fabricante del acero y barra pretensada. Cada muestra proporcionada para prueba deberá estar acompañada por la certificación indicando la “Resistencia Última Garantizada a Tensión” (Guaranteed Ultimate Tensile Strength, GUTS), la Resistencia Última Mínima a Tensión” (Minimum Ultimate Tensile Strength, MUTS) o la “Resistencia Última Real a la Tensión” (Actual Ultimate Tensile Strength”, AUTS), del fabricante.

Un ejemplo de las frecuencias típicas de muestreo y designaciones LOT son, como sigue:

- Para torones: tres muestras seleccionadas aleatoriamente, de 1.5 metros (5 pies) de largo, por fabricante, por dimensión del torón, por envío, con un mínimo de una prueba por diez carretes enviados.
- Para barras: tres muestras seleccionadas aleatoriamente, de 1.5 metros (5 pies) de largo, por dimensión de la barra, por calor del acero con un mínimo de una muestra por envío.

Una de cada una de las muestras proporcionadas representa un LOT que deberá probarse en concordancia con el estándar ASTM apropiado, y las muestras restantes identificadas y etiquetadas apropiadamente deberán almacenarse para pruebas futuras. En el caso de una pérdida o falla la muestra(s) almacenada deberá usarse para evaluar la resistencia. Para la aceptación del LOT representado, las pruebas resultantes deberán demostrar el 100% de la resistencia última garantizada a tensión.

Todas las barras de cada tamaño por cada millón de calor de acero (heat of steel, es el producto de una sola operación de fusión en un horno), y todos los torones de cada fabricante de carretes a enviarse al sitio deberán ser asignados con un número LOT individual y estar etiquetados de tal forma que cada LOT pueda ser identificado de forma precisa en el sitio. Es suficiente prueba para el rechazo todos los aceros de pretensado no identificados (torones o barras) o con pérdida de una prueba de identificación positiva.

Luego de la aceptación inicial, el usuario del acero pretensado (Contratista) deberá mantener un buen control sobre el almacenaje e identificación, mantener los registros y suministrar copias y certificaciones y los resultados de las pruebas al inspector (CEI). Este último deberá comprobar regular y periódicamente los componentes almacenados, registro y resultados.

La aprobación de cualquier material de pretensado por el Ingeniero (CEI) no deberá excluir rechazos subsecuentes si el material es dañado en tránsito o se encuentre luego que está defectuoso por alguna razón. Los costos de las pruebas de aceptación y control de calidad están típicamente incluidos en los ítems de oferta del proyecto para los trabajos de post-tensionado y no se realizará ningún pago separado. La prueba deberá estar conforme a las Especificaciones ASTM aplicables. La ubicación donde el post-tensionado se instalará se considera "el sitio" y puede ser el sitio del proyecto o la planta de fabricación o fundición.

2.2. Grout

2.2.1. Propósito

El grout cementicio es químicamente básico y proporciona un entorno pasivo alrededor de las barras y torones de post-tensado. Además, el grout sirve para adherir los tendones internos a la estructura. En las longitudes libres de los tendones externos el rol principal del grout es proporcionar un entorno alcalino al interior del ducto de polietileno. Sin embargo, el llenar completamente el ducto con grout es esencial para la protección apropiada.

2.2.2. Cemento y Otras Puzolanas para el Grout

El constituyente primario del grout es el cemento Portland ordinario (Tipo I y II). Otros materiales cementicios puede adicionarse para mejorar ciertas cualidades del producto final. Por ejemplo, el polvillo de cenizas mejora la resistencia a la corrosión en entornos agresivos. La adición de humo de sílice seco (micro-sílice) también

mejora la resistencia a la penetración de cloruros ya que las partículas ayudan a llenar los intersticios entre los granos cementicios hidratados así reduciendo la permeabilidad.

La relación del material agua-cemento deberá limitarse a un máximo de 0.45 para evitar la retención excesiva de agua y el sangrado y optimizar el proceso de hidratación. Cualquier tentación de agregar agua para mejorar la fluidez en el sitio debe ser resistido en todo momento. La fluidez puede mejorarse agregando un reducir de agua de rango elevado (high range water-reducer, HRWR), tipo F o G, ver Sección 2.2.5.

2.2.3. Grout Pre-Embolsado

Los grouts se hacen de materiales cementicios, agua y aditivos dosificados en el sitio no siempre tienen propiedades uniformes. Esto hace que surjan variaciones en el material, diferencias de mezcla día a día, cambios del personal del equipo, condiciones de clima y así sucesivamente. Los grouts hechos sólo de cemento y agua a menudo exhiben segregación y agujeros (cangrejeras) debido al excesivo sangrado de agua. En un esfuerzo para eliminar los problemas relacionados a las variaciones del grout y los agujeros, varios DOT's Estatales han obtenido los más grandes controles de calidad requiriendo grouts "pre-embolsados". En un grout "pre-embolsado", todos los materiales constituyentes (cementicios) han sido mezclados y combinados a fondo en fábrica en condiciones secas. Esto asegura la combinación apropiada y requiere sólo que una cantidad medida de agua sea agregada para mezclarla en el sitio.

Un fabricante de un grout pre-embolsado puede haber ya tenido el material pre-calificado por un DOT Estatal u otra agencia. En este caso, es apropiado aceptarlo sobre las bases de una certificación escrita; indicando que el fabricante ha cursado las pruebas de control de calidad que pueden ser confirmadas enviando reportes de las pruebas al Ingeniero. La certificación deberá mostrar que el grout mezclado reúne los estándares de pre-calificación. En el sitio, la producción diaria de grout deberá ser monitoreada con varias pruebas de campo con la finalidad de mantener el control de calidad y desempeño.

2.2.4. Grout Tixotrópico Vs No Tixotrópico

Un grout tixotrópico es uno que empieza a gelificar y a rigidizar en un tiempo relativamente corto mientras reposa luego del mezclado, aun cuando es agitado mecánicamente, retorna a su estado líquido con mucha menor viscosidad. La mayoría de los grouts hechos con materiales cementicios, aditivos y agua son no-tixotrópicos. La tixotropía puede ser exhibida por algunos, pero no necesariamente todos, grouts pre-embolsados.

Una característica crítica de un grout es que debe mantenerse bombeable por el tiempo anticipado para inyectar completamente el tendón. Esto puede ser significante para tendones grandes o cuando un grupo de varios tendones serán inyectados en una operación continua. Algunos grouts tixotrópicos pueden tener muy baja viscosidad luego de la agitación, volviéndose fáciles de bombear.

2.2.5. Aditivos

Tal como el concreto, los aditivos pueden usarse para mejorar la trabajabilidad y reducir el agua requerida, reducir el sangramiento, mejorar las propiedades de bombeo o aire atrapado. Se debe tener cuidado para usar las cantidades correctas en la manera apropiada de acuerdo a las instrucciones del fabricante y permanecer dentro de las propiedades establecidas por las pruebas del laboratorio de calificación.

El nitrato de calcio puede ayudar a mejorar la resistencia a la corrosión en algunas situaciones adhiriéndose al acero para formar una capa pasiva y prevenir el ataque por iones de cloruros.

Los reduidores de agua de rango elevado (high range water reducer, HRWR) mejoran la fluidez a corto plazo. Sin embargo, un grout con HRWR puede perder fluidez luego cuando está siendo inyectado a través de mangueras y ductos. A diferencia de una mezcla de concreto, no es posible re-dosificar un grout especialmente cuando este está en la bomba, mangueras y ductos. También, los HRWR tienden a causar sangrados en los grouts. El grout mezclado en el sitio con HRWR no es recomendado.

- Otros aditivos incluyen:
- Agentes de compensación de contracción.
- Aditivos anti-sangrado.
- Ayudantes de bombeo.
- Agentes incorporadores de aire.

2.2.6. Pruebas de Laboratorio

La aceptación de un grout está usualmente basada en los resultados de pruebas de laboratorio. Las pruebas de laboratorio en dosificaciones de prueba del grout propuesto, usando los mismos materiales y equipo a ser usado en el sitio, son usadas para calificar un grout. El grout de prueba deberá ser preparado por personal experimentado en preparar y probar mezclas de grout. Esto deberá hacerse en un laboratorio aprobado de pruebas de material. Todas las pruebas deberán desarrollarse en condiciones de temperatura y humedad esperadas en el sitio. Las pruebas deberán preceder a la construcción por al menos ocho semanas con la finalidad de dar tiempo a las pruebas y resolución de cualquier problema.

Las pruebas de laboratorio son normalmente desarrolladas para las propiedades listadas en las secciones siguientes. Los detalles de las pruebas a ser desarrolladas son proporcionados de forma resumida. Este es un resumen de los aspectos claves solamente. Para mayores detalles referirse a la "Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures", última edición, del Instituto de Post-Tensionado y/o los documentos específicos del contrato del proyecto.

2.2.6.1. Tiempo de Fraguado

El tiempo de fraguado del grout es probado en concordancia con el ASTM C 593 "Standard Test Method for Setting Time of Grouts". El tiempo de fraguado deberá ser mayor de 3 pero no menor que 12 horas. El tiempo de fraguado probado no está relacionado a la colocación o ciclo de vida de la mezcla.

2.2.6.2. Resistencia del Grout

Los cubos especímenes de grout, de 50 mm (2 plg), son preparados y probados de acuerdo al ASTM C 942 "Standard Test Method for Compressive Strength of Grouts". La resistencia deberá ser de 21 MPa (3000 psi) a los siete días y de 35 MPa (5000 psi) a los 28 días.

2.2.6.3. Permeabilidad

La permeabilidad del grout deberá probarse en concordancia con el ASTM C1202 "Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". Un valor menor que 2500 Coulombs después de 6 horas es aceptable generalmente cuando se somete a un potencial de 30 voltios.

2.2.6.4. Cambio de Volumen

El cambio de volumen deberá probarse en concordancia con el ASTM C1090 "Standard Method for Measuring Changes in Height of Cylindrical Specimen from Hydraulic Cement Grout". Un valor de 0.0% a menos del 0.1% en 24 horas y no más de +0.2% a los 28 días es aceptable.

2.2.6.5. Bombeabilidad y Fluidez (Cono de Flujo)

Para los grouts no-tixotrópicos, cuando se prueban en concordancia con el ASTM C939 "Standard Test Method for Flow of Grout" el tiempo de eflujo deberá estar entre 11 y 30 segundos inmediatamente después de la mezcla (Figura 2-1). Luego permitiendo al grout descansar por 30 minutos sin mayores agitaciones, el tiempo de eflujo deberá ser menor que 30 segundos. El límite inferior inicial de 11 segundos es un intento para indicar que la mezcla contiene la cantidad necesaria de material cementicio. Los límites superiores están destinados a indicar satisfactoriamente la fluidez para el bombeo.

Para los grouts tixotrópicos, el cono de flujo (flow cone) es llenado hasta la parte superior, esto es sobre el nivel estándar, y el tiempo de llenado a un contenedor de un litro es medido. El tiempo de eflujo deberá estar entre 5 y 30 segundos inmediatamente después del mezclado. Luego permitiendo al grout descansar por 30 minutos sin agitación y entonces re-mezclándolo por 30 segundos, el tiempo de eflujo deberá ser menor que 30 segundos. Es recomendable que algunas de las pruebas de calificación de laboratorio puedan ejecutarse en los extremos de este espectro. Hay algunos pre-embolsados comerciales grouts tixotrópicos que reúnen todos los otros requerimientos aún mostrados, sin embargo muestran muy baja viscosidad (alta fluidez) luego de la agitación, resultando en el límite inferior de 5 segundos (referirse a la revisión del 2003 del PTI "Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures").

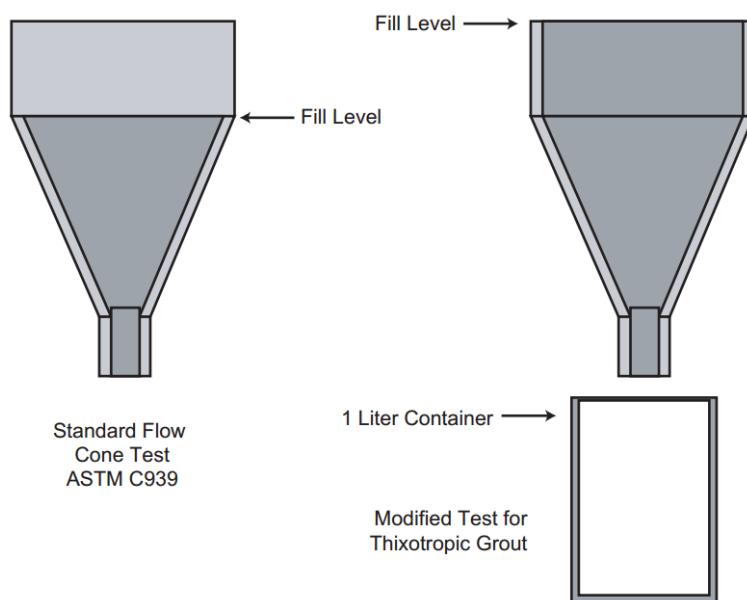


Figura 2-1: Prueba del cono de flujo ASTM C939 estándar y modificado.

2.2.6.6. Prueba de Fluidez de Temperatura Elevada del Campo Simulado

Esta no es una prueba estándar. Sin embargo, fue desarrollada por el Departamento de Transporte (DOT) de Florida para asegurar que una mezcla se mantenga suficientemente trabajable para el bombeo bajo condiciones de sitio simuladas luego de la re-circulación durante el periodo de una hora. El procedimiento siguiente, tomado de la FDOT Standard Specification, Sección 938, puede usarse como guía:

- a. Desarrollar la prueba en un laboratorio de condiciones controladas de temperatura. Condicionar el cuarto, grout, agua, ducto, bomba, mixer y todos los otros equipos a ser usados a una temperatura de 32.5 °C (90 °F) por un mínimo de 12 horas antes de la prueba.
- b. Usar 122 metros (400 pies \pm 3 metros (10 pies)) de ducto (tubo) para la prueba. Usar un ducto con un diámetro interior de 25 mm (1 plg).
- c. Mezclar el grout al contenido de agua especificado. Bombear el grout a través del ducto hasta que el grout se descargue desde el extremo del vertedor (outlet) del ducto y sea retornado a la bomba.
- d. Iniciar el periodo de prueba de una hora después que el ducto esté completamente llenado con grout. Registrar el tiempo para circular el grout a través del ducto. Bombar constantemente y re-circular el grout en el tanque comercial de almacenamiento de mezcla de grout.
- e. Bombar y re-circular el grout por un mínimo de una hora.
- f. Registrar en intervalos de 15 minutos a lo largo del periodo de prueba, la presión de bombeo en la entrada (inlet), la temperatura del grout, y la fluidez en el vertedor de grout.

El resultado es satisfactorio si el tiempo de eflujo del cono de flujo (ASTM C 939 estándar o modificado) después de una hora de re-circulación no es mayor de 30 segundos.

2.2.6.7. Sangrado o Exudado (Bleed)

La “Prueba de Sangrado Inducida por Meca” (Wick Induced Bleed Test) implica la inmersión completa de una longitud de 0.5 metros (20 plg) de torón en un cilindro de grout preparado cuidadosamente y siguiendo una versión modificada del ASTM C940 para registrar el sangrado o exudación del agua sobre el grout. Un sangrado de 0.0% luego de 3 horas a una temperatura del cuarto normal (70° F) es aceptable (Figura 2-2).

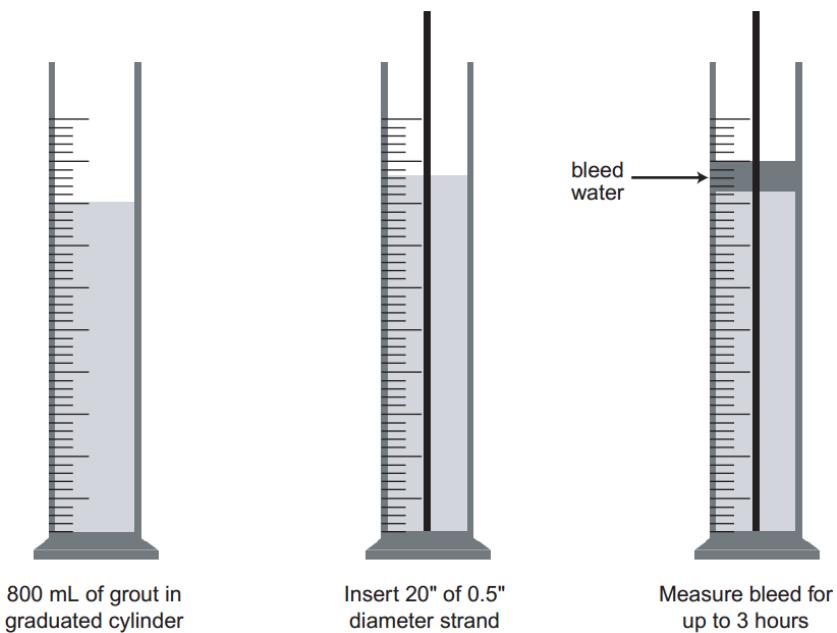


Figura 2-2: Prueba de sangrado inducido por mecha.

La “Prueba de Sangrado de Presión Schupack” (Schupack Pressure Bleed Test) usa un Filtro Gelman para retener las partículas del grout y registrar el agua de sangrado expulsado bajo presión de aire aplicada hasta 0.34 MPa

(50 psi), ver Figura 2-3. La Tabla 2-1 muestra porcentajes de agua de sangrado máximos permisibles en valores de presión específicos que deberán indicar que el grout tiene pequeño o ningún sangrado para el aumento vertical dado.

Vertical Rise	Pressure MPa (psi)	Max% Bleed
0 to 0.6M (0 to 2 feet)	0.14 (20)	4
0.6M to 1.8M (2 to 6 feet)	0.21 (30)	2
1.8 to 30.5M (6 to 100 feet)	0.34 (50)	0

Tabla 2-1: Sangrado permisible bajo presión

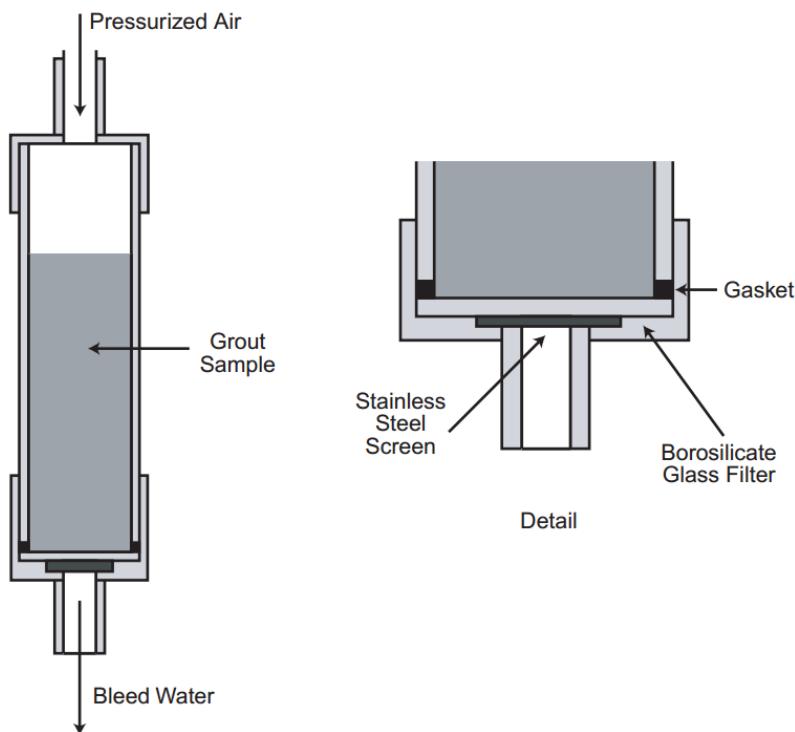


Figura 2-3: Sangrado bajo prueba de presión (embudo de filtración de Gelman).

2.2.6.8. Corrosión

Una prueba de corrosión acelerada (Accelerated Corrosion Test, ACT) puede usarse para cuantificar el nivel esperado de corrosión para un grout específico. La prueba está basada en la investigación realizada por la FHWA-RD-91-092 el cual indica que un tiempo medio de corrosión de 1000 horas cuando se prueba en 0.2 voltios es adecuado. Esta prueba no está aún estandarizada. Sin embargo, es útil particularmente en la determinación de combinaciones de aditivos que pueden afectar adversamente el desempeño de protección corrosiva de un grout.

2.2.6.9. Densidad Húmeda

Un valor de la densidad húmeda para el grout puede establecerse en el laboratorio usando el ASTM C185 "Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar". Una vez establecido, puede ser monitoreado en campo usando un Balance de Lodos del Instituto Americano del Petróleo (API Recommended Practice 13B-1: "Standard Procedures for Field Testing Water-Based Drilling Fluids").

2.2.7. Envío, Manipulación, Almacenamiento y Vida Útil

El cemento y otros materiales pueden ser enviados en bolsas pero deberán almacenarse en un edificio resistente a la intemperie. El almacenamiento en la intemperie puede estar permitido tomando las precauciones para que los materiales estén sobre una plataforma seca y elevada con adecuada protección de la intemperie. Los aditivos deberán ser almacenados en un entorno caliente. Los materiales de embalaje absorbibles no deberán estar permitidos para cualquier componente ya que pueden romper la pulpa y causar el bloqueo del equipo o ducto.

Es esencial que el usuario (Contratista) mantenga un registro de todos los materiales enviados. Una copia de las hojas de datos (data sheets) de control de calidad de los fabricantes deberá acompañar cada LOT de los componentes del grout enviados al sitio. Un LOT es aquella parcela de material de la misma corrida de producción enviada al sitio. Cada envío debe identificarse claramente con el número LOT correspondiente de modo que pueda ser rastreada hasta el registro del control de calidad del fabricante. Las copias de los registros de envío y los reportes de las pruebas de control de calidad deberán ser mantenidas por el Contratista y las copias suministradas al Inspector (CEI).

Previo al uso, todos los materiales en el almacén deberán revisarse para estar seguros que no han excedido el ciclo de vida del fabricante o no hayan absorbido humedad y empezado a formar grumos o hidratarse. Es recomendable que los materiales cementicios y los grouts pre-embolsados no se almacenen en el sitio por más de un mes antes que sean usados.

El humo de sílice seco está disponible en bolsas. Es esencial el cuidado especial cuando se mezcla el humo de sílice seco con el cemento y los aditivos con la finalidad de producir una mezcla de grout de trabajo-en-sitio, ya que puede conducir a formar grumos y un pobre resultado. Los grouts pre-embolsados contenido humo de sílice han sido mezclados en seco y no exhiben este problema.

Cualquier material con un tiempo total desde la fabricación hasta el uso mayor de seis meses deberá reprobado, re-certificado por el proveedor antes de usarlo o bien ser rechazado y reemplazado. La aprobación de cualquier grout o materiales del grout por el Inspector (CEI) no deberá excluir el subsecuente rechazo si el material es dañado en tránsito o se encuentre que está defectuoso por alguna razón.

2.2.8. Aceptación

Un grout propuesto es normalmente aceptado sobre las bases de las pruebas de laboratorio listadas en la Sección 2.2.6 desarrolladas antes de la construcción, o sobre las bases de certificación del fabricante indicando que los materiales (pre-embolsados) reúnen los requerimientos de pre-calificación del Propietario o de las especificaciones del proyecto. El fabricante deberá tener un programa de control de calidad continuo para asegurar que la producción continúa cumpliendo los requerimientos especificados. Las copias de los certificados deberán ser revisados y conservados por el Contratista y el Inspector (CEI). El uso de un grout en particular en el sitio debe continuar proporcionando aquella certificación y documentación que se mantiene al día, de que los materiales almacenados se mantienen útiles y que las pruebas de producción de mezcla de grout reúnen los límites especificados. La aprobación para usar el grout se retirará si estos estándares de control de calidad no se mantienen.

2.2.9. Pruebas en Prototipo de Campo

Cuando se especifique en los Documentos del Contrato, pruebas en prototipos de campo pueden usarse para demostrar que los materiales, componentes tales como los inlets y outlets, mixer, métodos de bombeo y de inyección de grout resultarán en un llenado completo del ducto. Los prototipos son apropiados para los nuevos medios

y métodos, nuevos tipos de componentes o materiales de grout. Los tendones de producción no deberán ser usados para las pruebas en prototipos.

Las pruebas en prototipos deberán conducirse suficientemente por adelantado a la producción de grout (al menos 4 semanas) para tener tiempo de resolver cualquier problema. En la medida de lo posible, un prototipo deberá simular el tipo y el tamaño del tendón, ducto, anclajes y accesorios propuestos y ser ensamblados un perfil similar, representativo, geométrico del ducto. Los requerimientos de aceptación deberán incluir disposiciones para el sangrado o exudación, asentamiento, contracción o expansión, fluidez del grout, integridad de llenado y la ausencia de pockets de sangrado (burbujas, cangrejeras del exudado).

Las siguientes pruebas en prototipos de campo se sugieren como guía:

- a. Para los tendones continuos recubiertos en las vigas principales empalmadas o construidas vaceadas-en-sitio: un tendón prototipo del más grande de los tendones desde un anclaje hasta el otro, incluyendo todos los acopladores de ductos intermedios propuestos y los inlets (entrada) y vents (orificios) del grout. El perfil deberá simular el tendón con la curvatura máxima acumulada desde un anclaje al otro.
- b. Para los tendones en voladizo o continuos externos e internos en la construcción segmental prefabricada o vaceada-en-sitio: un tendón prototipo del más grande de los tendones desde un anclaje hasta el otro, incluyendo todos los acopladores de ductos intermedios propuestos y los inlets y vents del grout. El perfil deberá simular el tendón con la curvatura máxima acumulada desde un anclaje al otro.
- c. Para los tendones verticales: un tendón prototipo del más grande de los tendones desde un anclaje hasta el otro, incluyendo todos los acopladores de ductos intermedios propuestos y los inlets y vents del grout. El perfil deberá simular el tendón con la curvatura máxima acumulada desde un anclaje al otro.

Las siguientes pruebas deberán ser conducidas y satisfacerse durante las pruebas en prototipos de campo:

- Bombeabilidad y Fluidez (Cone de Flujo), (2.2.6.5).
- Prueba de Fluidez a Temperatura Elevada de Campo Simulada (2.2.6.6 – opcional).
- Prueba de Sangrado Inducido por Mecha (2.2.6.7).
- Densidad Húmeda (2.2.6.9).
- La Prueba de Sangrado de Presión de Schupack (2.2.6.7), deberá satisfacerse para proyectos donde los tendones longitudinales tienen una diferencia máxima en altura en cualquier punto sobre 6 pies, o los tendones verticales estén sobre los 20 pies de altura.

El desempeño ante la corrosión deberá probarse por separado y a un momento muy anterior antes del inminente uso en la construcción. Referirse al PTI “Specification for the Grouting of Post-Tensioned Structures” para mayor información. Las pruebas en prototipos pueden dejarse a discreción del Ingeniero, dando resultados satisfactorios de pruebas anteriores o el uso de los mismos materiales, equipo y métodos por el mismo personal.

Para las pruebas de campo (en-sitio) de la producción diaria de grout, referirse al Capítulo 4.

2.3. Ductos

Los ductos están disponibles en diferentes materiales para distintas aplicaciones y tipos de tendones. Originalmente, el ducto fue considerado principalmente como un medio de “encofrado” para formar un agujero a

través del concreto para el tendón y se puso poca atención al posible rol del ducto como barrera a los agentes corrosivos. En gran parte, como consecuencia de encontrar agujeros en los tendones “engrutados”, se puso más énfasis sobre la calidad, integridad y continuidad del ducto como una barrera a la corrosión en sí mismo. Esto ha resultado en un avance hacia el uso de ductos plásticos de alta densidad en algunos estados. Sin embargo, los materiales de los ductos anteriores están aún disponibles y se continúan usando en otras regiones. En consecuencia, las siguientes recomendaciones deberán adaptarse como apropiadas para reunir las necesidades y condiciones locales.

2.3.1. Tamaño del Ducto

2.3.1.1. Tendones de los Torones

El área de la sección transversal nominal interior del ducto circular deberá ser al menos 2.25 veces el área neta de los torones de post-tensionado o 2.50 veces para los tendones instalados por el método de arrastre (pull through). En el caso de limitaciones de espacio, el área mínima del ducto será sólo 2.00 veces el área del torón para tendones relativamente cortos hasta aproximadamente los 30 metros (100 pies) de largo.

Ductos planos ovalados son comúnmente usados para los tendones transversales que comprenden hasta 4 torones de 0.6 pulgadas de diámetro en losas de tableros de vigas principales tipo cajón. Las dimensiones internas libres del ducto ovalado deberán ser como mínimo 25 mm (1 plg) verticalmente y 75 mm (2 plg) horizontalmente.

2.3.1.2. Tendones de Barras

Para los tendones que contienen una sola barra de post-tensionado el diámetro interior del ducto será al menos de 6 mm (1/4 plg) más grande que la dimensión exterior máxima de la barra. Puede preferirse un mayor espaciamiento o necesitarse en algunas aplicaciones. Ejemplos de este uso sería para proporcionar mayor tolerancias para las barras temporales o para acomodar puentes con alineamientos ligeramente curvados.

2.3.2. Ductos para los Tendones

2.3.2.1. Acero Corrugado

Los ductos son enrollados en forma de espiral (spirally wound) al diámetro del fleje de acero con mínimo de espesor de pared de 0.45 mm (gauge 26) para los ductos menores que 66 mm (2-5/8 plg) de diámetro o 0.6 mm (gauge 24) para ductos de mayor diámetro. El fleje de acero deberá galvanizarse al ASTM A653 con un peso de revestimiento de G90. Los ductos deberán fabricarse con junturas (sems) soldadas (welded) o entrelazadas (interlocking) con suficiente rigidez para mantener el perfil correcto entre los soportes durante la colocación del concreto (Figura 2-4(a)). Los ductos también deberán ser capaces de flexionarse sin prensarse o aplandarse. Las juntas entre las secciones del ducto y entre los ductos y los componentes del anclaje deberán hacerse con conexiones metálicas positivas que proporcionen un alineamiento interior suavizado sin picos o cambios abruptos del ángulo.

2.3.2.2. Tubo de Acero Liso y Rígido

Los tubos de acero lisos deberán estar conformes con el ASTM A53 “Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc Coated, Welded and Seamless”, Grado B Schedule 40. Cuando son requeridos para alineamientos curvos del tendon (ejemplo, desviaciones tipo silla de montar o sillín y similares) el tubo deberá ser prefabricado al radio requerido (Figura 2-4(b)).

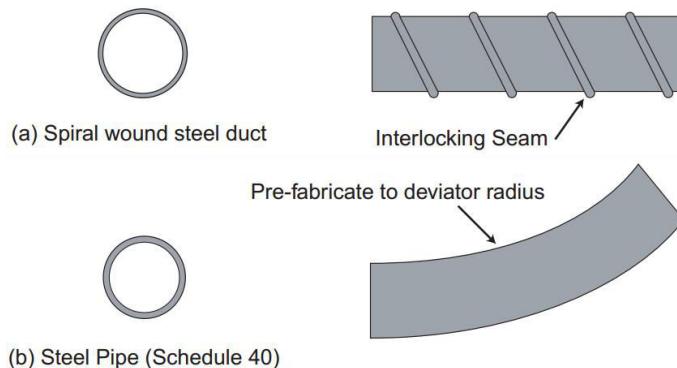


Figura 2-4: Ducto de acero de enrollado en espiral y tubo de acero rígido.

2.3.2.3. Plástico Corrugado

El ducto de plástico corrugado (Figura 2-5) a ser completamente embebido en el concreto deberá construirse ya sea de polietileno o de polipropileno. El radio de curvatura mínimo aceptable deberá ser establecido por el proveedor del ducto de acuerdo a los métodos de pruebas estándar. El ducto de polietileno deberá fabricarse de resinas que reúnan o excédanlos requerimientos del ASTM D3350 con una clasificación celular de 344434C. El ducto de polipropileno deberá ser fabricado de resinas que reúnan o excédanlos requerimientos del ASTM D4101 con un rango de clasificación celular de PP0340B44544 a PP0340B65884. El ducto deberá tener un espesor mínimo de material de $2.0 \text{ mm} \pm 0.25 \text{ mm}$ ($0.079 \text{ plg} \pm 0.010 \text{ plg}$). Los ductos deberán tener un revestimiento blanco en el exterior o deberán ser de un material blanco con estabilizadores ultravioleta añadidos.

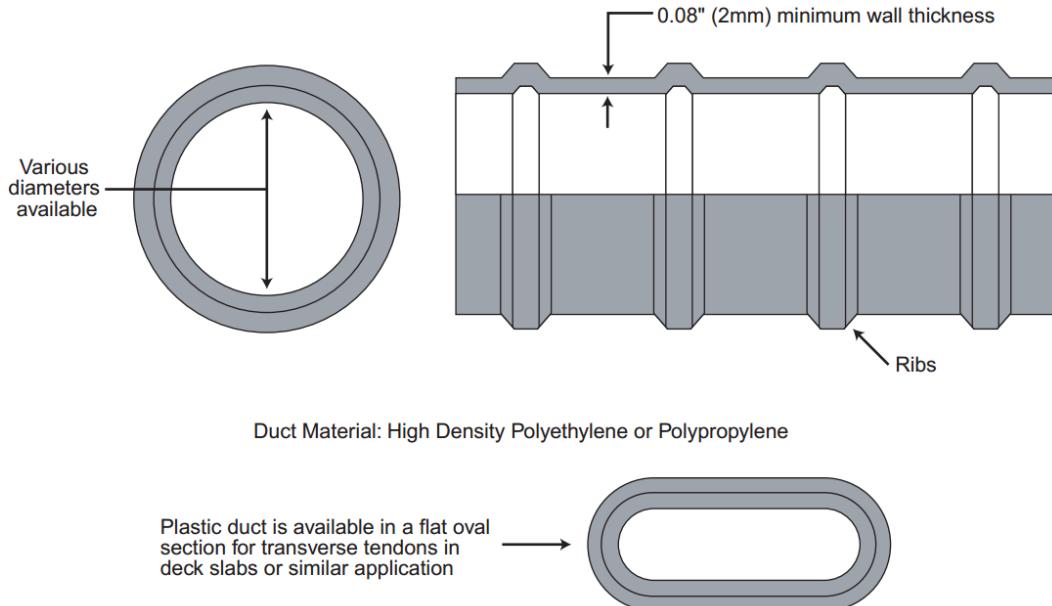


Figura 2-5: Ducto de plástico corrugado.

2.3.2.4. Tubo de Polietileno de Alta Densidad (High Density Polyethylene Pipe, HDPE) Lisos para los Tendones Externos

Los tubos lisos HDPE están disponibles en diversos diámetros, espesores de pared, propiedades físicas y químicas. Existe significativa variabilidad en los materiales disponibles comúnmente. Es muy importante que tengan

propiedades satisfactorias para la manipulación, almacenamiento, instalación y durabilidad para la aplicación. El color es normalmente negro debido a una cantidad de carbón en el material, para la protección contra la degradación de los rayos ultravioletas. Los espesores de las paredes el diámetro y la resistencia física (Bases del Diseño Hidrostático) deberán ser suficientes para resistir inicialmente las presiones del grout. A largo plazo no deberá deteriorarse o romperse. Los requerimientos deberán estar en concordancia con el AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications.

2.3.2.5. Accesorios Plásticos y Conexiones para los Tendones Internos

Todos los empalmes de los ductos, juntas y conexiones a los anclajes deberán hacerse con acopladores y conectores que produzcan un alineamiento interior suave del ducto sin picos o torceduras. Conectores especiales de ductos pueden usarse en las juntas emparejadas-vaceadas entre los segmentos prefabricados y en situaciones similares si es necesario crear un sello continuo hermético de aire o agua. Cinta adhesiva de ductos no deberá usarse para reparar los ductos o hacer conexiones.

Todos los conectores y conexiones éntrelas longitudes del ducto de plástico y entre los componentes de los ductos y el acero (ejemplo, anclajes o tubos de acero) deberán hacerse con materiales compatibles con los ductos de plástico corrugado. Los materiales plásticos deberán contener estabilizadores antioxidantes y tener un agrietamiento de esfuerzo ambiental no menor a 192 horas como lo determina al ASTM D 1693 "Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics", Condición C.

2.3.2.6. Conexiones del Ducto del Tendón Externo

Las conexiones entre las secciones de tubos de plástico deberán hacerse usando técnicas de soldadura en calor o con conectores mecánicos por las recomendaciones del fabricante o cuando se aprueben por el Ingeniero. Las conexiones deberán tener un rating mínimo de presión de 1 MPa (145 psi) y producir un alineamiento suavizado interior sin picos o torceduras.

Las conexiones entre los tubos HDPE externos y el tubo de acero embebido en el concreto deberán hacerse usando mangas o fundas circulares (calzados) hechas de monómeros de Etileno Propileno Dieno (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) teniendo un rating de presión mínima (de trabajo) de 1MPa (145 psi). El EPDM debe tener el 100% de retención de calidad como lo define el ASTM D1171 "Standard Test Method for Rubber Deterioration-Surface Ozone Cracking Outdoors or Chamber (Triangular Specimens)" Método B de Exposición a la Cámara de Ozono. El espesor mínimo de la pared deberá ser 10 mm (3/8 plg) reforzado con un mínimo de cuatro capas de poliéster reforzado. Las fundas deberán asegurarse con 10 mm (3/8 plg) de asentado de amplia potencia, abrazaderas de bandas de acero inoxidable 316, usando un extremo de cada funda (calzado) para sellar contra la fuga del grout. La fuerza de asentamiento de potencia deberá estar entre 356 y 534 N (80 y 120 lbf). Alternativamente, las conexiones deberán hacerse usando acopladores mecánicos con componentes plásticos hechos de resinas plásticas aprobadas que reúnen los mismos requerimientos como los tubos plásticos externos y los componentes de metal de grado 316 de acero inoxidable. Las conexiones mecánicas deberán reunir los mismos requerimientos de rating de presión (de arriba) y tener sellos para prevenir que el grout se derrame.

El tubo de acero y de plástico, pueden ser conectados directamente cuando los diámetros exteriores no varían por más de ± 2 mm (0.08 plg). Deberá usarse un reducidor o espaciador cuando esté fuera de estas tolerancias. Cuando se instalan correctamente, una abrazadera de banda simple alrededor de cada extremo de la funda deberá ser suficiente. Las bandas dobles pueden ser necesarias para arreglar una fuga aparente de aire, agua o grout.

2.3.2.7. Fundas o Mangas Retráctiles

En algunos casos, las conexiones del tendón exterior pueden mejorarse usando mangas retráctiles envolviendo la conexión y partes del plástico adyacente y tubos de acero. Esto puede usarse en entornos agresivos donde las conexiones pueden estar expuestas directamente a las sales de deshielo u otros contaminantes entrando a través de las juntas u otras aberturas similares.

Las fundas retráctiles deberán consistir de un irradiado y vinculado transversalmente, polietileno de alta densidad respaldado con una capa de adhesivo que resista 66°C (150 °F). Los materiales de las fundas deberán reunir lo siguiente:

Property	Test Method	Minimum Requirements		
		Internal Application	External Application	Units
Fully recovered Thickness*		2.3 (92)	2.8 (111)	mm (mils)
Peel Strength:	ASTM D 1000	5.0 (29)	8.0 (46)	KN/M (lb per inch)
Softening Point:	ASTM E 28	72 (162)	102 (216)	°C (°F)
Lap Shear:	DIN 30 672M	60 (87)	40 (58)	MPa (psi)
Tensile Strength:	ASTM D 638	20 (2,900)	24 (3,480)	MPa (psi)
Hardness:	ASTM D 2240	46	52	Shore D
Water Absorption:	ASTM D 570	< 0.05%	< 0.05%	

*The fully recovered thickness is the thickness after installation using heat.

Tabla 2-2: Propiedades físicas requeridas para las fundas reducidoras.

2.3.3. Envío, Manipulación y Almacenamiento de los Ductos

Los ductos hechos de flejes de acero galvanizado pueden ser prefabricados o fabricados en el sitio cuando sea necesario. El ducto de plástico puede ser enviado en bobinas o en paquetes de longitudes rectas.

Con la finalidad de evitar la introducción inadvertida de contaminantes o escombros, es recomendable que los extremos de las bobinas de los ductos o paquetes estén protegidos y recubiertos durante el envío y el almacenamiento. Cabezales exteriores especiales temporales pueden usarse para sellar los extremos de los ductos individuales. Los ductos plásticos deberán estar protegidos de la luz solar, degradación ultravioleta, aplastamiento y flexión excesiva hasta que se instalen en el puente. Todos los ductos y tubos deberán almacenarse en una ubicación seca, sobre una plataforma elevada, protegida del clima y la contaminación.

2.3.4. Aceptación de los Materiales del Ducto

Todos los materiales de los ductos (metal o plástico) deberán cumplir con los requerimientos del AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications o las especificaciones del proyecto, la que corresponda.

En general, el ducto de post-tensionado será aceptable si reúne los requerimientos de los "Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", Sección 5, "Sheathing", PTI, 1998 y para ductos de plástico corrugados, FIB Bulletin #7, "Corrugated Plastic Ducts for Internal Bonded Post-Tensioning Systems", Artículo 4.2 "System Approval Testing" Paso 1 y Paso 2.

Las características claves para la aceptación (de acuerdo al PTI) para los tendones internos son:

- El ducto vaciado en el concreto deberá resistir al menos 3.0 m (10 pies) de presión de concreto fluido.

- El ducto no deberá abollarse más de 3 mm (1/8 plg) bajo una fuerza concentrada de 0.45 KN (100 lbf) aplicada usando un barra reforzada de 13 mm de diámetro (#4).
- Cuando el acero de pretensado está pre-instalado en el ducto, el ducto deberá mantener al menos 1.5 m (5 pies) de presión de concreto fluido y resistencia a la abolladura no es necesaria.
- Los ductos con un diámetro mayor a 50 mm (2 plg) no deberán deflectarse más de 75 mm (3 plg) cuando una longitud de 6 m (20 pies) es soportada en sus extremos, aunque cuando un radio ajustado es requerido, ductos más flexibles pueden permitirse.
- Los ductos plásticos deberán resistir por encima de los 38°C (100 °F) excepto que los requerimientos de la rigidez longitudinal pueden reducirse al 50% si el espaciamiento de soporte de instalación se reduce al 50% de aquel para el ducto de acero.
- Lo arriba mencionado no aplica a ductos rigidizados con barras, mandriles (mandrel) o tubos inflables.

Para aceptación, es recomendable que tres pruebas satisfactorias y sucesivas por cada tipo de ducto cumplan con los requerimientos mencionados.

El Boletín #7 del FIB establece procedimientos para la aprobación de un sistema de ducto de plástico corrugado sobre las bases de una serie de etapas, usando el mismo arreglo del sistema. Las etapas son:

- Practibilidad del Arreglo – el arreglo real de los ductos en cada celda de refuerzo.
- Impermeabilidad de Agua – por una prueba de presión de aire del mismo arreglo antes del hormigonado.
- Esfuerzo/Fricción – por gateo liberación en un extremo y entonces del otro.
- Prueba de Grouting y Desgaste del Ducto – ningún agujero ni desgaste significativo después del grouting (autopsia).
- Prueba de la Resistencia Eléctrica – no menor que 1 kilo-ohm de resistencia entre el refuerzo y el acero de post-tensionado (para sistemas aislados eléctricamente – antes de la autopsia).

El Boletín #7 del FIB es adecuado para calificar nuevos sistemas que aún no han sido usados antes. Las pruebas no se ofrecen como pruebas específicas del proyecto o pruebas de producción, pero si como pruebas de homologación del sistema y por lo tanto, necesitan llevarse a cabo sólo una vez para la certificación o aprobación del sistema.

Los requisitos de aceptación clave para los tendones externos:

- El ducto (tubo HDPE) incluyendo todos los accesorios del grout soldados, empalmados y las conexiones deberán ser ajustadas al vapor y capaces de mantener 1 MPa (145 psi) de presión de grout.
- Para verificación, un arreglo contenido tubo plástico y de acero y conexiones pueden ser probadas a presión como sigue: (1) Condicionar del arreglo sosteniendo una presión interna de 1MPa (145 psi) por 3 horas; (2) Luego del acondicionamiento, el arreglo deberá retener una presión interna de 1 MPa (145 psi) por cinco minutos con no más de una reducción de 0.1 MPa (15 psi).

Es recomendable que un proveedor del sistema proporcione completa documentación incluyendo:

- Documentos técnicos y planos y dibujos del arreglo general del sistema y detalles de los componentes.
- Declaraciones de instrucciones y métodos para la instalación, esforzado y grouting.
- Un plan de aseguramiento de calidad que cubra la producción, envío, manipulación, almacenamiento e instalación del sistema.
- Instrucciones para la vigilancia y mantenimiento del sistema en servicio.

Para la aprobación y aceptación de un sistema de post-tensionado, todas las pruebas y resultados de los componentes de las pruebas de aprobación del sistema de post-tensionado deberán llevarse a cabo por un organismo independiente o laboratorio de pruebas autorizado. Estas pruebas deberán completarse antes del envío de los Planos de Ejecución y otros documentos relacionados al Ingeniero para la aprobación.

No todas las pruebas mencionadas están estandarizadas y no son requisitos formales. Lo anterior puede ser usado como guía. Los requerimientos para los proyectos individuales deberán considerarse en un básico caso-por-caso. Las propuestas deberán ser preparadas por el Contratista para la aprobación del Ingeniero.

En el sitio, el Contratista deberá mantener un registro completo de toda la documentación, reportes de pruebas, envío de expedientes y aprobaciones. Las copias deberán ser proporcionadas al Inspector (CEI) para asegurar conformidad. También, es recomendable que para los tendones multi-torón, los ductos de los tendones internos se revisen usando un torpedo antes de instalar los tendones (ver Capítulo 3).

2.4. Otros Accesorios del Sistema de Post-Tensionado

2.4.1. Anclajes

2.4.1.1. Placas de Apoyo Básicas

Una placa de apoyo básica es una placa plana apoyada directamente contra el concreto. Cubiertos por esta definición son las placas cuadradas, rectangulares o redondas; cortadas o cortadas con soporte de la placa de acero fácilmente disponible, normalmente el ASTM A 36. Las placas de asiento o apoyo básicas son usadas en conjunto con láminas de metal galvanizado o trompetas (trumpets) de plástico de transición desde el espacio del torón en la placa de la cuña hasta el ducto (Figura 2-6).

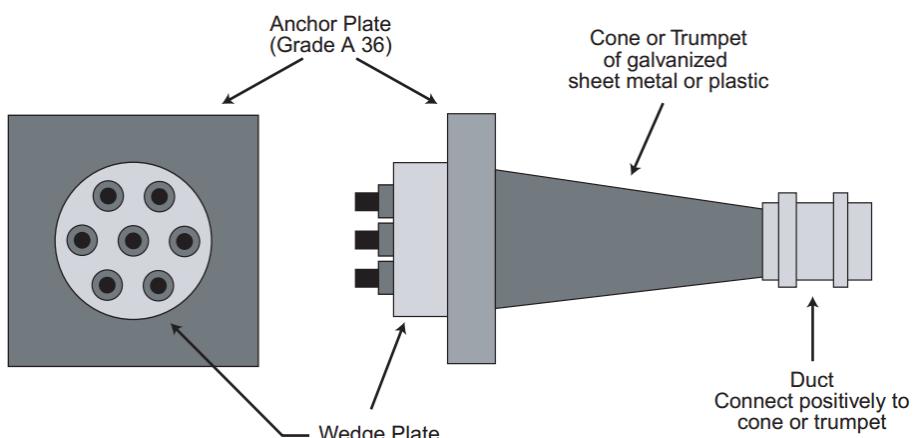


Figura 2-6: Placa de anclaje básica.

Para la aceptación, una placa de apoyo básica deberá cumplir con los requerimientos del AASHTO LRFD Construction Specifications.

2.4.1.2. Placas de Apoyo Especiales o Dispositivos de Anclaje

Una placa de apoyo especial o dispositivo de anclaje es cualquier accesorio de anclaje que transfiere fuerza del tendón en el concreto pero no reúne los requerimientos de diseño normales analíticos para las placas de apoyo básicas. Cubiertos por esta definición son dispositivos que tienen superficies de apoyo planas simples o múltiples, y los dispositivos que combinan placas de apoyo y de cuña en una sola pieza. Estos anclajes requieren típicamente refuerzo de confinamiento y deberá aceptarse en las bases de pruebas físicas (Figura 2-7).

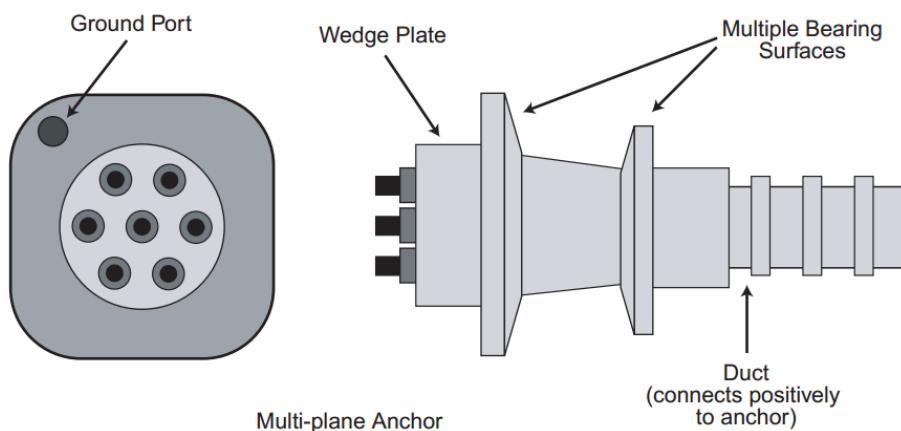


Figura 2-7: Anclaje multi-plano.

El uso de placas de apoyo especiales o dispositivos de anclaje es aceptable si cumplen con los requerimientos de las pruebas del AASHTO LRFD Construction Specification 10.3.2.3.

2.4.1.3. Placas de Cuña

Las placas de cuña son parte del sistema de anclaje y deberán cumplir con el AASHTO LRFD, Sección II – 10.3.2.3 para dispositivos de anclaje especiales. Ante la ausencia de cualquier otro requerimiento contractual específico, en general, tres pruebas de calificación satisfactorias sobre las placas de cuña deberán reunir los requerimientos de la Sección 4.1 del “Wedge Plate Test Requirements” of “Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems”, PTI, 1998. Estas pruebas requieren que luego de la carga al 95% del MUTS y la liberación, la deformación de la placa no deberá exceder 1/600 del tramo libre y que la placa de cuña mantenga al menos el 120 % del MUTS sin fallar.

2.4.1.4. Conexiones de las Placas y Torón-Cuña

El desempeño de la cuña es crítico para el anclaje apropiado de los torones. Diferentes cuñas han sido desarrolladas para sistemas particulares y aplicaciones tal que no existe una sola cuña estándar. Sin embargo, todos son similares. La longitud es al menos 2.5 veces el diámetro del torón, con un 5 a 7 grados de ángulo de la cuña y dientes de sierra para asegurar o engrapar el torón. Son de acero endurecido bajo en carbón o acero sin aleación. Una cuña ensamblada típicamente tiene 2 o 3 partes acuñadas con un clip retenedor del cable del resorte en una ranura alrededor en el extremo grueso.

Las cuñas son endurecidas con un núcleo dúctil, con la finalidad de penetrar en el torón y ajustarse a la irregularidad entre el torón y el agujero de la cuña. Al hacerlo, la superficie puede agrietarse. Esto es aceptable

normalmente y no afecta el desempeño con tal que las cuñas no se rompan completamente en piezas separadas. A menudo, es sólo la parte exterior del anillo de retención el que se agrieta.

Los requerimientos de desempeño deberán estar en concordancia con la Sección 4.1.2 "Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", PTI, 1998 el cual impone un muestreo o prueba de control de calidad en lotes fabricados de 3000 cuñas con la finalidad de certificar el cumplimiento.

Para la aceptación de un sistema de post-tensionado, la conexión torón-cuña es parte del sistema de anclaje y deberá cumplir con el AASHTO LRFD, Bridge Construction Specifications artículo 10.3.2.3. En ausencia de cualquier otro requerimiento contractual específico, para guía, las conexiones torón-cuña deberán estar conformes con la Sección 4.1.3 y 6.1.6 del "Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", PTI, 1998. Estas pruebas requieren que para cada torón, cuña y agujero de cuña, treinta pruebas estáticas consecutivas y cuatro pruebas dinámicas consecutivas, para lo que la mitad son sobre agujeros lubricados y la otra mitad sobre agujeros no lubricados serán conducidas. As pruebas estáticas se requieren para mantener el 95% del AUTS en una elongación del torón del 2%. Las pruebas dinámicas comprenden 500000 ciclos desde el 60% al 66% del AUTS seguido por 50 ciclos entre el 40% y el 80% del AUTS sin fallar.

2.4.2. Barras PT, Tuercas y Adaptadores o Acopladores de Anclaje

Para aceptar un sistema de barra de post-tensionado, la tuerca de la barra y la placa es parte del sistema de anclaje (Figura 2-8) y deberá cumplir con el AASHTO LRFD, Bridge Construction Specifications artículo 10.3.2.3. En ausencia de cualquier otro requerimiento contractual específico, para guía, para aplicaciones permanentes, tres pruebas satisfactorias de cada tamaño, tipo y grado de la conexión de la tuerca de la barra y la conexión del adaptador de la barra son requeridos para la aceptación en concordancia con las Secciones 4.2, y 6.1.7 de la "Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", PTI, 1998".

Esta prueba requiere que las tuercas lleven al mayor del 100% del MUTS de la barra o el 95 del AUTS, los adaptadores o acopladores lleven lo mismo con 1 pulgada central del adaptador no acoplado, y las tuercas permitan 5º de desalineación entre la barra y la placa de apoyo. Los tendones de barra no adherida deberán resistir 500000 ciclos desde el 60% al 66% del MUTS y por lo tanto 50 ciclos desde 40% al 80% del MUTS.

2.4.3. Inlets (Entradas), Outlets (Salidas), Válvulas (Valves) y Plugs (Tapones) del Grout

Los inlets, outlets, válvulas y tapones deberán hacerse de polipropileno o polietileno reuniendo los requerimientos para los ductos plásticos, corrugados. Los tapones roscados permanentes deberán hacerse de acero inoxidable o cualquier material no metálico que contenga estabilizadores antioxidantes y teniendo un agrietamiento de esfuerzo ambiental de 192 horas como lo determina el ASTM D 1693, Condición C. Los ítems temporales no incluidos en las características permanentes de la estructura acabada pueden ser de cualquier otro material adecuado.

Los accesorios para los inlets y outlets del grout (también denominados como "vents" o respiraderos), incluyendo los sellos entre los cabezales del grout y los anclajes, deberán ser capaces de mantener al menos 1 MPa (145 psi) de presión interna. Para las pruebas de aceptación, ver la Sección 2.3.4.

Los tubos para los inlets y outlets para los tendones de los torones deberán tener un diámetro interior mínimo de 20 mm (3/4 plg). Para los tendones de la barras que comprenden hasta 4 torones, los tubos deberán ser al menos de 10 mm (3/8 plg) de diámetro interior. Los inlets y outlets deberán cerrarse con válvulas disponibles o

tapones. Para el grouting de los tendones verticales grandes, válvulas de cerrado mecánico dual son generalmente necesarias para facilitar las etapas intermedias del grouting y ventilación.

Los inlets y outlets deberán ensamblarse y anexarse a los ductos, anclajes y cabezales de grout que una manera que permita escapar a todo el aire y agua con la finalidad de asegurar que el sistema esté completamente lleno con grout. Ver el capítulo 4 para ejemplos de localización de los inlets y outlets.

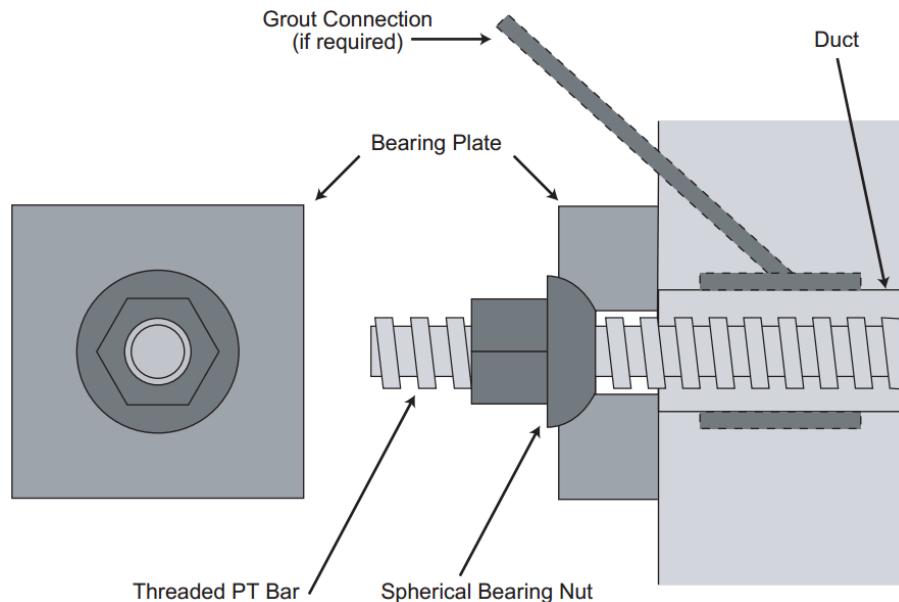


Figura 2-8: Placa de anclaje de la barra PT.

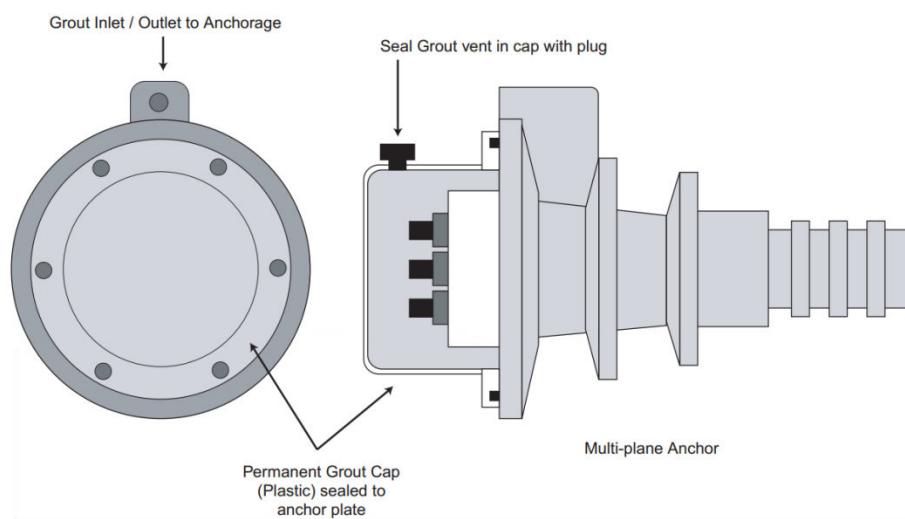


Figura 2-9: Cabezal permanente (plástico) del grout para anclaje.

2.4.4. Cabezales de Grout Permanentes

Los cabezales de grout permanentes son recomendados para proporcionar un nivel adicional de protección a la corrosión en el anclaje (ver Figura 2-9). Los documentos específicos del contrato deberán especificar cuándo los cabezales de grout son requeridos.

Los cabezales de grout permanentes deberán hacerse de un plástico reforzado con fibra conteniendo un aditivo anti-oxidante para asegurar una duración, libre de mantenimiento, de un ciclo de 75 años con una resistencia al agrietamiento de esfuerzo ambiental de 172 horas por el ASTM D 1693. Los cabezales deberán sellarse contra la placa de apoyo del anclaje y tener un respirador de grout en la parte superior del cabezal. Los cabezales deberán asegurarse a la placa de anclaje usando tornillos de acero inoxidable 316. Los cabezales deberán clasificarse para una presión mínima de 1 MPa (145 psi).

2.5. Otras Pruebas de Calificación de Sistemas PT

Los documentos específicos del proyecto deberán establecer cuando una prueba de calificación dinámica del sistema para tendones no adheridos (externos) es necesaria. Esta deberá cumplir con la más reciente AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications. En ausencia de cualquier otra información, para guía, referencias pueden hacerse al "Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems", PTI, 1998.

3

*instalación del ducto y
tendón de post-
tensionado*

3. Instalación del Ducto y Tendón de Post-Tensionado

Este capítulo se ocupa básicamente de los procedimientos de construcción y operaciones de los Planos de Ejecución, a través de la instalación y esforzado del tendón. El grouting es abordado en el siguiente capítulo. La información y detalles en estos dos capítulos pueden usarse como guía.

3.1. Planos de Ejecución (Shops Drawing)

3.1.1. Planos y Detalles

3.1.1.1. Propósito

Para permitir la realización y fomentar el mayor desarrollo en el campo de la construcción de puentes post-tensionados, en general, los planos y especificaciones contractuales normales no especifican un sistema de post-tensionado de un fabricante en particular. El Ingeniero de Registro generalmente selecciona el tipo, tamaño, ubicación y número de tendones, pero el Contratista selecciona el sistema de anclaje. Todos los sistemas de post-tensionado deben tener la aprobación previa antes de ser usados.

Ahora todos los sistemas en uso general han sido desarrollados por compañías independientes y representan diferentes métodos por el cual la fuerza de pretensado es aplicada. Cada uno ofrece ciertas ventajas cuando se comparan con las otras, pero cada uno, cuando se instalan y esfuerzan apropiadamente, cumplirá con el resultado deseado.

Un sistema de post-tensionado propuesto por un Contratista deberá mostrarse en los planos de ejecución. Estos planos deberán incluir detalles para los métodos y materiales usados, incluyendo cualquier re-arreglo de o adición para el acero de refuerzo que difiera de aquel mostrado en los planos del contrato. Los planos de ejecución representan un suplemento importante a los Planos del Contrato.

Los planos de ejecución son normalmente revisados por el Diseñador del Puente. El Diseñador normalmente los revisará para integridad, cumplimiento con el contrato, holguras o interferencias de los ductos y del acero de refuerzo. A pesar del proceso de aprobación, el Contratista mantiene responsabilidad por la correctitud de los planos de ejecución y consiguiente construcción.

Los planos de ejecución son necesarios para la integración de los sistemas aprobados de post-tensionado (esto es, información y detalles de los proveedores del post-tensionado), refuerzo, post-tensionado, y otros ítems embebidos (incluyendo aquellos elegidos por el Contratista “medios y métodos” de construcción) para los componentes prefabricados y vaceados-en-sitio.

3.1.1.2. Contenidos Típicos

Los planos de ejecución o de Fábrica de un sistema de Post-Tensionado típicamente aborda varios detalles tales como:

- Dimensiones, detalles y materiales para todos los componentes fabricados.

- Para sistemas de torones, dimensiones y detalles de anclaje, placas-cuña, cuñas, para cada tamaño y tendón.
- Para sistemas de barras, dimensiones y detalles de las placas de anclaje, tuercas de anclaje, barras y acopladores para cada tamaño de la barra.
- Detalles de los inlets y outlets en los anclajes.
- Dimensión, tipo de conexión y detalles del sellado de los cabezales de grout.
- Por cada tipo de ducto, dimensiones, detalles, tipo de material, conectores del ducto y métodos de conectar los ductos a los conos de anclaje (trompetas).
- Detalles de los medios y métodos de anexar o adjuntar los inlets y putlets de grout a los ductos, incluyendo los tamaños de los tubos para grout, materiales, y válvulas de cierre.
- Dimensiones, espacios libres, fuerza y carrera de los jacks (gatos) para las barras y torones de post-tensionado, incluyendo jacks simples, mono-torón, multi-torón el que sea necesario.
- Detalles típicos del equipo auxiliar tales como fuente de alimentación, líneas hidráulicas, indicadores de presión para usarlos con los jacks de esforzado.
- Gráficos de calibración del jack que muestren la relación entre la presión medida en el dial y la fuerza enviada.

A menudo, gran parte de la información anterior está disponible en un catálogo de datos, particularmente para los anclajes, acopladores, cuñas, tuercas, barras, ductos, jacks y equipo. Otra información mostrada en los dibujos de ejecución adicionales preparados por el Contratista o su Ingeniero (Especialista) o en manual de post-tensionado o de construcción para un proyecto específico generalmente incluye procedimientos, tales como:

- Perfil del ducto y espacios libres mínimos.
- Detalles, tipos y ubicaciones de los soportes de los ductos, conexiones a los bulkheads temporales, y medios de mantener el alineamiento y perfil.
- El método para instalar los torones, individualmente o en un paquete completo por cada tendón.
- La secuencia en el cual los tendones son esforzados.
- El extremo(s) por el cual los tendones son esforzados.
- Coeficiente de fricción asumido (μ) y el coeficiente de tambaleo (k).
- La elongación estimada y fuerza máxima del jacking (gateo) para cada tendón.
- La disposición estimada de la cuña o pérdida de asentamiento (wedge-set).
- Cuando las barras de post-tensionado temporales son usadas para asegurar un segmento prefabricado emparejado-vaceado, la secuencia y fuerza al cual cada uno deberá ser acoplado y esforzado alrededor de la sección transversal.
- La secuencia y medios por el cual las barras de post-tensionado temporal o los tendones de los torones son de-tensionados y removidos.
- Para todas las instalaciones permanentes, ubicaciones de los inlets y outlets, detalles, dirección del grouting y secuencia en el cual los tendones son “engrutados” (ver también el Capítulo 4).

3.1.1.3. Proceso Típico de Aprobación

Las responsabilidades típicas asociadas con los planos de ejecución incluyen:

- Contratista: Organizar la preparación de los planos de ejecución necesarios y otra información relevante requerido por el Contrato, ver que los planos de ejecución sean enviados al Ingeniero (generalmente al Diseñador) para su revisión y aprobación, recibir los comentarios revisados, hacer las revisiones cuando sea necesario y llevar a cabo la construcción consecuente.
- Ingeniero del Contratista: La persona o firma quien prepara los cálculos y planos de ejecución en nombre del Contratista.
- Ingeniero (Diseñador): Revisar, registrar y revisar todos los documentos enviados para el cumplimiento de la información trasmisida en los planos y proporcionar aprobación, rechazo, pedir la modificación o aclaración cuando sea necesario. El Ingeniero puede ser un miembro de una agencia estatal (Propietario) o de una firma privada convocada por el Estado o el Propietario.
- CEI (Construction Engineering and Inspection, Ingeniería de Construcción e Inspección): Esta es la persona, firma o agencia que representa los intereses del Estado o Propietario en la zona de trabajo (Ingeniero Residente).

Un típico envío de los planos de ejecución, revisión y proceso de aprobación para un proyecto de Diseño-Oferta-Construcción (Design-Bid-Build) es ilustrado en la Figura 3-1. Esto sería diferente para un proyecto Diseño-Construcción (Design-Build).

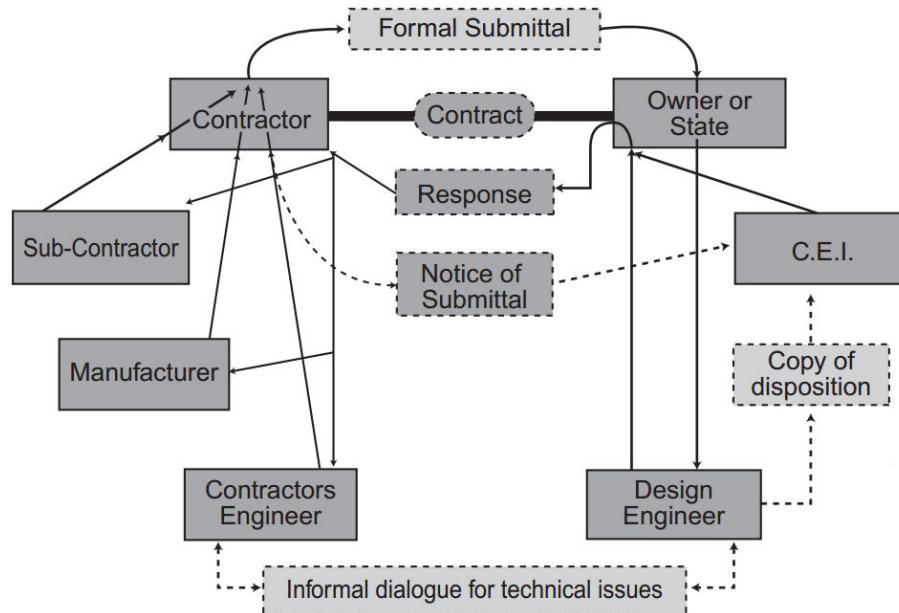


Figura 3-1: Típico proceso de aprobación de los planos de ejecución para el post-tensionado.

3.1.2. Cálculo del Esforzado

Para asegurar que la fuerza correcta es aplicada a cada tendón, se harán cálculos tomando en cuenta las pérdidas (fricción, tambaleo, disposición de la cuña y fricción del anclaje) a lo largo de la longitud de un tendón y estimar la elongación como una revisión contra la presión en el indicador del jack. Los cálculos son generalmente realizados por el Ingeniero del Contratista o instalador del Post-Tensionado y

deberá ser revisado por el Ingeniero (Diseñador o CEI). La información clave, tal como la fuerza del jack o presión de calibrado y elongación anticipada, es extraída del esforzado.

El esforzado de un tendón puede desarrollarse en uno o ambos extremos. El esforzado de ambos extremos puede ser secuencial, primero de un extremo y luego el otro, o simultáneamente usando dos jacks. En algunos tipos de construcción, puede ser sólo necesario esforzar desde un extremo; por ejemplo, cuando los tendones son relativamente cortos, es decir hasta alrededor de 50 m (150 pies) y tengan pérdidas de fricción relativamente pequeñas. Sin embargo, para los tendones largos, especialmente aquellos dentro de ductos internos ajustados a un perfil adecuado que pasan continuamente a lo largo de tres o cuatro tramos de vigas principales-I, la pérdida de fricción puede ser tan significativa que es esencial esforzar el tendón desde ambos extremos para asegurar la fuerza adecuada a todo lo largo.

El wedge-set (pérdida de asiento) deberá tomar en cuenta tanto el extremo esforzado como el extremo muerto de un tendón. Para tendones largos, a menudo la elongación puede ser mayor que el recorrido sobre el jack. Es entonces necesario tomar más de un tirador del jack. Cada vez que el jack liberado, ocurre el wedge-set nuevamente en el extremo del jacking. Ya que la carga se recoge nuevamente en el re-enganche, el wedge-set de los halados individuales no es acumulativo. Sólo el wedge-set final afecta la pérdida de fuerza del tendón. Sin embargo, teniendo en cuenta la acumulación de elongaciones y los wedge-sets durante halados repetidos por un jack es siempre útil para resolver problemas imprevistos.

Los cálculos del esforzado son ilustrados con dos ejemplos: primero para un tendón drapeado a un perfil a través de cuatro tramos continuos y esforzados secuencialmente desde ambos extremos; segundo para un tendón externo desviado en un tramo extremo esforzado desde la junta de expansión.

Varios parámetros para el cálculo de las fuerzas de esforzado y elongaciones son definidas a continuación:

- Longitud del Tendón (L).
- Área sumida del tendón (A_s).
- Módulo de elasticidad asumido (E_s).
- Coeficiente de fricción entre el tendón y el ducto (μ).
- Coeficiente de tambaleo (wooble) (k).
- Distancia desde el extremo del gateo (jacking) a la ubicación de interés = x .
- Ángulo de curvatura acumulado al punto $x = \theta_x$.
- Longitud de parte del tendón entre dos puntos "i" y "j", = X_{ij} .
- Pérdida de asiento (wedge-set) (W).
- Fricción en el anclaje (%).
- Fricción en el jack (%).
- P_0 = fuerza en el jack.

En el término A_S y E_S los subíndices “S” significan que estos son valores asumidos para el propósito de los cálculos iniciales. Durante las operaciones de esforzado, la elongación anticipada es ajustada para tomar en cuenta el valor real de A_r y E_r para el carrete de torón usado.

La fuerza en el tendón (P_x) en cada punto de interés a una distancia “x” desde el jack se determina con la fórmula:

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\theta+kx)}$$

La elongación total se obtiene sumando los incrementos de elongación por cada porción del tendón, basado en el promedio de la fuerza al inicio y al final de aquella porción: Elongación $\Delta L = \sum \left(Pav \cdot \frac{X_{ij}}{A_{S1} \cdot E_{S1}} \right)$, donde Pav es igual al promedio de la fuerza sobre X_{ij} .

La información a ser remitida al ingeniero de sitio o inspector deberá incluir:

- Identificación del tendón.
- Área asumida de los torones (A_S).
- Módulo de elasticidad asumido (E_S).
- Fuerza de gateo requerida, P del jack.
- Wedge-set (extracción), W , asumida para cada extremo de cada tendón.
- Elongación calculada en cada extremo, antes de liberar el jack y el wedge-set para cada extremo del tendón, dependiendo de los extremos a ser “gateados” primero y segundo.
- La elongación total anticipada, ΔL , antes del wedge-set.

La información a ser ajustada en el sitio incluye:

- A_r = área real de los torones.
- E_r = módulo real de las muestras por LOT del torón o por bobina o (carrete) del torón.
- Elongación objetivo total = $\Delta L \frac{A_s E_s}{A_r E_r}$.
- Elongación anticipada en cada extremo en proporción a la elongación objetivo ajustada.

3.1.2.1. Ejemplo 1 – Viga Principal-I Empalmada de Cuatro Tramos

Considerar una viga principal-I empalmada de cuatro tramos con un perfil del tendón gradualmente curvado hecho de varios arcos parabólicos como se ilustra en la Figura 3-2. Es necesario calcular la elongación esperada y la fuerza final de post-tensionado, permitida por la fricción, tambaleo y wedge-set. Dos tramos de la estructura son mostrados y se asume que son simétricos alrededor del pilar central. Siendo un tendón largo, debe esforzarse desde ambos extremos sino la pérdida de la fuerza total será demasiado grande. Sin embargo, para una eficiencia y recursos en el sitio, el esforzado se realiza primero en un extremo y luego en el otro.

El cálculo se realiza considerando cada arco del perfil a su vez y aplicando la fórmula de arriba para determinar la fuerza al inicio y al final de cada porción, comenzando en el jack. Por conveniencia, el

cálculo se realiza usando una hoja de cálculo (Tablas 3-1 y 3-2 al final de este capítulo). También, por claridad, este ejemplo es mostrado en unidades acostumbradas en los Estados Unidos en este momento.

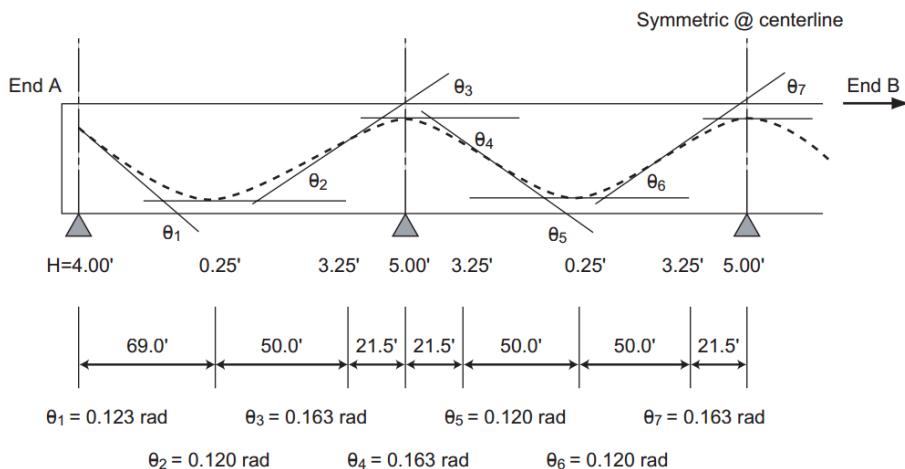


Figura 3-2: Perfil del tendón en la viga principal-I de cuatro tramos.

Cuando se esfuerza primero desde un extremo (A) (extremo izquierdo de la Figura 3-2), la elongación es calculada como 38.53 plg (Tabla 3-1). Deben observarse dos cosas. Primero, esta elongación es mayor que la carrera disponible de los jacks normales de esforzado; así la elongación total puede requerir de tres o cuatro halados separados desde un extremo solo. Segundo, en la Tabla 3-1, no se toma en cuenta el wedge-set inicial en el extremo (B) (extremo opuesto del puente). Este wedge-set anticipado ocurre mientras el extremo B es un “extremo muerto” no esforzado. En teoría, deberá agregarse la elongación tota anticipada por el esforzado desde el extremo A. Por ejemplo, si toda la elongación podría medirse en el extremo A, la elongación aparente en A se convertiría en $38.53 + 0.38 = 38.91$ plg – si el wedge-set en el extremo B se asume que es 0.38 plg. Sin embargo, no todas las fuerzas serán aplicadas en un paso en el extremo A. De hecho una carga inicial, generalmente del 20%, es aplicada en A para remover la parte floja y asentar las cuñas en el extremo B. Las elongaciones son sólo medidas después de esta carga inicial. Una corrección se agrega para el 20% inicial basado en aquella medición desde el 20% al 100% de la carga.

La segunda etapa del esforzado es desarrollada desde el extremo B. En consecuencia, es necesario calcular la elongación anticipada (adicional) y la fuerza final en el extremo B. Luego del esforzado desde el extremo A, la fuerza en el tendón en el extremo B se calcula que es 169.1 kips (Tabla 3-1). Por tanto, cuando se “gatea” en el extremo B, el jack no empezará a moverse hasta que la carga exceda esta cantidad. El jack en B recogerá la carga en 169 kips y continuará hasta la fuerza de gateo requerida de 308.0 kips. Sin embargo, debido a la pérdida por fricción y tambaleo, el efecto del gateo en B recorrerá sólo tan lejos alrededor del puente hasta que alcance un punto donde la fuerza sea igual a aquella del gateo en el extremo A. En este caso, ya que el puente es simétrico, esto ocurre en el pilar al medio. Consecuentemente,

la elongación adicional en el extremo B vendrá sólo del incremento en la fuerza del tendón entre el extremo B y el pilar del medio. Esta elongación se calcula en la Tabla 3-2 y es 6.36 plg.

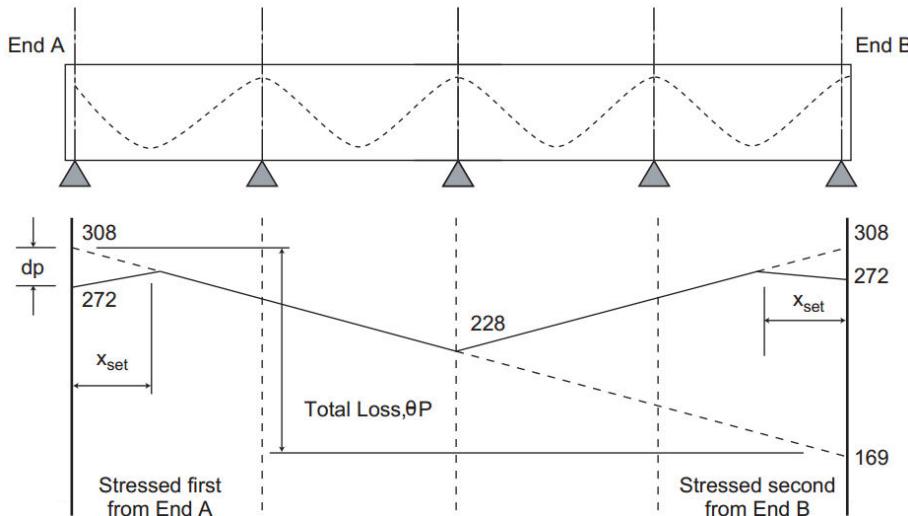


Figura 3-3: Fuerza del tendón calculada después de las pérdidas.

Así la elongación total del tendón antes de cualquier wedge-set es:

$$38.53 \text{ (en A, de la Tabla 3-1)} + 6.36 \text{ (en B, de la Tabla 3-2)} = 44.88 \text{ plg}$$

La elongación neta después del wedge-set en ambos extremos es:

$$44.88 - 0.38 \text{ (en A)} - 0.38 \text{ (en B)} = 44.12 \text{ plg (Tabla 3-2)}$$

En el campo, la elongación en B (6.36 plg) será observada y medida en el extremo B como teniendo lugar desde el punto en el cual las cuñas han sido ya jaloneadas luego del esforzado desde el extremo A. Si una marca se realizara en la cola del torón en el extremo B antes del esforzado desde el extremo A, se movería hacia dentro al menos en la cantidad del wedge-set en B (0.38 plg). De hecho, probable que se mueva más que esto, especialmente si las cuñas en B sólo han sido inicialmente asentadas "a mano". Afortunadamente, no es necesario conocer el halado inicial en la cuña en B debido a la carga en A, ya que la elongación real en B es medida desde donde el torón está en B solamente luego de cargar desde el extremo A.

Luego de liberar el jack en B, las cuñas son jaloneadas por el wedge-set final de 0.38 plg en B. En consecuencia, como se revisó, la elongación total neta luego del wedge-set es dado por (Tabla 3-2):

$$38.53 \text{ (neto en el extremo en A)} - 0.38 \text{ (set en B)} + 5.98 \text{ (movimiento neto en B)} = 44.13 \text{ plg (OK)}$$

La pérdida de fuerza (dp) en cada extremo es determinada por la cantidad de wedge-set anticipada como se muestra en las Tablas 3-1 y 3-2. Para este ejemplo, la final, fuerza post-tensionada calculada es resumida en la Figura 3-3. La fuerza mínima (228 kips) está en el centro de la unidad de cuatro tramos.

Las fuerzas de gateo requeridas y elongaciones esperadas son remitidas al campo para las operaciones de esforzado. En el campo éstas se volverán las fuerzas y elongaciones objetivo del reporte de esforzado en campo (Tablas 3-4 y 3-5 al final de este capítulo).

Deberá notarse que en este ejemplo, no ha sido tomado en cuenta el acortamiento elástico de la estructura bajo la fuerza de compresión axial del tendón. Si este esforzado es desarrollado sólo sobre la viga principal antes que cualquier losa del tablero haya sido vaceada y el tendón por encima es el primero de varios, luego el acortamiento elástico es aproximadamente estimado como sigue:

De la Figura 3-3 la fuerza promedio, P , en la viga principal es 264.6 kips. Si el área de la sección transversal de la viga principal es $A_C = 6.00 \text{ pie}^2$, y asumiendo un módulo de elasticidad inicial de 4500 ksi y la longitud total del puente es $L_B = 567$ pies, el acortamiento elástico está dado por $x_{EL} = \frac{PL_B}{A_C E_C} = 0.46 \text{ plg}$.

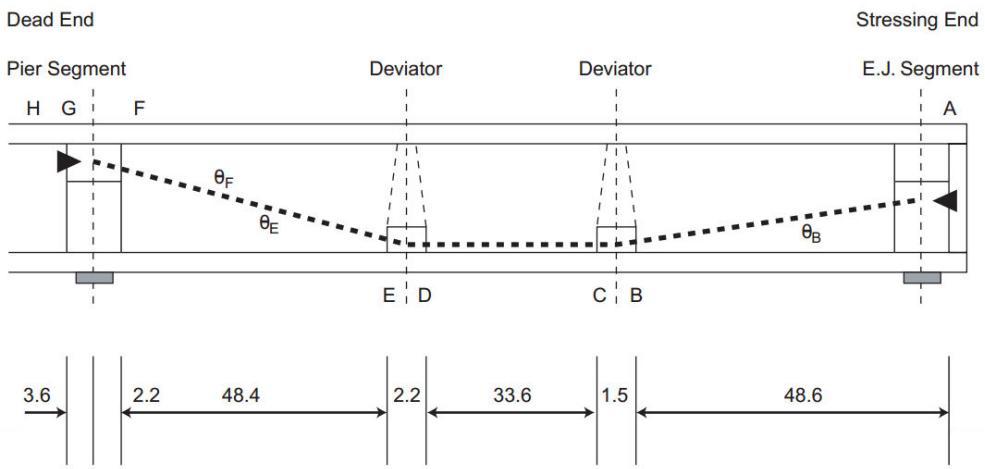
Este es relativamente pequeño. Sin embargo, en el campo, tendría el efecto de incrementar las elongaciones medidas; aproximadamente en proporción a la elongación calculada en cada extremo. Luego que la losa del tablero haya sido agregada, el acortamiento elástico de un tendón similar sería mucho menor.

Resulta que el esforzado de un tendón subsecuente del mismo perfil resultaría en las mismas elongaciones para aquel tendón. Sin embargo, también se deduce que el acortamiento elástico causado por el esforzado de un segundo tendón reduce la fuerza efectiva en el primer tendón. Tal reducción también ocurre por el efecto de todos los tendones esforzados subsecuentes después de los anteriores. El efecto de tal post-tensionado por etapas es normalmente tomado en cuenta por el Diseñador durante el diseño del puente. El diseñador deberá considerar los efectos del acortamiento elástico en el diseño de las fuerzas de post-tensionado.

3.1.2.2. Ejemplo 2 – Tendón Externo Desviado en el Tramo Final

Considerar el tendón externo en el tramo final de un puente típico tramo-por-tramo (Figura 3-4). En este caso, el tendón es esforzado sólo desde un extremo (extremo derecho). Es necesario calcular la fuerza anticipada en el tendón luego del esforzado, la elongación y el efecto del wedge-set.

La fricción entre el tendón y el ducto pueden sólo ocurrir en desviadores y en aquellas porciones del ducto en los diafragmas de los pilares o segmentos junta de expansión donde la ruta del tendón (tendon path) se curva al anclaje. En este ejemplo, hay una curva en el extremo muerto solamente y ninguno en el extremo esforzado. La fricción de la curvatura, μ , se aplica en los desviadores (deviators) y en el diafragma externo muerto (dead end diaphragm). No hay pérdidas debido al tambaleo en los tendones externos, de modo que $k = \text{cero}$.



Curved portions (steel pipe) at BC, DE, FGH

$$\theta_F = \theta_E = 0.1085 \text{ rad}$$

$$\theta_B = 0.0759 \text{ rad}$$

Angles θ_F θ_E θ_B are calculated allowing for vertical and out of plane deviation of tendon path

Figura 3-4: Tendón desviado externo en el tramo final.

Para propósitos de cálculo, el tendón es considerado en partes individuales, ya sean externos o internos y la pérdida de la fuerza es calculada de acuerdo a la misma fórmula que se mencionó arriba, ésta es:

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\theta+kx)}$$

Por conveniencia, el cálculo es desarrollado usando una hoja de cálculo (Tabla 3-3). También, por claridad, este ejemplo es mostrado en unidades acostumbradas en los Estados Unidos en este momento. Las fuerzas en cada punto a lo largo del tendón se determinan para la condición justo antes que el jack sea liberado. La elongación total en el gateo es la suma de las elongaciones para cada porción.

El efecto del wedge-set no es tan fácil determinarlo como para un tendón interno continuo del Ejemplo 1. Más bien, es necesario determinar si el efecto del wedge-set termina dentro del primer desviador (BC) o si se extiende al siguiente desviador o más allá. Esto puede realizar primero haciendo la suposición que el efecto del wedge-set termina en el primer desviador y luego se calcula la fuerza que debería existir en las otras porciones del tendón si este fuera el caso, y comparándolo a la fuerza original en gateo antes de la pérdida del wedge-set.

En este ejemplo se encuentra que la fuerza en AB se reduce significativamente desde 835 hasta 761 kips. Se deduce que la fuerza en la porción CD debe ser mayor que aquella en AB peor no puede ser más que aquella debido a la pérdida de fricción a través del desviador BC. Por tanto la fuerza en CD tendría que ser $761 + (835 - 819) = 775$ kips. Pero, ya que la fuerza de gateo original en CD de 819 kips es mayor que 775, se deduce que el desviador BC solo no puede absorber toda la pérdida debido al wedge-set. Por tanto el wedge-set debe también afectar la porción CD.

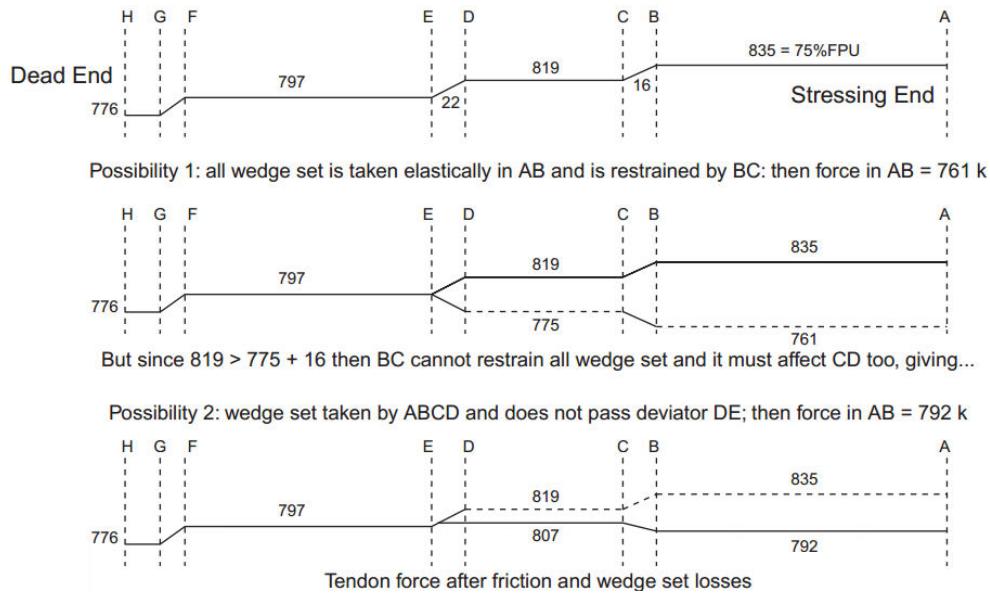


Figura 3-5: Fuerza del tendón exterior luego de la fricción y del wedge-set.

El cálculo es repetido, esta vez asumiendo que el wedge-set termina en el desviador DE. Esta vez, se encuentra que la fuerza en AB es 792 kips y en CD es 807 kips. Ya que la diferencia en la fuerza en las porciones CD y EF (esto es, $807 - 797 = 10$ kips) es menor que la pérdida de fricción original de 22 kips a través del desviador DE, se deduce que el efecto del wedge-set termina en DE. El diagrama de la fuerza final luego de la pérdida de gateo de fricción y wedge-set es entonces conocido (Figura 3-5). En este caso, la fuerza final es casi uniforme (aproximadamente 800 kips) a lo largo del tendón.

3.2. Pruebas del Tendón en el Sitio

3.2.1. Fricción

El propósito de una prueba de fricción es verificar las suposiciones para los coeficientes de fricción y tambaleo. Esta prueba sería apropiada para todas las aplicaciones pero de escala pequeña donde bastaría adoptar valores para la fricción y el tambaleo de otras, previas, experiencias.

Una prueba de fricción es desarrollada normalmente sobre un tendón típico representativo del tipo o grout de los tendones a ser instalados – por ejemplo, en un tendón en una viga principal de varios en el tramo o sobre tal vez dos tendones en voladizo similares en la parte superior de los segmentos prefabricados o vaceados-en-sitio.

Para cualquier tendón, hay dos incógnitas, el coeficiente de fricción (μ) y el de tambaleo (k). Sin embargo, para cualquier prueba montada dada la fuerza es medida en cada extremo del tendón, sólo puede haber una ecuación y un resultado basado en la ecuación de pérdida de fuerza estándar:

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\theta+kx)}$$

En consecuencia, dos incógnitas (μ y k) serán derivadas de la ecuación. Esto no será posible a menos que una de las incógnitas sea ya conocida.

Para un tendón externo en un puente tramo-por-tramo (Figura 3-4) los puntos de curvatura son relativamente discretos y los ángulos consumados son conocidos. En las partes rectas no hay tambaleo. De modo que en tal caso, siempre que los ductos de tubo de acero pre-curvados en los diafragmas del pilar y los sillines desviadores hayan sido correctamente instalados, luego puede asumirse que $k = 0$. Así una prueba sobre este tipo de tendón deberá proporcionar un resultado razonable para el coeficiente efectivo de fricción, μ , entre el tendón y los tubos de acero.

Para un tendón en la parte superior de un voladizo segmental prefabricado o vaceado-en-sitio (Figura 3-6), generalmente es alineamiento es relativamente, pero no completamente, recto entre dos curvas en cada extremo del anclaje. Si el ducto para este tipo de tendón ha sido cuidadosamente y bien instalado de modo que no existe tambaleo, entonces puede asumirse que $k = 0$ y una prueba deberá proporcionar un resultado razonable para μ .

De otro lado, si hay incertidumbre en cuanto a cómo un ducto ha sido instalado o si se conoce que tiene tambaleo involuntario significativo, es necesario hacer una prueba en cuanto a la proporción adecuada de pérdida debido a la fricción y pérdidas debidas al tambaleo. Se sugiere que el coeficiente de tambaleo sea tomado como para el valor asumido para “ k ” – y usar el resultado de la prueba para dar “ μ ”.

Un enfoque alternativo para determinar ambos coeficientes μ y k sería desarrollar la prueba de fricción en dos similares tendones en voladizo – uno corto y el otro largo. Asumiendo que los tendones están instalados con los mismos materiales y estándar de cuidado, esto proporcionaría dos resultados independientes (esto es, dos ecuaciones) que podrían resolverse simultáneamente para μ y k .

En cualquier caso, se recomienda que cada de fricción se desarrolle en al menos dos, muy similares o idénticos, tendones – de la misma longitud y disposición de curvatura – por ejemplo, en un voladizo segmental, un tendón sobre el alma izquierda y su contraparte sobre el alma derecha. El promedio de los pares representa un resultado (esto es, una ecuación). En una viga principal-I con un perfil de tendón drapeado, las dos pruebas podrían desarrollarse en dos tendones muy similares en la misma viga principal o el mismo perfil del tendón en dos vigas principales paralelas – donde nuevamente, el promedio de las dos representará un resultado (ecuación).

En general, la prueba de fricción da probablemente resultados razonables sólo en tendones relativamente largos (sobre alrededor de 30 m (100 pies)) ya que es necesario medir ambas fuerzas y elongaciones bajo cargas incrementales a un nivel suficiente de precisión. Por esta razón, una prueba de fricción en el sitio no es apropiada para algunas aplicaciones tales como, tendones longitudinal y transversalmente rectos en ductos “planos-ovalados” o similares en losas prefabricadas con agujeros o tendones de losas de tableros transversales en segmentos prefabricados o vaceados-en-sitio.

Es usual probar un mínimo de un tendón en un grupo de tendones desarrollando la misma función – ejemplo, un tendón en cada alma de un cajón de dos almas. La función del tendón puede generalmente describirse como:

- Tendón de voladizo interno o tendón de continuidad (ejemplo, en segmentos prefabricados o cip).
- Tendón drapeado (desviado) externo (ejemplo, en la construcción tramo-por-tramo).
- Tendón interno perfilado (drapeado) (ejemplo, vigas principales-l y cajones cip).

Los tendones seleccionados deberán representar el tamaño general (que es el número de torones) y longitud. Es recomendable que los grupos de pruebas de fricción se identifiquen en los Planos de Ejecución para aprobación.

El procedimiento de la prueba es tensionar el tendón en un anclaje ensamblado y medir la fuerza en el extremo muerto usando una célula de carga o jack calibrado. El tendón deberá ser tensionado al 80% del último en incrementos no menores del 20%. Por cada incremento, la presión manométrica en el extremo gateado, la fuerza de la célula de carga (o jack) en el extremo muerto y la elongación en el extremo de gateo deberá ser registrado. También, anotar el tirón de la cuña en ambos extremos. Tomar en cuenta la pérdida de fuerza debido a la fricción en los anclajes y placas de cuña así como los torones desviados ligeramente a través de ellos y cualquier fricción en el jack. El fabricante del sistema de post-tensionado deberá ser capaz de proporcionar porcentajes estimados para estas pérdidas. Para tendones muy largos que requieren el halado de múltiples jacks, es esencial mantener una cuenta exacta de la elongación en el extremo de gateo y en cada wedge-set intermedio correspondiente (tirón).

Si las cuñas no están instaladas, y si el equipo de gateo disponible puede facilitarlo, las fuerzas y elongaciones medidas mientras se libera gradualmente la carga de gateo deberá revelar un desfase o histéresis como resultado del efecto inverso de la fricción (Figura 3-6). La fuerza y la elongación pueden no retornar inmediatamente a cero debido a los efectos residuales de la fricción.

Cuando se desarrollan las pruebas de fricción, es recomendable que las fuerzas y elongaciones se concilien dentro de una tolerancia del 5% para todos los tendones. La tolerancia del 5% al 7% en el AASHTO LRFD Construction Specifications es para producir elongaciones del tendón – ninguna guía es dada para pruebas de fricción.

Si la elongación total medida es diferente a la elongación anticipada (calculada) por más del 5% entonces las razones para ello deberán ser investigadas. Puede ser necesario realizar cálculos más detallados o correr una prueba similar sobre otro tendón. Se sugiere que los valores asumidos para la fricción (μ) y el tambaleo (k) no varíen por más del 10% cuando se trata de conciliar los resultados medidos y anticipados.

Un déficit significativo en la elongación es indicativo de alineamientos del ducto pobres o de obstrucciones. La causa más probable deberá examinarse y tomarse las medidas correctivas apropiadas.

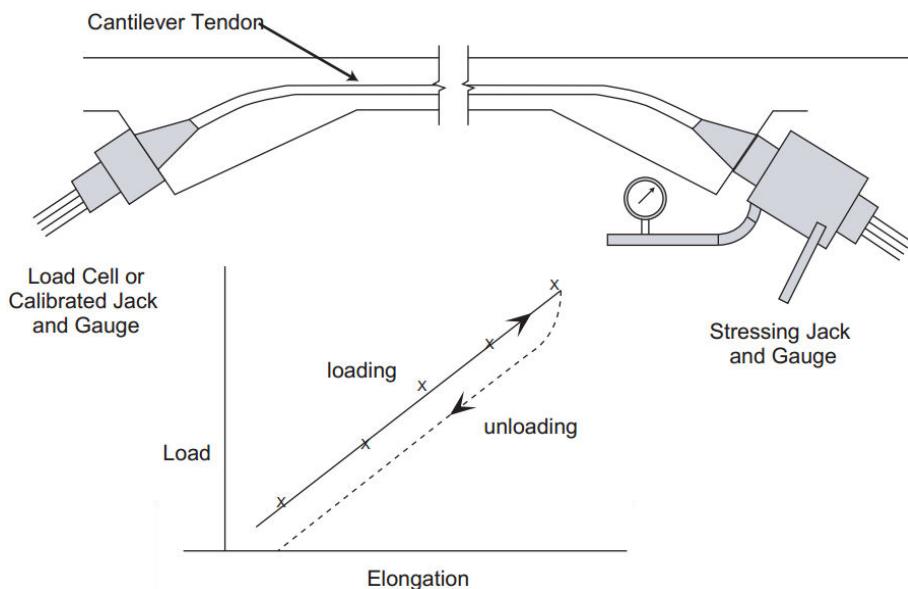


Figura 3-6: Prueba de fricción en el sitio.

3.2.2. Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad, E , es proporcionado por la bobina del torón, o paquete de barras por cada uno de los muchos fabricantes. Esto es derivado del proceso de pruebas de calidad desarrolladas por el fabricante como parte de su control de calidad del torón, o barra, o producción.

El módulo de elasticidad para un torón individual es generalmente alrededor de 193 a 200 GPa (28000 a 29000 ksi). Hay una escuela que piensa que el módulo de elasticidad efectivo de un paquete de torones que componen un tendón multi-torón puede ser ligeramente menor que aquel de un torón individual debido al efecto del paquete o el “desembalaje”, cualquiera, cuando los torones son esforzados. Esto no es necesariamente así. En algunos bancos de prueba desarrollados en una longitud calibrada aproximada de 9 m (30 pies) sin contacto entre el tendón y el ducto, el módulo del grupo de torones demostró ser el mismo como aquel de un torón individual una vez que se hizo la asignación adecuada para las pérdidas en el jack y los anclajes. Por tanto es recomendable que los cálculos de elongaciones se basen en los valores asumidos apropiadamente o de producción reales para el torón solo. Es también recomendable que cuando se calculen las elongaciones, asignaciones adecuadas se hagan para todos los efectos de pérdida de la fuerza.

Una instalación típica para un banco de pruebas para comprobar el módulo de elasticidad de un tendón de un paquete de torones es ilustrado en la Figura 3-7, el cual puede usarse como guía si los documentos del proyecto requieren banco de pruebas. Es recomendable que el número, frecuencia y detalles para los bancos de prueba sean propuestos y aprobados en los Planos de Ejecución. Los siguientes números de pruebas se sugieren como guía:

- Para proyectos pequeños aproximadamente con menos de 45 toneladas (100000 libras) de PT: ningún banco de pruebas, disponer que los torones sean del mismo proveedor con copias de certificado de comprobación del módulo del muestreo y pruebas de producción.
- Para proyectos grandes, uno por cada 45 toneladas (100000 libras) de PT: una prueba si es del mismo proveedor o una prueba por cada proveedor.

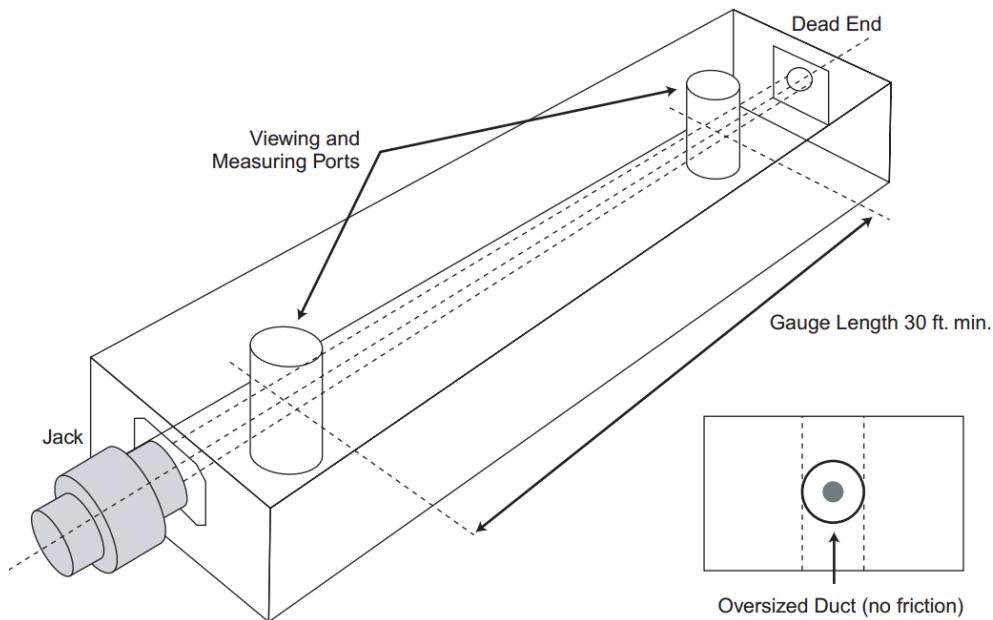


Figura 3-7: Banco de pruebas en sitio para el módulo de elasticidad.

3.3. Anclajes y Componentes del Anclaje

3.3.1. Placa de Apoyo de Anclaje Estándar o Básico

Los anclajes de post-tensionado anteriores para los tendones de torones consistieron de una placa de apoyo de acero simple rectangular o cuadrada soportando una placa de cuña (Figura 3-8). La campana (expansión gradual, flame) del torón es acomodada dentro de un cono o trompeta anexada a la parte posterior de la placa de apoyo. El cono es hecho de láminas de metal galvanizado o de plástico. Hoy en día, estos tipos simples de placas de apoyo han sido ampliamente sustituidos por anclajes multi-planos o sistemas de anclajes especiales compuestos.

Las placas de anclaje básicas son generalmente usadas en concordancia a las fórmulas del AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Las placas de apoyo simples y las planas son aún usadas para los tendones de barras, especialmente para el post-tensionado temporal.

3.3.2. Anclaje Multi-Plano

Los anclajes multi-plano (Figura 3-9) inducen esfuerzos locales de apoyo más grandes que el límite permitido para las placas estándar (placa de apoyo básica). Por lo tanto, los anclajes multi-plano

necesitan refuerzo especial para el confinamiento de la zona de anclaje local. Este es normalmente suministrado por el fabricante del anclaje – generalmente en la forma de un espiral (no mostrado).

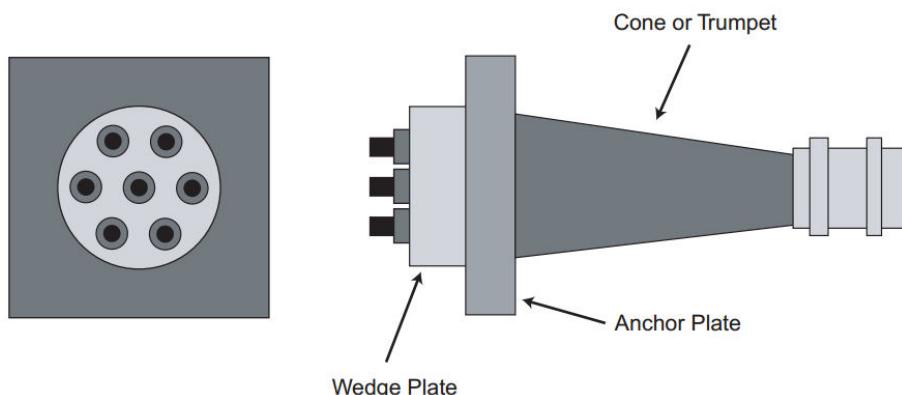


Figura 3-8: Placa de apoyo de anclaje básico.

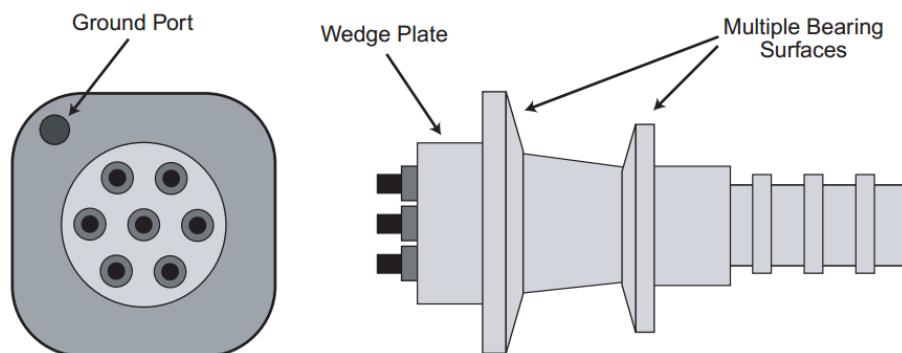


Figura 3-9: Anclaje multi-plano.

3.3.3. Placas de Anclaje Especiales (Compuestas)

Algunos fabricantes han introducido anclajes especiales compuestos. Estos requieren refuerzo de confinamiento especial en la zona local similares a los anclajes multi-plano.

3.3.4. Placas de Anclaje para los Tendones de Barras

Las placas de anclaje para los tendones de barras son generalmente cuadradas o rectangulares (Figura 3-10). Una placa de apoyo separada es usada para cada barra. Otros tipos de anclajes confinados y circulares están también disponibles.

3.3.5. Refuerzo de la Zona Local

Con respecto al tipo de anclaje, es esencial proporcionar refuerzo en la zona de anclaje local – esta es la región directamente detrás de la placa(s) de apoyo de anclaje. Para los tendones de torón longitudinales, mayormente, esto generalmente comprende un espiral (Figura 3-11). Los enlaces tipo grilla o rectangulares pueden usarse en lugar de o para suplementar el refuerzo en espiral. El refuerzo de la zona

local deberá colocarse tan cerca como sea posible (esto es, 12 mm (1/2 plg) máximo) a la placa de anclaje principal en todas las aplicaciones.

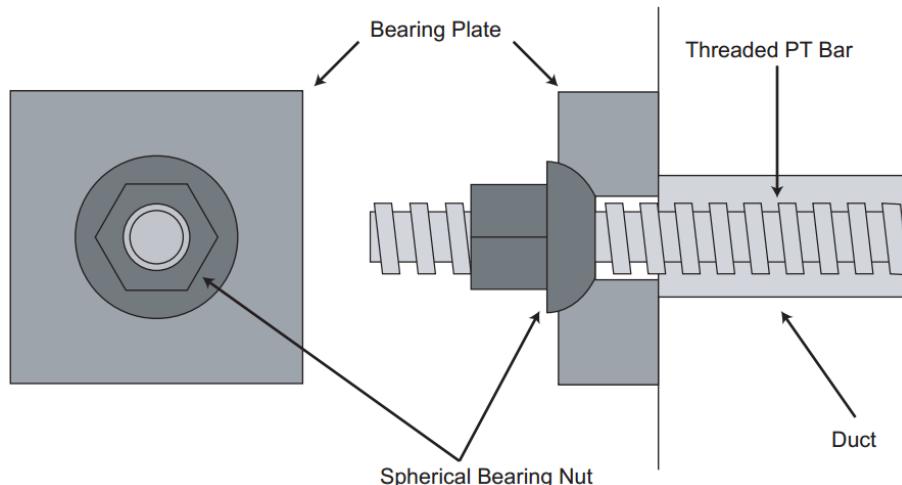


Figura 3-10: Placa de anclaje para la barra-PT.

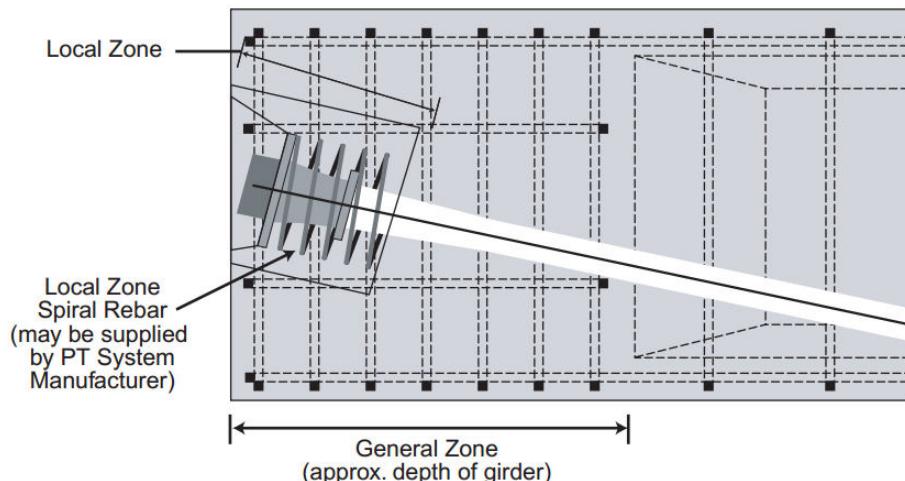


Figura 3-11: Zonas de anclaje local y general en el extremo de una viga principal-I.

Una serie de estribos rectangulares espaciados relativamente cerca es normalmente proporcionada para reforzar la zona de anclaje general (región alrededor y más allá de la zona local) hasta que la fuerza del anclaje local se haya dispersado al peralte efectivo total de la sección. Típicamente, para una viga principal-I, se extiende sobre una longitud aproximadamente igual al peralte de la viga desde el anclaje.

Las zonas de anclaje local para los tendones de las losas del tablero transversales ancladas en el peralte relativamente superficial en el borde de los segmentos son más efectivamente reforzadas por

barras en forma de múltiples-U colocadas en arreglo alternado hacia y hacia abajo, empezando muy cerca a la placa de anclaje (Figura 3-12).

Se ha encontrado que este arreglo es muy efectivo para interceptar grietas potenciales que podrían originarse en la esquina superior o inferior de la placa de apoyo de anclaje y recorren diagonalmente a través de la superficie adyacente – aparte del esfuerzo clásico de corte a lo largo de la línea del tendón mismo.

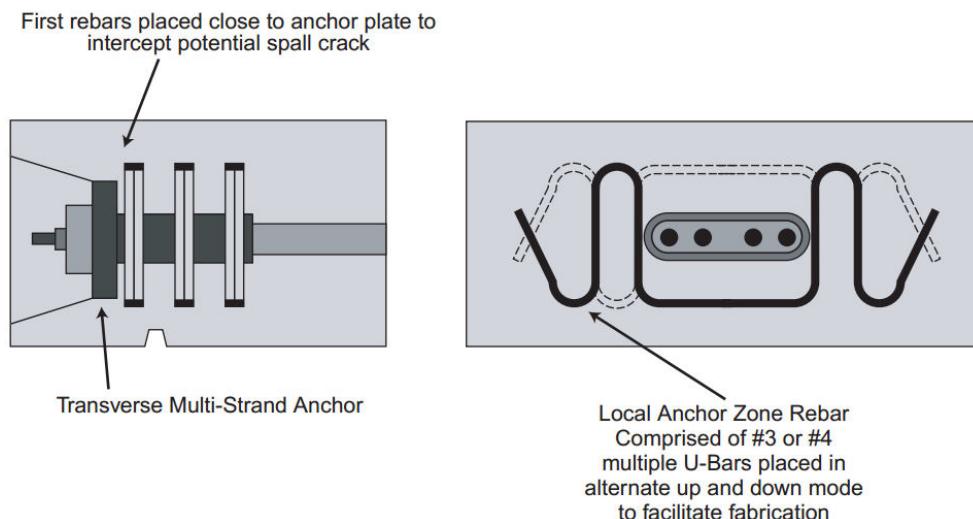


Figura 3-12: Refuerzo de la zona local para el anclaje de borde en losas delgadas.

3.4. Instalación del Ducto

3.4.1. Alineamiento

El alineamiento correcto del ducto y perfil es de primordial importancia para el funcionamiento apropiado de un tendón de post-tensionado, si aquel tendón es interno o externo al concreto. El alineamiento del ducto y perfil debe estar clara y suficientemente definido en los planos y planos de ejecución aprobados por dimensiones a los puntos tangentes, radios, ángulos y offsets a las superficies fijas o líneas de referencia establecidas y por ubicaciones de entrada y salida y ángulos en el anclaje o bulkheads intermedios. El alineamiento, espaciamiento, espacios libres y detalles deberá estar en concordancia con el AASHTO LRFD Specifications 5.10.3.3 a 5.10.4.3.2.

Las recomendaciones generales para la fabricación son que los ductos deberán estar:

- Instalados al correcto perfil (línea y nivel) dentro de las tolerancias especificadas.
- Atados y apropiadamente soportados en intervalos frecuentes.
- Conectados con acopladores sellados positivamente entre piezas del ducto y entre los ductos y anclajes.
- Alineados con acoplares sellados en bulkheads temporales.
- Sellados positivamente en las conexiones hechas en sitio y juntas de empalme vaceadas-en-sitio.

- Las elevaciones y alineamientos de los ductos deberán ser cuidadosamente revisados.

3.4.1.1. Ductos para Tendones Internos: Vigas Principales-I y Construcción Vaceada-en-Sitio

Las recomendaciones para los ductos en concreto en vigas principales-I (Figura 3-13):

- El tamaño máximo permitido del agregado deberá estar especificado.
- La distancia entre el exterior del ducto y el lado del alma deberá ser el adecuado para acomodar el refuerzo vertical y el recubrimiento especificado y proporcionar la sección mínima de concreto para satisfacer los requerimientos de diseño.

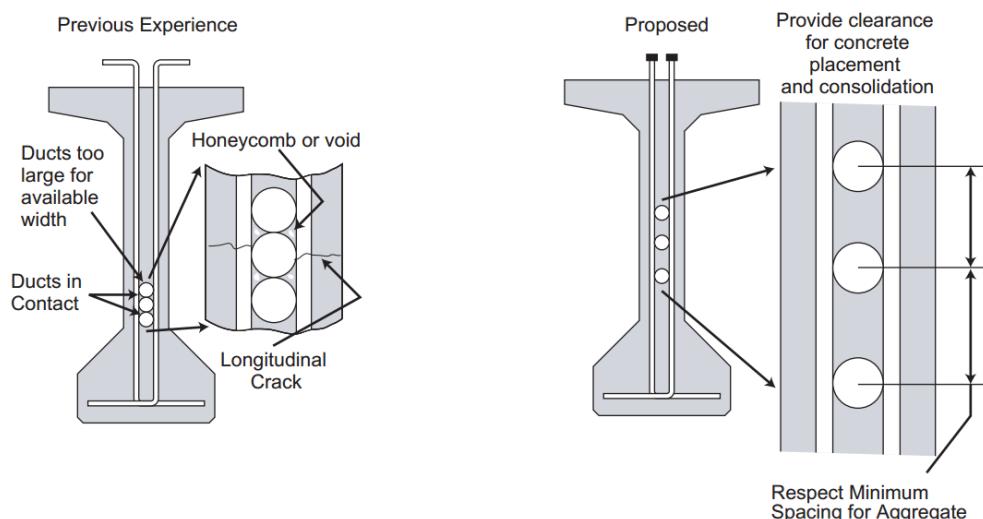


Figura 3-13: Espaciamiento del ducto y espacio libre en vigas principales prefabricadas post-tensionadas.

3.4.1.2. Ductos para Tendones Internos en Segmentos Prefabricados

Además de las recomendaciones generales anteriores los ductos deberán estar:

- Instalados para conectar correctamente la ubicación del ducto en el bulkhead con la ubicación corregida del ducto en el segmento emparejado-vaceado.
- Correctamente alineados con respecto a la orientación del segmento en la célula de vaceado y en la dirección de erección.
- Las elevaciones y alineamientos de los ductos longitudinales y transversales deberán ser cuidadosamente revisados (Figura 3-14).

3.4.1.3. Ductos para Tendones Externos en Segmentos Vaceados-en-Sitio y Prefabricados

Además de las recomendaciones generales anteriores, durante la erección:

- Los ductos deberán tener conexiones de sellado positivo entre el ducto externo y los tubos de acero y entre las longitudes individuales del ducto (la cinta adhesiva no califican como un sello aunque puedan ser usados para propósitos de soporte temporal).
- Cuando se instalan tubos HDPE para conectar con desviadores y tubos diafragma, la instalación deberá revisarse para asegurar que los tendones correctos estén conectados.

- Las juntas entre los segmentos emparejados-vaceados deberán ser apropiadamente preparados y sellados con epóxico necesariamente en concordancia a los requerimientos contractuales específicos del proyecto.

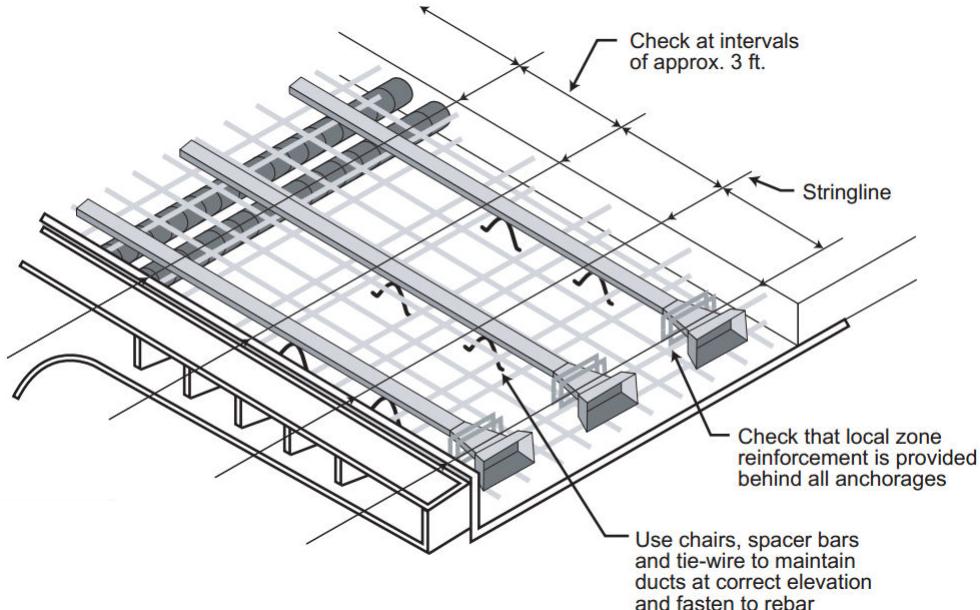


Figura 3-14: Comprobación de los alineamientos de los ductos longitudinal y transversal.

3.4.1.4. Alineamiento en los Anclajes

Tanto para los tendones internos como para los externos, los anclajes deberán ser:

- Del tipo y tamaño correcto para el tipo y tamaño del tendón usado.
- Cuando se requiera, abastecer con cabezales permanentes, de alta resistencia, de plástico con un sello contra la placa de anclaje.
- Alineados correctamente y bien soportados por el falso puente.
- Cuando se requiera, instalar un rebajo (recess) (pocket de anclaje o bloqueador) del tamaño correcto, forma e instalado en orientación.
- Proporcionar con el refuerzo correcto de la zona local y general en la ubicación correcta y espaciamiento.

Algunas veces es necesario comprobar un alineamiento en tres dimensiones desde superficies fijas o líneas de referencia (ejemplo, líneas centrales), por ejemplo, como se indica en la Figura 3-15.

Una buena conexión del ducto a un anclaje deberá hacer un sellado y alinear apropiadamente el ducto con el anclaje. Ejemplos de prácticas pobres y riesgos potenciales son mostrados en la Figura 3-16. Hoy en día, los sistemas comerciales generalmente ofrecen conexiones positivas, selladas y alineadas.

3.4.1.5. Recubrimiento

El recubrimiento es una parte esencial de la protección de corrosión. El recubrimiento deberá comprobarse para el refuerzo y los ductos de post-tensionado longitudinal y transversal.

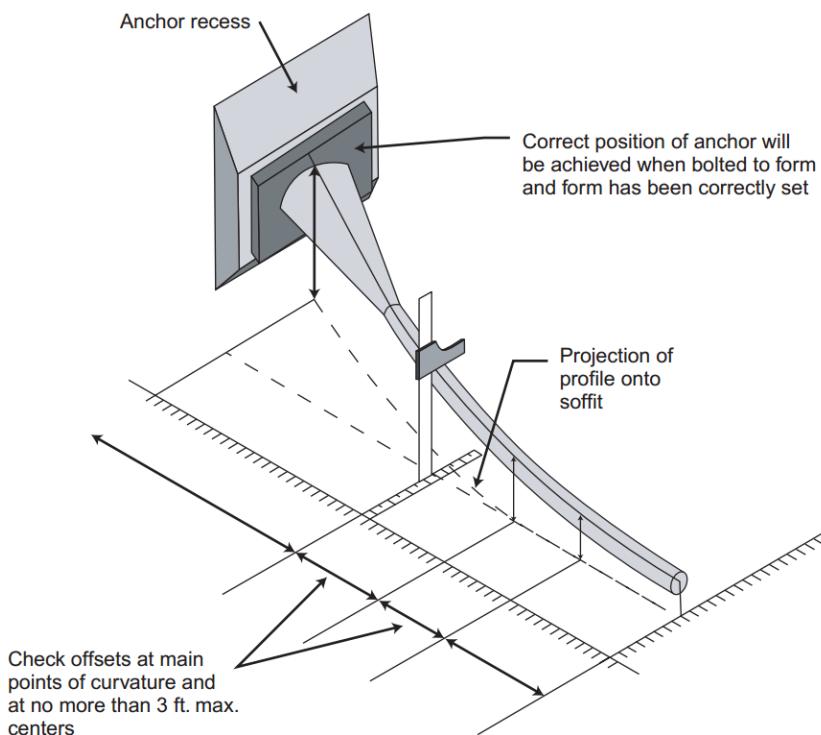


Figura 3-15: Rebajo de anclaje y comprobación de la alineación del ducto.

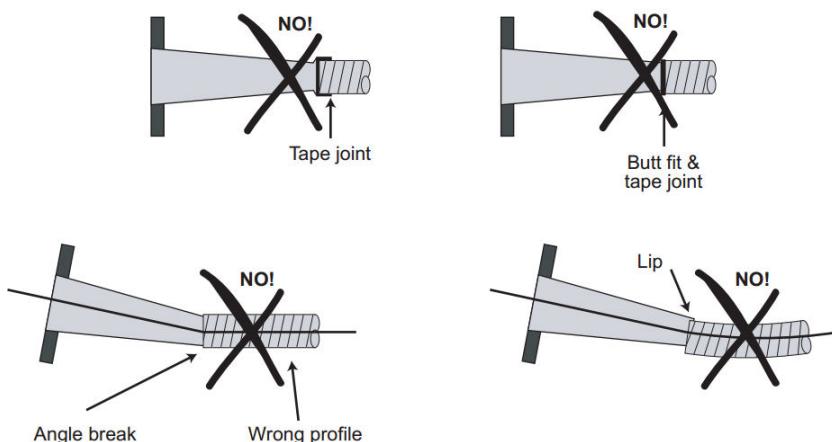


Figura 3-16: Conexiones inaceptables del ducto y errores.

3.4.2. Soportes de Ducto

Con la finalidad de asegurar los ductos de post-tensionado al perfil, prevenir la flotación, o desplazamiento o desconexión, los soportes deberán proporcionarse en intervalos frecuentes (Figura 3-17).

- Los soportes de los ductos deben ser cable de amarre, refuerzo, cable D4 atado al refuerzo del alma, o un dispositivo comercial aprobado. El uso de cable de amarre solo es proporcionado satisfactoriamente ya que no se aprieta tanto como para distorsionar la celda de refuerzo o rizar el ducto.
- Las barras de soporte pueden ser barras de refuerzo rectas, o en forma L, U, Z como sea necesario.

- Los soportes deberán estar en intervalos de más de 0.6 a 1.0 m (2 a 3 pies), o por recomendaciones del proveedor del ducto.
- El recubrimiento mínimo y espacios libres deberán mantenerse.

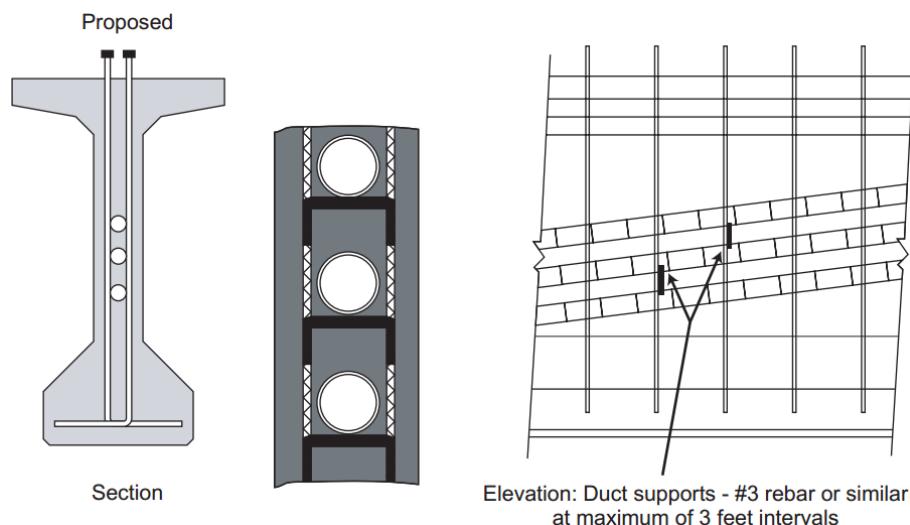


Figura 3-17: Soportes de ducto en vigas principales-I prefabricadas post-tensionadas.

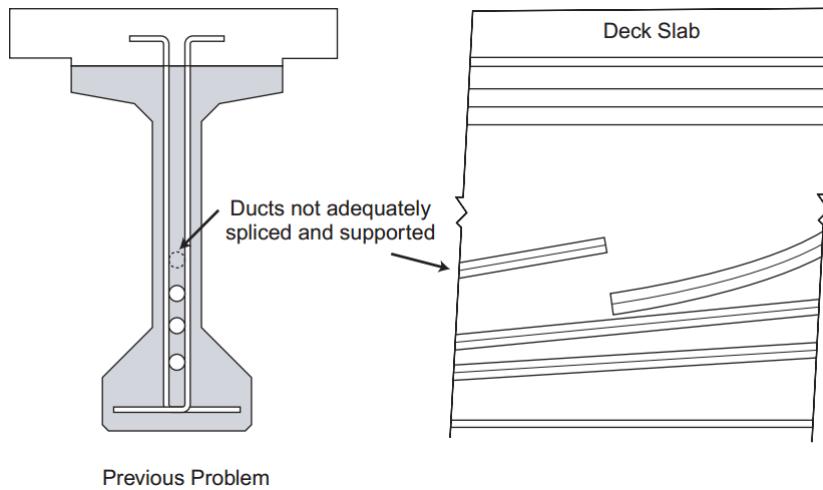


Figura 3-18: Un posible resultado de un ducto pobremente soportado y conectado.

3.4.3. Empalmes y Conexiones

En el pasado, varios métodos fueron usados para conectar piezas separadas del ducto dependiendo del tipo de ducto (ejemplo, enrollado en espiral, semi-rígido o flexible, corrugado o liso, ductos de acero o plástico) y para conectar ductos a los anclajes. A menudo, las conexiones fueron hechas usando una pieza sobredimensionada del mismo ducto envuelto alrededor y asegurado con alambres de amarre o cinta adhesiva. Las conexiones fueron también hechas solamente con cinta adhesiva. Tales conexiones no son selladas. Ellas permiten la migración de humedad o cloruros; posiblemente conduciendo

eventualmente corrosión. La cinta adhesiva no deberá usarse para unir o reparar ductos o hacer conexiones.

Tradicionalmente, los ductos de fierro galvanizado han proporcionado algún grado de protección de sacrificio pasivo. En años recientes, ha habido un cambio a sistemas más robustos que comprenden ductos impermeables de plástico, generalmente de polietileno de alta densidad (high density polyethylene, HDPE) o polipropileno de alta densidad (high density polypropylene, HDPP) con el propósito de hacer conexiones (selladas); generalmente clips conectores de ductos de exterior de plástico firmemente alrededor del ducto.

En consecuencia, es recomendable que las conexiones positivamente selladas se hagan entre los ductos y anclajes y entre piezas separadas del ducto. Es importante estar seguros que los soportes no fallen y que las conexiones no se separen durante el vaceado (Figura 3-18).

3.4.4. Inlets y Outlets de Grout

Es recomendable que la ubicación de los inlets y outlets de grout se muestren en los Planos de Ejecución o en los Planos del Grouting para aprobación. Ejemplos de ubicaciones recomendables para los inlets y outlets de grout son dados en el Capítulo 4.

3.4.5. Tamaño de las Tuberías para Inlets, Outlets y Drenajes (Drains) de Grout

Las tuberías para los respiradores (vents) de los inlets y outlets deberán de suficiente diámetro para permitir el escape de aire, agua, agua de sangrado y el flujo libre del grout.

Las tuberías de grout deberán estar conectadas a los ductos y componentes de anclaje de una manera que cree un sello y no permita fugas o ingreso de agua, cloruros u otros agentes corrosivos.

Para facilitar la inspección y completar el relleno de un tendón con grout, respiradores (vents) de grout en puntos elevados (cretas) pueden salir de la parte superior de la superficie (montando) siempre y cuando el vent del outlet del grout pueda ser tapada y sellada adecuadamente. Alternativamente, el outlet deberá salir de otra superficie disponible. Es recomendable que los cabezales (tapas) y sellos se proporcionen en todos los respiraderos de los inlets y outlets para prevenir el ingreso de agua y agentes corrosivos en el tendón.

3.4.6. Cierres Positivos

Las válvulas de cierre positivo u otros medios aprobados de cierre de los inlets y outlets de grout deberán ser provistas en todos los respiradores.

En los puntos elevados u otras ubicaciones, donde se sospeche que los agujeros de aire o agua podrían acumularse y requieran de llenado secundario asistido por grouting al vacío, conexiones y válvulas adecuadas deberán ser proporcionadas (Figura 3-19).

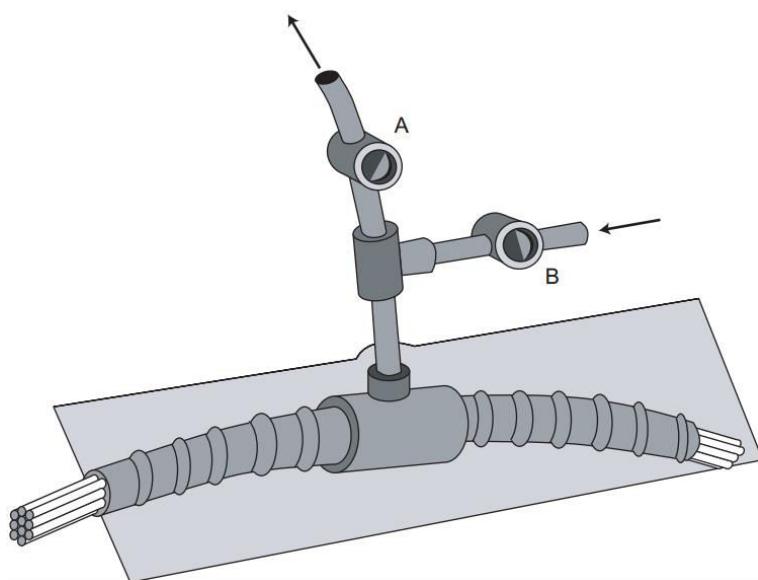


Figura 3-19: Conexiones para operaciones secundarias, grouting al vacío (inyección al vacío).

3.4.7. Protección de los Ductos Durante la Colocación del Concreto

3.4.7.1. Presión del Concreto

El concreto húmedo cuando se descarga en encofrados y se consolida por vibración puede ejercer presión significativa y fuerzas locales en las celdas de refuerzo y en los ductos de post-tensionado. Es esencial que las celdas de refuerzo se aten de forma segura y mantenidas firmemente en el lugar por la cubierta, bloques o sillas espaciadoras. De lo contrario los ductos de post-tensionado deben estar bien soportados y anexados a la celda de refuerzo en intervalos frecuentes.

Los ductos, siendo huecos, tienden a flotar. Un duco que no está bien asegurado puede fácilmente ser desplazado como resultado del tambaleo excesivo (Figura 3-20). Esto afecta la ubicación prevista del tendón de post-tensionado y causa una pérdida de fuerza por exceso de fricción. El resultado es una reducción en la fuerza de post-tensionado y en la excentricidad. En algunos casos, el tambaleo excesivo, o alineamiento del ducto inapropiado (por ejemplo, la Figura 2-21), puede hacer difícil o imposible instalar un tendón.

La presión del concreto mismo es fácilmente resistida por ductos circulares. Los ductos plásticos tipo "plano oval" son rigidizados por nervios corrugados para prevenir el aplastamiento de la presión estática o dinámica del concreto húmedo. Colocar un ducto plano oval verticalmente en un alma ha resultado en deformaciones locales de la pared del ducto, de la colocación y refuerzo del concreto, causando dificultades con los tendones instalados y cangrejeras locales (Figura 3-22). Es recomendable que los ductos circulares se usen en las almas y que suficiente espacio se proporcione para que el concreto fluya entre los ductos.

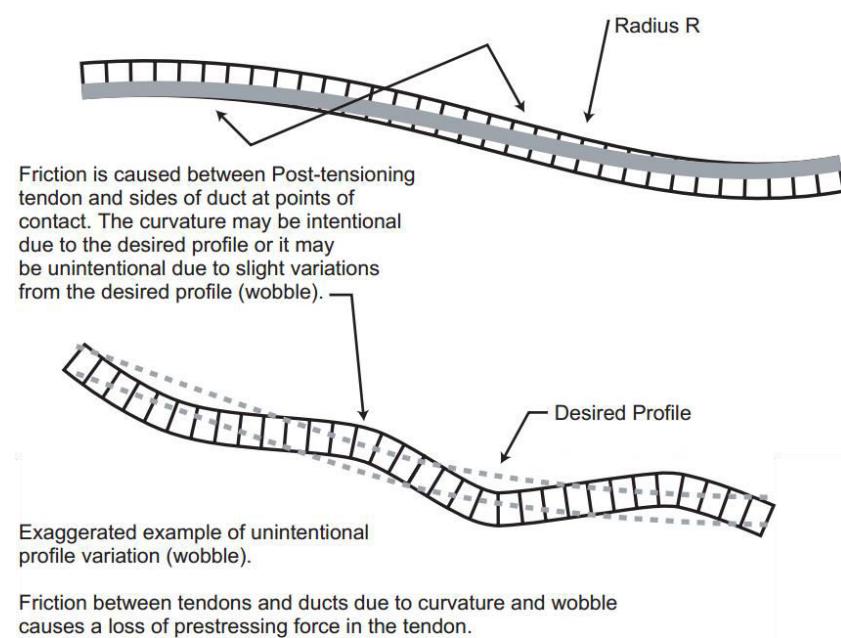


Figura 3-20: Tambaleo excesivo involuntario.

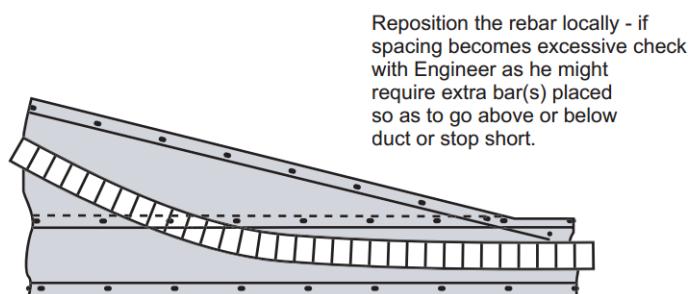
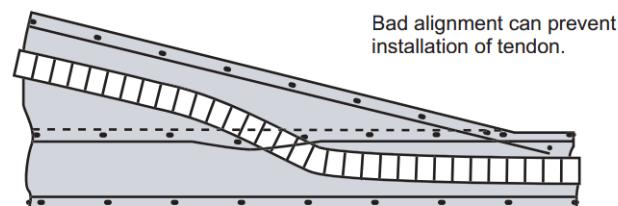


Figura 3-21: Tambaleo excesivo involuntario.

3.4.7.2. Movimiento del Concreto

La descarga y colocación del concreto puede fácilmente desplazar indebidamente los ductos asegurados. Los ductos deberán estar asegurados de forma apropiada y tomarse precauciones cuando se coloque el concreto. La Figura 3-23 muestra un caso donde el concreto fue colocado por debajo de las almas y permitiendo el flujo a través de la losa inferior de un segmento, donde los ductos no fueron bien atados. El concreto desplazó los ductos hacia un lado y condujeron a dificultades significantes con la

instalación del tendón. Muchos soportes de los ductos, en este caso entre el refuerzo superior e inferior de la losa inferior, y un cambio en la secuencia de descarga y colocación solucionará este problema.

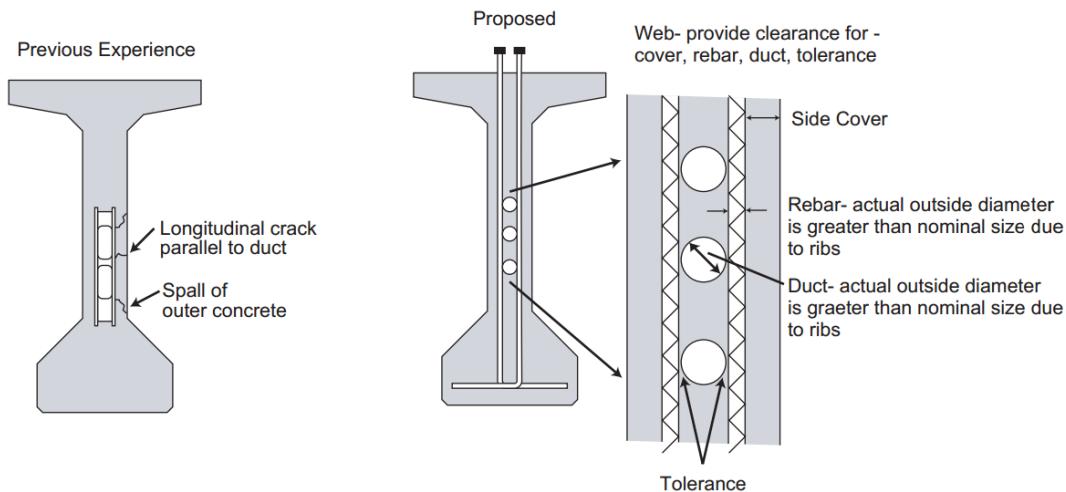


Figura 3-22: Tamaño del ducto en vigas principales post-tensionadas.

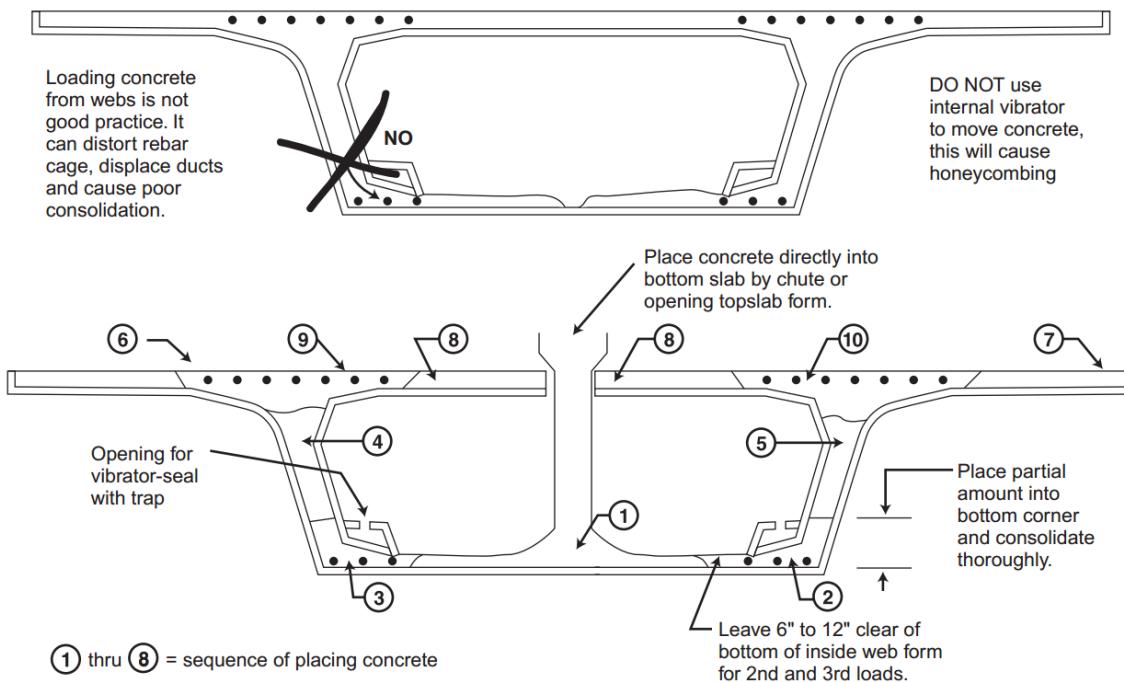


Figura 3-23: Colocación de concreto en los segmentos tipo cajón.

3.4.7.3. Vibración del Concreto

Es práctica común usar vibradores de encofrado para la consolidación del concreto para muchos componentes prefabricados tales como pilotes y vigas principales-I. Los vibradores de encofrado externos pueden usarse en las células de vaceado para los segmentos prefabricados. Sin embargo la mayoría de los

vibradores internos para la construcción vaceada-en-sitio, y algunos prefabricados son necesarios generalmente.

Los vibradores pueden desplazar los ductos cuando no están correctamente asegurados. También, el uso agresivo o inapropiado de los vibradores internos puede conducir a deformaciones locales del ducto o daño. Se debe tener cuidado. Colocar el concreto en elevadores relativamente pequeños de sólo dos o tres pies y permitir vibradores internos sólo para penetrar lo suficiente para consolidar los elevadores. Tener cuidado en no tener un vibrador permanentemente alojado en la celda de refuerzo (Figura 3-24).

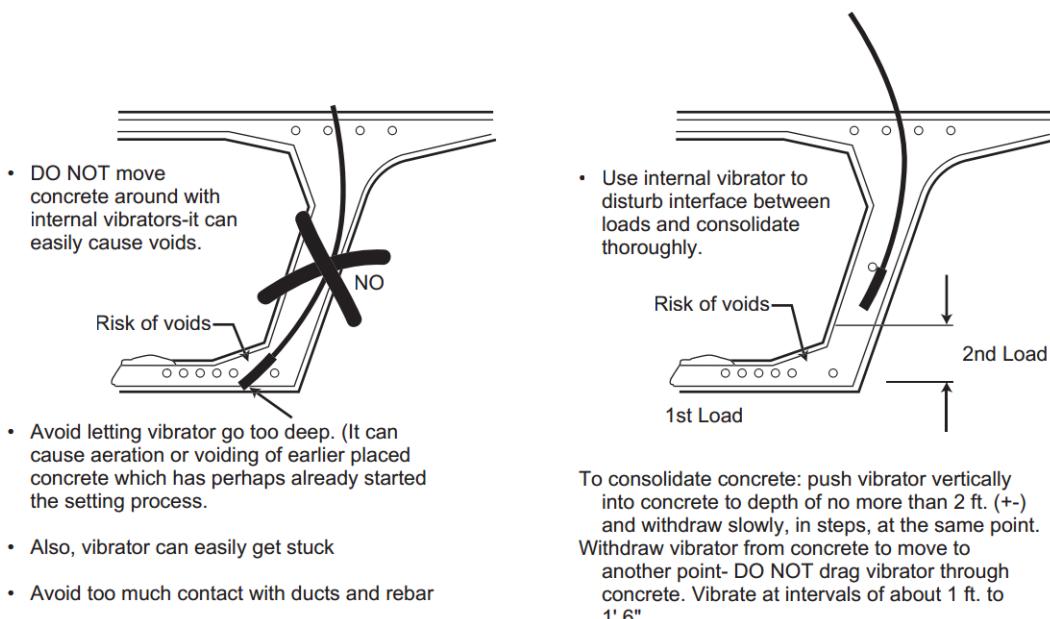


Figura 3-24: Uso de los vibradores internos para consolidar el concreto.

3.4.8. Protección de los Ductos Luego de la Colocación del Concreto

Para prevenir de la contaminación innecesaria y no deseada de los ductos en el periodo desde el vaceado hasta la instalación de los tendones, es altamente recomendable que se implementen medidas de protección adecuadas. Por ejemplo, cubrir o tapar temporalmente los extremos abiertos de los ductos o instalar cabezales temporales sobre los anclajes para prevenir la entrada de agua y bichos en ellos. Los agujeros de drenaje en la parte inferior de los ductos deberán ser dejados abiertos con tubos de grout apuntando hacia abajo para drenar libremente cualquier agua de lluvia o condensación. Los respiradores de grout (vents) en puntos elevados y los anclajes deberán ser cerrados temporalmente. Las áreas de las caras de los componentes tales como los segmentos prefabricados con múltiples aberturas para ductos pueden ser cubiertos con láminas de plástico adecuadas de alta resistencia. Todas las medidas temporales deberán revisarse periódicamente, particularmente si el trabajo está finalizado parcialmente o los componentes están almacenados por períodos prolongados.

Las precauciones relativamente simples valen la pena comparadas a los inconvenientes y costos potenciales de reparación como consecuencia del bloqueo de los ductos. También, es mucho más preferible mantener el agua fuera de los ductos que tener que removerlo antes del grouting. El exceso de agua diluye el grout y puede conducir al sangrado y agujeros del grout los que, a su vez, pueden facilitar la corrosión. Rellenar los agujeros del grout luego que el grout fue colocado, es difícil y puede requerir grouting especial al vacío (inyecciones al vacío), el cual es costoso. Una pequeña prevención es mucha más valiosa que la cura.

3.5. Instalación del Tendón

3.5.1. Tipos de Tendón

Los tendones principales longitudinales, internos o externos colocados en un perfil curvado o drapeado son generalmente hechos de múltiples torones de siete cables, con diámetros de 12 o 15 mm (0.5 o 0.6 plg). El número de torones por tendón depende del rango del anclaje y el accesorio de la placa de la cuña disponible para aquel sistema.

Torones similares son usados para los tendones transversales de las losas de los tableros de los segmentos vaceados-en-sitio o prefabricados – pero sólo tres de cuatro torones son puestos lado-a-lado en un ducto drapeado oval aplanado para un perfil muy superficial. Ocionalmente, los tendones de barras rectas pueden usarse transversalmente.

Las barras de post-tensionado son más usadas a menudo para aplicaciones temporales; erección de segmentos prefabricados, asegurar equipos de erección tales como los gantrys y encofrados móviles. Las barras son mucho más costosas que los torones para una fuerza de post-tensionada dada, principalmente debido al costo de las placas de anclaje, tuercas y acopladores. El re-uso es apropiado y económico para trabajos temporales, siempre que el esfuerzo no exceda más de alrededor del 50% del GUTS y el número de re-usos es limitado normalmente a diez; o como de otra manera lo recomienda el fabricante. Para la instalación, las barras de post-tensionado se colocan generalmente a través de ductos rectos de suficiente diámetro para proporcionar adecuada tolerancia para la construcción (2.3.1.2).

3.5.2. Comprobación de los Ductos Internos de Post-Tensionado

Antes de instalar los tendones internos, es recomendable que los ductos se demuestren que están libres de daño y de obstrucciones pasando un torpedo de tamaño apropiado a través de los ductos. El torpedo deberá tener la misma forma de la sección transversal como el ducto pero 6 mm (1/4 plg) más pequeño en todas las dimensiones interiores alrededor del espacio libre del ducto y deberá tener extremos redondeados. Para los ductos rectos el torpedo deberá ser alrededor de 0.6 m (2 pies) de largo. Para ductos claramente curvos, la longitud deberá ser tal que cuando ambos extremos toquen la pared externa, el torpedo esté al menos a 6 mm (1/4 plg) de la pared interior, pero no necesariamente mayor que 0.6 m (2

pies). Un ducto deberá ser satisfactorio si el torpedo puede jalarse fácilmente a mano sin esfuerzo excesivo o asistencia mecánica.

Para orientación, es recomendable que esta prueba se desarrolle en cada tendón individual en una viga principal prefabricada o componente similar, antes que sea liberado de la planta de fundición. Para toda la construcción vaceada-en-sitio, con tendones internos, esta prueba se haría en el sitio. Para los tendones internos en los segmentos prefabricados, esta prueba se haría en el sitio luego de la erección. Probar los ductos con un torpedo es recomendable para todos los tendones longitudinales internos sobre aproximadamente 15 m (50 pies) de largo y pueden ser usados, cuando sea necesario, para tendones cortos o como sea requerido por los documentos específicos del contrato. Esta revisión no es necesaria para los tendones transversales en las losas de los segmentos prefabricados cuando los tendones son instalados en la planta de fundición. No es necesario para las longitudes cortas de los tendones longitudinales internos en los segmentos prefabricados mientras se almacenen.

3.5.3. Métodos de Instalación

Los torones de post-tensionado pueden ser presionados o jalarse a través de los ductos para hacer un tendón. El presionar debe hacerse con cuidado usando un cabezal plástico de protección proporcionado por el abastecedor del sistema PT, de modo que no quede atrapado o dañe el ducto. Presionar torones simples en un ducto que ya contiene muchos torones puede ser difícil cuando el ducto está lleno con más torones.

Algunas veces puede ser fácil jalar el paquete entero todo junto usando un calcetín especial de alambre de acero u otro dispositivo anexado de forma segura al extremo del paquete (bundle), Figura 3-25. Los torones soldados juntos con un “ojo de halado” (pulling eye) no son recomendados porque el calor de la soldadura altera las propiedades del acero y reduce su resistencia incluso cuando se pierdan unos pies.

Para el post-tensionado transversal en las losas de los tableros, algunas veces el Contratista puede desear colocar los torones en los ductos antes del hormigonado para proporcionar rigidez extra. Si esto se realiza, los torones transversales deberán revisarse para ver que ellos puedan moverse en los ductos luego del vaceado, con la finalidad de asegurar que ellos estén realmente libres antes que sean esforzados.

En todo caso, si los torones son colocados en ductos antes del vaceado del concreto, el tiempo para completar el esforzado y grouting comienza desde el momento que los tendones son colocados en el ducto.

3.5.4. Entornos Agresivos

Para entornos agresivos, cuando los ductos pueden estar contaminados con cloruros, pueden requerir enjuague antes de instalar los tendones. Sólo agua limpia deberá usarse para el enjuague. Los ductos deberán ser bien drenados. Toda el agua deberá removese antes del grouting. Si es necesario, el

agua de enjuague debe soplarse fuera de los ductos antes de instalar los tendones, usando aire comprimido seco libre de grasas.



Figura 3-25: Calcetín de alambre de acero para instalar tendones multi-torón.

3.5.5. Tiempo para el Grouting y Protección del Tendón Temporal

El tiempo entre la primera instalación del acero de pretensado en el ducto y la finalización de las operaciones de esforzado y grouting no deberá exceder las recomendaciones del AASHTO LRFD Construction Specifications.

Cualquier corrosión ligera de la superficie formada durante este periodo de tiempo no será suficiente para rechazar el acero de pretensado. Sin embargo, a menos que sea aprobado por el Ingeniero, fallar en “engrutar” los tendones dentro del tiempo límite podría ser razón suficiente para parar el trabajo hasta que los problemas sean resueltos.

El uso de aceite soluble en agua para reducir la fricción para la instalación y esforzado o para la protección temporal a la corrosión de un tendón instalado, no se recomienda ya que ha demostrado que reduce la adherencia. Además, puede nunca ser removido satisfactoriamente de los torones y ductos y cualquier residuo de agua en los ductos estropea el grout, conduciendo a un excesivo sangrado, agujeros de grout y posible corrosión.

Los extremos de los tendones deberán protegerse por revestimientos hasta que se apruebe el corte de las colas de los torones esforzados luego que se haya obtenido el esforzado satisfactorio, por el CEI.

3.6. Jacks y Otros Equipos de Esforzado

3.6.1. Comportamiento a Corto y Largo Plazo

3.6.1.1. Jacks Mono-Torón

Los jacks para esforzar torones simples (mono) generalmente tienen dos cilindros, uno a cada lado del torón, con un dispositivo de cuña para atrapar y jalar el torón (Figura 3-26).

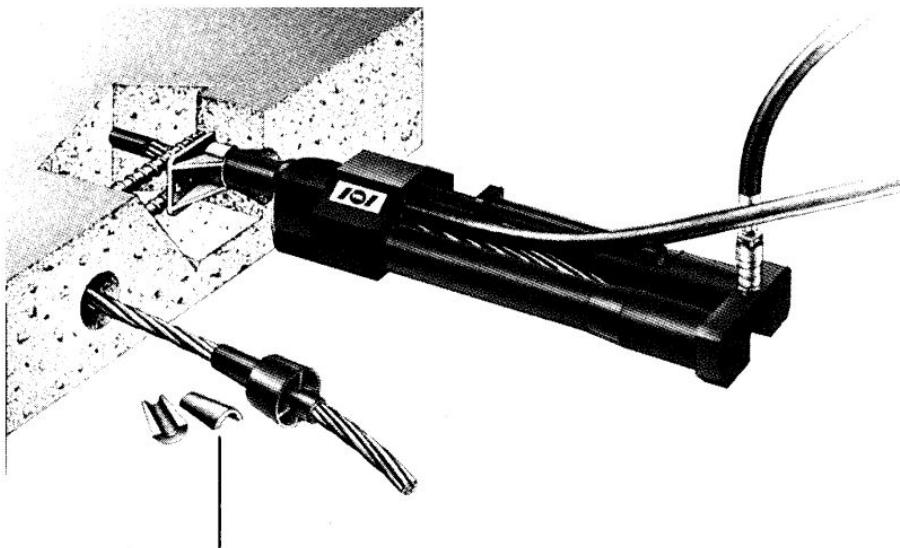


Figura 3-26: Jack monotorón (Cortesía de VSL Corporation).

Los tendones mono-torón a menudo son usados en edificios, donde cada tendon es un torón simple en su propio ducto. En puentes, los jacks mono-torón son usados normalmente para esforzar los torones transversales, generalmente comprenden 3 o 4 torones, en losas del tablero o aplicaciones similares. También, los mono-torón son a menudo usados para la reparación o rehabilitación.

Ocasionalmente, los tendones longitudinales multi-torón pueden esforzarse un torón a la vez, aunque esto es generalmente sólo práctico cuando cada torón está claramente identificable en cada extremo y no hay riesgo de atrapar un torón subyacente en el proceso.

3.6.1.2. Jacks Multi-Torón

Los tendones post-tensionado multi-torón son generalmente esforzados como un grupo entero, usando jacks hechos por encargo muy grandes. Esto asegura que todos los torones son tensionados juntos y evitando el riesgo de atrapar un tendon individual. Los jacks de esforzado son generalmente del tipo agujero central (center-hole) – esto es, los tendones pasan a través de un agujero en el medio y son anexados en el lado posterior del jack (Figura 3-27).

Los jacks de pretensado deben ser muy precisos – lo que es difícil de alcanzar. Los jacks de esforzado tienen más superficie de desgaste y de empaque que un jack convencional de la misma capacidad. Esto, la necesidad de una jack de carrera larga, aumenta el potencial para las variaciones en la precisión de la fuerza aplicada. Otros factores que afectan la precisión y eficiencia de los jacks de esforzado son: el uso de aceite sucio, exposición del sistema al polvo y arena, carga excéntrica, tipo de empaque,

posición del ram (espolón), temperatura del aceite, válvulas hidráulicas, mantenimiento del ram y del empaque, y equipo de lectura.

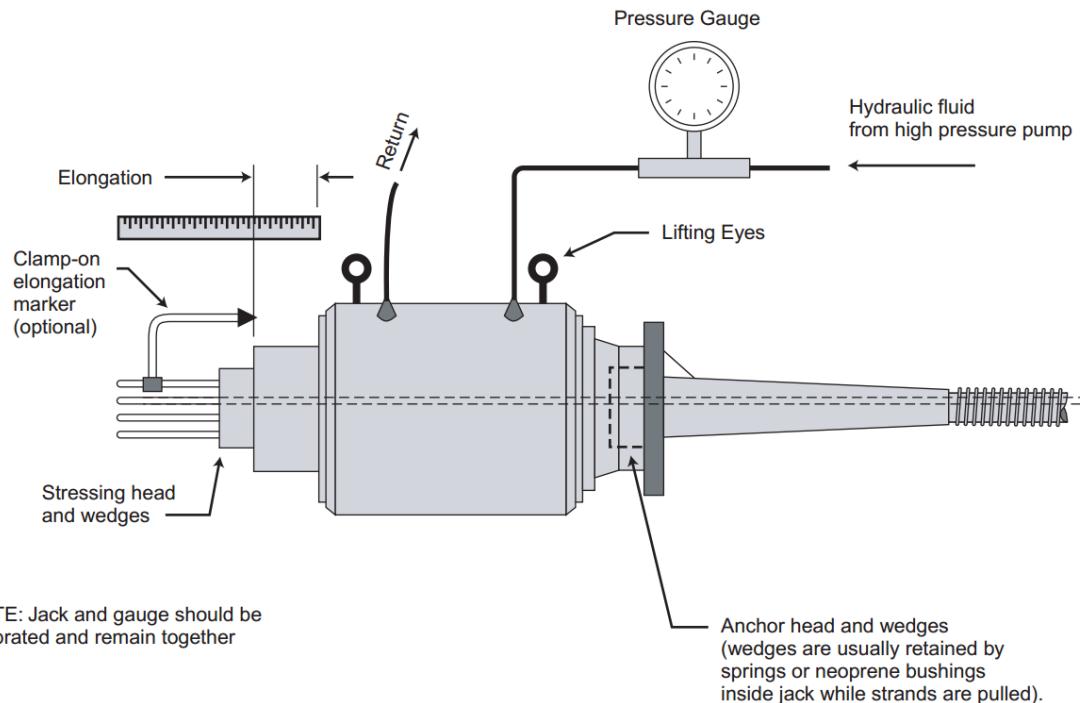


Figura 3-27: Típico jack de esforzado multi-torón, de agujero central.

Otro efecto es la histéresis. La histéresis es una pérdida de energía debido al cambio de la presión hidráulica al interior del jack, causando valores de carga imprecisos cuando la presión del ram es estática o en decreciente. Un aumento de la presión hidráulica también causa una pérdida de energía, pero esta pérdida es tomada en cuenta en la calibración del jack y del dial de presión (pressure gauge) con una célula de carga durante este aumento de presión.

El sistema de gateo deberá estar equipado con un dial de presión que registre la presión del fluido hidráulico de gateo. El dial de presión y el jack deben ser calibrados juntos y mantenerse juntos como una unidad a lo largo de toda la operación de esforzado. Los diales de presión y los jacks no deberán ser intercambiados. Si sucede, entonces el nuevo sistema deberá ser recalibrado antes de usarlo en la producción de esforzado.

Las bombas para el fluido hidráulico enviado deben mantenerse en un buen estado de mantenimiento. Las averías a la mitad de la operación de esforzado son indeseables.

3.6.1.3. Jacks de Barra

Los jacks de barra tienen un agujero central a través del cual la barra pasa y es asegurada por una tuerca en el lado posterior del jack (Figura 3-28). La mayoría de los jacks tienen una nariz ampliada para acomodar un acoplador de barra.

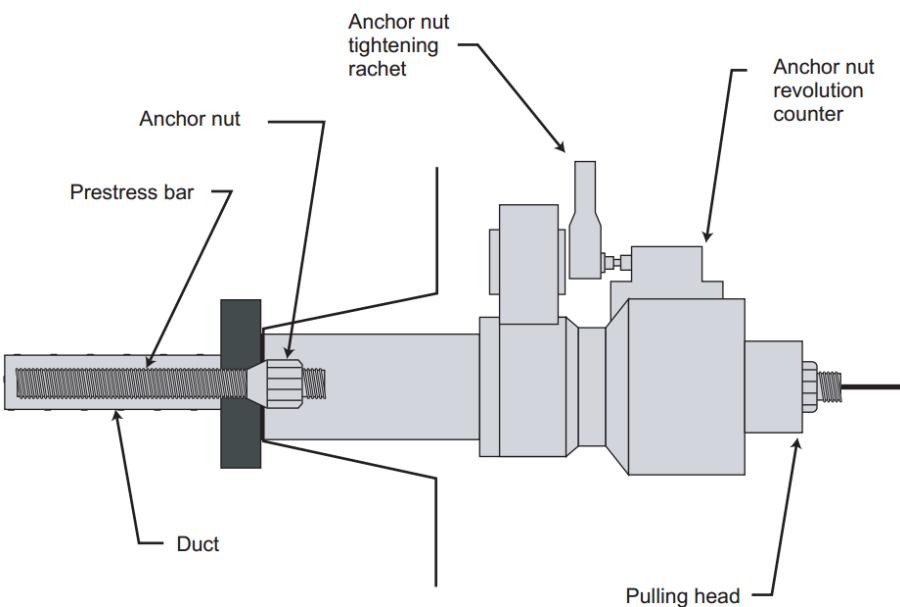


Figura 3-28: Jack de barra pretensada.

También, los jacks de barra tienen un ratched a mano o mecánico para rotar y apretar la tuerca del anclaje contra la placa del anclaje cuando la barra se alargue bajo la carga. Con cuidado, apretando la tuerca del anclaje, la pérdida de asiento puede minimizarse o eliminarse.

3.6.2. Calibración

Los jack deberán ser calibrados cada seis meses como mínimo.

3.6.2.1. Jack y Dial o Medidor

La calibración es muy importante. Este es un proceso donde la carga enviada por el jack hasta un tendón es medida por una célula de carga precisa u otro equipo. Las lecturas del dial de presión del jack son anotadas en contra de las lecturas de la célula local a través de todo el rango del gateo para crear un gráfico de la lectura del dial de presión versus la carga real registrada por la célula de carga. El gráfico sólo se aplica a este jack y combinación de dial en particular – no se aplica a cualquier otro.

Cuando se usa para el esforzado, la fuerza real en el tendón es fácilmente encontrada del dial de presión y gráfico de calibración. En general, los jacks de esforzado son alrededor del noventa y cinco por ciento eficientes; pero la eficiencia real varía dependiendo de la edad y condiciones del jack. Cualquier gráfico de calibración que muestre fuerzas de gateo mucho mayores al noventa y cinco por ciento de presión multiplicada por el área del pistón deberá ser cuestionada.

Con el uso, un sistema jack y dial puede desviarse de la calibración. Así, en proyectos grandes, una célula de carga de calibración se mantiene normalmente en el sitio y el jack y el dial son revisados periódicamente. En proyectos pequeños, el sistema jack y dial deberá calibrarse inmediatamente antes del uso. Esto lo hace a menudo el proveedor del sistema o un laboratorio local aprobado.

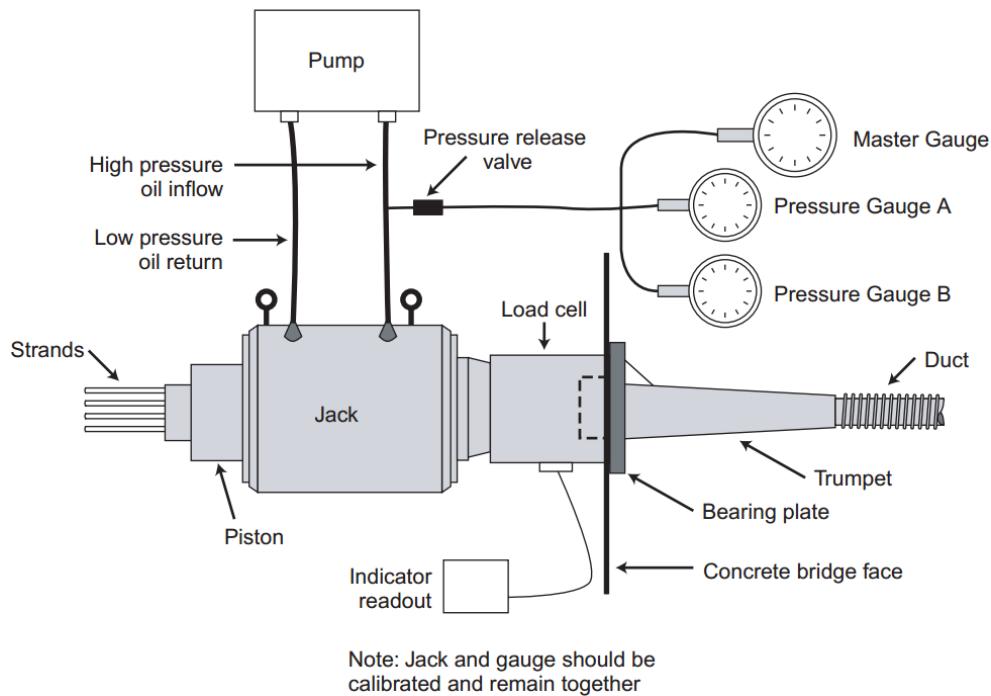


Figura 3-29: Calibración del jack.

La Figura 3-29 muestra la instalación para la calibración del jack. Además para la instalación normal para el esforzado, dos instrumentos son agregados: la célula de carga entre el jack y el anclaje y un dial maestro anexado al dial de presión a ser calibrado. La célula de carga es colocada normalmente en frente del jack, como se muestra. La célula de carga permite una lectura precisa de la fuerza aplicada al tendón de pretensado. Las células de carga son instrumentos de laboratorio que, a su vez, son calibrados con una célula de carga de la “National Bureau of Standards”.

3.6.2.2. Dial Maestro

El dial maestro mide de forma precisa las presiones hidráulicas. La célula de carga opera sobre el principio que la presión cambiante resulta en un cambio correspondiente al cambio en la resistencia eléctrica. Las lecturas se hacen con un, así llamado, Indicador Transductor de Deformación.

Las lecturas del dial no deberán tomarse mientras el ram está retraído o en una condición estática como la histéresis ya que probablemente resultaría en valores erróneos. Las curvas de calibración y las lecturas en el dial maestro son sólo válidas cuando la ram está extendida.

Si hay cualquier indicación de daño al dial, el sistema de esforzado deberá revisarse con el dial maestro. Por esta razón, el dial maestro deberá permanecer cerrado en un lugar seguro de modo que esté siempre en buen estado de funcionamiento. Si existe más del 2% de diferencia entre el dial maestro y el gráfico de calibración, el jack y el dial deberán ser recalibrados. Generalmente el Contratista del esforzado tiene los jacks calibrados con el dial maestro y al menos otro dial (B) como respaldo.

3.6.2.3. Curva de Calibración

Una curva de calibración relaciona la presión registrada por el dial propio del jack a la fuerza real enviada por el jack (Figura 3-30). La curva está establecida por el proceso de calibración mencionado líneas arriba. Puede encontrarse para el dial del jack y el dial maestro. El jack y el dial deben permanecer juntos como una unidad en todo momento mientras se usa con la finalidad de evitar resultados confusos e incorrectos. Periódicamente durante el uso, el jack y el dial deberán comprobarse insertando el dial maestro. La variación significativa desde la curva de calibración sería razón para examinar el sistema del jack.

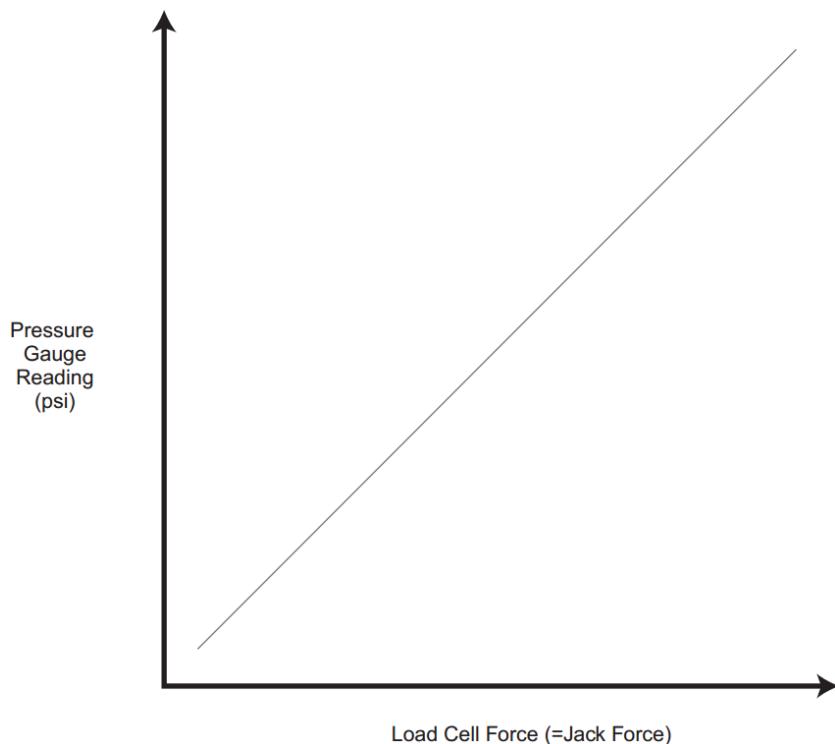


Figura 3-30: Gráfico de calibración para el dial de presión y fuerza del jack.

3.6.2.4. Reparación del Jack

Si un jack necesita reparación, entonces el jack y el dial reparados deberán ser re-calibrados. (Reparar sólo las mangueras no sería razón para re-calibrar).

3.7. Métodos de Gateo (Jacking)

3.7.1. Esforzado de Torones Simples (Mono).

El torón simple esforzado usando un jack mono-torón es práctica normal para los tendones transversales en las losas de los tableros (Apéndice C) donde cada torón yace lado a lado en un ducto plano ovalado donde no pueda interferir o coger otro torón. Similares aplicaciones podrían incluir tendones de torones longitudinales relativamente cortos en placas o sólidas o agujereadas losas prefabricadas.

El torón simple esforzado puede usarse en tendones longitudinales multi-torón sólo si son rectos o curvos en una sola dirección de modo que los torones en el interior de la curva pueda esforzarse antes que aquellos sobre el exterior para evitar atraparlos. Por esta razón, el esforzado del torón simple no está disponible para los tendones multi-torón de curvaturas inversas.

Cuando el multi-torón esforzado es usado para una viga principal de sección pequeña, compensaciones deberán hacerse para la pérdida de acortamiento elástico inducida en los torones esforzados anteriormente por el esforzado de los subsecuentes. Esto deberá tomarse en cuenta en la ingeniería de diseño o construcción del componente.

Las técnicas de esforzado mono-torón están disponibles para torones engrasados y envainados para atirantados y similares, tendones externos, aplicaciones para reparación o rehabilitación.

La secuencia en la cual los tendones son esforzados y los extremos por el cual son esforzados deberán ser mostrados claramente en los Planos del Contrato o Planos de Ejecución aprobados, y deberán seguirse.

3.7.1.1. Esforzado del Torón Simple, Extremo Simple y Extremo Alternado

Cuando el esforzado simple del mono-torón involucra tendones cortos, generalmente sólo es necesario esforzar desde un extremo ya que la pérdida de fricción es pequeña (aunque es necesario el cuidado para estar seguro que la pérdida por wedge-set no sea excesiva en un tendón corto).

Con la finalidad de mantener la dispersión relativamente uniforme del post-tensionado, los tendones transversales en las losas del tablero serán esforzadas desde extremos alternados – esto es, esforzar todos los torones de un tendón desde un lado del puente y cambiar al lado opuesto para el siguiente tendón – y así sucesivamente. Esto puede ser denominado como “Esforzado de Extremos Alternados”. Esto deberá ser sólo necesario en casos especiales (cuando lo determine el Diseñador) para esforzar los torones de un tendón desde extremos alternados.

3.7.1.2. Esforzado del Torón Simple, Dos Extremos

El esforzado de dos extremos significa esforzar el mismo torón desde ambos extremos. Esto puede hacerse secuencialmente, desde un extremo en un momento o simultáneamente usando dos jacks. Sin embargo, el esforzado desde ambos extremos normalmente sólo sería necesario para tendones largos donde la pérdida por fricción es significativa. El esforzado desde el segundo extremo no deberá hacerse si la elongación calculada es menor que la longitud del enganche de la cuña. El re-enganche en una parte de la longitud de enganche vieja deberá evitarse.

3.7.2. Multi-Torón

Los tendones multi-torón es la elección más frecuente para los tendones principales longitudinales en los puentes. Todos los torones de un tendón son tensionados juntos usando un jack multi-torón. La secuencia en el cual los tendones son esforzados y los extremos desde el cual son esforzados

deberán estar claramente indicados en los Planos del Contrato o Planos de Ejecución aprobados y deberán seguirse.

3.7.2.1. Esforzado del Multi-Torón, Extremo Simple y Extremo Alternado

Cuando un tendón multi-torón es esforzado desde un extremo es a menudo denominado como “esforzado simple o de un extremo” para distinguirlo de los tendones esforzados desde ambos extremos. Sin embargo, con un número de tendones similares y a menudo simétricos en una superestructura, que necesitan sólo ser esforzados desde un extremo, es deseable mantener el efecto total del post-tensionado lo más uniforme como sea posible esforzando tendones similares desde extremos alternados de la estructura. Cuando se hace esto a menudo es denominado como “Esforzado de Extremos Alternados” y significa que los tendones son esforzados sólo desde un extremo, pero desde opuestos, alternados, extremos del puente.

La ubicación del jack es cambiada desde un extremo de la estructura al otro de tal forma que un número igual de tendones son esforzados en cada extremo (Figura 3-31). Si el esforzado inicia con T1 en el lado este de la estructura, los tendones T2 y T3 son esforzados desde el lado oeste y T4 nuevamente desde el este.

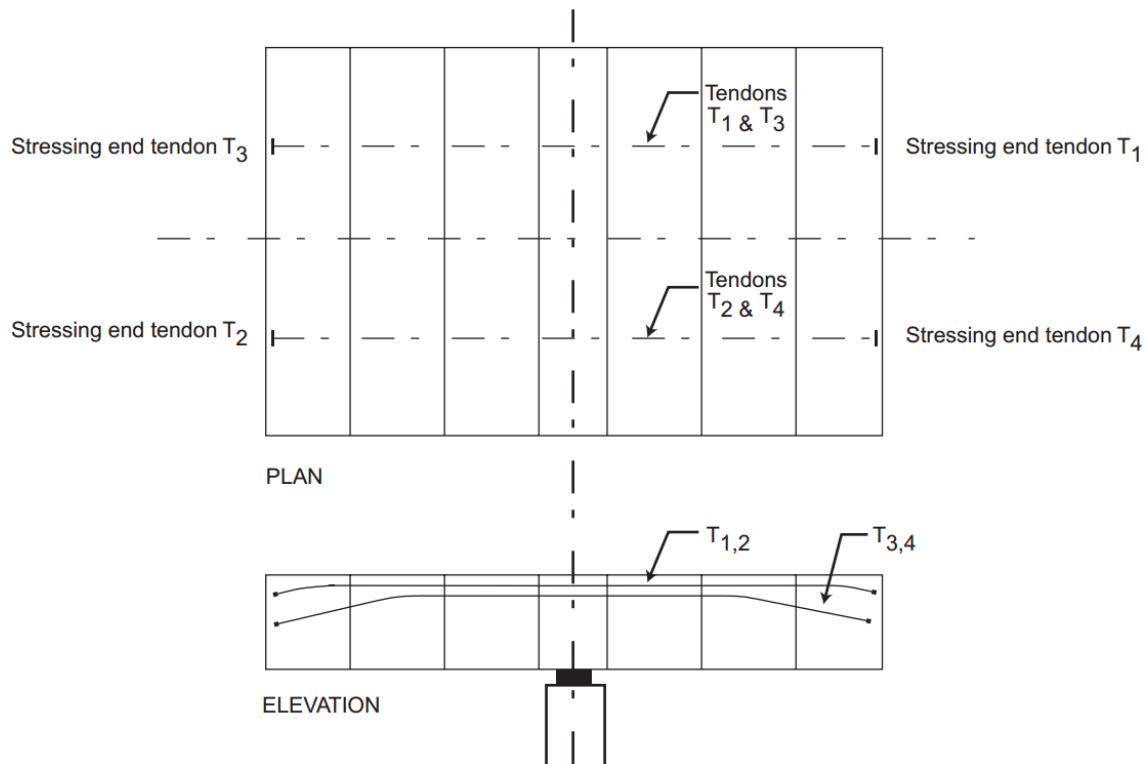


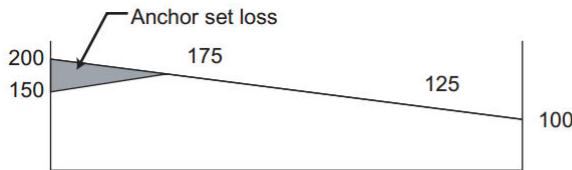
Figura 3-31: Esforzado de extremos alternados.

El esforzado de extremos alternados resulta en una distribución más o menos uniforme sobre la sección. Ya que los tendones son esforzados desde un extremo, sólo las fuerzas en los extremos vivos serán más grandes que las fuerzas en los extremos muertos. Cada tendón individual causa una distribución

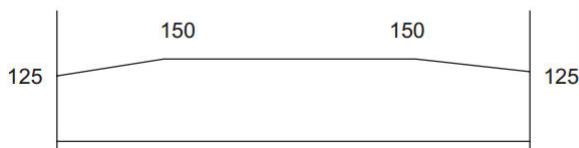
esfuerzos asimétrica. Alternando los extremos esforzados el efecto total es más o menos simétrico. Ya que el diseño de la estructura está basado generalmente en una distribución relativamente uniforme por la secuencia de esforzado de extremos alternados, es muy importante que se adhiera la correcta secuencia especificada.

3.7.2.2. Esforzado del Multi-Torón, Dos Extremos

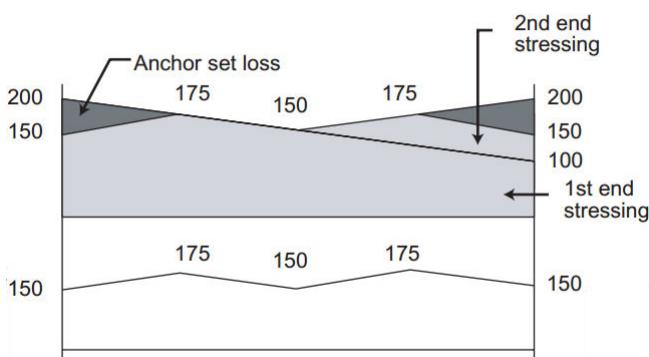
Cuando los tendones son muy largos, las pérdidas sobre la longitud del tendón debido a que la fricción y el tambaleo se vuelven mayores. El esforzado del tendón desde el segundo extremo resulta en una fuerza elevada en el tendón que si sólo se esforzara desde un extremo. También, para tendones simétricos el esforzado dos extremos se convierten en efectivos cuando el efecto del wedge-set en el extremo "gateado" afecta menos de la mitad del tendón (Figura 3-32). El esforzado desde el segundo extremo no deberá hacerse si la elongación calculada es menor que la longitud del enganche de la cuña. Reenganche en una porción de la longitud de enganche vieja deberá evitarse.



"One End Stressing" results in non-symmetrical stresses due to prestress



"Alternate End Stressing" results in symmetrical stresses due to prestress



"Two End Stressing" results in symmetrical stresses, and, in longer tendons, higher stress levels

Figura 3-32: Esfuerzos a lo largo del tendón para diferentes modos de esforzado.

Hay dos formas de esforzar el tendón. El primero y método más común es iniciar el esforzado desde un extremo. La elongación será bastante grande y el tendón tendrá que ser anclado y probablemente re-enganchado varias veces. Número de re-enganches dependerá de la carrera del jack. Las elongaciones están aproximadamente en el rango de 178 a 203 mm (7 a 8 plg) por cada 30 m (100 pies) de tendón. Usando un jack con una carrera (stroke) de 250 mm (10 plg) y aproximadamente 150 m (500 pies) de largo de tendón, 4 re-enganches serán necesarios.

Cuando el tendón ha sido esforzado hasta la fuerza final en el primer extremo, las cuñas están asentadas y la operación de esforzado se mueve al otro extremo. En este segundo extremo el tendón ya tiene una fuerza considerable (no hay parte floja a jalar fuera del tendón y las mediciones de elongación pueden iniciar inmediatamente). Las elongaciones en este extremo serán relativamente cortas y el re-enganche del jack no es necesario normalmente. La elongación total para el tendón será la sumatoria de las elongaciones medidas en cada extremo. El re-enganche es un origen de error en la medición de las elongaciones. Deberá tenerse cuidado en no perder las marcas de referencia durante el re-enganche.

El segundo método involucra una operación de gateo simultáneo en ambos extremos usando dos jacks. Cada jack jala aproximadamente la mitad de toda la elongación. No hay razón por la que estas elongaciones debieran ser exactamente las mismas. La ventaja para el Contratista deberá ser que la operación de esforzado y el movimiento del equipo de una ubicación a la otra pueden proceder algo más rápido ya que este método involucra menos re-enganche. Dos sets de equipos son requeridos y algunos medios de comunicación fiables para sincronizar las operaciones.

3.7.3. Tendones de las Barras

Los tendones de las barras tienen ya sean hilos gruesos o finos y están anclados por una tuerca de apoyo contra una placa de anclaje. Las barras son esforzadas individualmente usando un jack especial (Figura 3-28).

Los tendones de las barras curvas son raramente usados hoy en día; la vasta mayoría de tendones de barras son rectos. Con un buen espacio libre alrededor de las barras, no hay pérdidas de fricción. También, cuando la tuerca es gradualmente ajustada usando el ratched en el jack cuando la carga aumenta, hay pequeña o ninguna pérdida por asentado. En consecuencia, la fuerza es la misma a todo lo largo y no hay necesidad de esforzar desde ambos o alternados extremos.

La secuencia en la cual las barras PT son esforzadas deberá ser mostrada claramente en los Planos del Contrato o en los Planos de Ejecución aprobados. Por ejemplo, muchas barras PT son usadas para erigir y cerrar las juntas de epóxico en la construcción segmental prefabricada. Es importante mantener cuanta presión uniforme sea posible con la finalidad de comprimir eventualmente el epóxico suave. Esto se alcanza esforzando las barras en una cierta secuencia especificada. Situaciones similares aplican para las barras PT verticales en las columnas de los pilares. En consecuencia, la secuencia deberá seguirse.

3.8. Operaciones de Esforzado

3.8.1. Personal y Seguridad

Los tendones de pretensado son la columna vertebral de la estructura. Cuando se esfuerzan apropiadamente, previenen que la estructura se agriete y se deteriore. Pero, un tendón esforzado de mala manera se ve como un tendón esforzado apropiadamente. Por lo tanto, la única forma para asegurar el esforzado apropiado es tener un personal experimentado u entrenado (Apéndice B) y un inspector presente durante todas las operaciones de esforzado.

El esforzado deberá considerarse una operación básicamente no segura. Las personas que operan el equipo y tomando mediciones nunca deberán mantenerse detrás de un jack vivo. Esto es también cierto en el extremo-muerto del torón: nunca mantenerse detrás del anclaje de un tendón siendo esforzado. Aunque esto no ocurre a menudo, los tendones se rompen, las cuñas se sueltan y las fuerzas grandes son liberadas en un corto segundo, haciendo saltar el jack e impulsando el tendón fuera de un anclaje. Con la finalidad de hacer que todos en el proyecto estén conscientes del hecho que hay un tendón siendo esforzado, un sistema de alerta de peligro deberá estar en el lugar tales como luces o banderas rojas.

3.8.2. Fuerza de Gateo

La fuerza requerida en cada tendón es determinada por el Diseñador y es dado en los planos de ejecución o manual de trabajo de esforzado. También, las elongaciones correspondientes están predeterminadas tomando en cuenta todas las pérdidas debido a la fricción de curvatura, tambaleo, wedge-set, y fricción dentro del anclaje y del jack, cuando sea necesario. Para el post-tensionado la medición de la elongación sirve como una revisión de la fuerza de gateo anticipada principalmente dada por el dial de presión y el gráfico de calibración.

La operación de esforzado deberá ser constantemente monitoreada por un inspector. Hay dos piezas de información que necesitan ser registradas: las elongaciones del tendón y las presiones del dial. Ambos darán una indicación de si el tendón está esforzado a la fuerza requerida. La presión del dial es una medida directa de la fuerza en el jack y la elongación dará una indicación de cómo el resto del tendón está siendo esforzado. Normalmente el tendón será esforzado a una presión de dial predeterminada, representado una cierta fuerza en el tendón en el extremo esforzado. La elongación medida en este punto es comparada a la elongación determinada teóricamente.

3.8.3. Medición de la Elongación en los Tendones de Torones

Cuando se esfuerza un tendón una cierta porción de la extensión del jack será necesaria para remover la holgura (parte floja). Esto da una elongación inicial falsa que no deberá ser parte de las mediciones de la elongación real. Por esta razón, el primer paso es esforzar el tendón a una fuerza inicial de aproximadamente el 20% de la fuerza final para remover la holgura. Desde este punto hasta el 100% de la

carga requerida, la extensión del jack causará elongaciones puras del tendón. Al final de la operación, una corrección puede hacerse para la parte o porción no medida de la elongación por extrapolación recta.

La precisión en la determinación de la elongación es obtenida durante el primer paso, esto es tensionar hasta el 20% de la fuerza de gateo, puede algunas veces mejorarse para registrar elongaciones en lecturas intermedias del dial a 40%, 60% y 80% y plotear los resultados en un gráfico. Idealmente el gráfico deberá ser una línea recta.

Las elongaciones intermedias deberán registrarse si un tendón largo ha sido esforzado usando dos o más halados en el jack cuando la elongación requerida es más grande que la carrera disponible.

Para tendones cortos, mono o multi-torón puede ser suficiente comprobar la elongación para el rango de esforzado entre el 20% y 100% de la carga contra el valor calculado para este rango. Los tendones cortos son todos generalmente menores que alrededor de 30 m (100 pies) de largo cuando la elongación esperada es sólo alrededor de 0.2 m (8 plg) o menos, y se hace fácilmente con una carrera simple, estable y continua del jack. Los tendones cortos incluyen, por ejemplo, los tendones transversales en las losas de tablero.

La elongación puede medirse por la extensión del cilindro más allá del barril del jack. Sin embargo, es aceptable sólo si el halado de la cuña dentro de las cuñas internas que enganchan el torón dentro del jack es conocido de forma fiable; deducido de la extensión medida en el cilindro da la elongación real del torón. Este método es a menudo preferido por conveniencia.

Alternativamente, la medida de las elongaciones puede hacerse a un punto directamente añadiendo un accesorio a una de las colas de los torones y medir entre la punta del accesorio y el barril (inmóvil) del jack. De hecho, la diferencia entre estas mediciones y aquella sola de la extensión del cilindro es el halado de las cuñas interiores del jack.

Alternativamente, la elongación puede medirse directamente desde la cara del concreto hasta una marca en las colas de los torones. Al menos dos torones seleccionados aleatoriamente son marcados. La marca puede ser una marca escrita o corte de sierra en la cola del torón más allá de la parte posterior del jack o puede hacerse con una cinta o pintura en spray y lápiz. Esta marca es colocada luego que el 20% de la fuerza de gateo haya sido aplicada. La distancia de la marca al punto fijo en la cara de concreto o en el barril inmóvil del jack es registrado. Cuando el jack es bombeado, esta distancia aumenta. Las mediciones de la elongación son hechas solo en una de los torones marcados. El otro torón marcado está ahí en caso que el torón siendo usado pueda deslizarse.

Con cualquier operación de esforzado multi-torón, es buena práctica marcar varias colas de los torones (al 20% de la carga) en la misma ubicación usando pintura en spray y lápiz o cinta para dar una seguridad visible que los torones se alargan en la misma cantidad, cualquier deslizamiento es fácilmente notado.

Cuando el esforzado alcanza la carga total, siempre que la elongación esté dentro de la tolerancia requerida de aquella anticipada, el jack es liberado y el tendón es anclado en las cuñas permanentes. El halado de la cuña debe registrarse y deducirse de la elongación a carga total y dar la elongación real final en este extremo del tendón.

Para miembros de secciones transversales pequeñas, tales como vigas principales-I, la cantidad apropiada deberá tomarse en cuenta para compensar el acortamiento elástico del concreto cuando se miden las elongaciones.

3.8.4. Medición de la Elongación en Barras PT

Los tendones temporales de las barras para propósitos de erección son generalmente cortos (esto es desde alrededor de 3 a 6 m (10 a 20 pies) de largo). Las elongaciones son pequeñas y no son generalmente medidas para aplicaciones temporales; las barras “gateadas” a la carga dad por los diales de presión de los jacks.

Para las barras permanentes PT, las elongaciones deberán revisarse como una verificación secundaria de la fuerza. La elongación deberá medirse desde un punto fijo en la cara del concreto hasta una marca en la barra más allá del extremo del jack. La holgura, o parte floja, deberá removese aplciando el 20% de la carga. La elongación para el rango entre el 20% y el 100% de carga requerida deberá ser comprobada en contra de aquella calculada para este rango.

Para miembros de secciones transversales pequeñas, tales como las vigas principales-I, la cantidad apropiada deberá tomarse en cuenta para compensar el acortamiento elástico del concreto cuando se miden las elongaciones.

3.8.5. Variables de Campo

3.8.5.1. Fricción

La fricción entre los torones y ductos y con los anclajes y jacks reduce la fuerza efectiva en el tendón. Las fuentes principales de fricción son:

- Fricción entre el tendón y el ducto debido a la curvatura del perfil del tendón (" $\mu\theta$ ").
- Fricción entre el tendón y el ducto debido al tambaleo no anticipado (" kl ").
- Fricción en el anclaje cuando la campana del torón pasa a través de la placa de cuña ("").
- Fricción dentro del jack mismo. (Esto puede darse como un porcentaje (%) por el abastecedor del post-tensionado o puede eliminarse usando una curva de calibración de las presiones en el dial versus la fuerza entregada por el jack).

Una asignación por cada efecto es hecha por el Diseñador o el Ingeniero del Contratista y la fuerza requerida de gateo y la elongación correspondiente al tendón es dado en los planos, planos de ejecución o manual de esforzado.

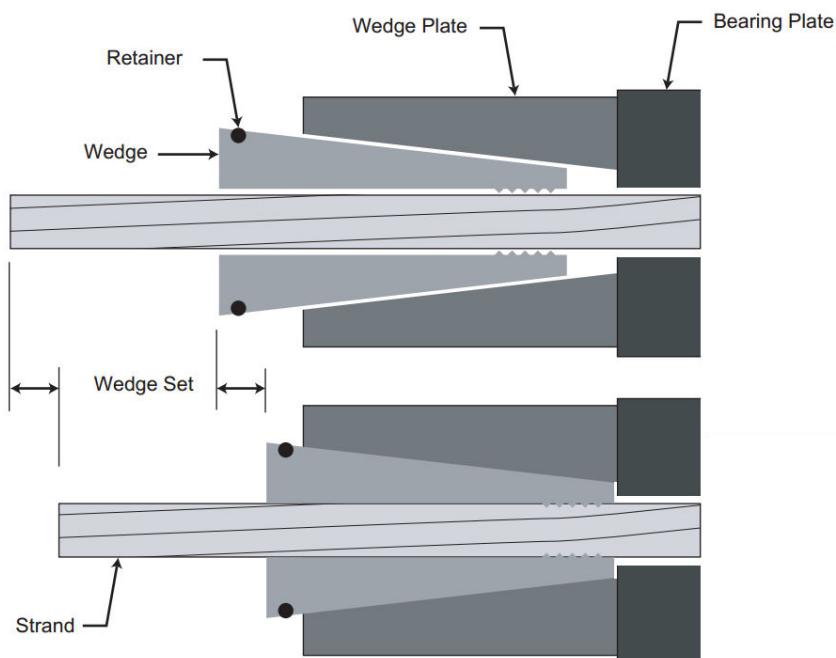


Figura 3-33: Anchor-set o wedge-set.

3.8.5.2. Anchor-Set o Wedge-Set (Pérdida de Asiento)

Cuando un tendon del torón ha sido “gateado” hasta la fuerza requerida y el jack es liberado, las cuñas son estiradas en la placa de la cuña (wedge plate) hasta que se muerda y asegure el torón. Típicamente la cantidad de wedge-set o “estirado” (draw-in) es alrededor de 10 mm (3/8 plg) (Figura 3-33).

Algunos jacks tienen dispositivos de puesta de asiento para las cuñas antes de liberar la fuerza. Esto puede compensar la mayor parte de la pérdida de asiento de la cuña. Además al asiento de la cuña, hay una deformación elástica de la placa de la cuña – es relativamente pequeña en comparación al asiento de la cuña. Juntos, estos efectos pueden ser denominados como “anchor-set” o “wedge-set”. Esto representa la cantidad que un punto en el torón justamente dentro del anclaje se mueve cuando se transfiere una carga desde el jack hasta los torones.

El wedge-set se mide en el campo usando las mismas marcas de referencia en los torones como las usadas para las elongaciones. Es la diferencia entre la elongación antes y después de liberar el jack.

3.8.5.3. Deslizamiento del Torón

Ocasionalmente durante el esforzado los torones pueden deslizarse en las cuñas. Esto podría ocurrir si el tamaño de los torones y el de las cuñas están en los extremos opuestos o sus rangos de tolerancia de fábrica.

Cuando se esfuerza el equipo y el inspector deberán estar seguros de que ningún torón se deslice. Todos los torones en el tendón deberán marcarse en ambos extremos de modo que un torón deslizado se muestre inmediatamente. Una forma de hacer esto es cortar los torones igualmente en ambos

extremos antes que el jack haya sido anexado y presurizado. El corte deberá hacerse a cierta distancia desde una placa de cuña de extremo muerto y más allá de la parte posterior del jack(s) de esforzado, dejando suficiente longitud proyectando en caso que sea necesario re-enganchar y re-esforzar. Otro método es marcar todos los torones con pintura en spray. Un torón deslizado se mostrará con prontitud retrasándose detrás de los otros torones. (No es posible, ni es necesario excepto en circunstancias muy necesarias, identificar cuál torón es cuál en ambos extremos del tendón).

3.8.5.4. Re-Enganchado de los Torones por Cuñas

En el esforzado por multi-etapas de un tendón largo que requiere re-enganche, es importante estar seguros que re-enganches intermedios no toman lugar en la ubicación que ha sido ya enganchada por la cuñas – o sino podría ocurrir el deslizamiento o rotura.

3.8.6. Fuerza Final

La fuerza final en el tendón es la fuerza de gateo menos todos los efectos debido a las varias pérdidas descritas líneas arriba. Si luego de liberar el jack, hay alguna duda acerca de lo adecuado de la fuerza, una prueba de despegado (levantado, lift-off) puede ser necesario (ver 3.8.8).

En el campo, durante las operaciones de esforzado, es sólo posible monitorear la fuerza de gateo dada por el dial de presión y la gráfica de calibración, y medir la elongación y el wedge-set. Estas son las observaciones esenciales necesarias para asegurar que el tendón tiene la fuerza final requerida. Ellas deberán ser registradas apropiadamente en un reporte del esforzado. Un ejemplo de un Reporte del Esforzado está dado en las Tablas 3-4 y 3-5.

La fuerza del tendón es determinada principalmente por el dial de presión del jack y la gráfica de calibración. Las elongaciones medidas son una segunda revisión de la fuerza del tendón y deberá estar de acuerdo dentro del 5% de los valores calculados para los tendones sobre 15 m (50 pies) de largo o 7% para tendones menores que éste (AASHTO LRFD Construction Specifications 10.10.1.4). Algunas especificaciones del proyecto pueden tener diferentes porcentajes de concordancia tanto para los tendones largos como para los cortos.

3.8.7. Corte del Extremo del Torón

Los extremos de los torones deberán sólo ser cortados si las fuerzas de gateo y elongaciones son satisfactorias. Si hay cualquier duda que podría requerir verificación por una prueba lift-off o gateo adicional, los torones no deberán cortarse. Preferiblemente, los torones deberán recortarse tan pronto sea posible, de modo que los cabezales de grout permanentes puedan ser colocados sobre la placa de la cuña para sellar el tendón hasta el grouting.

Los torones deberán cortarse en las cuñas dejando aproximadamente 12 a 20 mm (1/2 a $\frac{3}{4}$ plg) del torón proyectado pero no mayor que lo que puede acomodarse por un cabezal de grout permanente no-metálico abastecido para la instalación con el sistema de post-tensionado. Los torones deberán cortarse

sólo con una herramienta abrasiva de corte. Bajo ninguna circunstancia deberá cortarse con oxicorte ya que el calor usado puede suavizar el torón y las cuñas y producir la pérdida de los torones. Recientemente, cortadores de plasma se han vuelto disponibles; sus usos deberán ser sólo con inspección estricta y aprobación del Ingeniero.

Luego que las colas de los torones han sido cortadas, los extremos del tendón deberán ser protegidos temporalmente de una forma aprobada hasta que el tendón haya sido “engrutado”. Preferiblemente, el cabezal de grout no-metálico (plástico) deberá colocarse sobre los torones y cuñas.

3.8.8. Lift-Off (Levantado)

Ocasionalmente, después de la liberación de la fuerza de gateo, hay alguna duda de lo adecuado de la fuerza, una prueba de despegado (levantado, lift-off) puede ser necesario. El jack restante en el lugar o es re-instalado y gradualmente tomado para cargar. Los torones son marcados y la posición de la marca desde la cara de la placa de anclaje es medida con mucho cuidado. Si esta marca está más allá del extremo del jack, entonces cuando la carga del jack aumenta, sólo se moverá por la cantidad de elongación en aquella parte del torón pasando a través del jack. Ya que esta es una muy pequeña cantidad puede ser inmensurable.

Cuando la carga alcanza y pasa aquella en el tendón, el tendón mismo empieza a alargar sobre su longitud total (menos los efectos de fricción). Esta elongación deberá ser notable midiendo las marcas. El dial deberá registrar una presión más alta que aquella en la que el tendón fue primero liberado. También en este punto, las cuñas deberán iniciar a moverse desde la placa de la cuña. Este es el punto de “lift-off” y deberá verificar la fuerza en el tendón en el jack.

Una advertencia: si la carga es significativamente baja entonces el gateo para la carga requerida puede proceder siempre que el punto previo de los enganches de la cuñas se alarga más allá de las cuñas ya que ellos muerden en el torón fresco. Si no, hay un riesgo para que las cuñas puedan no re-enganchar apropiadamente. Por tanto, las pruebas lift-off deberán desarrollarse sólo cuando sean necesarias y no una de rutina más.

3.9. Registro del Esforzado

Toda la información relacionada al esforzado de un tendón deberá registrarse. Los reportes del esforzado son muy importantes. Ellos serán invaluables cuando los problemas ocurran durante las operaciones de esforzado.

La siguiente información deberá incluirse en el reporte:

- La identificación del tendón, ejemplo: el número del tendón, número de viga/arma, número de tramo/unidad.
- Fecha y hora de cuando el tendón fue esforzado.

- Información del tendón usado para hacer el tendón – tal como el paquete de la bobina y número de calor para los tendones.
- Números de identificación del jack y del dial.
- La elongación requerida y la fuerza del jack o presión del dial.
- El anchor-set en el extremo vivo así como en el extremo muerto.
- El extremo(s) de esforzado para el tendón.
- Las lecturas del dial de presión en el cual las mediciones de elongación se hicieron. Importante son las lecturas iniciales y las finales – lecturas intermedias deberán cuidadosamente anotadas.
- Cualquier comentario acerca de los eventos que ocurrieron durante las operaciones de esforzado – tal como rotura de los cables, torones deslizados, crujidos, etc.
- El nombre del inspector y el capataz (foreman) del equipo de esforzado.

Una muestra del reporte de esforzado es mostrada en la Tabla 3-4 y 3-5 (al final de este Capítulo) para el Ejemplo 1, la viga principal-I de cuatro tramos de las Figuras 3-2 y 3-3. Por claridad, esto se muestra en unidades acostumbradas en los Estados Unidos en este momento. El formato y el tipo de información en un reporte pueden adaptarse para un proyecto, cuando sea necesario.

3.10. Problemas y Soluciones del Esforzado

Durante las operaciones de esforzado varias cosas pueden salir mal: lo siguiente abarca algunos de los problemas más comunes y sus soluciones.

3.10.1. Deslizamiento del Torón

El deslizamiento de un torón puede ocurrir durante la operación de esforzado y mientras se ancla el tendón. La razón es normalmente una cuña defectuosa. Esto puede causarse por una superficie oxidada en el exterior de la cuña o al interior de la echada (chuck), previniendo a la cuña de tener un enganche firme en el torón. Los dientes desgastados en las cuñas dentro del jack pueden también ser una razón. En muchos casos, el deslizamiento puede prevenirse usando chucks y cuñas mantenidas apropiadamente.

El deslizamiento durante el esforzado deberá revelarse así mismo en las marcas realizadas sobre las colas de los torones para este propósito. Si el deslizamiento es significativo (es decir, más de alrededor de una pulgada), éste deberá tomar en cuenta cuando se esfuerza el resto del tendón. Los torones deslizados están bajo un esfuerzo bajo. Esto resultará en una fuerza total baja en el tendón para la elongación requerida. Sin embargo, con la finalidad de no sobre esforzar otros torones que no deslizan, el dial de presión para el objetivo principal deberá reducirse en proporción al número de torones deslizados y cantidad de deslizamiento en cada uno.

Por ejemplo, si un torón fuera de los doce se desliza completamente, el dial de presión para el objetivo principal deberá reducirse por un doceavo mientras el tendón es esforzado a la elongación original requerida.

Por ejemplo, si son 12 torones y el objetivo principal de la elongación es 152 mm (6 plg) y ocurre un deslizamiento de 50 mm (2 plg) en un torón y 75 mm (3 plg) en otro, el dial de presión para el objetivo principal deberá reducirse por $(2 + 3) / (6 \times 12)$. (Si este ejemplo realmente ocurrió en el sitio, entonces las operaciones y el equipo deberá examinarse cuidadosamente y tomarse las acciones apropiadas para rectificar el problema).

Con la finalidad de alcanzar la fuerza final requerida en un tendón con torones deslizados, los torones deslizados pueden ser esforzados individualmente hasta sus elongaciones finales y nivel de fuerza usando un jack de simple (mono) torón luego de esforzar los restantes. Sin embargo, deberá tomarse cuidado ya que los torones deslizados puedan atraparse y, aunque probablemente puedan ser esforzados a la fuerza requerida en el torón, es menos probable que la elongación sea alcanzada. El Ingeniero deberá estar presente cuando el trabajo en un tendón con torones deslizados esté en progreso.

Si se produce el deslizamiento después de liberar el jack luego de esforzar el tendón contrario a carga completa y la elongación sin percances, entonces puede corregirse el torón(s) deslizado individualmente de vuelta a su elongación original usando un jack simple (mono) torón. Nuevamente el Ingeniero deberá estar presente.

El esforzado de los torones individuales necesitará hacerse individualmente y no deberá posponerse. Existe siempre el riesgo que un trabajador celoso corte las colas de los torones antes de llevarse a cabo. Si y cuando esto ocurra, el tendón completo necesitará removese y reemplazarse.

3.10.2. Cables Rotos

Algunas veces un cable romperá un tendón. Si sólo uno o dos cables se rompen, puede ser una situación de relativa poca preocupación. Por ejemplo, cuando un cable se rompe sólo 1/7 de la capacidad del torón se ha perdido. En un tendón multi-torón esto será una proporción mucho más pequeña. Un cable roto es fácilmente reconocible por un ruido fuerte. Muy a menudo los cables rotos estarán dentro del cono acampanado del anclaje, posiblemente en la parte posterior de la placa de la cuña. Puede ser posible verlos usando un endoscopio (borescope) o sonda visual similar. La mayoría de las especificaciones permiten hasta que el 2% de los cables se rompan. Sin embargo, la rotura persistente de los cables deberá investigarse y tomar acción para cambiar los procedimientos y equipos para evitar rebajar significativamente los problemas.

Cuando la rotura se vuelve excesiva, alcanza un punto donde la fuerza requerida en el tendón está fuera de tolerancia. En tales casos, los torones individuales o los tendones enteros necesitan ser reemplazados.

La causa de la rotura de cables deberá siempre determinarse. Algunas posibles causas son: el sobre-esforzado, torón pobre, cuñas malas, o puntos de alta fricción en el ducto. El sobre-esforzado y los puntos de alta fricción se revelan cuando los registros de esforzado son cuidadosamente examinados.

Algunas veces los torones y las cuñas pueden simplemente estar en extremos opuestos de sus respectivos rangos de tolerancia de tamaño permitidos y el problema puede ser fácilmente corregido usando diferentes piezas.

3.10.3. Problemas de Elongación

No alcanzar la elongación requerida puede tener varias causas. Una de las principales razones es una alineación menos que perfecta del tendón. Torceduras repentinas en el alineamiento pueden incrementar la pérdida por fricción considerablemente y consecuentemente reducir la elongación.

3.10.3.1. Elongación Demasiada Pequeña en el Extremo del Jack Bajo Carga Total

La elongación demasiada pequeña puede ocurrir debido a torcedura cerca del anclaje de esforzado; el jack puede alcanzar carga total, pero la elongación será muy pequeña. Cuando esto ocurre, la elongación requerida puede posiblemente alcanzarse esforzando el tendón desde el otro extremo. Sin embargo, esto no será factible si la baja elongación es debido a la desalineación del ducto sobre la entera longitud del tendón.

3.10.3.2. Elongación Baja para el Tendón Entero

Cuando la baja elongación se debe a desalineación del ducto ocurrido sobre la entera longitud del tendón, el esforzado desde el otro extremo puede no ser suficiente para alcanzar la elongación. Consideraciones pueden darse para lubricar el tendón con aceite soluble en agua o con polvo de grafito. Esto puede reducir la fricción y resultar en mejores elongaciones. Luego que un tendón ha sido esforzado satisfactoriamente, el aceite soluble en agua removese a fondo por lavado. El agua de lavado deberá ser completamente drenada y soplada de los ductos. El polvo de grafito puede quedar en los ductos y es, por lo tanto, generalmente preferido por los Contratistas.

3.10.3.3. Elongaciones Mayores que la Tolerancia

Una elongación puede ser mayor que la esperada. Esto puede deberse a la fricción menor que la anticipada o debido al deslizamiento de los torones y cuñas que pasó desapercibida. Las cuñas deberán examinarse en ambos extremos. Es por esta razón que las marcas deberán siempre ser realizadas en las colas de los torones en ambos extremos del tendón. Si no hay deslizamiento de la cuña y los tendones persisten dando una elongación mayor que la esperada, los cálculos del esforzado deberán examinarse y los ajustes apropiados realizarse.

3.10.3.4. Fuerza de Esforzado Baja

Sería muy inusual no ser capaz de esforzar un tendón a la fuerza de gateo requerida; más a menudo un problema se revela por falta de elongación, no por fuerza. Si la fuerza no puede alcanzarse, el sistema deberá ser revisado. La posibilidad de aumentar la fuerza de gateo puede considerarse. Sin embargo, deberán comprobarse los cálculos usando coeficientes de tambaleo y fricción elevados para estar seguros que el esfuerzo en el tendón luego del anchor-set no exceda los esfuerzos permitidos.

3.10.3.5. Tolerancia Total en un Grupo de Tendones

Si nada de lo anterior conduce a una solución satisfactoria, es posible considerar un tendón problemático como parte de un grupo entero de tendones – por ejemplo, un tendón fuera de tal vez dieciséis a veinte en un voladizo, o similar. Una tolerancia para el grupo entero deberá darse en las especificaciones o disposiciones especiales del proyecto. Si todos los otros tendones tienen un buen registro de esforzado, un tendón esforzado pobremente no debería influenciar la tolerancia grupal en forma demasiada.

Para compensar la pérdida de fuerza en un tendón un aumento compensado de la fuerza en los otros tendones debe considerarse, si hay suficientes agujeros de reserva en las placas de las cuñas para acomodar los torones adicionales. Alternativamente, si el déficit es significativo, puede ser necesario introducir o instalar tendones adicionales a través de las disposiciones hechas en los planos o planos de ejecución.

3.10.4. Rotura de las Cuñas

Algunas veces se rompen las cuñas. Esto causa la pérdida del torón entero. Esto cae bajo la categoría de torones deslizados y deberá tratarse como tal. Cuando unas pocas cuñas se rompen en el mismo tendón, todas las cuñas deberán ser consideradas potencialmente defectuosas. El lote total de cuñas deberá examinarse y, si fuera necesario, reemplazarse.

Las cuñas muy a menudo muestran grietas radicales en sus extremos visibles luego de asentarlas. La experiencia muestra que esto es generalmente una grieta localizada de borde anular contenido en el anillo retenedor. Siempre que el torón no ha deslizado y siempre que este tipo de grietas no se extienda en el barril de la cuña, entonces no es de mayor problema.

Problemas de deslizamiento repetitivos y grietas largas en la nariz de enganche de las cuñas son causa para problemas y deberán remediararse.

Elongation Calculation									Strand Area, As, (sq.in) =	1.520	
									Modulus, E, (ksi) =	27,000	
friction coefficient μ = 0.250 wobble k = 0.0002 P jack = 308.0 Kips											
Stressing first performed from End A, while End B remains a non-stressing (dead) end.											
Point	θ_{ij}	Total θ	$\mu\theta$	X _{ij}	x = $\sum X_{ij}$	k _x	$\mu\theta + kx$	$e^{-(\mu\theta + kx)}$	P _{xi}	P _{av ij}	Elong ij
End A									kips	kips	inch
1	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.000	308.0		
2	0.123	0.123	0.031	69.0	69.0	0.014	0.045	0.956	294.6	301.3	6.08
3	0.120	0.243	0.061	50.0	119.0	0.024	0.085	0.919	283.0	288.8	4.22
4	0.163	0.406	0.102	21.5	140.5	0.028	0.130	0.878	270.6	276.8	1.74
5	0.163	0.569	0.142	21.5	162.0	0.032	0.175	0.840	258.6	264.6	1.66
6	0.120	0.689	0.172	50.0	212.0	0.042	0.215	0.807	248.5	253.6	3.71
7	0.120	0.809	0.202	50.0	262.0	0.052	0.255	0.775	238.8	243.6	3.56
8	0.163	0.972	0.243	21.5	283.5	0.057	0.300	0.741	228.2	233.5	1.47
9	0.163	1.135	0.284	21.5	305.0	0.061	0.345	0.708	218.2	223.2	1.40
10	0.120	1.255	0.314	50.0	355.0	0.071	0.385	0.681	209.6	213.9	3.13
11	0.120	1.375	0.344	50.0	405.0	0.081	0.425	0.654	201.4	205.5	3.00
12	0.163	1.538	0.385	21.5	426.5	0.085	0.470	0.625	192.5	197.0	1.24
13	0.163	1.701	0.425	21.5	448.0	0.090	0.515	0.598	184.1	188.3	1.18
14	0.120	1.821	0.455	50.0	498.0	0.100	0.555	0.574	176.8	180.4	2.64
15	0.123	1.944	0.486	69.0	567.0	0.113	0.599	0.549	169.1	173.0	3.49
End B											
Total Tendon Length = 567.0 Feet											
Total Force Loss from End A (jack) to End B (dead) = $\Delta P = P_1 - P_{15} = 138.9$ kips											
Total elongation (before wedge set) when jacked from End A, ΔA , (ins) = Σ Elong ij = 38.53 inches											
** the assumption of a uniform rate of force loss Average rate of force loss along tendon** = $\Delta P / L$ (kip / ft) = 0.245 kip / ft											
is reasonable for a gradually curving profile. Assumed Wedge Set at End A = W_A (ins) = 0.38 inches											
Length of tendon affected by Wedge Set at End A = x_{set} (feet) = $\sqrt{(As.E.Wa.L / \Delta P)}$ = 72.8 feet											
Force loss at End A due to Wedge Set = dp (kips) = $2.\Delta P.x_{set} / L = 35.7$ kips											
Final Force at End A = 308.0 - 35.7 = 272.3 kips											

Tabla 3-1: Ejemplo 1, elongación del tendón perfilado en viga principal de cuatro tramos (Figura 3-2).

Stressing completed by stressing from End B																
Point	θ_{ij}	Total θ	$\mu\theta$	X _{ij}	x = $\sum X_{ij}$	k _x	$\mu\theta + kx$	$e^{-(\mu\theta + kx)}$	P _{xi}	Diff P _{xi}	Diff P _{av ij}	Elong ij				
End B									kips	kips	(>= 0)	inch				
15	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.000	308.0	138.9						
14	0.123	0.123	0.031	69.0	69.0	0.014	0.045	0.956	294.6	117.7	128.3	2.59				
13	0.120	0.243	0.061	50.0	119.0	0.024	0.085	0.919	283.0	99.0	108.4	1.58				
12	0.163	0.406	0.102	21.5	140.5	0.028	0.130	0.878	270.6	78.0	88.5	0.56				
11	0.163	0.569	0.142	21.5	162.0	0.032	0.175	0.840	258.6	57.2	67.6	0.43				
10	0.120	0.689	0.172	50.0	212.0	0.042	0.215	0.807	248.5	38.9	48.1	0.70				
9	0.120	0.809	0.202	50.0	262.0	0.052	0.255	0.775	238.8	20.6	29.7	0.43				
8	0.163	0.972	0.243	21.5	283.5	0.057	0.300	0.741	228.2	0.0	10.3	0.06				
7	0.163	1.135	0.284	21.5	305.0	0.061	0.345	0.708	218.2	-20.6	0	0.00				
6	0.120	1.255	0.314	50.0	355.0	0.071	0.385	0.681	209.6	-38.9	0	0.00				
5	0.120	1.375	0.344	50.0	405.0	0.081	0.425	0.654	201.4	-57.2	0	0.00				
4	0.163	1.538	0.385	21.5	426.5	0.085	0.470	0.625	192.5	-78.0	0	0.00				
3	0.163	1.701	0.425	21.5	448.0	0.090	0.515	0.598	184.1	-99.0	0	0.00				
2	0.120	1.821	0.455	50.0	498.0	0.100	0.555	0.574	176.8	-117.7	0	0.00				
1	0.123	1.944	0.486	69.0	567.0	0.113	0.599	0.549	169.1	-138.9	0	0.00				
End A																
Additional elongation (before wedge set) when jacked from End B, ΔB , (ins) = Σ Elong ij = 6.36 inches																
Average rate of force loss along tendon = $\Delta P / L$ (kip / ft) = 0.245 kip / ft																
Assumed Wedge Set at End B = W_B (ins) = 0.38 inches																
Length of tendon affected by Wedge Set at End B = x_{set} (feet) = $\sqrt{(As.E.Wb.L / \Delta P)}$ = 72.8 feet																
Force loss at End B due to Wedge Set = dp (kips) = $2.\Delta P.x_{set} / L = 35.7$ kips																
Anticipated Pick-Up Force at B = 169.1				Final Force at End B = 308.0 - 35.7 = 272.3 kips												
Total tendon elongation before wedge set = 38.53 + 6.36 = 44.88 inches																
Deduct Wedge Set = 0.38 + 0.38 = -0.76 inches																
Net total elongation after all wedge set = 44.12 inches																

Tabla 3-2: Ejemplo 1, elongación del tendón perfilado en viga principal de cuatro tramos (Figura 3-3).

Elongation Calculation		friction coefficient $\mu = 0.250$		Strand Area (sq.in) = 4.123													
				E Modulus (ksi) = 28,000													
For external tendon, in this case, assume wobble coefficient $k = 0.0000$																	
Note: deviator and diaphragm ducts are usually prefabricated steel pipe accurately bent to a given radius																	
Also, the length of the bend is short																	
So, in this case, it is appropriate to assume $k = 0$ for the entire length of the tendon.																	
Portion	X _{ij} feet	x = $\sum X_{ij}$ feet	θ_{ij} radians	Total θ radians	$\mu\theta$	kx	$\mu\theta + kx$	$e^{-(\mu\theta + kx)}$	P _{xi}	force loss in bend kips	P _{av ij}	Elong δ_j per portion inches					
Jack at A																	
Deviator	A to B	48.63	48.6	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	1.0000	835.0	835.0	835.0	4.221					
	B to C	1.52	50.2	0.0759	0.07590	0.01898	0.01898	0.9812	819.3	15.7	827.2	0.131					
	C to D	33.60	83.8	0.0000	0.07590	0.01898	0.01898	0.9812	819.3		819.3	2.862					
Deviator	D to E	2.17	85.9	0.1085	0.18440	0.04610	0.04610	0.9549	797.4	21.9	808.3	0.182					
	E to F	48.39	134.3	0.0000	0.18440	0.04610	0.04610	0.9549	797.4		797.4	4.011					
Diaphragm	F to G	2.17	136.5	0.1085	0.29290	0.07323	0.07323	0.9294	776.0	21.3	786.7	0.177					
	G to H	3.63	140.1	0.0000	0.29290	0.07323	0.07323	0.9294	776.0		776.0	0.293					
Dead End at H																	
	Total Tendon Length = 140.1 Feet		Total Force Loss from Jacking End to Dead End = 59.0		59.0												
Elongation when jacked from End A only, ΔA (ins) = 11.876						Assumed Wedge Set at End A (ins) = Wa = 0.375											
Account for Wedge Set																	
Possibility 1: all wedge set is taken elastically in portion "AB" so effect does not pass deviator "BC"																	
If so, then loss of force in AB =		Wedge set * Es / Length AB =		0.375 * 4.123 * 28,000		= 74.2 kips		48.63 * 12									
Therefore, after wedge set, force in portion AB = 835.0 - 74.2 = 760.8 kips																	
Therefore, after deviator BC, the force in portion CD would be = 760.8 e ^{+0.01898} = 775.3 kips																	
But, since the original force of 819 kips in portion CD is greater than 775.3 kips, then deviator BC alone cannot absorb all the wedge set effect																	
Hence, wedge set must at least affect portions AB and CD																	
Possibility 2: Assume wedge set is taken in portion "ABCD" and the effect does not pass deviator "DE"																	
If so, then loss in ABCD =		Wedge set * As * Es / Length AD =		0.375 * 4.123 * 28,000		= 43.1 kips		83.7 * 12									
(approximate)																	
Therefore, after wedge set, force in portion AB = 835.0 - 43.1 = 791.9 kips																	
Therefore, after deviator BC, the force in portion CD would be = 791.9 e ^{+0.01898} = 807.1 kips																	
Now, because the force in CD (807 kips) is less than the original force of 819 kips but greater than the force of 797 kips in portion EF, it follows that the effect of wedge set must terminate in deviator ED																	
Hence the final force in the tendon becomes:																	
A to B		792 kips															
C to D		807 kips															
E to F		797 kips															
G to H		776 kips															
This would average approximately 799 (say 800 kips) along the length of the tendon, if allowance is made for some "shakedown" after stressing.																	

Tabla 3-3: Ejemplo 2, elongación del tendón esviado externo en un tramo exterior (Figura 3-4).

STRESSING REPORT				Page 1 of 2		
Project name:	Bridge: Four-Span I-Girder			Job No.	Example 1	
Contractor:	Weebild Inc.			Stressing Sub-Contractor:	P. O. Stenshen	
Tendon Location:	Tendon #2			Tendon Number:	T9	
Tendon Size:	9"0.6"			PT Steel Supplier:	Strong String Inc.	
Assumed for Calculations				Actual Values Delivered per Pack or Reel of Strand		
Number of Strands, Ns:	9	Strands from Reel No:	120,039	120,041	120,044	
Assumed Strand Area, As:	0.217	Number of Strands per Reel, Nr:	5	3	1	
Assumed Modulus, Es:	28,000	Actual Strand Area per Reel, Ar:	0.219	0.218	0.217	
Product, Ns*As*Es =	54,684	Actual Modulus per Reel, Er:	28,900	29,000	28,800	
		Product, Nr*Ar*Er =	31,646	18,966	6,250	
		Sum of Products: Sum(Nr*Ar*Er) =		56,861		
Adjusted Elongation Expected = [Nr*Ar*Er / (Sum(Nr*Ar*Er))]						
First Stage Stressing from End A			Second Stage Stressing from End B			
Required force before wedge set:	308	Gauge (psi)	Jack Force (kip)	Gauge (psi)		
Theoretial elongation, ΔA , (ins) =	38.53	Theo $\Delta A + \Delta B$ =	44.89	Theoretical elongation, ΔB , (ins) =	6.36	
Adjusted elongation, ΔA , (ins) =	37.05	Adj $\Delta A + \Delta B$ =	43.17	Adjusted elongation, ΔB , (ins) =	6.12	
Expected Wedge Set, End A, Wa:	0.38	Expected Final Wedge Set, End B, Wb:				
Equipment Identifiers End A:	3	Gauge	Jack	Gauge		
	9		3	9		
Stressing Mode: One End only: <input type="checkbox"/> no Both A then B: <input type="checkbox"/> yes Both Simultaneous (A and B with 2 sets of equipment): <input type="checkbox"/> no						
Note Example 1: If the available stroke of the jack is less than 12" (say) than at least four pulls will be needed at End A that is one of 20% to remove slack and about 7" of the 37.05" followed by three of about 10 inches each However, since sometimes elongations can significantly exceed those anticipated and we do not wish to re-grip for a final short pull, then we will take the first stage in 5 increments of 20% load, with an expected elongation for each of 7.41 ins During the initial 20% load, wedge pull-in at end B will increase the apparent elongation at A, but it need not be measured						
Target Gauge Pressures and Elongations						
End A			End B			
	Pressure	Elongation per increment	Wedge Set	Pressure	Elongation	Wedge Set
Initial 20%	1,120	7.41	initial set at B [0.38] **			
40%	2,220	7.41		At pick-up		
60%	3,340	7.41	Final wedge set at A, Wa	3050	0	0
80%	4,450	7.41	0.38	At Final 100%		
Final 100%	5,560	7.41	0.38	5560	6.12	0.38
Elong before set at A = ΔA = (Sum) =	37.05	Elong before set at B = ΔB = (Sum) =	6.12	** Note, this wedge set would reveal itself only as an apparent increase in elongation at A, if it could be measured for the first 20% load		
Net Elong after wedge set at A = $(\Delta A - Wa) = 37.05 - 0.40 = 36.67$		Net at B after set = $(\Delta B - Wb) = 6.12 - 0.38 = 5.74$				
Overall anticipated elongation = $36.67 + 5.74 = 42.41$ inches ***		*** Note: Compare to 44.12 ins theoretically calculated for assumed strand area and modulus				

Tabla 3-4: Ejemplo 1, tendón perfilado en viga principal de cuatro tramos (Figuras 3-2 y 3-3).

STRESSING REPORT							Page 2 of 2	
Elongation Measurement:								
First Stage Stressing	End A			End B			Increment of Elong per 20% of Load	Average per 20%
	Pressure	Elongation	Wedge Set at A, Wa	Pressure	Elongation	Wedge Set at B, Wb		
	Initial 20%	1100	0.00	0.00	-	[0.6]		
	40%	2200	7.80	[0.3]	-			
	60%	3400	7.90	[0.5]	-			
	80%	4500	7.80	[0.3]	-			
Final 100% at A	5600	7.60	0.40	-		V		
Second Stage Stressing								
Pick-up at B			3400			0	0.00	I
Final 100% at B			5600			6.53	0.30	V
Elongation at A from 20 to 100% = 31.10 = $7.80 + 7.90 + 7.80 + 7.60$ Add for initial 20% load = 7.78 <-----< -----< -----< Elongation at A before set = 38.88 Elongation at B before set = 6.53 Total Elongation before set = 45.41 = $38.88 + 6.53$ Total Wedge Set = 0.70 = Final Wa + Final Wb only Deduct for elongation inside jack = 0.24 = Five increments at A of say .04" each plus One at B of .04" Final Elongation = 44.47 Expected Elongation = 42.42 Ratio of (Final / Expected) = 1.048 % under or over = 4.80% < 7% O.K. (AASHTO LRFD Construction or Project Specs.) Approved: O.K. Not Approved: 								
Observations: No popping noises of broken wires O.K. Over elongation is within tolerance, O.K.								
Signed - Stressing Foreman: AJM					Date: August 21 2003			
Signed - Inspector: JAC					Date: August 21 2003			

Tabla 3-5: Ejemplo 1, tendón perfilado en viga principal de cuatro tramos (Figuras 3-2 y 3-3).

4

*grouting de los tendones
de post-tensionado*

4. Grouting de los Tendones de Post-Tensionado

Este capítulo aborda los tópicos del grouting generalmente en la secuencia en la cual las operaciones ocurren en el sitio. Iniciando con un plan de grouting, esta guía es proporcionada con respecto al equipo, pruebas en el sitio de producción de grout, inyección de los tendones horizontales y verticales, inspección post-grouting, grouting al vacío (inyección al vacío) para llenar cualquier agujero, y reportes del grouting para acompañar los reportes de esforzado del tendón. Una revisión de unos pocos problemas del grouting y sus soluciones es proporcionada. Finalmente, un set de ejemplos de procedimientos de grouting de varios tipos de tendones es ofrecido para información y guía.

4.1. Plan de Grouting

Un Plan de Grouting deberá desarrollarse e implementarse para la construcción. En general, las responsabilidades en el proyecto con respecto al grouting son:

- Contratista – El Contratista deberá preparar y enviar un “Plan de Grouting” de acuerdo a los requerimientos de las especificaciones del proyecto para post-tensionado y grouting.
- Ingeniero de Construcción y Agencia de Inspección (CEI) – El CEI deberá registrar los documentos enviados, revisar y notificar al Contratista de la aceptabilidad de su Plan de Grouting propuesto. El CEI debe buscar opiniones del Diseñador, Autoridad Estatal o Federal con respecto al Plan de Grouting.

Un Plan de Grouting típicamente aborda lo siguiente:

- Los procedimientos de grouting a seguirse en cualquier planta de prefabricado y en el sitio de trabajo el que sea apropiado – esto requiere planes de grouting separados.
- Calificaciones y Certificación del Personal de Grouting en la planta de prefabricado y en el sitio de trabajo.
- Materiales del grout propuestos y reportes de pruebas de calificación de laboratorios adecuados o evidencia de mostrar que reúne una lista de productos pre-calificados o aprobados.
- Almacenamiento y protección de todo el material de grout y de cualquier aditivo con procedimientos que asegure que siguen siendo utilizables o cuándo ellos deben ser descartados.
- Una fuente de agua potable.
- Medios para medir cantidades correctas de grout, agua y aditivos.
- Equipo para el mezclado y pruebas diarias de la producción de grout – ejemplo, tipo de mixer (mezcladora), bomba, tolva de almacenaje, cono de flujo, o metro de viscosidad, muestras para las pruebas de resistencia, etc.
- Equipos stand-by (de reserva) – ejemplo, tolva de repuesto, bomba, mangueras, equipo de lavado,etc.
- Si fuera necesario, un medio para probar la presión del sistema de ductos para fugas y sellar apropiadamente cualquier fuga que sea descubierta.
- La secuencia de inyección y evacuación de grout por cada tipo de tendón.

- La ubicación para la inyección de grout en el punto más bajo de cada perfil de tendón.
- La dirección de la inyección del grout y secuencia de cierre de los respiradores (vents).
- Disposiciones para el grouting de un grupo de tendones (*).
- Medios de inspección para garantizar que todos los tendones están completamente llenos con grout, por ejemplo taladro y endoscopio o sonda.
- Los medios y detalles para sellar los inlets, vents y drenajes de grout en cualquier superficie – incluyendo la superficie del tablero superior (rodadura) si fuera necesario.
- Un procedimiento para el grouting secundario usando técnicas de inyección al vacío cuando sea necesario, con la finalidad de llenar cualquier agujero encontrado en la inspección.
- Formas u otros medios de conservar los registros de las operaciones de grouting (copia del proveedor al CEI para corroborar y ser testigo).
- Ductos temporales PT – procedimientos para asegurar que todos los ductos internos usados para el post-tensionado temporal, para cualquier propósito, estén completamente llenados en el extremo de erección, si los PT temporales permanecen en el lugar o no y si esforzados o no.

* Nota: Las disposiciones para el grouting de un grupo de tendones sólo es necesario en el caso de potencial de flujo cruzado entre los tendones internos en un defecto, empalme o junta. El grouting del grupo puede ser necesario por eficiencia y control de calidad de las operaciones en algunos casos. Sin embargo, normalmente, los tendones drapeados internos en una superestructura vaceada-en-sitio o viga-l empalmada son generalmente “enrutados” uno a cada vez. Antes del grouting del grupo, es esencial estar seguro que hay proveedores suficientes de material y equipo de respaldo en caso de rupturas. El grouting simultáneo de un grupo de tendones internos deberá combinar operaciones para todos los tendones de aquel grupo, reconociendo que la inyección se realizará en varios puntos de inyección, en secuencia o en paralelo, con múltiples outlets, requiriendo el cerrado en secuencia luego de la evacuación del grout de la consistencia requerida.

Para guías e información, ejemplos de los procedimientos a ser abordados en un plan de grouting o mostrados en los planos de ejecución para varios tipos de grouting de tendones, referirse a la Sección 4.5 más adelante.

4.2. Prueba del Grout

Todos los materiales para el grouting deberán ser calificados por pruebas o certificaciones de laboratorios acreditados antes de usarlos en el proyecto (Capítulo 2).

4.3. Operaciones para el Grouting

El grouting deberá procederse tan pronto como sea posible luego de la instalación y esforzado de los tendones. Dependiendo de las condiciones ambientales, la protección temporal puede ser necesaria, y la protección temporal de los extremos de los tendones será necesaria. Por ejemplo, los inlets y outlets del

grout deberán ser abiertos drenes cerrados y los extremos de los tendones equipados con cabezales temporales.

4.3.1. Verificación del Sistema de Ductos de Post-Tensionado Antes del Grouting

4.3.1.1. Revisión del Agua y Escombros

Antes del grouting, los ductos de los tendones, inlets y outlets del grout, y los anclajes, deberán ser examinados y los escombros y el agua deberán removerse para evitar bloqueos o dilución y grout.

4.3.1.2. Probar los Ductos con el Torpedo

Antes de instalar los tendones de post-tensionado (torón), es recomendable que los ductos se prueben por espacio libre y ausencia de bloqueos pasando a lo largo un torpedo de tamaño adecuado. Cuando la prueba se haga depende del tipo particular de Construcción – ver Capítulo 3.

4.3.1.3. Inlets, Outlets y Conexiones

Las conexiones desde las mangueras de grout a los inlets y outlets deben ser herméticas y libres de suciedad. Los inlets y outlets deberán proporcionarse con cierres positivos capaces de resistir la presión máxima del grouting. La presión requerida del grouting deberá tomar en cuenta la cabeza de presión para los cambios verticales en el perfil.

Deberán hacerse reparaciones especiales por cualquier inlet u outlet dañado, antes del grouting.

4.3.1.4. Revisión de la Presión del Sistema de Ductos

Antes de iniciar el grouting, es recomendable que los ductos de post-tensionado sean probados usando aire comprimido para verificar si alguna conexión del ducto, junta o accesorios requieren sellado o reparación. El aire comprimido deberá estar limpio, seco y libre de cualquier aceite o contaminante.

Una posible prueba sería considerar el sistema de ducto satisfactorio si, luego de la presurización a una presión inicial (ejemplo, 0.7 MPa (100 psi)) la pérdida de presión a los cinco minutos es menor del 10% (ejemplo, 0.07 MPa (10 psi)).

Dependiendo del tipo de construcción, esta prueba podría ser ejecutada:

- Antes que el concreto sea colocado alrededor de los ductos en cualquier estructura.
- Luego que el concreto haya sido colocado pero antes que una viga principal (girder) sea enviada desde una planta.
- Luego que una viga principal haya sido erigida y el empalme continuo realizado con las vigas principales adyacentes.
- Luego que los segmentos prefabricados hayan sido erigidos.
- Luego que los torones de post-tensionado o barras hayan sido instalados.

Normalmente, sólo una de aquellas pruebas podría hacerse según sea apropiado para el proyecto.

En cualquier caso sería necesario sellar temporalmente los extremos de los ductos. Esto podría hacerse con cabezales de grout de anclaje. Probar a 0.7 MPa (100 psi) antes de colocar el concreto (1) sería una prueba severa de un sistema del ducto. Una presión baja puede ser apropiada, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de los ductos y accesorios. La prueba de una viga antes de enviarla desde la planta (2) es adecuada sólo para los tendones que empiezan y acaban dentro de la viga principal y no necesitan empalmes en el sitio. Si una viga principal tiene que ser empalmada a otras, entonces la prueba deberá hacerse en el sitio para el ducto total continuo (3). Los ductos longitudinales en los segmentos prefabricados deberán ser probados luego de la erección (4). Los tendones externos sólo pueden probarse en el sitio después de la fabricación del sistema de ductos (4). Sellar temporalmente un tendón con colas de torones largas proyectando desde los anclajes es muy difícil y poco recomendable (5).

4.3.2. Equipo para el Grouting

4.3.2.1. Mezcladora (Mixer), Tola de Almacenamiento (Storage Hopper), Filtro (Screen), Bomba (Pump), Diales de Presión (Pressure Gauges), Mangüeras (Hoses)

4.3.2.1.1. Mixer

El mixer deberá ser capaz de un mezclado mecánico continuo para producir un grout homogéneo, estable, libre de grumos o un material no disperso que abasteza continuamente a la bomba.

Los mixers son de dos tipos principales: mixer de veleta (paleta, vane, paddle) con una velocidad de alrededor de 1000 rpm o mixers de corte de alta velocidad (coloidal) con una velocidad de alrededor de 1500 rpm. Los mixers de alta velocidad distribuyen el cemento de forma más uniforme, mejoran las características del sangrado o exudado y minimiza los grumos de cemento.

4.3.2.1.2. Tola de Almacenamiento (Storage Hopper) y Filtro (Screen)

La mayoría de los equipos de grouting tienen un tanque de mezclado (mixing tank) el cual descarga a un filtro en una tolva de almacenamiento o tanque montado sobre la bomba del grout (Figura 4-1). La tolva de almacenamiento deberá también tener un rotor de mezclado para conservar el grout agitado para el uso continuo y deberá ser mantenido parcialmente lleno en todo momento. El filtro deberá contener abertura de 3 mm (1/8 plg) de tamaño máximo para filtrar grumos (terrones) de la mezcla. El filtro deberá ser inspeccionado periódicamente. Si los grumos de cemento permanecen en el filtro, entonces la mezcla no es adecuada.

Para los grout tixotrópicos, dos idénticos tanques de mezclado/almacenamiento son necesarios para que alternen entre el mezclado (blending) y el almacenamiento, de modo que una nueva mezcla puede iniciarse mientras que el almacenado es bombeado. Un mixer de velocidad alta (coloidal) es necesario para cada tanque. Para los grouts tixotrópicos, el filtro entre el tanque y la bomba debe tener aberturas de 5 mm (3/16 plg). La bomba de grout deberá tener un control preciso de presión y ser alimentado desde cada tanque de almacenamiento (holding hopper) a su vez.

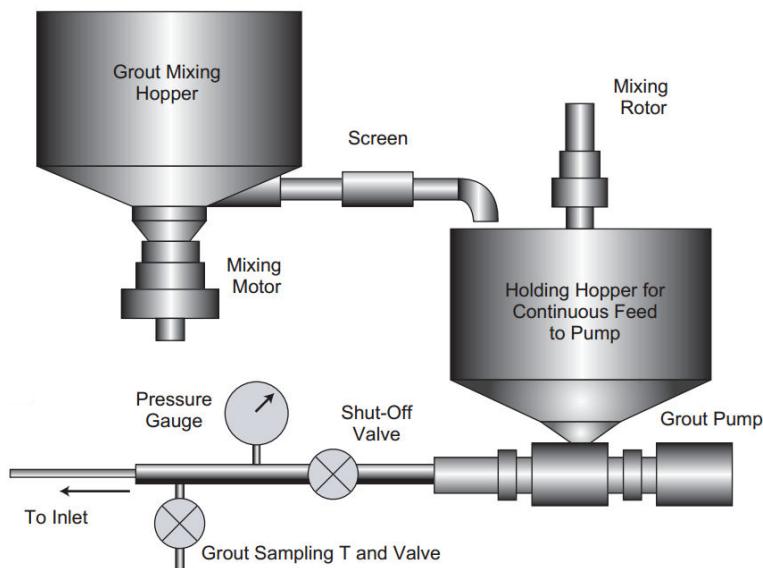


Figura 4-1: Equipo de mezclado y bombeo de grout.

4.3.2.1.3. Bomba del Grout

Las bombas de grout deberán ser del tipo de desplazamiento positivo y ser capaces de mantener una presión de outlet (salida) de al menos 1 MPa (145 psi). La bomba, mangueras y conexiones deberán ser capaces de mantener la presión en los ductos “enrutados” completamente. Una válvula de cierre deberá instalarse en la línea de modo que pueda ser cerrada bajo presión, cuando sea necesario (Figura 4-1).

Las bombas con una capacidad de salida variable son adaptables para enviar demandas de diámetros diferentes de ductos o para el grouting de grupos. Sin embargo, la presión del grouting deberá limitarse para ayudar a prevenir explosiones en el equipo, protecciones de los operadores, prevenir la segregación o sangrado excesivos y prevenir posibles divisiones del concreto por la sobre-presurización de los ductos.

Las bombas deberán tener un sistema para la re-circulación del grout cuando el bombeo no esté en progreso y deberá tener sellos la entrada de aceite, aire, u otras sustancias extrañas o prevenir la pérdida de grout o agua. En la bomba, la tubería de grout deberá incorporar una Tee de muestreado con una válvula de parada. El número de cambios y curvas en el tamaño deberá minimizarse.

4.3.2.1.4. Dial de Presión

Un dial de presión con una lectura total de escala de no más de 2MPa (300 psi) deberá anexarse entre el outlet de la bomba y el inlet del ducto. Para longitudes cortas (dígase, menores que alrededor de los 10 m (30pies)) de manguera de grout, el dial puede colocarse cerca de la bomba – para longitudes grandes, en el inlet. Para longitudes de mangueras sobre los 30 m (100 pies), un manómetro (gage) cerca de la bomba y uno en el inlet pueden ayudar a identificar si las acumulaciones de presión repentinas están en las mangueras o en los ductos.

4.3.2.1.5. *Mangueras*

El diámetro y relación de presión de las mangueras deberá ser compatible con la bomba y las presiones máximas anticipadas. Todas las mangueras deberán estar firmemente conectadas a los outlets de la bomba, tubería e inlets. Es recomendable que la manguera del grout sea al menos de 20 mm (3/4 plg) de diámetro interior para longitudes hasta alrededor de los 30 m (100 pies) y que una reducción en el tamaño de los conectores sea evitada. También, aberturas estrechas deberán evitarse. Ambos pueden conducir a un acumulación de presión y posibles riesgos de bloqueo.

4.3.2.2. *Equipo de Prueba en el Sitio para la Producción de Grouting*

Para el muestreo y pruebas de la producción diaria del grout fluido el siguiente equipo deberá ser considerado:

- Contenedores limpios para el muestreo.
- Cono de flujo, contenedor de 1 litro y cronómetro (watch-stop) para fluidos (ASTM C939, Figura 2-1).
- Balance de lodo (mud-balance) del American Petroleum Institute (API) para las pruebas de densidad.
- Moldes de 50 mm (2 plg) para hacer los cubos de las pruebas de resistencia.
- Cilindros graduados y muestra del torón para la Prueba de Sangrado Inducida por Meca (ASTM C940).
- Para grout tixotrópico – kit para la Prueba del Grout a la Presión de Schupack (figura 2-3).

Los requerimientos de las especificaciones para las pruebas de campo pueden variar por proyecto y no todo el equipo listado puede ser necesario.

4.3.2.3. *Equipo de Grouting al Vacío (Inyección al Vacío)*

Cuando los documentos del contrato del proyecto requieren grouting al vacío, el equipo deberá proporcionarse en el sitio de trabajo al mismo tiempo con todas las operaciones de presión de grouting (Figura 4-2). El equipo de grouting al vacío deberá ser del tipo de medición volumétrica con la capacidad de medir el volumen de un agujero y suministrar un volumen medido de grout para llenar aquel agujero.

Las disposiciones para el grouting al vacío no son generalmente necesarias para proyectos que contienen sólo tendones transversales (losas de tableros) con una longitud menor que 30 m (100 pies).

4.3.2.4. *Equipo de Grouting de Respaldo*

Un mixer y bomba de grout de respaldo deberán estar disponibles durante las operaciones del grouting.

Una compresora de aire es necesaria para suministrar aire comprimido libre de aceite para revisar los ductos para integridad y fugas o ayudar a soplar cualquier agua. La longitud de las mangueras de aire deberá ser suficiente para insertar y llegar a lo largo de los ductos para soplar escombros o agua hacia fuera cuando sea necesario.

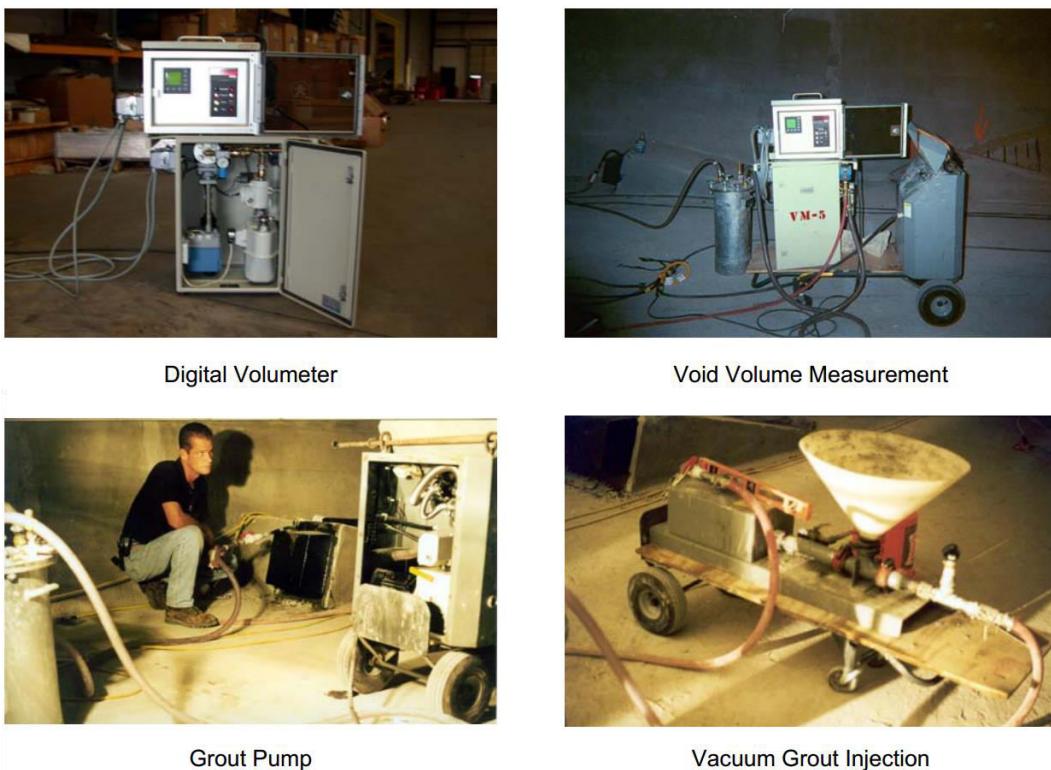


Figura 4-2: Equipo de grouting al vacío.

Equipo de lavado adecuado y abastecedor de agua potable deberán estar disponibles en el caso que sea necesario para remover grout del ducto. Sin embargo, aunque el lavado ha sido adecuado en el pasado, ya no se recomienda. Como medida correctora, la remoción de grout deberá hacerse sólo con la concurrencia del Ingeniero cuando sea necesario. El grouting al vacío es un método preferido para los ductos llenados parcialmente de grouting en la mayoría de las situaciones.

4.3.2.5. Limpieza del Equipo de Grouting

Todo el equipo de grouting deberá ser limpiado a fondo después del grouting.

4.3.3. Dosificación y Mezclado

Las proporciones en la mezcla deberán estar basadas en la mezcla aprobada, antes que el grouting inicie ya sea para una mezcla a ser mezclada en el lugar o un grout pre-calificado, pre-embolsado (Capítulo 4). Los materiales del grout de polvo seco y pre-embolsados deberán ser dosificados por peso a una precisión del +2%. El agua y el aditivo líquido puede ser dosificado por peso o volumen a una precisión de +1%. Cualquier contenido de agua en cualquier aditivo líquido deberá contarse para la cantidad de agua.

Los materiales deberán ser mezclados para producir un grout homogéneo sin subidas excesivas de temperatura o pérdida de las propiedades del fluido (cono de flujo). La mezcla deberá agitarse continuamente hasta que sea bombeada. No deberá añadirse agua para incrementar la fluidez si se ha disminuido o retrasado el uso del grout. Típicamente, el tiempo de mezcla para el grout deberá estar en

concordancia con las pruebas de calificación y generalmente no más de 4 minutos para un mixer de paleta o 2 minutos para un mixer de corte de alta velocidad.

A menos que se especifique lo contrario por el fabricante, los constituyentes pueden añadirse como sigue:

- Para un mixer con paleta: todo el agua, alrededor de 2/3 del material cementicio, el aditivo, el material restante.
- Para un mixer de corte (coloidal) de alta velocidad: agua, aditivo, material cementicio.

El humo de sílice condensado, compactado seco no deberá agregarse a una mezcla ya que los aglomerados no se mezclan bien, conduciendo a una mezcla pobre.

4.3.4. Pruebas en el Sitio de la Producción de Grout

Con la finalidad de asegurarla correcta consistencia y densidad de la producción diaria de grout, la fluidez y la densidad deberán estar dentro de los límites aceptables en concordancia con los siguientes requerimientos. Agua adicional nunca deberá añadirse a una mezcla para reunir los requerimientos de la prueba de fluidez y el grout sobrante, descargado y probado deberá desecharse apropiadamente.

Es recomendable que la producción diaria de grout sea monitoreada antes y después de la inyección de acuerdo a las pruebas de las siguientes secciones.

4.3.4.1. Prueba de Sangrado de la Producción – Antes de la Inyección

Para grouts normales (no tixotrópicos) es recomendable que al empezar cada día de producción de grouting, ya sea una prueba de sangrado inducido por mecha (Figura 2-2) será desarrollada en la mezcla por aquel día o una Prueba de Sangrado de Presión de Schupack (Figura 2-3).

Ya que las pruebas de sangrado inducido por mecha toman al menos tres horas, debe ejercerse discreción para evitar retrasos innecesarios cuando se inicien operaciones de grouting nuevas (diarias). En consecuencia, se sugiere que esta prueba sea desarrollada regularmente en los materiales almacenados corrientemente destinados a usarlos en el plazo cercano de modo que resultados aceptables puedan ser mantenidos de forma rutinaria para facilitar la producción continuada del grouting.

Como una alternativa, la Prueba de Sangrado de Presión de Schupack requiere menos tiempo y deberá ser adecuada para la mayoría de grouts fabricados (pre-embolsados). Referencias deberán hacerse al fabricante. Información sobre las pruebas pueden encontrarse en el Apéndice C del PTI “Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures”, última edición.

4.3.4.2. Grout Normal, No Tixotrópico – Antes de Inyectar al Inlet

La consistencia de los grouts no tixotrópicos deberá probarse de acuerdo al ASTM C939 “Standard Test Method for Flow of Grout”. El tiempo de eflujo deberá estar entre 11 y 30 segundos

inmediatamente después del mezclado. Luego permitiendo al grout mantenerse por 30 minutos sin mayores agitaciones, el tiempo de eflujo deberá ser menor de 30 segundos.

4.3.4.3. Grout Tixotrópico – Antes de Inyectar al Inlet

Para grouts tixotrópicos, la prueba modificada del ASTM C939 deberá usarse cuando el cono de flujo está lleno hasta el tope, esto es sobre el nivel estándar, y el tiempo de llenar un contenedor de un litro es medido. El tiempo de eflujo deberá estar entre 5 y 30 segundos inmediatamente después del mezclado. Luego permitiendo al grout mantenerse por 30 minutos sin mayores agitaciones y entonces re-mezclar por 30 segundos, el tiempo de eflujo deberá ser menor de 30 segundos.

[Nota: el cono de flujo modificado puede no ser adecuado para algunos tipos de grout tixotrópicos. Es entendible obtener resultados diferentes para distintas fabricantes de grout. Una prueba alternativa que mide el diámetro de propagación de un cilindro colapsado de grout es considerado por la industria. Esto fue desarrollado para proyectos off-shore en Noruega y Suecia.]

La densidad de un grout tixotrópico puede ser muestrada y comprobada en el inlet usando la prueba del “balance de lodo” de la American Petroleum Institute (API) (ASTM C185).

4.3.4.4. Grout Normal, No Tixotrópico – Descarga el Outlet Final

Inmediatamente después un flujo uniforme de grout no contaminado es obtenido en el último outlet, una prueba de fluidez deberá desarrollarse en el grout descargado desde el outlet usando la prueba del cono de flujo estándar ASTM C939 (Figura 2-1). El tiempo de eflujo no deberá ser menor que aquel medido en la bomba/inlet. Si el tiempo de eflujo es muy corto, entonces más grout deberá descargarse y probar nuevamente. Esto deberá repetirse hasta que el grout tenga una consistencia uniforme aceptable: esto es, un tiempo de eflujo mínimo aceptable de 11 segundos siempre que el tiempo máximo de eflujo sea menor que 30 segundos.

Alternativamente, la fluidez y densidad del grout descargado puede comprobarse usando el Método de Densidad Húmeda para muestras de campo (ASTM C 138). La densidad medida deberá caer dentro de valores aceptables.

4.3.4.5. Grout Tixotrópico – Descarga el Outlet Final

Inmediatamente después un flujo uniforme de grout no contaminado es obtenido en el último outlet, una prueba de fluidez deberá desarrollarse en el grout descargado desde el outlet usando la prueba del cono de flujo modificada ASTM C939 (Figura 2-1). El tiempo de eflujo máximo no deberá ser menor que 30 segundos. Alternativamente, la densidad de la descarga del grout puede comprobarse usando el balance de lodo del API.

[Nota: Esto puede ser un método más adecuado para ciertos grouts comerciales, tixotrópicos y de fluidez elevada con tiempos de eflujo muy cortos, de unos pocos segundos. La densidad en el outlet no deberá ser menor que aquel medido en la bomba/inlet.]

4.3.5. Inyección de Grout

Antes del grouting, todos los outlets de grout deberán estar abiertos y revisarse para asegurar que ellos están libres y limpios de cualquier escombro y agua. El grouting deberá proceder de acuerdo a un Plan de Grouting aprobado (Sección 4.1).

4.3.5.1. Bombeo

Los métodos de bombeo de grout aseguran el llenado completo de los ductos y el encerrado del acero del post-tensionado. El grout deberá ser bombeado en una operación continua y ser desde el primer, y subsecuentes outlets, hasta que toda el agua condensada o aire atrapado haya sido removido antes de cerrar cada outlet a su vez. En cada outlet y cabezal final de grout, el bombeo deberá continuar hasta que la consistencia del grout descargado sea equivalente a aquel que es inyectado en el inlet. Al menos 7.5 litros (2 galones) de grout bueno, consistente y de calidad deberá descargarse a través del anclaje final y el cabezal antes de cerrarlos.

4.3.5.2. Límites de las Presiones de Inyección de Grout

Para las operaciones normales el grout deberá inyectarse a una presión menor que 0.52 MPa (75 psi) en el inlet. Las presiones de bombeo no deberán exceder de 1MPa (145 psi).

Aunque presiones más elevadas que estas podrían ser sostenidas por los ductos internos de HDPE o de acero o por ductos externos de tubos de acero, las presiones elevadas no son recomendadas para el grouting. Algunas veces una presión inicial elevada temporal puede ser necesaria para movilizar un grout tixotrópico, pero, una vez que fluye, las presiones de bombeo deberán ser las mismas como para los grouts normales.

4.3.5.3. Velocidad del Flujo de Grout

A menos que se apruebe lo contrario por el Ingeniero, el grout deberá inyectarse a una velocidad de 16 pies (5 metros) a 50 pies (15 metros) de ducto por minuto bajo presiones normales de bombeo.

4.3.6. Inyección de Grout de los Tendones de la Superestructura

4.3.6.1. Ubicación de los Inlets y Outlets

Para información y guía, referirse a los ejemplos de ubicaciones recomendadas de inlets y outlets de grout en la Sección 4.5 más adelante.

4.3.6.2. Secuencia para Usar y Cerrar Outlets

Para los tendones generalmente horizontales o drapeados, el grouting deberá proceder desde un inlet en el punto más bajo del perfil del tendon. Esto puede ser en un anclaje inicial o en un punto bajo intermedio en el perfil del tendon.

El grout deberá inyectarse sostenidamente y consistentemente en el inlet diseñado. Cuando el flujo de grout del primer outlet intermedio es de una consistencia de aquel que está siendo inyectado y está libre de todo el aire y agua condensada, el primer outlet deberá cerrarse. La inyección deberá continuar

hasta que el mismo flujo se obtenga desde el siguiente outlet a su vez, después de lo cual éste deberá cerrarse. La inyección de grouting deberá continuar hasta que todos los outlets intermedios hayan sido cerrados y el grout fluya desde el último outlet del anclaje. El grouting deberá continuar hasta que al menos 2 galones de grout hayan sido descargados a través del último anclaje y su cabezal de grout, con la finalidad de asegurar que el anclaje y el cabezal estén completamente llenos.

Si durante la inyección, la presión real del grouting excede el máximo permitido en el inlet, entonces el inlet deberá cerrarse y el grout bombeado al siguiente respiradero disponible, siempre que el grout ya haya fluido desde aquel respiradero (vent) – de modo que el flujo del grout en un sentido se mantenga.

Para mayor información y guía, ver la Sección 4.5 más adelante.

4.3.6.3. Prueba de Presión del Grout para Fugas

Revisar un tendón “enrutado” deberá estar principalmente en concordancia con el AASHTO LRFD Construction Specifications. Referencias pueden hacerse también al PTI Grouting Specification.

El siguiente método alternativo ha sido adoptado del FDOT y está incluida sólo para información:

“Luego que todos los outlets hayan sido sangrados y cerrados, la presión deberá ser elevada hasta aproximadamente 0.52 MPa (75 psi) y esperar por dos minutos mientras el tendón es examinado por alguna evidencia de fuga y evitar la pérdida no intencionada de grout. Un descenso en la presión durante el periodo de dos minutos indicaría fugas. Con la finalidad de revisar la pérdida de presión, un dial de presión deberá colocar en la línea entre la válvula de salida en la bomba, la que está cerrada bajo presión, y el inlet del tendón, el cual se deja abierto. Alternativamente, un dial de presión podría ser instalado en algún outlet conveniente. Las fugas deberán ser selladas usando métodos aprobados por el Ingeniero y la prueba de presión repetida”.

4.3.6.4. Liberación del Aire Atrapado y Bloqueado

Revisar un tendón “enrutado” deberá principalmente estar en concordancia con el AASHTO LRFD Construction Specifications. Referencias también deberán hacerse al PTI Grouting Specification.

El siguiente método alternativo ha sido adoptado del FDOT y está incluido sólo para información:

“Cuando no haya fugas o cuando han sido selladas correctamente, la presión de 0.52MPa (75 psi) deberá ser liberada a 0.03 MPa (5 psi) y diez minutos y permitir a cualquier aire atrapado fluir a los puntos elevados. Luego de diez minutos, la presión del grouting deberá aumentarse tanto como sea necesario con la finalidad de liberar aire atrapado o agua y descargar el grout en cada outlet en puntos elevados del tendón a su vez. El sistema deberá entonces bloquearse a una presión de 0.21 MPa (30 psi)”.

4.3.6.5. Grouting Incompleto

Cuando el grouting completo no pueda alcanzarse por los métodos mencionados líneas arriba, entonces la operación del grouting deberá terminarse. Luego de 24 horas (esto es, luego que el grout haya

sido colocado), el tendón deberá inspeccionarse, si fuera necesario, perforando y usando un endoscopio o sonda (Sección 4.3.8). Los agujeros deberán ser medidos y llenados usando grouting al vacío de medida volumétrica u otros métodos aprobados por el Ingeniero. La disposición de un tendón bloqueado será una determinación específica del proyecto.

4.3.7. Inyección de Grout de Tendones Verticales

Esta sección aborda el grouting de sistemas convencionales de post-tensionado en aplicaciones verticales. El grouting de Cables Atirantados no está abordado en este documento.

4.3.7.1. Material del Grout

El grout para tendones verticales relativamente cortos tales como barras PT verticales o diafragmas de una superestructura, puede ser el mismo como aquel usado en tendones longitudinales. Sin embargo, para aplicaciones en pilares elevados o torres, un grout con características de sangrado muy bajas es esencial y puede ser necesario inyectar el grout en elevaciones intermedias.

4.3.7.2. Tuberías Verticales (Standpipes)

Para los tendones verticales, un tubo vertical deberá proporcionarse en cada superior para almacenar el agua de sangrado y grout, y mantener el nivel del grout sobre el nivel del anclaje de pretensado y el cabezal del grout. El tubo deberá diseñarse e instalarse así para asegurar que el sangrado en ningún momento cause que el nivel del grout descienda por debajo de un punto establecido en el tubo vertical de al menos 0.3 m (1 pie) por encima del punto más elevado del anclaje y del cabezal, y de modo que todo el agua de sangrado ascienda en el tubo vertical y no se acumule en el anclaje y el cabezal. Tubo plástico limpio es adecuado para una tubería vertical.

4.3.7.3. Inyección del Grout

El grout deberá inyectarse en el punto más bajo y descargarse a través de la tubería vertical. La fluidez y densidad del grout antes y después de la inyección deberá revisarse. La tubería vertical deberá ser llenada de modo que el nivel no descienda por debajo del anclaje y del cabezal. Si, luego de cesar el bombeo activo, los niveles descienden por debajo del nivel establecido en la tubería vertical, el grout deberá ser inmediatamente añadido al tubo vertical.

Para los tendones verticales mayores de 30 m (100 pies) de altura, o si la presión del grouting excede 1 MPa (145 psi), entonces el grout deberá inyectarse en los outlets más elevados desde el cual el grout haya ya fluido, de modo que el flujo del grout en un sentido se mantenga. El grout deberá estar permitido fluir desde un outlet hasta que todo el aire y agua hayan sido purgados antes de usar aquel outlet para inyección.

4.3.7.4. Grouting Incompleto

Cuando el grouting completo no pueda alcanzarse por los métodos mencionados líneas arriba, entonces la operación del grouting deberá terminarse. Luego de 24 horas (esto es, luego que el grout haya

sido colocado), la tubería vertical deberá removese y el anclaje y el cabezal examinados para asegurarse que ellos están completamente llenos; si es necesario perforar y usar un endoscopio o sonda (Sección 4.3.8). Los agujeros deben ser medidos y rellenados usando grouting al vacío de medida volumétrica.

Es preferido que el grout completo parcialmente no sea lavado hacia fuera con agua – esto no es sólo difícil pero es imposible remover todo el exceso de agua. Esto puede conducir al sangrado excesivo del re-grouting – especialmente si el lavado es sólo satisfactorio parcialmente. El grout sólo deberá lavado hacia fuera cuando se da la aprobación del Ingeniero. En casos extremos, la remoción de grout puede requerir hydro-demolición de presión elevada. Si se requiere la demolición de esta manera, todo el grout y el tendón deberán ser removidos.

4.3.8. Inspección Post-Grouting

Es recomendable que todas las inspecciones se desarrollen en presencia del Inspector (CEI).

4.3.8.1. Apertura de los Inlets y Outlets para Inspección

Las válvulas, cabezales, tuberías en los inlets y en los outlets no deberán abrirse o removese hasta que el grout se haya colocado y curado por un mínimo de 24 horas después del grouting. Sin embargo, dentro de las 72 horas del grouting, todos los inlets y outlets deberán ser abiertos para facilitar la inspección. La inspección del grout deberá desarrollarse dentro de una hora desde la apertura.

Todos los inlets y outlets deberán inspeccionarse para asegurar el llenado completo con grout. Todos los inlets y outlets deberán ser tapados y sellados (por debajo) dentro de cuatro (4) horas de completar la inspección, completar el grouting al vacío o remoción de los inlets y outlets no inspeccionados.

El grouting al vacío, cuando sea necesario, deberá completarse dentro de 72 horas de la inspección.

4.3.8.2. Perforado del Grout para Verificar la Ausencia de Agujeros

En los anclajes, algunas veces, dependiendo de la geometría, es posible que un inlet u outlet pueda aparentar estar lleno, pero un agujero puede existir al interior de la trompeta o del ducto. En consecuencia, el inlet u outlet del grout en el anclaje deberá perforarse justo lo suficiente para penetrar la superficie interior de la trompeta o ducto. El equipo de perforación deberá tener un cerrado automático cuando el acero sea encontrado de modo que el tendón no sea dañado. Los cabezales del grout sobre los anclajes no deberán ser perforados a menos que se sospeche que haya agujeros haciéndolos sonar.

Los outlets (tuberías) e inlets de grout en el ducto entre los anclajes deberán ser instalados de tal forma que puedan ser perforados justo lo suficiente para penetrar la superficie interior del ducto y entonces ser inspeccionados en la misma forma como en un anclaje.

Cuando se encuentre un agujero, éste deberá ser examinado para determinar su extensión. Todos los agujeros deberán ser llenados completamente usando el proceso de grouting al vacío de medida volumétrica.

4.3.8.3. *Frecuencia de la Inspección*

Para los tendones longitudinales de la superestructura, la siguiente frecuencia de inspección es sugerida:

- Todos los inlets y outlets en los puntos elevados del anclaje y el cabezal deberán inspeccionarse perforando y probando con un endoscopio para detectar defectos (agujeros).
- Para puentes con más de 20 tendones pero donde ninguno de los tendones es mayor de 50 m (150 pies) todos los inlets y outlets en los puntos elevados de los anclajes y tendones deberán inspeccionarse perforando y probando con un endoscopio o probar hasta que ningún defecto (agujeros) sean encontrados en veinte (20) consecutivos tendones. Después de eso, la inspección puede reducirse por 50%, esto es para cada otro tendon. Sin embargo, si un defecto es encontrado, los últimos cinco tendones “enrutados” deberán ser inspeccionados y los siguientes 20 tendones consecutivos deberán inspeccionarse antes de que una vez más se reduzca la frecuencia de inspección al 50% si ningún agujero se encuentre. Este ciclo deberá continuar a lo largo de todas las operaciones de grouting de los tendones.

Para los tendones verticales relativamente cortos en las almas o diafragmas de la superestructura, el outlet superior (anclaje) de cada tendon deberá inspeccionarse. Todos los inlets y outlets deberán inspeccionarse para los tendones verticales en la subestructura.

4.3.8.4. *Llenado de los Agujeros de Inspección Perforados*

Los agujeros de inspección perforados en los que no se encuentren agujeros deberán ser llenados con un grout o epóxico cementicio aprobado usando un tubo de inyección que se extienda hasta el inferior del agujero perforado.

4.3.8.5. *Grouting Incompleto*

En general, cuando cualquier operación de grouting del tendon haya sido prematuramente terminada, antes que los ductos podrían haber sido completamente llenados con grout, los ductos deberán perforarse y explorar por áreas agujereadas usando un endoscopio con la finalidad de determinar la extensión y el volumen de los agujeros. Los inlets y outlets de grout deberán ser instalados en los agujeros llenados usando equipo de grouting al vacío de medida volumétrica.

4.3.9. *Agujeros Llenados por Grouting al Vacío*

El grouting al vacío es un método para retirar el aire desde agujeros para crear un completo vacío tanto como sea posible y entonces usar este vacío para atraer grout en los agujeros para rellenarlos. La eficiencia del método depende significativamente del grado en el cual todas las fugas puedan ser selladas efectivamente. Ya que es imposible un completo vacío, la mayoría de las operaciones se realizan bajo un vacío parcial. También, el grout es normalmente inyectado bajo presión – así el método puede referirse como “grouting a presión de vacío asistido”.

Las fugas en los anclajes, en los inlets y outlets de grout pueden generalmente ser sellados apretando los cabezales de grout. Sin embargo, es difícil sellar una fuga en algún lugar a lo largo de un

tendón en una brecha de la pared del ducto, en un empalme del ducto hecho pobemente o si hay comunicación cruzada entre los ductos a través de la junta epóxica incompletamente sellada o por defectos en el concreto. Una prueba de presión positiva de aire deberá revelar la presencia de tales fugas. En lo que fuera posible, tales fugas deberán sellarse con epóxico o inyección de epóxico.

El equipo de grouting al vacío deberá incluir un dispositivo para la medición de volúmenes de los agujeros de modo que la cantidad de grout inyectado pueda revisarse en contra de aquel anticipado, para dar alguna garantía de que los agujeros han sido llenados. La mayoría de los dispositivos funcionan en las bases de medir los cambios de presión cuando los agujeros están conectados a un recipiente (vessel) presurizado de evacuación de volumen conocido y viceversa.

Si un agujero tiene una constrictión, dígase en algún lugar a lo largo de un tendón, puede no ser posible de inyectarlo con grout más allá de él. En consecuencia, el volumen de grout inyectado al vacío será menor que aquel volumen medido. Deberá entonces hacerse un intento para completar el grouting al vacío desde el otro extremo, si fuera posible. Si la ubicación de una constrictión fuera conocida, o si un agujero existe en algún lugar en el centro del tendón y no conecta con los extremos, puede ser posible perforar cuidadosamente en el ducto e instalar inlets y outlets de grout intermedios para el grouting al vacío.

4.3.9.1. Tiempo para Completar el Grouting al Vacío

Cuando es necesario el grouting al vacío, éste debe completarse dentro de 72 horas de la inspección de los inlets y outlets perforando y probándolos. Los cabezales y sellados deberán completarse dentro de cuatro (4) horas de completar el grouting al vacío.

4.3.9.2. Material del Grout

A menos que se apruebe lo contrario por el Ingeniero, el grout para el grouting al vacío deberá ser el mismo como aquel usado para “engrutar” los tendones.

4.3.9.3. Equipo

4.3.9.3.1. Mixer

Ya que el grouting al vacío involucra cantidades relativamente pequeñas de grout, el mixer y la tolva de almacenamiento de grout necesarios no necesariamente serán los mismos como aquel para las operaciones principales de grouting. Sin embargo, el mixer debe ser capaz de mezclar a fondo los constituyentes para reunir fluidez y otros requerimientos para los grouts normales o tixotrópicos.

4.3.9.3.2. Volúmetro (Volumeter)

Un dispositivo denominado como un “volúmetro” es necesario para medir el volumen de los agujeros de grout. Este dispositivo puede usar ya sea un vacío o el método de presión de aire. Éste puede ser un dispositivo analógico o digital.

4.3.9.3.3. Almacenamiento y Bombeo del Grout

Una bomba de grout deberá ser un dispositivo de desplazamiento positivo (pistón y cilindro) con una tolva dimensionada y accesorios para las mangueras.

4.3.9.3.4. *Mangueras y Válvulas*

Las mangueras y las válvulas son necesarias para conectar una compresora de aire o bomba de vacío con el volúmetro, con la bomba de grout y con el inlet del ducto. Las válvulas deberán instalarse cuando sea necesario facilitar la evacuación de aire desde los agujeros, medir el volumen del agujero y cambiar al grout inyectado bajo presión.

4.3.9.4. *Operación del Grouting al Vacío*

El grouting al vacío generalmente involucra las siguientes actividades:

- Presurización del agujero y revisar para fugas.
- Sellado de fugas (apretar todos los cabezales y sellar las fugas con epóxico o inyección de epóxico).
- Medición del volumen del agujero para determinar la cantidad necesaria de grout.
- Mezcla suficiente de grout para el uso y para las pruebas, registrar la cantidad del grout mezclado.
- Probar el grout usando el cono de flujo o el método del cono de flujo modificado.
- Evacuar el aire de los agujeros.
- Cambiar (switch) la válvula e inyectar grout en los agujeros bajo presión.
- Registrar la cantidad de grout restante y calcular la cantidad inyectada.
- Sellar los inlets de inyección de grout.
- Limpiar el equipo, el área de operaciones en la estructura y descartar de forma apropiada el grout no usado.
- Registrar y reportar las operaciones del grouting al vacío.

4.3.10. *Sellado de los Inlets y Outlets de Grout*

Es recomendable que los cabezales de plástico roscados se usan para sellar todas las tuberías de los inlets y outlets del grout, y que los tapones roscados se instalen en los anclajes y los cabezales de grout una vez que la tubería de grout y la válvula de cierre haya sido removida (Figura 2-9).

Cuando un inlet o outlet es dado de baja permanentemente dentro del concreto, provisión deberá hacerse para acomodar los cabezales de plástico roscados a un profundidad libre de al menos 25 mm (1 plg) por medio de un hueco o rebajo formado. El rebajo deberá estar limpiado y completamente lleno con un material epóxico aprobado. La superficie del rebajo deberá prepararse para recibir el material epóxico en concordancia con las recomendaciones del fabricante del epóxico (Apéndice D).

4.3.11. *Protección de los Anclajes de Post-Tensionado*

Luego del grouting, todos los anclajes de post-tensionado deberán ser correctamente preparados y protegidos cuando sea necesario. Para mayor información, referirse al Apéndice D.

4.3.12. *Reporte del Grouting*

Un reporte en el grouting del tendón, inspección, grouting al vacío y sellado deberá ser proporcionado del Contratista al Ingeniero dentro de las 72 horas de completar el sellado. El reporte del grouting del tendón deberá incluir, pero no necesariamente estar limitado a:

- Identificación del proyecto.
- Identificación del puente.
- Identificación del tendón.
- Fecha en la que el tendón fue esforzado.
- Fecha del “enrutado”.
- Número de días desde el esforzado hasta el grouting.
- Tipo de grout (tipo de cemento, pre-embolsado, fabricante).
- Tendones “enrutados” en la misma operación de grouting.
- Inyección final.
- Presión de grouting aplicada.
- Relación del real a la teórica cantidad de grout.
- Resumen de cualquier problema con el grouting y acciones correctivas tomadas.
- Fecha del llenado de los agujeros por grouting al vacío.
- Volumen estimado de los agujeros medidos durante el proceso de grouting al vacío.
- Cantidad de grout injectado por el grouting al vacío.
- Resumen de cualquier problema con el grouting al vacío y acciones correctivas tomadas.
- Confirmación y fecha del sellado de los inlets y outlets.
- Tipo de epóxico usado para llenar los rebajos contenido inlets y outlets sellados.

El “Reporte de Grouting” deberá coordinar con el “Reporte de Esforzado”.

4.4. Problemas y Soluciones del Grouting

4.4.1. Interrupción del Flujo del Grouting

Si hay una ruptura, entonces usar el equipo de respaldo disponible. El equipo de respaldo deberá revisarse periódicamente para asegurar que está en condiciones de funcionamiento. El equipo de respaldo puede ser un segundo set de equipo de producción de grouting en operación cerca. En cualquier caso, el equipo de reemplazo deberá ser movilizado tan pronto como sea posible.

El equipo de respaldo deberá ponerse en funcionamiento dentro de los 15 a 30 minutos o sino el grout puede empezar a solidificarse y será muy difícil para móvilizar el grout, especialmente de tendones largos.

Si el equipo de respaldo no puede ponerse en funcionamiento, entonces el grouting deberá finalizarse. El grouting deberá inspeccionarse (Sección 4.3.8) y ser completado usando grouting al vacío (Sección 4.3.9) u otros métodos aprobados propuestos por el Contratista y aprobados por el Inspector (CEI).

4.4.2. Presión del Grouting Muy Elevada

Si se requiere una presión excesiva para inyectar el grout, puede haber una obstrucción. La presión excesiva sería cualquier presión alrededor del 50% más que el límite de presión de la Sección 4.3.5.2. En ninguna circunstancia deberá intentarse forzar al grout a través. La presión excesiva puede conducir a fallas del ducto o agrietamiento del concreto, dependiendo de las circunstancias y detalles.

Si el grout no puede inyectarse en un outlet intermedio desde el cual haya ya fluido, el grouting deberá cesar. El grout deberá inspeccionarse (Sección 4.3.8) y ser completado usando el grouting al vacío (Sección 4.3.9) u otros métodos aprobados y procedimientos propuestos por el Contratista y aprobados por el Inspector (CEI) (ver también las secciones 4.3.6.2 y 4.3.7.3).

4.4.3. Lavado del Grout Incompleto

Es preferible que el lavado del grout incompleto no se use (secciones 4.3.6.5 y 4.3.7.4) a menos que sea inevitable bajo algunas circunstancias muy especiales – en cuyo caso éste deberá sólo hacerse con la aprobación del Inspector (CEI).

4.4.4. Grouting Transversal No Anticipado

El riesgo del grouting transversal deberá detectarse por la prueba de presión del ducto (Sección 4.3.1.3) y se tomarán acciones para acomodar el grouting de los tendones como un grupo (ver requerimientos para el Plan de Grouting, Sección 4.1).

Si, sin embargo, el grouting transversal es descubierto sólo durante la producción de grouting, entonces si los otros tendones afectados ya han sido satisfactoriamente esforzados, el grouting deberá continuar hasta que todos los tendones afectados por el grouting transversal hayan sido totalmente “enrutados”. Si el grouting transversal está en los ductos vacíos o en los ductos que contienen tendones que aún no han sido esforzados, entonces el grouting debe parar y los ductos afectados o tendones deberán ser lavados. Luego que el grout incompleto haya sido colocado en el tendón con fugas, las fugas deberán ser selladas usando técnicas apropiadas y aprobadas (ejemplo, inyección de epóxico). El grouting deberá inspeccionarse (Sección 4.3.8) y completarse usando grouting al vacío (Sección 4.3.9).

4.4.5. Inaceptable Fluidez del Grout Producido

Antes del grouting, si el tiempo del cono de flujo excede los límites permitidos, desarrollar otra prueba. Si el tiempo de flujo aún excede los límites permitidos, revisar la fuente, fecha, almacenamiento y mezclado de los materiales del grout.

No agregar agua o cualquier reducidor de agua de alto rango para mejorar la fluidez. Si es necesario, abandonar la dosificación e iniciar nuevamente con material nuevo.

4.5. Ejemplos de Procedimientos de Grouting

Lo siguiente es ofrecido como una guía. Esto no es un set exhaustivo de ejemplos para todas las circunstancias concebibles y deberá considerarse sólo para información y guía.

4.5.1. Ejemplo 1: Viga Principal-I Empalmada de Dos Tramos (Figura 4-3)

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Orientar los anclajes de los extremos (A y G) de modo que los respiradores (vents) estén en la parte superior.
- Determinar la ubicación en el punto más bajo del perfil para el vent de inyección (en este ejemplo, el punto B). Ya que, en este caso, el cambio de perfil en el peralte de la viga principal-I empalmada es significativo (esto es, más de 0.5 m (20 plg)), el grout deberá inyectarse desde el punto bajo. Si dos o más puntos bajos están en la misma elevación, entonces seleccionar uno.
- Proporcionar un vent en la cresta (D) y en 1 a 2 m (3 a 6 pies) más allá de la cresta (en C y E) en ambas direcciones (evitar la confusión potencial entre trabajar en la planta de prefabricado y en el sitio).
- Proporcionar vents de drenaje en otros puntos bajos (B y F).
- Proporcionar el outlet de grout en el anclaje extremo (G).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: A, C, F, E, D G, B.

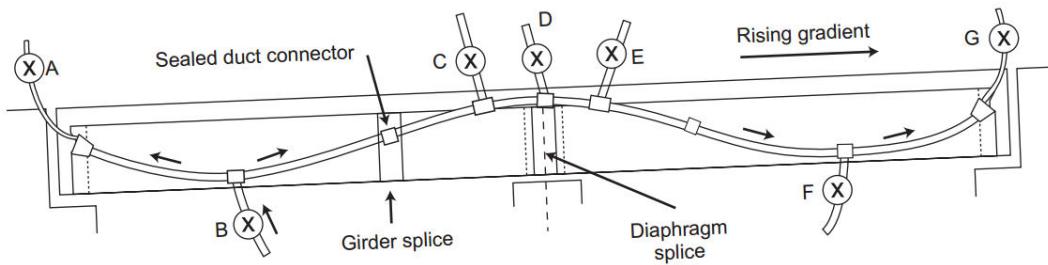


Figura 4-3: Detalles del grouting para un sistema de ducto de una viga principal empalmada de 2-tramos.

4.5.2. Ejemplo 2: Viga Principal-I Empalmada de Cuatro Tramos (Figura 4-4)

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Orientar los extremos finales (A y O) de modo que los vents estén en la parte superior.
- Determinar qué ubicación es el punto más bajo del perfil para el vent de inyección (en este ejemplo, el punto B). Ya que, en este caso, el cambio de perfil en el peralte de la viga principal-I es significativo (esto es, más de 0.5 m (20 plg)), el grout deberá inyectarse desde el punto bajo. Si dos o más puntos bajos están en la misma elevación, entonces seleccionar uno.
- Proporcionar un vent en todas las crestas (D, H, L) y en 1 a 2 m (3 a 6 pies) más allá de la cresta (en C, E, G, I, K y M). Aunque esto es sólo necesario, en teoría, instalar outlets en los puntos más elevados y en el lado aguas debajo de cada cresta, con la finalidad de evitar confusión y riesgo de errar (tal como girar la

viga principal de extremo a extremo) durante la erección, puede ser prudente instalar vents en ambos lados de una cresta.

- Proporcionar vents de drenaje en todos los otros puntos bajos (B, F, J, y N).
- Proporcionar el vent del outlet de grout en el anclaje extremo (O).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: A, C, F, E, D, G, J, I, H, K, N, M, L, O, B.

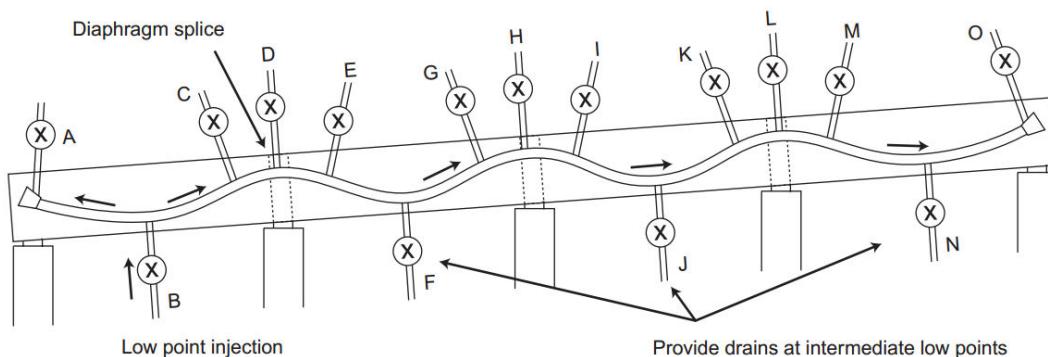


Figura 4-4: Detalles del grouting para un sistema de ducto de una viga principal empalmada de 4-tramos.

4.5.3. Ejemplo 3: Voladizo y Viga Principal-I Empalmada de Tres Tramos en Caída (Figura 4-5)

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Ya que, en este caso, el cambio de perfil en el peralte de la viga principal-I empalmada es significativo (esto es, más de 0.5 m (20 plg)), el grout deberá inyectarse desde el punto bajo.
- Determinar qué ubicación es el punto más bajo del perfil para el vent de inyección (en este ejemplo, el punto B).
- Orientar los anclajes extremos (A y L) de modo que los vents estén en la parte superior.
- Proporcionar vents en las crestas (D, e I) y en 1 a 2 m (3 a 6 pies) desde las crestas (en C, E, H y J). Aunque esto es sólo necesario, en teoría, instalar outlets en los puntos más elevados y en el lado aguas debajo de cada cresta, con la finalidad de evitar confusión y riesgo de errar (tal como girar la viga principal de extremo a extremo) durante la erección, puede ser prudente instalar vents en ambos lados de una cresta.
- Proporcionar vents de drenaje en todos los otros puntos bajos (B, F, G, y K).
- Proporcionar el vent del outlet de grout en el anclaje extremo (L).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: A, C, F, G, E, D, H, K, J, I, L, B.

4.5.4. Ejemplo 4: Vaceado-en-Sitio Sobre Falso Puente (Figura 4-6)

Este ejemplo aplica a cualquier tipo de estructura vaceada-en-sitio sobre falso puente tales como cajones, losas sólidas y losas con aberturas.

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.

- Si el cambio en la profundidad del perfil del tendón es mayor a 0.5 m (20 plg), el grout deberá inyectarse desde un punto bajo. Si dos o más puntos bajos están a la misma elevación, seleccionar uno.
- Proporcionar vents del outlet en los anclajes extremos (A e I).
- Orientar los anclajes extremos (A e I) de modo que los vents estén en la parte superior.
- Proporcionar vents de outlets en los puntos elevados de la cresta del perfil – esto es, lo que permita la pendiente.
- Proporcionar vents de outlets en puntos aproximadamente de 1 a 2 m (3 a 6 pies) más allá de las crestas en la dirección de flujo del grout – ejemplo, en D y G.
- Determinar qué ubicación es el punto más bajo del perfil para el vent de inyección (ejemplo, el punto B).
- Proporcionar vents de drenaje en otros puntos bajos (E y H).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: A, E, D, C, H, G, F, I, B.

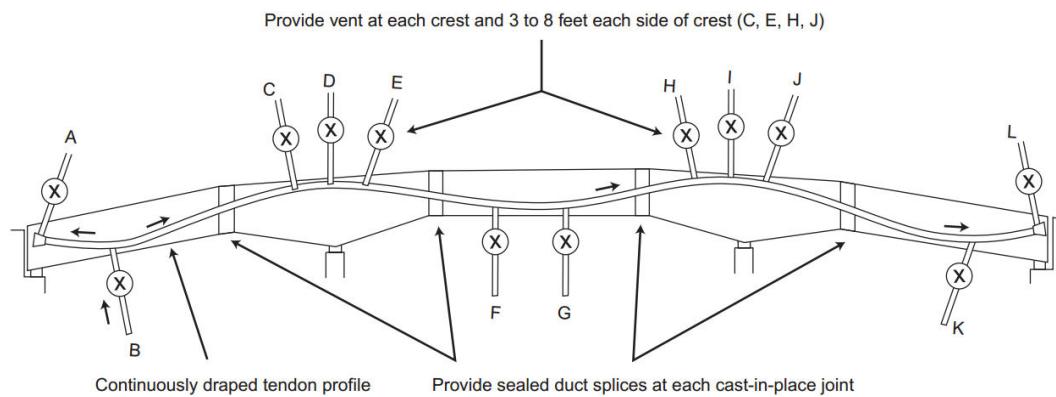


Figura 4-5: Detalles del grouting para un sistema de ducto de una viga principal empalmada de 3-tramos en caída.

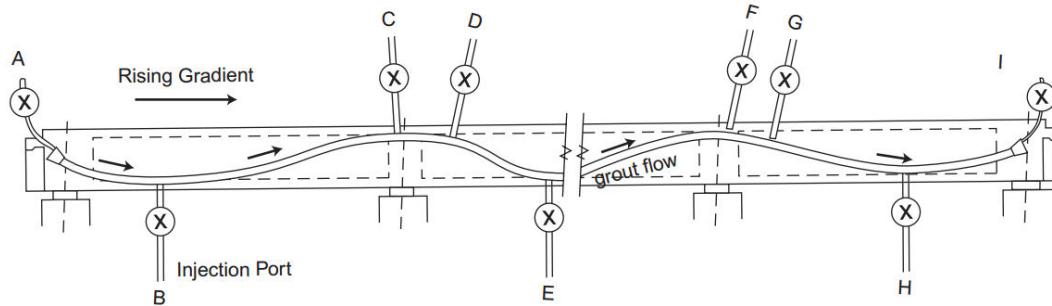
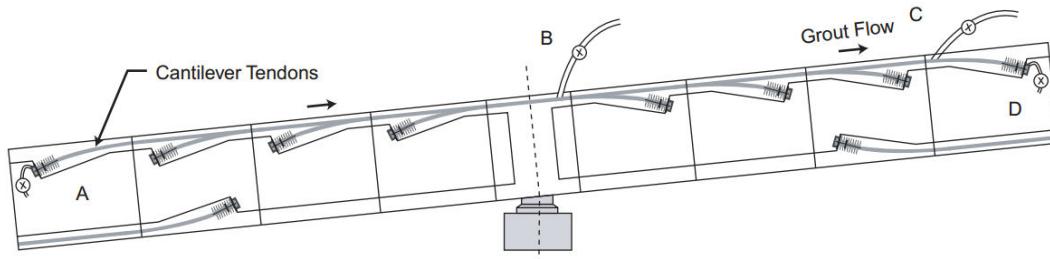


Figura 4-6: Detalles del grouting para un sistema de ducto de un cajón celular, losa con aberturas o sólida.

4.5.5. Ejemplo 5: Voladizo o Post-Tensionado de Continuidad Superior (Figura 4-7)

Para un tendón típico en voladizo, donde el voladizo esté sobre una gradiente longitudinal en ascenso, el siguiente procedimiento sería. También se aplicaría a un similar tendón de continuidad de una losa superior.

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Orientar los anclajes extremos (A y D) de modo que la inyección de grout y los vents de evacuación estén en la parte superior.
- Proporcionar inlet de grout en el anclaje más bajo extremo (A).
- Proporcionar un vent de outlet de grout en el punto más elevado del perfil del tendón (C).
- Proporcionar vent de outlet en el anclaje extremo (D).
- Si el tendón es mayor que 50 m (150 pies), proporcionar vent intermedio cerca a la mitad de la longitud (B).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: B, D, C, A.



- Injection port at top of anchor (A)
- Intermediate vent (B)
- High point vent (C)
- Outlet vent at top of anchor (D)

Figura 4-7: Grouting de los tendones en voladizo (en continuidad superior).

4.5.6. Ejemplo 6: Tendón de Continuidad Inferior en Voladizo de Sección Variable (Figura 4-8)

La Figura 4-8 ilustra un tendón de continuidad inferior típico en una estructura con peralte variable. Lo siguiente también se aplicaría a una estructura de peralte constante con anclajes y blisters dentro del cajón.

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Orientar los anclajes extremos (A y E) de modo que los vents de outlet de grout estén en la parte superior.
- Proporcionar un vent de drenaje en el punto más bajo o los puntos (B y D) del perfil del tendón permitido por la inclinación longitudinal y la configuración del tendón.
- Proporcionar inlet de grout en B y D. (El vent de drenaje podría también servir como un inlet).
- Proporcionar un vent de outlet de grout intermedio (C) en el punto más elevado del perfil del tendón o cerca de la mitad de la longitud del tendón si el tendón es más largo que 50 m (150 pies).

- Proporcionar otro puerto de inyección (D) si el perfil del tendón es de 0.5 m (20 plg) más bajo que el vent intermedio (C) y el vent del anclaje extremo (E).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: A, C, D, E, B.

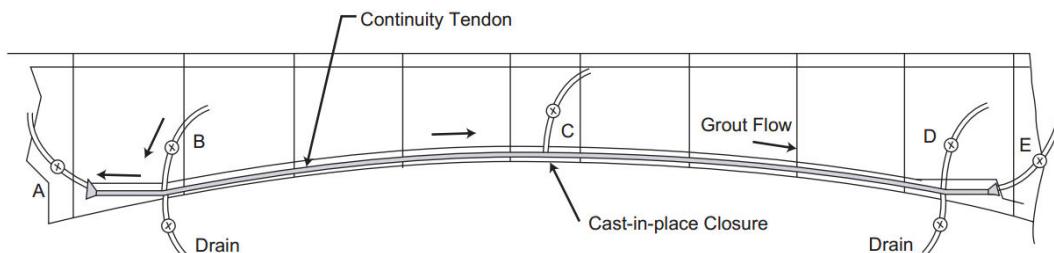


Figura 4-8: Grouting de los tendones de continuidad inferior en vigas principales tipo cajón de peralte variable.

4.5.7. Ejemplo 7: Tendón Externo del Tramo Exterior en Estructura Tramo-por-Tramo (Figura 4-9)

La Figura 4-9 muestra un tendon externo típico en el tramo extremo de un puente segmental tramo-por-tramo.

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Orientar ambos anclajes extremos (A y E) de modo que los vents de grout estén en la parte superior.
- Proporcionar un puerto de inyección en el punto bajo del perfil del tendon (B).
- Proporcionar otro vent de outlet en (C) si el tendon es mayor que 50 m (150 pies).
- Proporcionar un vent de outlet de grout (D) en el punto más elevado del perfil del tendon.
- Proporcionar otro vent de outlet en el anclaje exterior (E).
- Mostrar la dirección del grouting.
- Secuencia de cerrado de los vents: A, C, E, D, B.

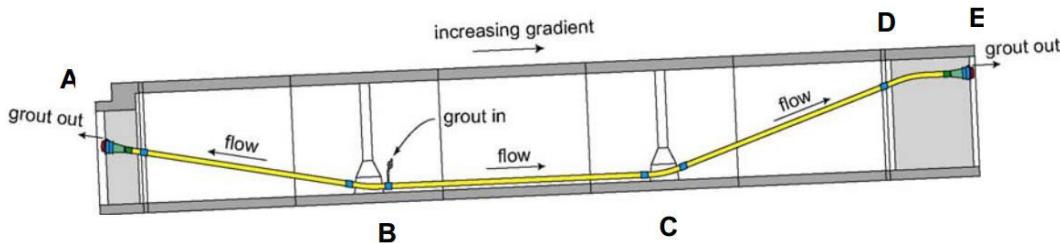


Figura 4-9: Detalles de grouting para el tendon exterior del tramo exterior.

Dependiendo de los detalles en los segmentos pilares, el tendon puede salir horizontalmente o curvarse cabeza abajo en el anclaje como se muestra en la Figura 4-10. Esto requiere dos diferentes arreglos para los vents de outlet de grout.

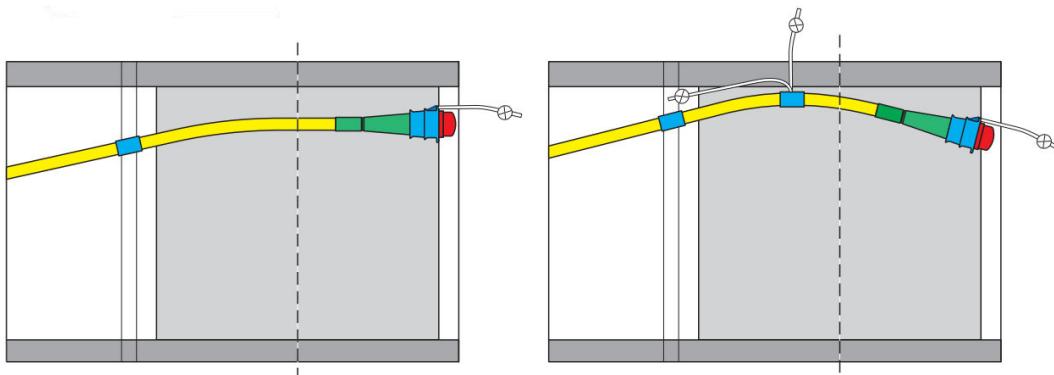


Figura 4-10: Ubicación de los vents de outlet en segmento pilar en puentes tramo-por-tramo.

4.5.8. Ejemplo 8: Conexiones del Inlet y Outlet al Tendón Externo Inferior (Figura 4-11)

Los tendones externos típicamente recorren a lo largo de la losa superior e inferior con un espacio libre pequeño. Cuando es necesario proporcionar un dren así como un inlet en el punto bajo del perfil, entonces las conexiones de la tubería de grout deberán ubicarse tanto como permita el ducto drenar. Un posible concepto es ilustrado en la Figura 4-11.

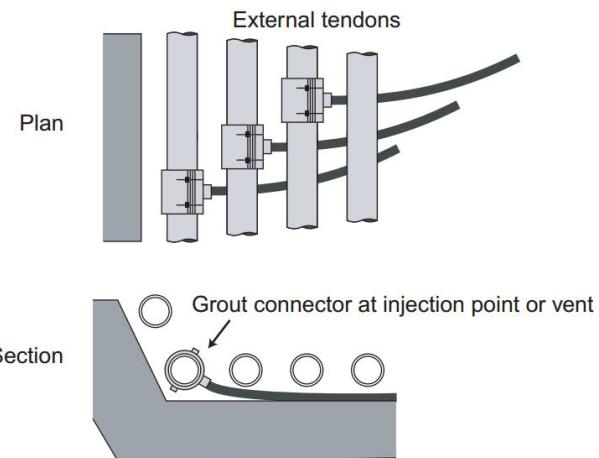


Figura 4-11: Posibles conexiones de grout para tendones externos inferiores.

4.5.9. Ejemplo 9: Tendones Laterales en Cabezal de Pilar Cabeza de Martillo (Figura 4-12)

- Considerar el perfil del ducto y la gradiente longitudinal y establecer la dirección de grouting.
- Colocar un outlet en el punto elevado.
- Inyectar desde un extremo del cabezal.
- Primero cerrar el vent en el extremo opuesto del cabezal luego evacuar el grout.
- Respirar el grout en el outlet del punto elevado.
- Cerrar el outlet del punto elevado, luego cerrar el inlet.

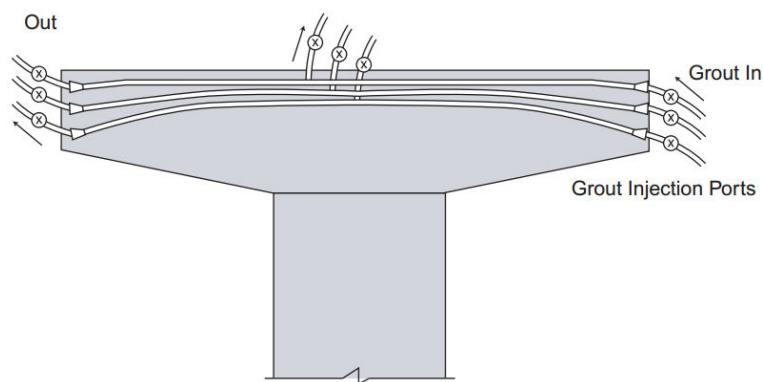


Figura 4-12: Detalles de grouting para tendones laterales en cabezal de pilar cabeza de martillo.

4.5.10. Ejemplo 10: Post-Tensionado Vertical en Pilares (Figura 4-13)

Los tendones post-tensionados verticales en un pilar son ilustrados en la Figura 4-13. Los inlets y outlets de grout intermedios son necesarios en intervalos de no más de 6 m (20 pies) aproximadamente. Esto es para facilitar el llenado apropiado y, si es necesario, el llenado por etapas en intervalos.

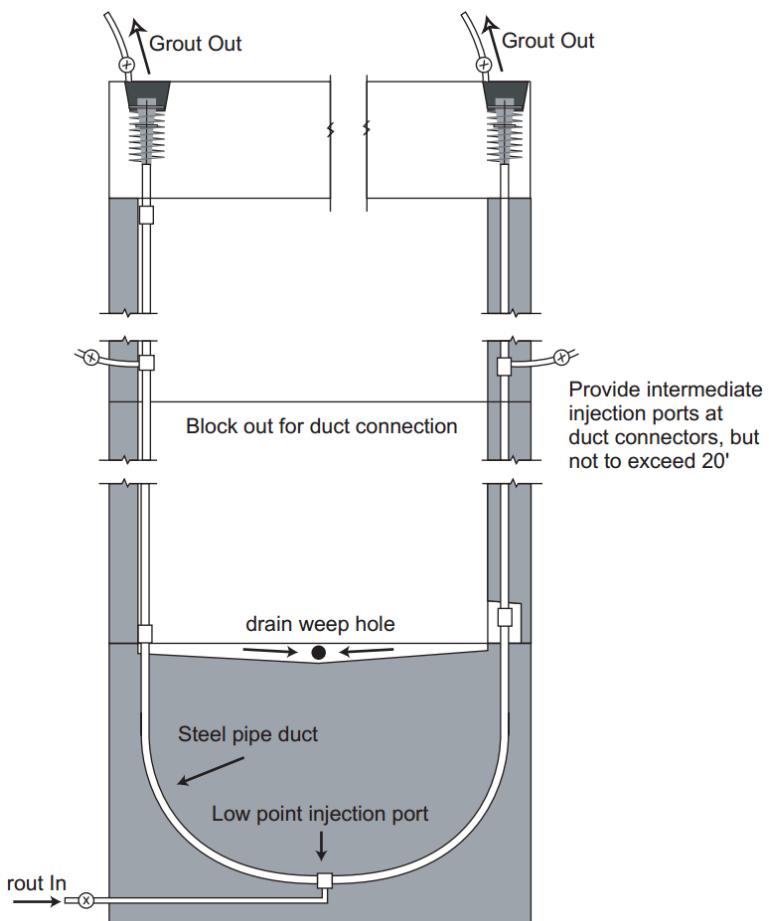


Figura 4-13: Detalles de grouting y anclaje para tendones verticales en pilares.

4.5.11. Ejemplo 11: Pilar-C en Voladizo (Figura 4-14)

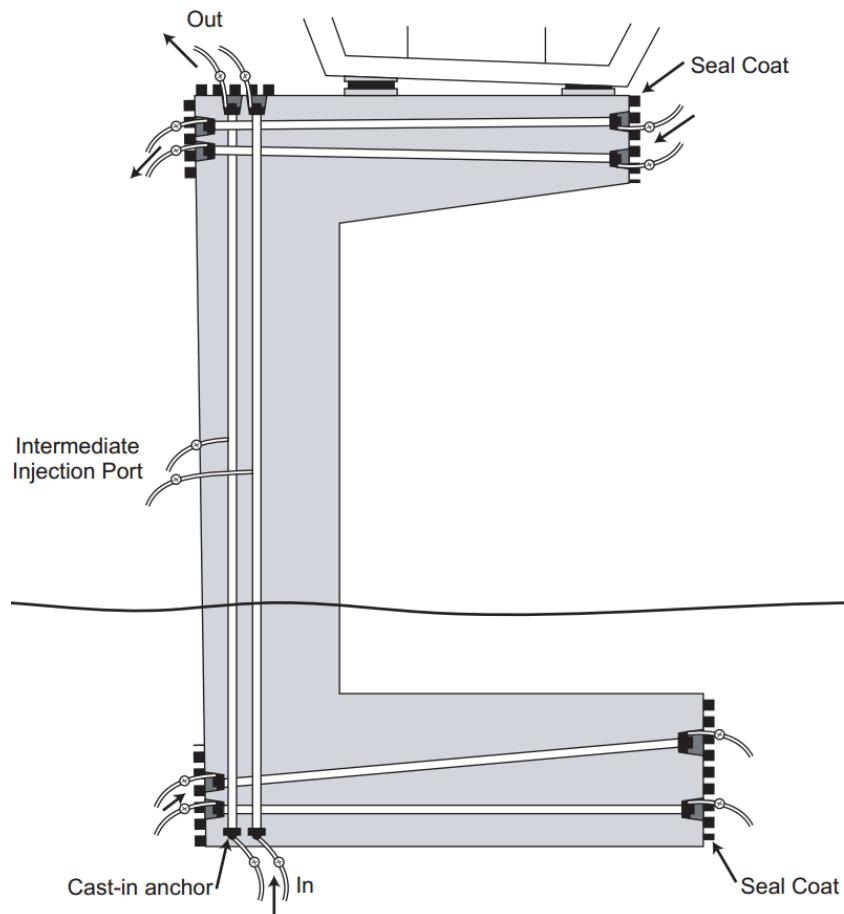


Figura 4-14: Detalles de grouting y protección del anclaje para tendones verticales y laterales en pilar-C.

A

apéndice A:terminología

5. Apéndice A: Terminología

Referirse al documento original en la página de la FHWA

(<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/pt/pttoc.cfm>)

B

apéndice B: calificaciones del personal

6. Calificaciones del Personal

Referirse al documento original en la página dela FHWA

(<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/pt/pttoc.cfm>)

C

*apéndice C: más
ejemplos de aplicaciones
de tendones post-
tensionados*

7. Más Ejemplos de Aplicaciones de Tendones Post-Tensionado

7.1. Tendones en Voladizo

Los tendones en voladizo en la losa superior de una sección tipo cajón contrarresta el efecto de flexión por el peso propio del voladizo durante la construcción. Esta flexión induce un esfuerzo de tensión longitudinal en la parte superior, alcanzando un máximo sobre el pilar. El post-tensionado en voladizo de la parte superior contrarresta estos efectos induciendo un esfuerzo de compresión de igual o mayor magnitud en cada sección transversal a lo largo del voladizo.

La Figura 7-1 muestra una disposición típica para los tendones en voladizo que se anclan en la cara exterior de un segmento prefabricado o vaceado-en-sitio. Esta característica detallada especial para facilitar la inspección de las cabezas de anclaje luego que el grouting del tendon y luego que los segmentos adicionales hayan sido erigidos en el voladizo. (Un detalle posible para un anclaje de cara para facilitar esta inspección es mostrado en el Apéndice D, Figura 8-13).

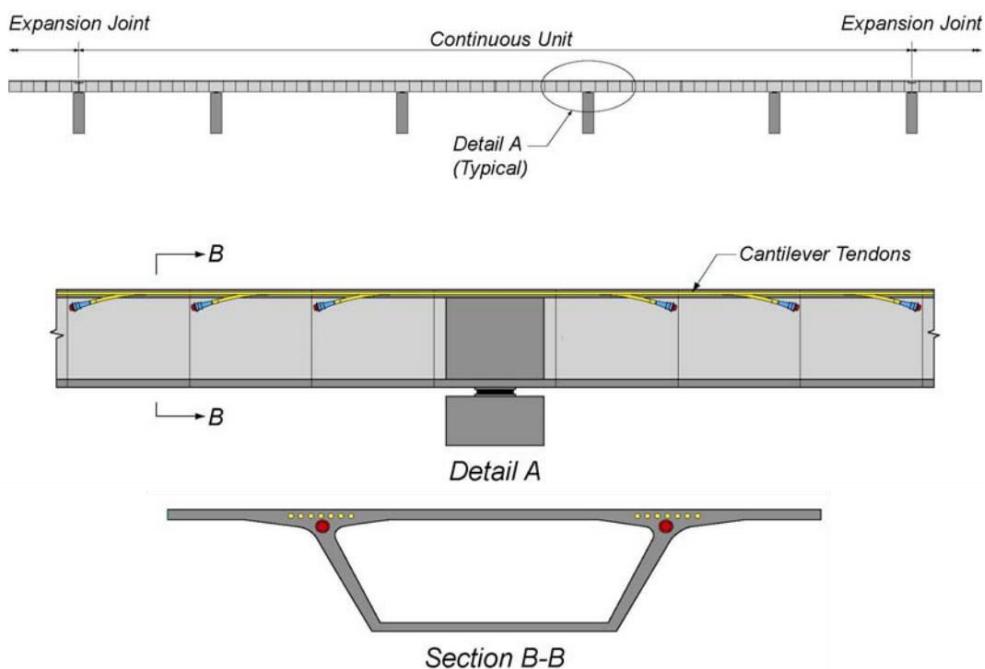


Figura 7-1: Tendones post-tensionados en voladizo anclados a las caras exteriores.

Un enfoque alternativo es anclar los tendones en voladizo en blisters (bloques de anclaje) vaceados en los segmentos en la intersección de la losa superior y el ama (Figura 7-2 y Capítulo 1, Figura 1-12). Los anclajes de estos tendones pueden ser inspeccionados en cualquier momento durante y después de la construcción.

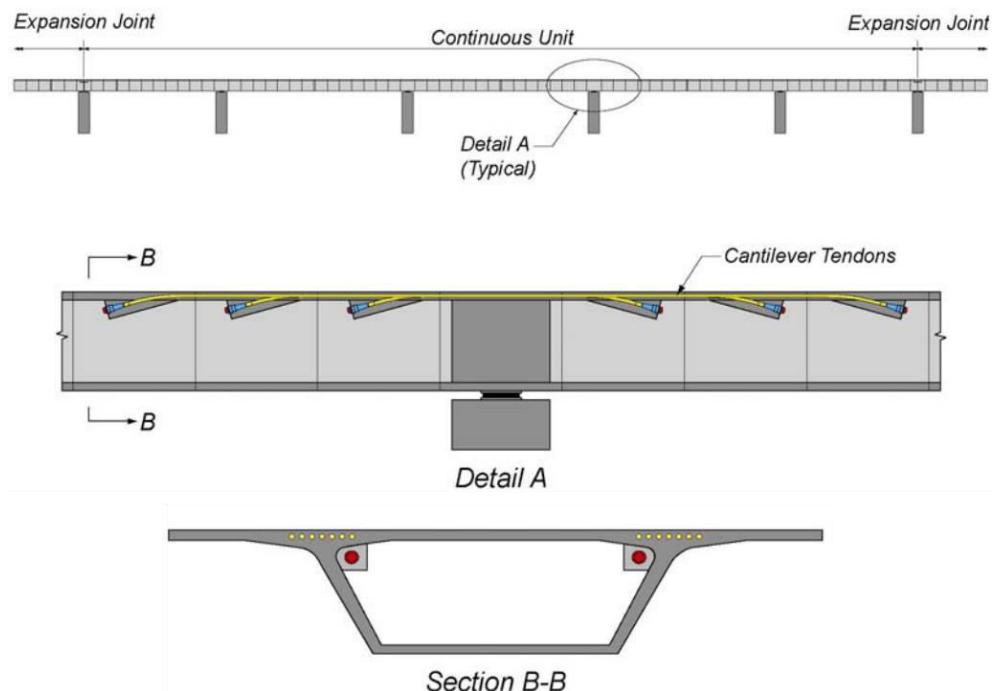


Figura 7-2: Tendones post-tensionados en voladizo anclados en blisters en la parte superior.

7.2. Tendones de Continuidad

Para completar un tramo, los extremos de dos voladizos adyacentes son conectados por un colado de cierre vaceado-en-sitio en o cerca de la mitad del tramo de los tramos interiores. En los tramos finales, la junta de cierre generalmente está más cerca de la junta de expansión del extremo. La longitud del cierre, que comprende la sección transversal total del cajón de la superestructura, puede variar desde seis pulgadas a varios pies. Con la finalidad de alinear y sostener las puntas de los voladizos mientras se hace el cierre, un dispositivo especial, denominado como una “viga de cierre” o “espalda fuerte” (strong-back), es fijada a través de las puntas de los voladizos. El falso puente es asegurado a lo largo del cierre, el refuerzo y el post-tensionado transversal es instalado si fuera necesario, y el cierre de concreto es colado u hormigonado. Cuando el cierre de concreto alcanza la resistencia suficiente, los tendones de post-tensionado longitudinal (de continuidad) son instalados, tensionados y “enrutados”. La Figura 7-3 describe las ubicaciones típicas y disposiciones para los tendones de continuidad inferiores a mitad del tramo.

Cuando un cierre es de varios pies de largo y pesa más de la mitad de un segmento típico, puede ser necesario colocar el cierre de concreto en una secuencia muy específica con la finalidad de prevenir la apertura o agrietamiento del cierre cuando los voladizos deflecten. Puede también ser necesario aplicar una pequeña cantidad de post-tensionado (10% al 20% de dos tendones de continuidad) tan pronto como el concreto de la losa inferior haya tomado un endurecido inicial (esto es, alrededor de 2 a 4 horas del vaceado) para mantener apretado el cierre, incluso cuando se añada más concreto. Éstas son las consideraciones específicas del proyecto.

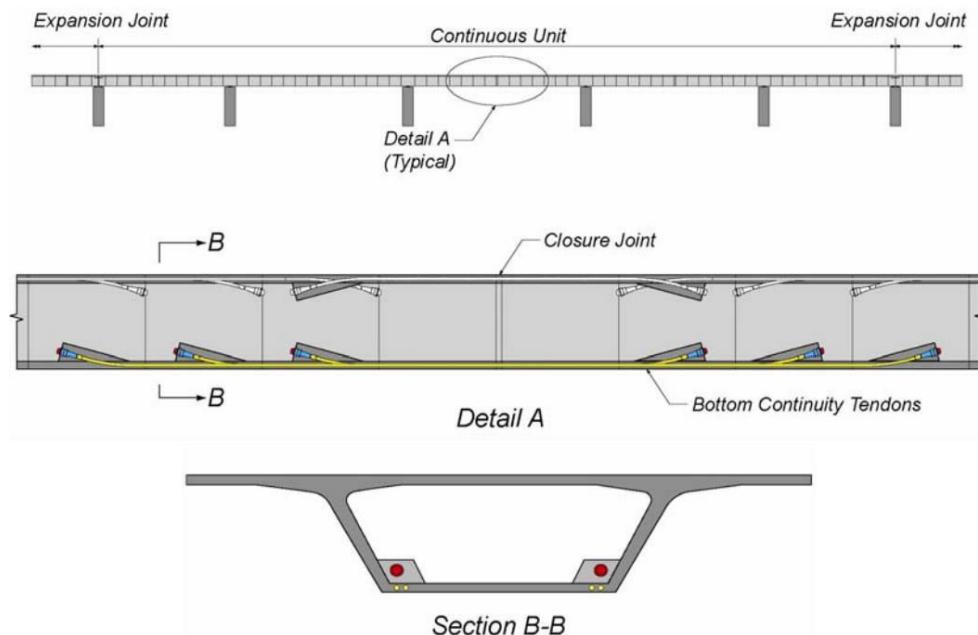


Figura 7-3: Tendones de continuidad inferior para la construcción por voladizos balanceados.

Los tendones post-tensionados de continuidad superior son también típicamente requeridos en puentes por voladizos balanceados. Un puente construido en voladizos balanceados tiene pequeño, si hubiera alguno, esfuerzo por peso propio en la ubicación de la junta de cierre en el centro del tramo. Los tendones de continuidad inferior a mitad del tramo, junto con las cargas vivas en tramos adyacentes, producen esfuerzos de tensión en la losa superior que necesitan contrarrestados con los tendones de continuidad superiores. La aplicación subsecuente de la baranda de barrera y la posible superficie de rodadura, deberán producir compresión superior en esta ubicación, minimizando la necesidad de los tendones de continuidad superiores. A su tiempo, la redistribución interna de las fuerzas y momentos debido al flujo plástico del concreto inducirán compresión en la parte superior a mitad del tramo, reduciendo aún más la necesidad de los tendones de continuidad superiores. La Figura 7-4 muestra detalles típicos de los tendones de continuidad superiores.

7.3. Tendones de Continuidad en los Tramos Juntas de Expansión

Varios segmentos construidos sobre falso puente son típicamente necesarios para completar un tramo extremo de un puente en voladizos balanceados que terminan en una junta de expansión en los estribos o pilares de expansión (Figura 7-5). Una junta de cierre vaceado-en-sitio conecta el voladizo a los segmentos sobre el falso puente y los tendones post-tensionados de continuidad son instalados. Usualmente, más tendones de continuidad son necesarios en la parte inferior que en la superior. Aunque los tendones de continuidad pueden no siempre ser necesarios en la parte superior, es buena proporcionar al menos dos, uno en cada alma extrema. Los tendones de continuidad pueden esforzarse desde la junta de

expansión si está disponible el acceso o pueden esforzarse desde el blíster de anclaje dentro de la superestructura.

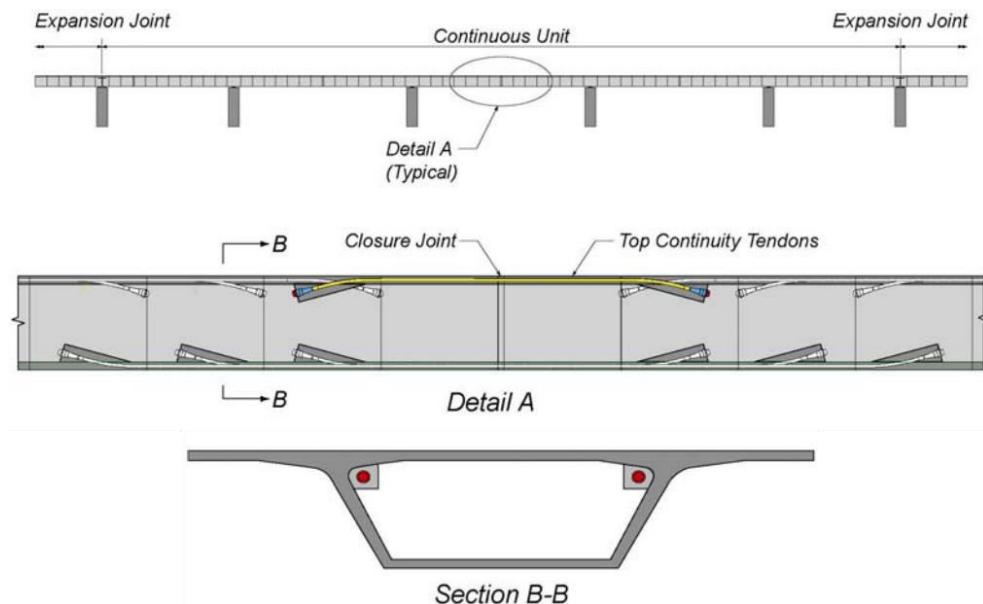


Figura 7-4: Tendones de continuidad superior para la construcción por voladizos balanceados.

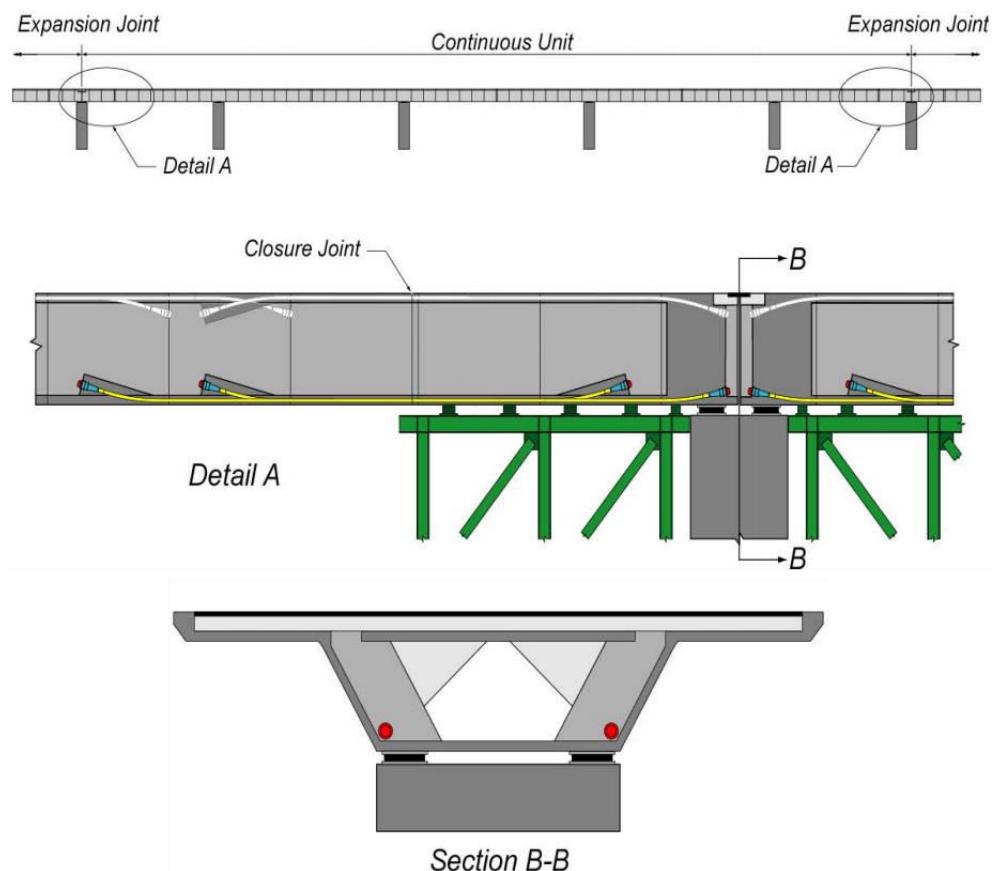


Figura 7-5: Tendones de continuidad inferior cerca de la junta de expansión en un soporte.

7.4. Rótulas en el Tramo en la Construcción por Voladizos Balanceados

Los grandes viaductos de la construcción por voladizos balanceados han sido construidos con rótulas conectadas aproximadamente a un cuarto de distancia de los tramos de expansión (Figura 7-6). Esta ubicación se eligió sobre la mitad del tramo ya que se demostró deflexión excesiva a mitad del tramo por flujo plástico en algunas generaciones tempranas de puentes en Europa y en los Estados Unidos.

Las mejoras subsecuentes en modelos de predicción del flujo plástico a largo plazo para el concreto, han reducido las incertidumbres en el cálculo de la deflexión. Las rótulas a mitad del tramo han sido nuevamente usadas de forma satisfactoria. La deflexión puede controlarse usando vigas de acero sobre asientos de apoyo deslizantes ubicados al interior de una viga principal tipo cajón, entre las puntas de los voladizos, para permitir la expansión y contracción, pero restringiendo la rotación. Se debe tener cuidado en el diseño y detalle de cualquier tipo de rótula en el tramo, ya que los detalles locales pueden estar sometidos y fuerza y distribución de esfuerzo complejos.

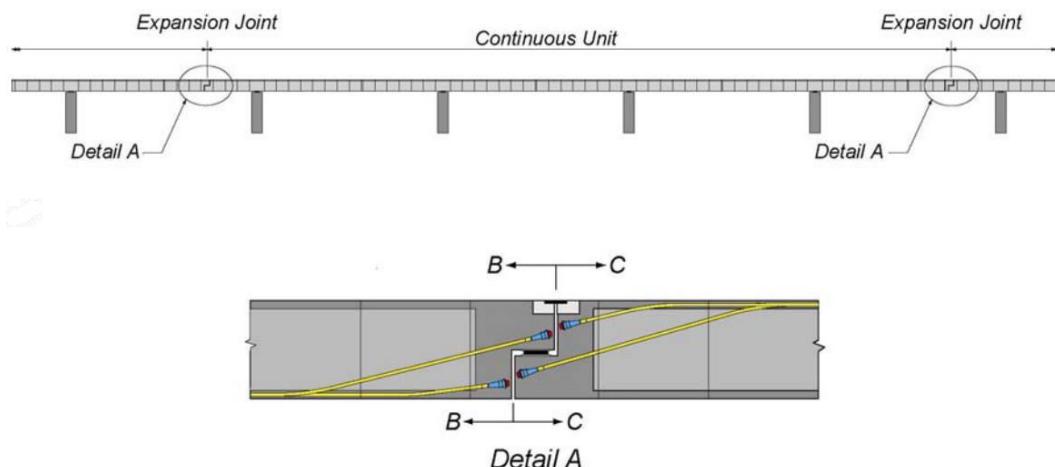


Figura 7-6: Rótulas en el tramo en la construcción por voladizos balanceados.

7.5. Puentes Segmentales Prefabricados Tramo-por-Tramo (Span-by-Span)

Para la construcción tramo-por-tramo, el uso de tendones exteriores proporciona mayor eficiencia en la sección transversal del cajón, tanto eficiencia longitudinal como transversal, facilitando un alma más gruesa en la parte superior que en la inferior. Esto eleva el centroide de la sección transversal entera, y maximiza la excentricidad y eficiencia del post-tensionado en a mitad del tramo, región necesaria para el efecto dominante de la flexión longitudinal de este método. La Figura 1-15 muestra una disposición típica de tendones tramo-por-tramo para un tramo interior donde todos los tendones se desvían en un sillín de desviación común. La Figura 7-7 muestra una disposición similar para un tramo típico junta de expansión. Los diseños actuales requieren un tendón adicional (recto) por alma para controlar los efectos de la gradiente termal y/o proporcionar redundancia adicional.

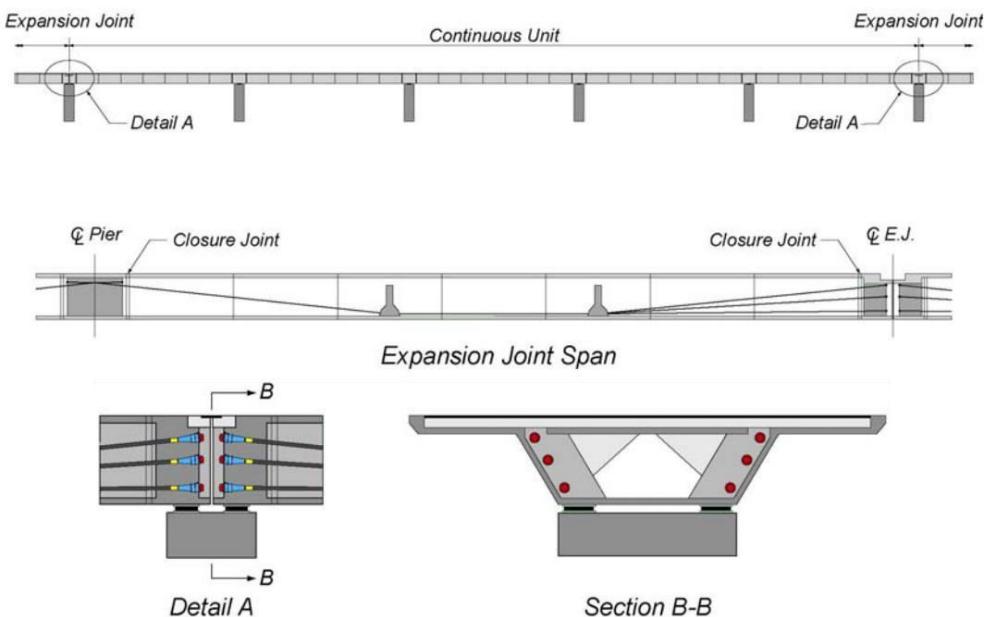


Figura 7-7: Post-tensionado del tramo junta de expansión para la construcción tramo-por-tramo.

En algunos casos, un tendón post-tensionado en un puente tramo-por-tramo puede estar tanto interno o externo al concreto. El perfil de tal tendón post-tensionado es similar a aquel de un tendón externo excepto que entre los desviadores, este entra en la losa inferior. El tendón es externo en regiones inclinadas (Figura 7-8). Esto proporcionar excentricidad adicional al tendón a mitad del tramo, pero no facilita la inspección visual de mantenimiento o posibles reemplazos futuros. Sin embargo, este tipo de disposición ha sido usado satisfactoriamente en el Evans Crary Bridge, Florida, y en las rampas de aproximación del Central Artery North Area al Charles River Bridge en Boston. La forma fue proporcionar un tramo más largo que el normal y el último, para ayudar a abordar los problemas sísmicos del momento.

Con este tipo de tendón interno-externo, las condiciones del Estado Límite de Servicio son generalmente fácilmente satisfechas. Sin embargo, en el Estado Límite de Resistencia, es necesario tomar en cuenta el hecho que las partes de tales tendones son tanto externos (esto es, no adheridos) como internos (adheridos o parcialmente adheridos). Un enfoque de compatibilidad de deformación, no lineal, es generalmente necesario.

7.6. Puentes Segmentales Prefabricados en Voladizos Progresivos

Cuando al acceso al sitio del puente es restringido de modo que los componentes prefabricados puedan sólo enviarse a uno de los estribos extremos, la superestructura puede erigirse en voladizos progresivos. Se inicia colocando el primer tramo de los segmentos sobre el falso puente entre el estribo y el primer pilar, los segmentos siguientes son enviados a lo largo de la porción completada y se añaden al voladizo, progresivamente al avance del extremo. Cuando el voladizo alcanza la mitad del tramo, un soporte temporal es introducido. Más segmentos son añadidos en el voladizo sobre el soporte temporal hasta que

el avance del extremo alcance al siguiente pilar permanente. Este proceso se repite hasta que la superestructura complete todo el camino hasta el último estribo.

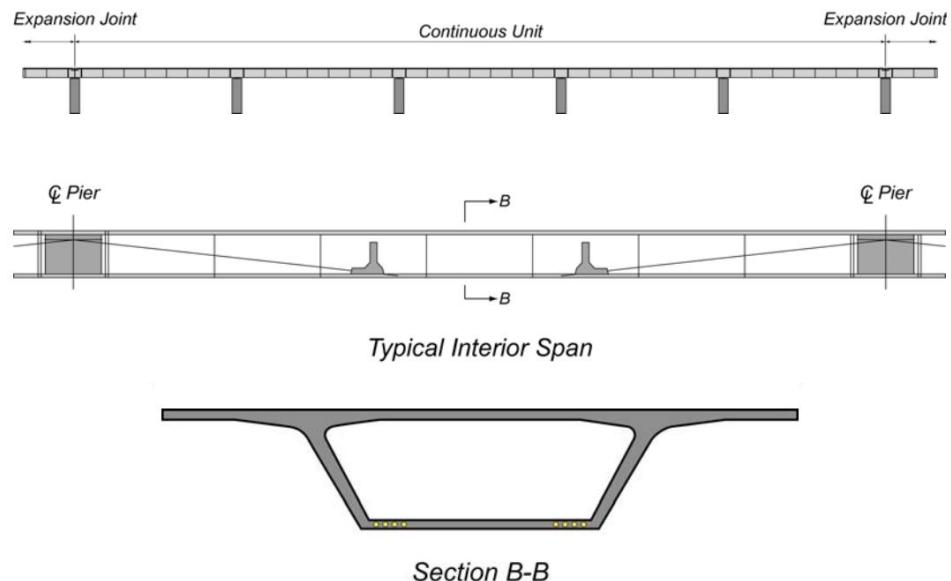


Figura 7-8: Tendones externos/internos.

Esta técnica fue usada para el Linn Cove Viaduct que lleva al Blue Ridge Parkway alrededor del Grandfather Mountain en North Carolina (Figura 7-9). Las restricciones del entorno permiten sólo el uso de pasarelas y equipo ligero sobre el terreno por debajo del viaducto. En consecuencia, el equipo y los materiales para la construcción fueron descargados en cada ubicación de los pilares desde el extremo de avance del voladizo. Luego de completar la zapata, los segmentos del pilar de concreto prefabricado excavado fueron transportados a lo largo de la porción completada del puente y luego bajados en su posición, construyendo el pilar para recibir y soportar el siguiente voladizo.



Figura 7-9: Construcción del Linn Cove Viaduct.

El método de erección por voladizos progresivos con condiciones de cambio de soporte requiere una disposición compleja del post-tensionado que incluye tendones de voladizo y de continuidad internos con tendones drapeados en las almas. La mayoría de los tendones fueron permanentes, pero unos pocos fueron temporales y se lanzaron cuando fueron necesarios para las condiciones de cambio de soporte.

Un concepto similar fue usado por la Federal Highway Administration para el diseño original de cuatro puentes para el Foothills Parkway en Tennessee (Capítulo 1, Figura 1-10). Sin embargo, con algunos de más fácil acceso, bajo un proceso que permitió alternativas propuestas para la construcción de la superestructura, el Contratista eligió construirlos usando el método de voladizos balanceados vaceado-en-sitio.

7.7. Post-Tensionado Transversal

El post-tensionado transversal tiene muchos usos en construcción de puentes de concreto. Algunos ejemplos son ofrecidos a continuación.

7.7.1. Post-Tensionado de la Losa Superior Transversal

Las losas superiores de segmentos prefabricados y vaceados-en-sitio, y cajones similares vaceados-en-sitio sobre falso puentes son a menudo post-tensionados transversalmente. El post-tensionado transversal típicamente comprende los tendones multi-torón internos “engrutados” luego del esforzado. Los tendones están espaciados en intervalos frecuentes y regulares, aproximadamente de 0.5 a 1.0 m (2 a 3 pies, a lo largo de la estructura. Los tendones se anclan en los en los bloqueadores en los bordes de las del voladizo de la losa superior. Los bloqueadores son subsecuentemente llenados con concreto y son cubiertos generalmente con una barrera de tráfico. La Figura 7-10 muestra una vista en perspectiva de los tendones típicos post-tensionados transversales en una viga principal tipo cajón. En los segmentos prefabricados, los tendones transversales de la losa superior están generalmente tensionados y “engrutados” mientras el segmento está en el almacenamiento de la planta de fundición.

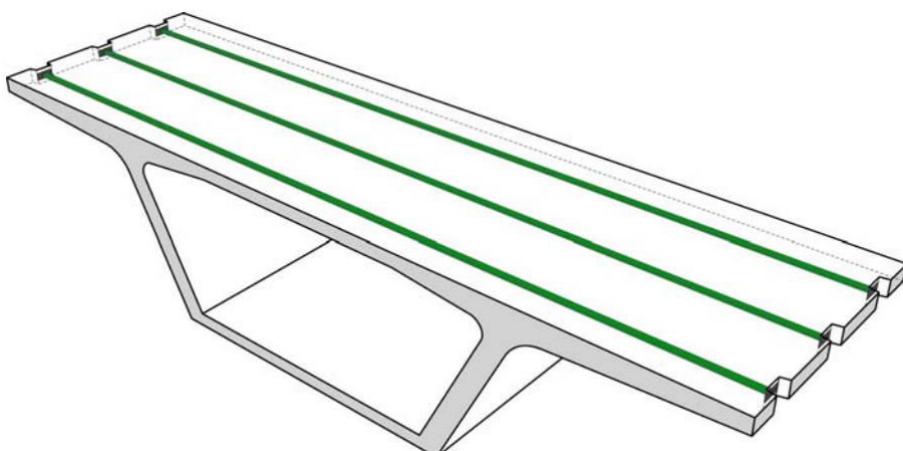


Figura 7-10: Post-tensionado transversal en la losa superior de una viga principal tipo cajón.

Los puentes a menudo son realizados con dos cajones paralelos gemelos unidos por una franja longitudinal de concreto vaceada-en-sitio. Esta franja de cierre puede ser reforzada convencionalmente o post-tensionada transversalmente. Cuando se conectan por post-tensionado transversal, sólo alrededor de la mitad de los tendones transversales dentro de un segmento son esforzados para la elevación y erección. Los restantes son colocados a través de los ductos en segmentos adyacentes y la franja de cierre y esforzados a través del ancho total del puente. Esto último requiere que la tolerancia esté considerada en los detalles para acomodar la falta de coincidencia del alineamiento transversal (vista en planta) debido al vaceado, tolerancias de construcción, diferencias en el acortamiento elástico, flujo plástico y contracción entre un cajón y el otro. La falta de coincidencia o desajuste del alineamiento vertical también puede ocurrir por razones similares.

7.7.2. Post-Tensionado Transversal de Superestructuras de Múltiples Elementos Prefabricados

Los puentes de tramos cortos se hacen a menudo de múltiples componentes prefabricados y pretensados colocados de forma adyacente a otro para formar el tablero del puente. Los componentes prefabricados incluyen placas para losas planas, dobles-tés, y vigas tipo cajón. Estos puentes pueden ser construidos con o sin coberturas. Los componentes prefabricados están a menudo conectados transversalmente con colados u hormigonados de cierre longitudinales y post-tensionado transversal. Las barras de alta resistencia, mono-torón o tendones multi-torón pueden ser usados. La cantidad de post-tensionado es una función de los requerimientos específicos de diseño del puente.

Tolerancias permitidas deberán hacerse para los desajustes de los alineamientos del tendón debido al vaceado y tolerancia de la erección, acortamiento elástico, flujo plástico y contracción y deflexión vertical, en los detalles para los tendones transversales.

7.7.3. Post-Tensionado Transversal en Diafragmas

Los segmentos de los pilares de la superestructura son ocasionalmente post-tensionados transversalmente con tendones multi-torón. Estos tendones pueden cruzar el uno al otro cuando drapean desde el ala a un lado hasta la cara opuesta del alma en el otro lado. A menudo, estos tendones transversales se extienden de cara a cara del alma (Figura 7-11). Estos tendones son internos y están generalmente esforzados y “enrutados” en la planta de fundición.

Atención apropiada deberá darse a los detalles con la finalidad de asegurar que los tendones son efectivos en las secciones críticas. Por ejemplo, en la Figura 7-11, los anclajes son rebajados en la cara del alma y los tendones no contribuyen a la resistencia de la interface de corte entre el alma y el diafragma. Ellos sólo contribuyen a la capacidad de la fuerza de tensión transversal necesaria a través de aquella parte del diafragma mayormente hacia el interior de los apoyos.

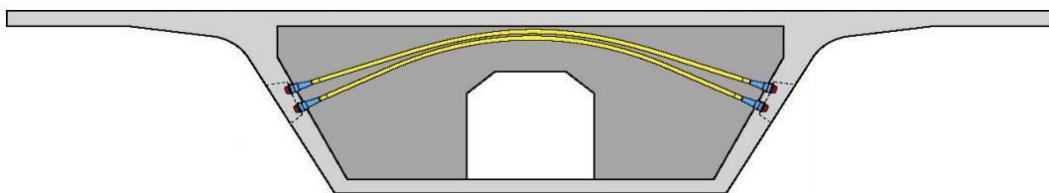


Figura 7-11: Post-tensionado transversal en diafragmas.

7.7.4. Post-Tensionado Vertical en Diafragmas

Las barras de post-tensionado vertical (Figura 7-12) son proporcionadas a menudo para confinar las zonas de anclaje y los efectos locales de corte inducidos por las fuerzas concentradas en los anclajes de los tendones post-tensionados anclados en grupos en los diafragmas de los segmentos. Estas barras verticales son internas y son esforzadas y “engrutadas” en la planta de fundición.

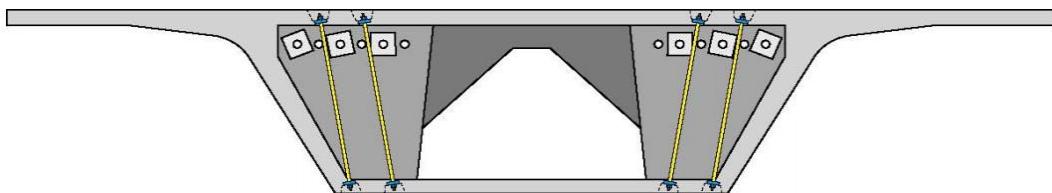


Figura 7-12: Post-tensionado vertical en diafragmas.

7.7.5. Post-Tensionado Transversal en Nervios (Ribs) Desviadores de los Segmentos Prefabricados

Los nervios o nervaduras desviadoras transversales de los puentes tramo-por-tramo pueden contener tendones (generalmente barras rectas) en la parte superior de los nervios a través de la losa inferior anclada en la cara del alma (Figura 7-13). Éstos son internos y son esforzados y “engrutados” en la planta de fundición.



Figura 7-13: Post-tensionado transversal en nervios desviadores.

7.7.6. Barras de Post-Tensionado Vertical en Almas

Las barras de post-tensionado vertical son ocasionalmente añadidas a las almas (Figura 7-14), usualmente en las zonas de corte elevado cerca de los pilares, para controlar los esfuerzos principales de tensión y mitigar o evitar el agrietamiento asociado. Debe darse cuidado a los detalles de las esquinas para asegurar una conexión apropiada y transferencia de fuerzas con el refuerzo de la losa superior e inferior.

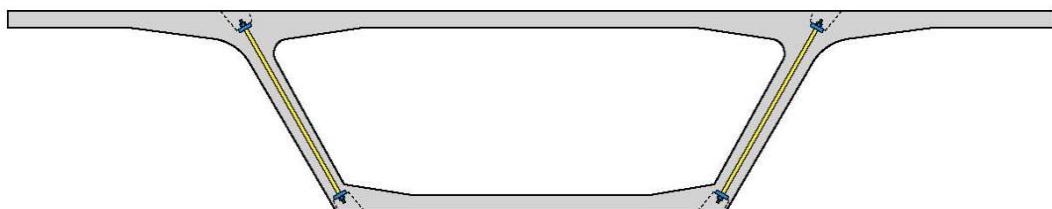


Figura 7-14: Post-tensionado vertical en almas.

Ocasionalmente, en segmentos largos de puentes segmentales grandes o de cables atirantados, los tendones de torones pueden usarse para el post-tensionado transversal de las almas y puntales o atados diagonales transversales que conecten y transfieran cargas a los puntos de anclaje de los cables atirantados.

8

*apéndice D: protección
por corrosión de los
tendones post-
tensionados*

8. Apéndice D: Protección por Corrosión de los Tendones Post-Tensionados

8.1. Protección por Corrosión

La buena protección por corrosión del post-tensionado es esencial para la integridad estructural y durabilidad a largo plazo. Durante los años fallas ocasionales han sido detectadas y fueron atribuidas al grouting inadecuado y pérdida de la protección total. Lo siguiente es una visión en conjunto de los métodos posibles, materiales y detalles que pueden ayudar a conducir proteger por corrosión satisfactoriamente.

8.1.1. Antecedentes

Originalmente, en estructuras vaceadas-en-sitio y estructuras prefabricadas sin juntas intermedias, los principales medios de protección por corrosión fue el recubrimiento de concreto. El rol principal del grout fue adherir el tendón al concreto circundante vías ductos corrugados, generalmente hechos de acero galvanizado. El grout también fue un intento de llenar el ducto y prevenir la corrosión debido al ingreso de contaminantes. Desafortunadamente, luego se encontró que muchos tendones contenían agujeros de grout como resultado del grouting incompleto, exceso de agua y sangrado. Incluso aunque el grout no prevenga el ingreso de contaminantes, se encontró el acero circundante o recubrimiento del acero de post-tensionado en un entorno alcalino (pasivo). Los ductos galvanizados jugaron un rol sacrificado pero sin embargo, aún permitió la corrosión ocasional por exceso de agua filtrándose a través de las junturas. La protección por corrosión de los anclajes fue alcanzado originalmente por encapsulado en colado secundario del concreto estructural ordinario.

El desarrollo de la construcción segmental prefabricada alteró el concepto de la protección por corrosión cómo se percibió originalmente para la construcción vaceada-en-sitio. Para los tendones internos, las discontinuidades en el recubrimiento de concreto y los ductos tuvo que ser compensado por el uso de epóxico para sellar los segmentos prefabricados en las juntas emparejadas-vaceadas. En las juntas, tanto el epóxico como el grout fueron un intento para proporcionar protección contra la corrosión.

La introducción de los tendones externos post-tensionado también altera la naturaleza del sistema de protección por corrosión. El recubrimiento de concreto existe sólo donde los tendones pasan a través de desviadores, diafragmas y bloques de anclajes. Entre ellos, un tendón externo es alojado en un tubo liso de polietileno de alta densidad relleno con grout. Estructuralmente, los tendones externos son generalmente considerados no adheridos – la única función del grout es prevenir la intrusión de contaminantes y tendones de acero circundantes en un entorno alcalino. El tubo de polietileno relleno con grout se convirtió en el medio principal de corrosión por protección.

Mientras los tipos diferentes de tendones evolucionan con los métodos de construcción de puentes, no fue un avance significativo desde el concepto original del recubrimiento y el grout para la protección por corrosión. Recientes investigaciones han expuesto varias falacias en materia de los roles asumidos de varios componentes de tal protección. Algunos son:

- El recubrimiento de concreto fue rajado por las grietas de contracción en las juntas de construcción y el re-vertido del concreto en los bloqueadores del anclaje.
- La protección por corrosión de los tendones internos fue negada por el sellado imperfecto de las juntas de epóxico en los puentes segmentales prefabricados – desde la aplicación no apropiada del epóxico, limpieza muy agresiva de las caras emparejadas-vaceadas por el arenado o agua a alta presión, y sellos imperfectos de los ductos en los bulkheads y los segmentos emparejados-vaceados durante el vaceado.
- Los procedimientos del grouting crearon agujeros debido al llenado insuficiente y usos de mezclas de grout susceptibles al sangrado de agua y acumulación de aire atrapado.
- Aunque los ductos galvanizados ofrecen protección galvánica, los ductos discontinuos y las juntas epóxicos selladas inapropiadamente o los ductos empalmados permitieron la evacuación directa en los tendones que no fueron siempre “engrutados” completamente.
- Los ductos de polietileno de alta densidad de algunos tendones externos sufrieron cortes longitudinales, permitiendo el acceso directo de la humedad al grout o a los torones. También, algunos fueron dañados debido a técnicas de inspección para determinar si el grouting fue completado, usando un martillo y uña para picar un agujero pequeño para revisar el grout y entonces no se reparó apropiadamente el daño.
- La protección del anclaje por el colado-posterior del concreto ordinario fue comprometida por las grietas de contracción y fugas en algunas aplicaciones. Esto fue especialmente problemático para los anclajes expuestos a juntas de expansión con defectos.

8.1.2. Niveles de Protección

La protección por corrosión del sistema de post-tensionado puede proporcionarse por un número posible de niveles de acuerdo a los detalles del sistema. La Figura 8-1 muestra seis niveles posibles de protección disponibles para los tendones típicos de post-tensionado en estructuras de puentes. Es una buena práctica recomendable requerir que al menos tres de estos posibles niveles sean proporcionados satisfactoriamente desde un anclaje hasta el otro.

Los seis posibles niveles de protección mostrados en la Figura 8-1 son como sigue:

- Nivel 1 – Superficie Exterior (Level 1 – Exterior Surface): La interface entre la estructura de concreto post-tensionada y la atmósfera circundante. El sellado apropiado de las superficies ayudará a mantener los contaminantes no deseados que atacan los tendones de post-tensionado. Las capas sobreuestas, membranas, y superficies de rodadura sobre los tableros de los puentes y selladores aplicados a otras superficies puede proporcionar un nivel de protección.
- Nivel 2 – Recubrimiento de Concreto/Epóxico (Level 2 – Concrete Cover/ Epoxy): En la construcción vaceada-en-sitio este nivel es el recubrimiento de concreto. En la construcción segmental prefabricada,

dentro de un segmento entre las juntas, este nivel también es el recubrimiento de concreto. En las juntas emparejadas-vaceadas entre los segmentos prefabricados este nivel es el epóxico aplicado apropiadamente. Para los tendones externos, la barrera es la estructura de viga principal tipo cajón total circundante, siempre que sea impermeable y bien drenada. El cajón proporciona un entorno benigno para proteger los tendones externos del daño físico y del contacto directo con agentes corrosivos potenciales.

- Nivel 3 – Ducto (Level 3 – Duct): La construcción vaceada-en-sitio facilita ya sean ductos de longitud total o ductos apropiados mecánicamente, acoplados o sellados. Para los tendones externos, ductos de tubos de plástico durable con conexiones selladas a los tubos de acero embebidos en desviadores y diafragmas pueden ser usados. Los ductos para los tendones internos son típicamente discontinuos en las juntas emparejadas-vaceadas en los puentes segmentales prefabricados – acopladores especiales de ductos han sido usados en algunos proyectos.
- Nivel 4 – Grout (Level 4 – Grout): La buena calidad del grout es un ingrediente clave de la protección por corrosión actual. Recientes investigaciones y desarrollo de grouts de post-tensionado por varias agencias estatales de transporte ha conducido a mejorar grandemente los materiales del grout. Estos grouts tienen poco o ningún sangrado y están disponibles desde varias fuentes en pre-embolsados, cantidades medidas para fácil dosificación y mezclado en sitio. Las características y requerimientos de los grouts mejorados están descritos en especificaciones tales como la “Specification for Grouting of PostTensioned Structures” del Post-Tensioning Institute. Además, la instalación del grout puede mejorarse atrayendo a personal entrenado y calificado en concordancia con los programas reconocidos tales como el “Grouting Certification Training” de la American Segmental Bridge Institute (ASBI).
- Nivel 5 – Revestimiento (Level 5 – Sheathing/Coating): Existe una oportunidad de proporcionar protección por corrosión entre el grout y los torones. Tanto los mono-torones engrasados y enfundados y los torones con recubrimiento epóxico están disponibles. No hay una gran experiencia en la colocación de estos tipos de torones enfundados o recubiertos ya sea individualmente o en paquetes de muchos tendones en la construcción de puentes y hay problema ya que la funda o recubrimiento puede no necesariamente mantenerse intacto durante la instalación. Los estimados actuales indican que el costo del material por el torón recubierto con epóxico es 3.5 veces que el torón barra.
- Nivel 6 – Torón o Barra (Level 6 – Strand or Bar): La sexta oportunidad para la protección recae en el elemento principal a tensión mismo. El acero inoxidable está disponible para los torones o barras, aunque a un costo considerable. Las propiedades metálicas de los torones inoxidables son ligeramente inferiores a los torones normales por lo que una aplicación dada requeriría proporcionalmente más torones. Aun así, considerando la naturaleza de la aplicación, el esfuerzo y el costo pueden estar garantizados. Los torones con revestido inoxidable son producidos en Inglaterra pero aún no han sido ampliamente usados en los Estados Unidos. El costo del material para torones inoxidables sólidos es aproximadamente 10 veces, y el torón con revestido inoxidable 5 veces, el costo del torón descubierto. Los torones de fibra de carbono proporcionan otra opción para la protección por corrosión al nivel del elemento principal a tensión, pero los asuntos del relativamente bajo módulo de elasticidad y, si es necesario, posible protección al fuego pueden necesitar abordarse. Ha habido pequeño uso de cualquiera de estos materiales a la fecha.

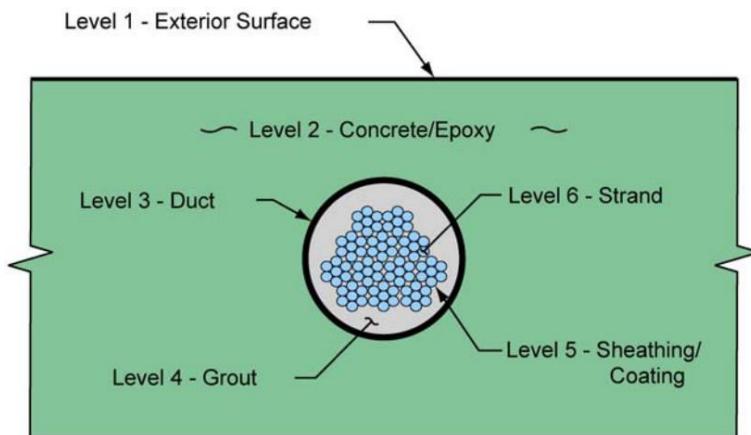


Figura 8-1: Niveles de protección para la protección por corrosión.

8.2. Materiales para la Protección por Corrosión

En los puentes existentes, los tendones son típicamente protegidos por una combinación de tres niveles: recubrimiento de concreto, ductos y grout (estos son los niveles 2, 3 y 4). Un buen desempeño depende de la calidad de los materiales individuales, mano de obra, inspección y detalles.

8.2.1. Recubrimiento de Concreto

El recubrimiento de concreto es un nivel principal de protección. Los puentes de concreto vaceados-en-sitio con infrecuentes, o ninguna, juntas de construcción ofrecen protección de recubrimiento contra el agua libre y contaminantes que dependen de la calidad del concreto. Las juntas más frecuentes de construcción, tales como aquellas en los puentes por voladizos balanceados vaceados-en-sitio, ofrecen mayores oportunidades para que el agua y los contaminantes alcancen al post-tensionado. El acero dulce (mild, acero bajo en carbono) de continuidad a través de las juntas de construcción ayudan a mantener la protección que ofrece el recubrimiento de concreto. Las juntas introducidas por el método de construcción segmental prefabricado interrumpen la protección ofrecida por el recubrimiento de concreto solo y por lo tanto debe ser correctamente sellado con epóxico.

El recubrimiento de concreto proporciona protección a los tendones externos sólo cuando están embebidos en la superestructura, en los diafragmas y desviadores. Por otra parte, los tendones externos están fuera del concreto y la protección es dada por el ducto, grout y la estructura cajón circundante.

El recubrimiento de protección puede mejorarse usando Concreto de Alto Desempeño. También, el revestimiento y selladores pueden ofrecer mayor protección.

8.2.2. Ductos

Originalmente, en los puentes post-tensionados, los ductos no fueron considerados integrales para la protección por corrosión. Luego, sus propósitos principales fue crear el agujero a través del cual los tendones pasarían. Los ductos ahora son considerados como un posible nivel de protección por corrosión.

Los diferentes tipos de ductos ofrecen varios grados de protección por corrosión. Los ductos de acero galvanizado de enrollado helicoidal proporcionan una barrera física pequeña para la migración de iones de cloruro a través del concreto y el grout vía las juntas porosas. La porosidad de este tipo de ducto fue considerada una ventaja en algunas investigaciones iniciales, ya que permitiría al agua en exceso en el grout ser absorbido por el concreto circundante. Además, el galvanizado ofrece protección sacrificial.

Los ductos de plástico ofrecen una barrera física a la mitigación de los elementos corrosivos siempre que las conexiones estén selladas. Los ductos de plástico para los tendones internos pueden sufrir daño local cuando los torones frotan y se apoyan contra la pared del ducto durante la instalación y esforzado. Esto se acomoda requiriendo un espesor mínimo de la pared.

Los ductos para los tendones externos se hacen de longitudes alternativas de plástico y tubo de acero. El tubo de plástico es polietileno de alta densidad extruido sólido (HDPE) con una pared gruesa. Los tubos HDPE están conectados por accesorios y abrazaderas a los tubos de acero embebidos en los diafragmas y desviadores. En un ducto cerrado, toda el agua introducida a través del grouting es ya sea consumido en la hidratación del grout, sangrado a través de las cabezas de anclaje o cerrado al interior del sistema del ducto. En la longitud libre de los tendones externos, cualquier deficiencia del grout puede dejar localmente, al ducto de polietileno como la única protección inmediata aparte del entorno alcalino dentro del ducto por la presencia parcial del grout. Además, los tendones externos están generalmente protegidos estando en el interior de una estructura tipo cajón circundante impermeable y bien drenada.

8.2.3. Grout

El grout de cemento es químicamente alcalino y proporciona un entorno pasivo alrededor de los torones. En los tendones internos, el recubrimiento de concreto es el primer nivel de protección; el ducto es el segundo y el grout es el tercero. En longitudes libres de los tendones externos un estructura impermeable y bien drenada es el primer nivel de protección, el tubo de HDPE es el segundo, y el grout proporciona el tercero creando un entorno alcalino dentro del ducto.

En todas las aplicaciones de grout, la presión hidrostática puede forzar el agua en exceso en las áreas intersticiales entre los cables individuales de los torones de post-tensionado y agravar el sangrado. El grout de bajo sangrado es necesariamente, y, para mantener los niveles adecuados de protección por corrosión, el ducto y el concreto circundante también deben participar.

8.2.4. Otras Consideraciones

Otras consideraciones y detalles que influencian el sistema de protección total son, por ejemplo:

- Los inlets y outlets de grout, si no se sellan apropiadamente, pueden ser fuente de ingreso.
- Las cabezas de los anclajes pueden ser un punto de entrada de agua o contaminantes si el grouting está incompleto. Esto puede ser peor en los anclajes expuestos a juntas de expansión con fugas.
- Los anclajes embebidos en o por debajo de una losa del tablero pueden ser susceptibles al ingreso de agua a través de las grietas por contracción alrededor de las juntas de concreto o colados-posteriores.

- Los anclajes en blisters o en los diafragmas interiores al interior de las secciones tipo cajón están relativamente bien protegidas siempre que estén completamente “engrutados” y no estén directamente debajo de una fuga o donde el agua pueda estancarse.
- Los agujeros de grout dentro de los ductos que no son sellados herméticamente pueden recargarse con aire húmedo o agua ocasionalmente cargada con sales. Cuando las temperaturas cambian el aire húmedo puede condensarse y posiblemente agravar la corrosión.

8.3. Protección por Corrosión a lo Largo de Un Tendón

En situaciones normales, el material de los torones revestidos o torón exótico con ausencia de selladores de superficie, tres niveles de protección por corrosión son proporcionados a los tendones a sus tipos y ubicaciones, como sigue:

8.3.1. Tendones Internos

Los tendones internos son protegidos por: el grout, el ducto y el recubrimiento de concreto (Figura 8-2).

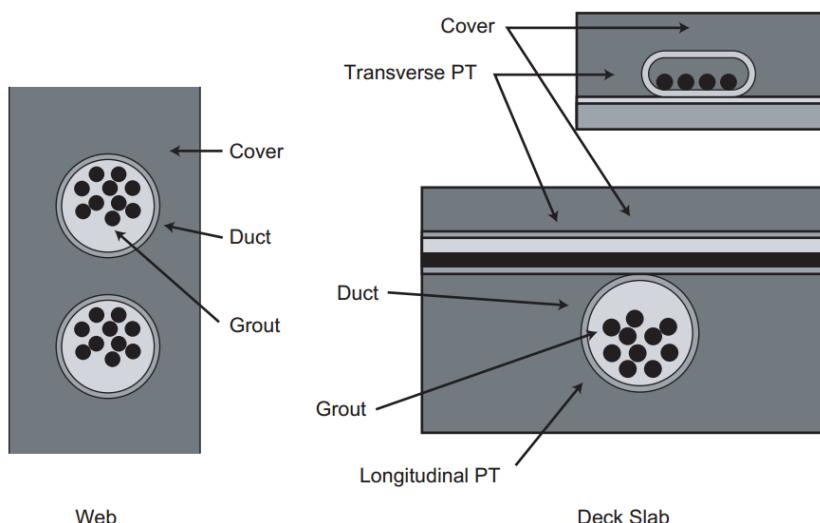


Figura 8-2: Niveles de protección para los tendones internos.

Protección adicional para las superficies expuestas de las vigas principales o almas que contienen los tendones internos pueden ser proporcionado por revestimientos o selladores. Protección adicional a la superficie superior de una losa de tablero puede proporcionarse incrementando el recubrimiento de concreto, impermeabilización con capas protectoras de rodadura sobrepuertas, capas de concreto modificado de polímero o selladores, tales como el metil metacrilato (siempre que no cause problemas de adherencia a las superficies de rodadura).

8.3.2. Tendones Externos

Los tendones externos son protegidos por el grout, el ducto y la estructura circundante el cual deberá ser “impermeable” (watertight) y bien drenada (Figura 8-3). En este contexto “impermeable” se

refiere a implementar medidas para estar seguros que las juntas de empalme vaceadas-en-sitio y las juntas entre los segmentos emparejados-vaceados estén correctamente selladas y las fugas resultantes a través de las juntas de expansión estén controladas y no entren en un cajón hueco interior. Los drenajes deben proporcionarse a través de las losas inferiores para drenar cualquier agua que ingrese en el cajón, ya sea de la escorrentía, servicios rotos o sistemas de drenaje en su interior.

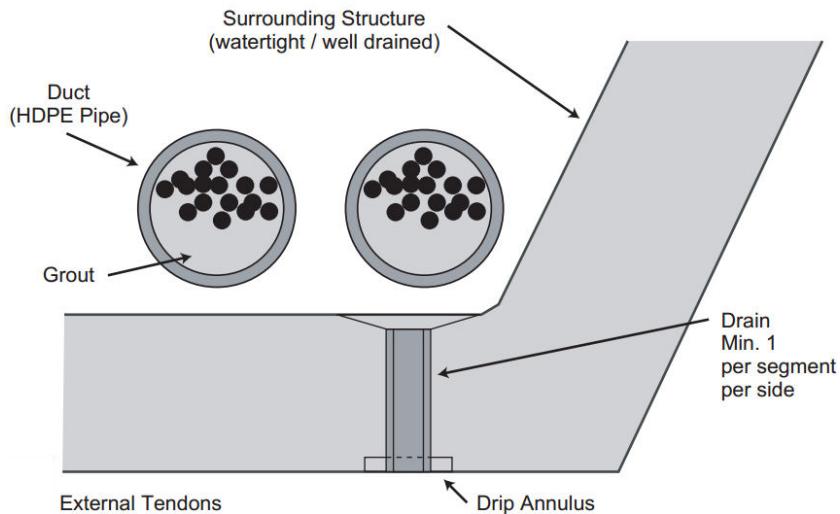


Figura 8-3: Niveles de protección para los tendones externos.

8.4. Comportamiento a Corto y Largo Plazo

8.4.1. Tendones Internos

Es recomendable que los inlets y outlets de grout intermedios a lo largo del tendon interno en vigas principales-I y componentes similares sean instalados de forma recta para facilitar la posible perforación e inspección para el llenado completo de grout usando, si es necesario, un endoscopio. Los extremos de los tubos de grout deberán ser sellados con cabezales inertes (sellados) dispuestos dentro de un rebajo. El rebajo deberá entonces ser limpiado, ponerse áspero y rellenarse con un compuesto aprobado (epóxico) (Figura 8-4).

8.4.2. Tendones Externos

Es recomendable que los tubos de grout para los inlets y outlets de grout intermedios a lo largo de un tendon externo, deberán estar cuidadosamente recortados y sellados con un cabezal roscado (plástico) inerte (Figura 8-5). El tubo del outlet deberá ser recto para facilitar la perforación e inspección con un endoscopio, si fuera necesario, para asegurar que el grout rellene completamente el tendon.

8.5. Protección por Corrosión en los Anclajes

En algunos casos, una pérdida de la adecuada protección en los anclajes llevan al ingreso de agua y contaminantes resultando en la corrosión del post-tensionado. Por ejemplo, la contracción y separación

del relleno de concreto de los bloqueadores de anclaje en la losa superior de algunos puentes segmentales crearon rutas hacia los anclajes para los tendones superiores internos. Las grietas similares de separación por contracción ocurrieron en los pockets de las losas de los tableros dejando abierto acceder a los tendones superiores en la construcción de vigas principales-I de concreto. La separación de concreto colado-posterior en los anclajes bajo las juntas de expansión, junto a con el grouting incompleto, permitieron al flujo de agua recargar los agujeros de grout e iniciar la corrosión en algunos pocos tendones.

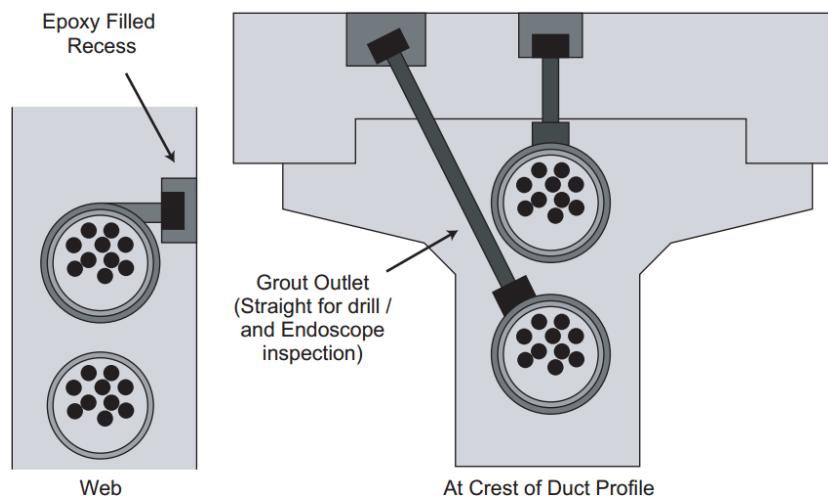


Figura 8-4: Sellado de inlets y outlets a lo largo de los tendones internos.

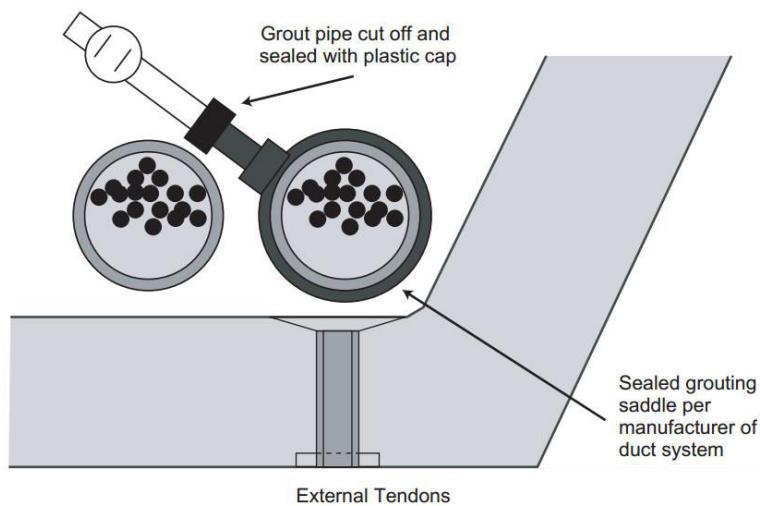


Figura 8-5: Sellado de los inlets y outlets a lo largo del tendón externo.

8.5.1. Posibles Niveles de Protección del Anclaje

Deben tomarse medidas para proteger correctamente los anclajes. Los siguientes son medios posibles para proporcionar diferentes “niveles” de protección. En este contexto, un nivel no es

necesariamente una capa de material, pero puede ser también un paso tomado para asegurar una parte del proceso de protección. Es considerado como buena práctica proporcionar hasta “cuatro niveles” de protección del anclaje usando combinaciones de cada una de las técnicas siguientes. Cada una puede considerarse para proporcionar un posible “nivel” de protección:

- Grout – un tendón relleno completamente, anclaje y cabezal de grout.
- Los cabezales de grout permanentes de material inerte (plástico).
- El concreto colado-posterior para encapsular el cabezal de grout y la placa de anclaje.
- Total encapsulamiento del extremo de una viga principal-I dentro de un diafragma de concreto armado.
- Encapsulamiento de un anclaje debajo de una losa del tablero junto con el sellado de las juntas de construcción con un sellador aprobado (ejemplo, metil-metacrilato o similar).
- Aplicación de un revestido de sellado aprobado o sellador a un del colado-posterior anclaje.
- Un cierre circundante de un cajón hueco impermeable y drenado.
- Aplicación apropiada de las capas de la superficie de rodadura.
- Detalles apropiados en las juntas de expansión para prevenir fugas e ingreso del agua.

8.5.2. Cabezales de Grout Permanententes

Los cabezales de grout permanentes de un material inerte (un plástico aprobado o plástico reforzado con vidrio) pueden proporcionar significativa protección a una placa de la cuña, colas de torones o a la tuerca de una barra PT del anclaje. El cabezal de grout es llenado con grout durante el grouting del tendón, permitiendo el flujo a través de un agujero especial en un anclaje o en la placa de la cuña, a través de espacios entre las cuñas y los intersticios de los torones. Para facilitar el llenado de un cabezal de grout, una apertura es necesaria en la parte superior del cabezal. Los cabezales de grout deberán ser sellados adecuadamente y asegurados contra las placas de anclaje.

8.5.3. Detalles de Protección del Anclaje

Sutiles distinciones son necesarias entre, por ejemplo, los anclajes en los extremos de las vigas prefabricadas, bajo las losas de los tableros u otras superficies expuestas. Igualmente los anclajes dentro de un cajón hueco y relativamente remotos a la exposición directa a los elementos corrosivos comparados a aquellos directamente expuestos a las sales de escorrentías y transportados por el aire en las juntas de expansión o a superficies expuestas similares. Las siguientes descripciones, detalles y figuras son ejemplos para ilustrar recomendaciones como guía.

Detalles generales para los anclajes deberán abordar la protección adecuada para asegurar, cuando sea necesario, que:

- El grout correcto esté instalado apropiadamente para llenar completamente el tendón y el anclaje.
- El cabezal de grout permanente esté completamente lleno con grout.

- Un rebajo de tamaño adecuado esté proporcionado, o que haya espacio adecuado para acomodar un colado-posterior, para encapsular completamente la cabeza del anclaje y el cabezal.
- Las superficies de los rebajos y los sustratos del colado-posterior estén completamente limpios y rugosos antes de colocar el colado-posterior.
- El anclaje y el cabezal de grout estén encapsulados en el colado-posterior de un grout epóxico aprobado, de alta resistencia, elevada adherencia, de baja contracción, y lleno de arena.
- El colado-posterior proporcione un recubrimiento mínimo sobre el cabezal y los bordes de la placa de anclaje de $1\frac{1}{2}$ plg.
- Para un anclaje individual en un rebajo, la superficie del colado-posterior es uniforme con la cara adyacente del bloque del anclaje.
- Para un grupo de anclajes, rebajos similares individuales o un colado-posterior simple de encapsulamiento puede encerrar todos los anclajes en el grupo.
- El colado-posterior simple de encapsulamiento es asegurado al substrato del concreto con refuerzo embebido (ejemplo, refuerzo acoplado atornillado) con la finalidad de asegurar la adherencia.
- Las formas y dimensiones del colado-posterior simple de encapsulamiento (single enclosing pour-back) es uniforme con las características adyacentes del concreto estructural con contraflechas en todas esquinas exteriores.
- Los extremos de los miembros prefabricados tipo viga son encerrados en un diafragma proporcionando concreto adicional (reforzado) sobre el extremo de la viga (ejemplo, Figura 8-6) y que en diafragmas reforzados de las juntas de expansión estén correctamente formados y vaceados. (Sólo materiales aprobados para el encofrado de los espaciadores de junta (ejemplo, poliestireno expandido o similar) deberán usarse entre las unidades continuas cuando un diafragma es vaceado contra el otro).
- El número de bloqueadores de anclaje y colados-posteriores por debajo de una losa de tablero superior en los extremos de las vigas y vigas principales empalmadas se minimiza.
- El uso apropiado y correcto se hace con la construcción por etapas de las vigas principales empalmadas (ejemplo, canal de tres tramos transversales) y puentes similares, con el fin de poder instalar y esforzar tendones largos, longitud total, desde ambos (abiertos) extremos de aproximación. (Esto reduce la necesidad de anclar los tendones en las partes superiores de las vigas principales y también facilita el tensionado).
- Los rebajos del anclaje en las partes superiores de las vigas principales y de las vigas son colocados en un colado continuo a todo lo ancho de aquella parte del extremo de la losa del tablero (Figura 8-7) y que la parte superior de la junta de construcción esté sellada con un sellador apropiado (ejemplo, metil metacrilato) que no cause un posible problema de desunión o pérdida de adherencia con cualquier capa de la superficie de rodadura subsecuente.
- Para un anclaje en un pilar interior dentro de un cajón hueco, un revestimiento sellador aprobado es aplicado sobre el cabezal, sobre el borde una placa de anclaje y traslapando en el concreto estructural adyacente por un mínimo de 12 pulgadas a todo el alrededor de la placa de anclaje o por un adicional de 6 pulgadas más allá de una esquina (Figura 8-8).
- Las estructura tipo cajón son diseñadas, detalladas y construidas apropiadamente para que sean ventiladas, impermeables y bien drenadas.

- Todas las superficies de acabado de los colado-posteriores y el concreto estructural adyacente son correctamente preparadas para recibir el subsecuente revestido-sellador.

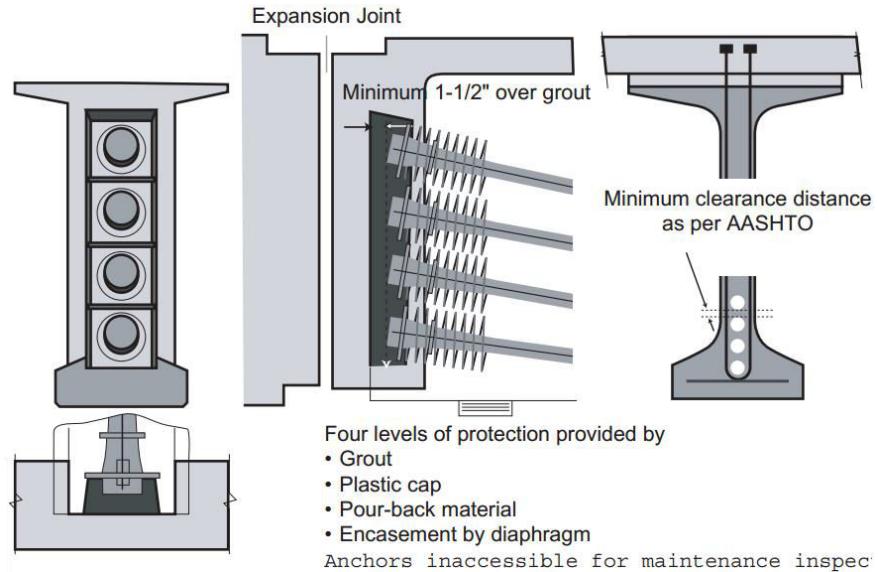


Figura 8-6: Detalles de protección del anclaje en los anclajes extremos.

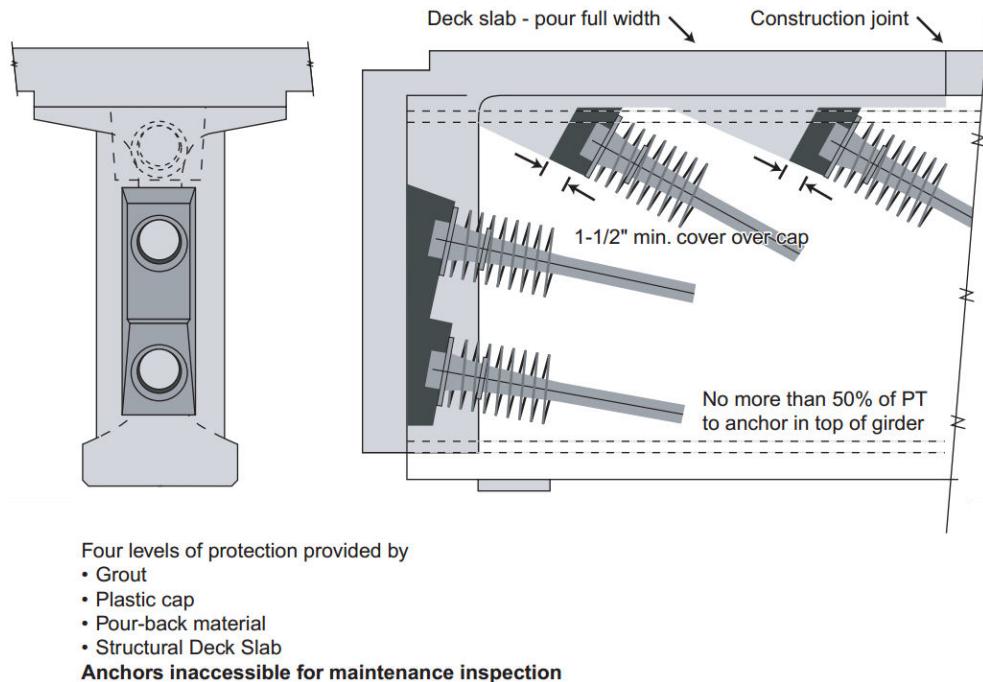


Figura 8-7: Detalles de protección en los anclajes superiores.

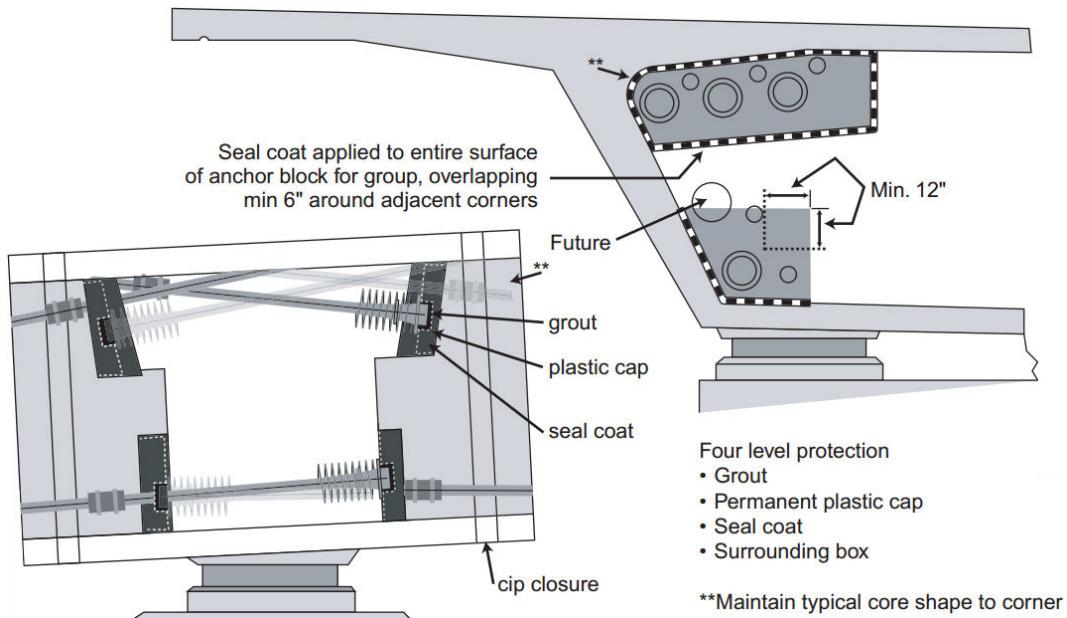


Figura 8-8: Protección del anclaje en pilares interiores.

- Longitudinalmente, los blisters de anclaje son colocados, preferiblemente, al menos a 12 pulgadas de las juntas de construcción transversales o desde las juntas entre los segmentos prefabricados commensurados con (a) la geometría necesaria para la ruta de tendón y el radio para entrar en la losa y (b) la longitud mínima necesaria para anclar el blister en la ubicación permitida (alma) por el acortamiento en forma de "pie" de cualquier curvatura plana (Figura 8-9). (La forma exterior y el tamaño de los blisters de anclaje en el interior de un cajón hueco deberán ser, en lo que fuera posible, los mismos dentro de un puente dado para facilitar detalles similares del refuerzo, construcción y encofrado).
- Los blisters de anclaje son reforzados correctamente para resistir el estallido y los efectos radiales de la fuerza.
- Los soportes del ducto se proporcionan para los ductos que no pueden ser atados directamente al refuerzo adyacente.
- Una ranura de goteo (drip groove) se recomienda en el soffit de la losa superior alrededor de los blisters de anclaje superiores para interceptar cualquier ruta posible de agua y desviar el agua hacia el alma.
- En las juntas de expansión, los anclajes son protegidos de la fuga del agua. Un ala que gotea (drip flange) puede proporcionar un borde protección positivo para la parte superior del revestido sellador (seal coat). (Figuras 8-10, 8-11 y 8-12).
- En áreas costeras, considerar añadir faldones o deflectores sobre el colado-posterior del anclaje en las juntas de expansión para minimizar el efecto directo del spray arrastrado por el viento.
- La cara embebida de los anclajes para los tendones longitudinales superiores en la construcción segmental prefabricada o vaceada-en-sitio o similar deberá ser diseñada, detallada e instalada de tal manera que proporcione total protección del anclaje en pockets de los rebajos, haciendo uso de la protección ofrecida por el grout, por el cabezal de grout permanente, y por el material del colado-posterior aprobado para llenar completamente el pocket del anclaje y una junta sellada y/o recubrimiento de concreto sobre el pocket (Figura 8-13).

- No debe haber aberturas permanentes a cualquier superficie (interiores o exteriores).
- Debe haber al menos 3 ½ pulgadas de recubrimiento de concreto estructural (emparejado-vaceado) sobre cualquier pocket para la superficie de rodadura de la losa superior, para la integridad del concreto y aplicación del epóxico.
- Las superficies de concreto de un rebajo del pocket del anclaje deberán ser limpiadas correctamente y preparadas antes de colocar el material del colado-posterior.

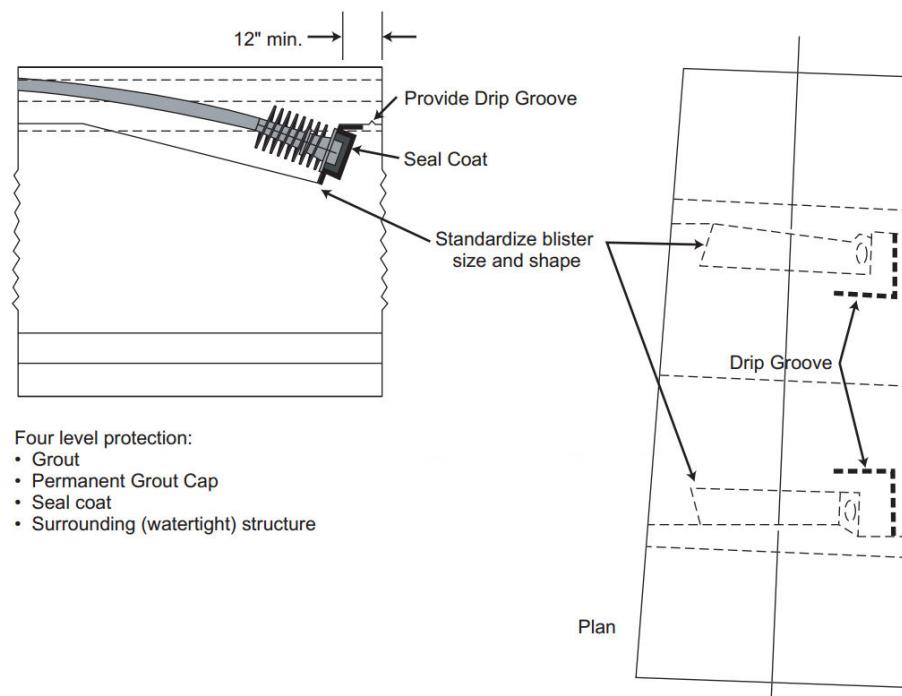


Figura 8-9: Protección del anclaje para tendones en voladizo anclados en blisters.

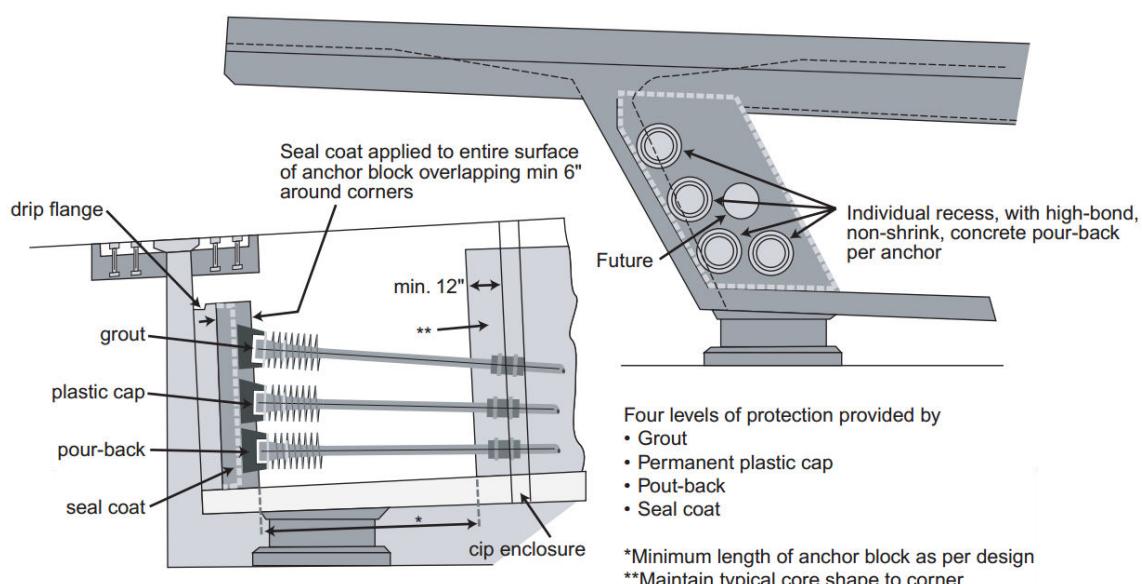


Figura 8-10: Protección de anclajes individuales en juntas de expansión.

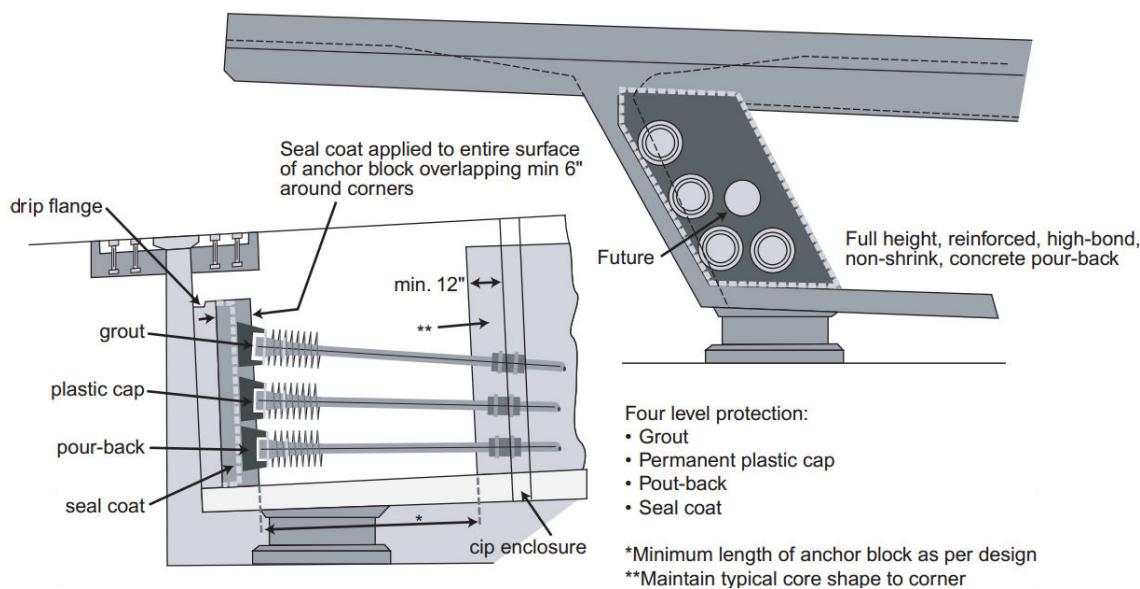


Figura 8-11: Protección de un grupo de anclajes en un segmento junta de expansión.

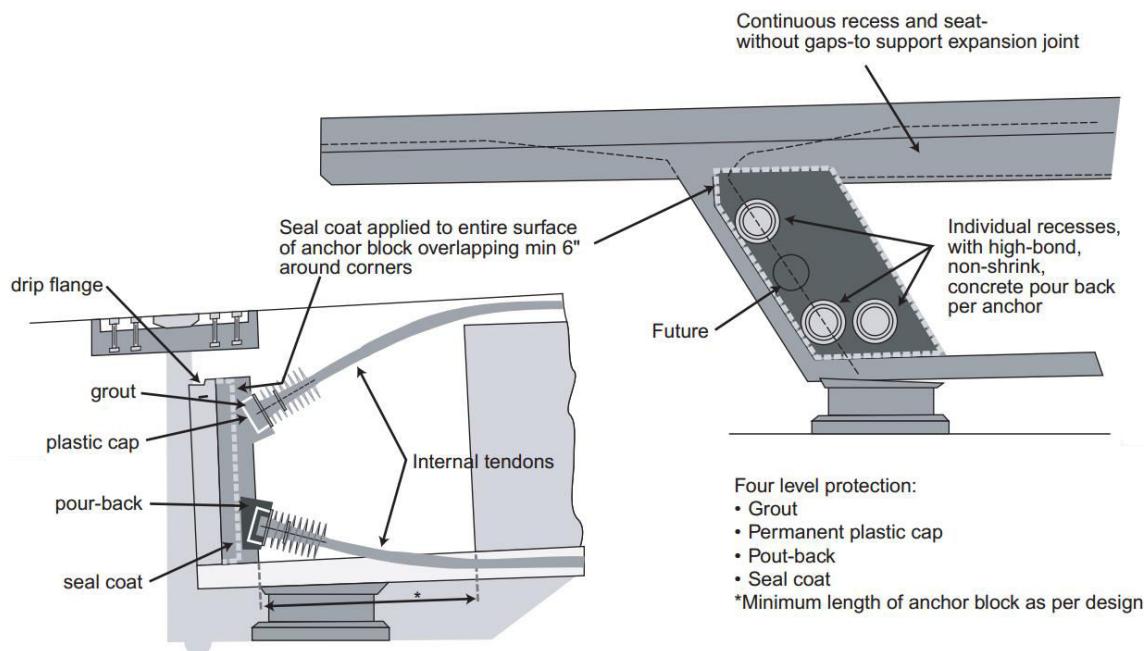


Figura 8-12: Protección del anclaje en juntas de expansión.

- Las juntas emparejadas-vaceadas deberán selladas completamente con epóxico.
- El grout deberá instalarse apropiadamente para llenar completamente el tendón, el anclaje y el cabezal.

Un método posible para el grouting y sellado de la cara embebida de los anclajes incluye:

1. Antes del vaceado, un outlet es instalado en el anclaje y se lleva a través de la parte superior de la superficie de concreto.

2. Un puerto de inspección sobredimensionado (aproximadamente 2 pulgadas de diámetro) es instalado a través de la porción de concreto sobre el rebajo y sobre el outlet del cabezal de grout y proporciona acceso al pocket del anclaje (rebajo/bloqueador) creado por el encofrador del pocket.
3. El segmento de concreto es entonces vaceado.
4. Luego de la erección e instalación de los tendones permanentes, pero antes de la erección del siguiente segmento, el cabezal plástico del grout es instalado en la placa del anclaje y un tubo respiradero anexado a través del puerto sobredimensionado.
5. El tendón es “engrulado”.
6. El anclaje y el cabezal son revisados para asegurarse que están llenos de grout.
7. Luego del grouting del tendón, el outlet del anclaje puede ser perforado e inspeccionado para la plenitud del grout usando un endoscopio, si es necesario. Si no está lleno, el grouting al vacío deberá usarse para llenar cualquier agujero.
8. El tubo de grout es cortado a aproximadamente $\frac{1}{2}$ " por encima de la base del rebajo del tablero. El outlet perforado es entonces llenado desde la parte inferior hacia arriba con epóxico y un cabezal es instalado en el tubo de grout.
9. El tubo de grout sobre el cabezal de grout es entonces removido y un plug (tapón) es insertado en el agujero del cabezal. El puerto de acceso sobredimensionado para el rebajo del anclaje por debajo del nivel del tablero deberá ser tapado temporalmente para mantener el rebajo limpio y seco antes de llenarlo con grout.
10. Luego de la erección del siguiente segmento y después que sus tendones hayan sido “engrulados”, el pocket del anclaje (bloqueador) es llenado hasta la parte superior del puerto de acceso sobredimensionado usando un material aprobado tal como un grout epóxico de alta resistencia, de alta adherencia, de baja contracción, lleno de arena o un grout pre-embolsado.
11. El rebajo del tablero del tubo de grout es sellado con un grout epóxico lleno de arena.

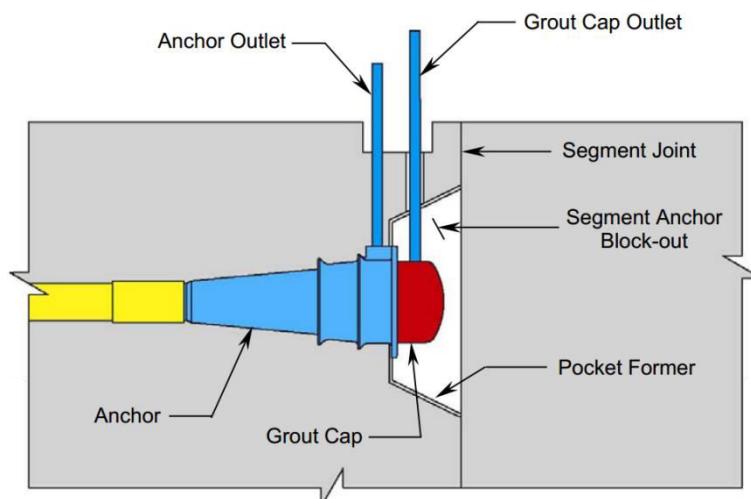


Figura 8-13: Posible detalle para la cara embebida del anclaje.

8.5.4. Instalación de la Protección del Anclaje del Post-Tensionado

Es recomendable que la protección permanente de los anclajes de post-tensionado se complete lo más pronto que sea posible luego del grouting, preferiblemente dentro de los 7 días en entornos agresivos o dentro de 28 días en entornos no agresivos o moderados. El tipo de protección permanente del anclaje depende de los detalles y ubicación de los anclajes como se indica a continuación. Guía general se ofrece para lo siguiente:

8.5.4.1. Preparación de la Superficie

Antes de la aplicación de cualquier material nuevo a la superficie, todos los tratamientos de superficie previos como la lechada, grasa, compuestos de curado, aceites o cualquier material perjudicial deberá removese por limpieza apropiada, tal como cepillo de alambre, chorro de arena, chorro a presión de agua o técnicas similares aprobada, para dejar una superficie limpia y sana sin ningún agua estancada. Cuando sea necesario, las superficies deberán ser secadas.

8.5.4.2. Encofrados para el Colado-Posterior del Anclaje

Los encofrados para el colado posterior deberán ser a prueba de fugas, construidos en filas ordenadas, con un buen ajuste a las superficies con la finalidad de resistir la presión del material contenido o del bombeo cuando sea necesario. Los respiraderos (vents) deberán proporcionarse para permitir el escape de aire y completar el relleno con material cuando sea apropiado.

8.5.4.3. Revestimientos de Sello – O Superficies No Visibles

Excepto para los anclajes sobre superficies expuestas visualmente, (por ejemplo, aquellos para los tendones transversales en los bordes de las losas de los tableros) las superficies expuestas de los coladores posteriores o cabezales de grout deberán ser revestidos con un sistema de revestido sellador aprobado. El revestimiento deberá ser mezclado y aplicado en concordancia con las especificaciones del fabricante.

8.5.4.4. Bloque de Prueba de Concreto para el Revestido Sellador Sobre Superficies Verticales Visibles

Cuando se requiere por las especificaciones del proyecto, un bloque de prueba con una cara vertical expuesta al de 2 pies por 4 pies (0.6 m por 1.20 m) deberá prepararse para una textura de superficie similar a las superficies a ser revestidas en el puente. El número de revestimientos deberá determinarse para alcanzar el espesor de revestido requerido sin chorrear o gotear mezclados y aplicados en concordancia con las especificaciones del fabricante.

8.6. Protección Temporal Durante la Construcción

Durante la construcción, todos los ductos de post-tensionado y los tendones deberán ser sellados o tapados temporalmente para prevenir el ingreso de agua, agentes corrosivos o escombros del sitio y cualquier punto bajo que drene debe mantenerse abierto. Particularmente:

- Los anclajes de post-tensionado deberán ser sellados en todo momento para prevenir la entrada de agua o de contaminantes transmitidos por el agua y no se bloqueen con escombros de la construcción.
- Los cabezales temporales deberán instalarse cuando sean necesarios.
- Los cabezales de grout permanentes deberán instalarse inmediatamente luego del esforzado.
- Los inlets y outlets en los anclajes, los cabezales de grout y los tubos de grout intermedios deberán cerrarse con tapones roscados o cabezales roscados hasta el grouting.
- Los tapones y cabezales deberán reemplazarse luego del grouting pero antes de completar la protección permanente del anclaje.

8.7. Puentes con Viga Principal Tipo Cajón Impermeable

Los tableros de puentes de los puentes con viga principal tipo cajón deberán ser impermeables como bien drenados tanto como sea posible, como una “primera línea de defensa” contra el ataque de agentes corrosivos. Las fugas frecuentemente ocurren a través de los dispositivos de expansión y pueden permitir a los agentes corrosivos atacar los anclajes o los tendones. Las fugas también pueden ocurrir alrededor de las aberturas temporales donde el material de relleno se contraiga o no se adhiera. Las juntas de epóxico selladas inapropiadamente entre los segmentos de viga principal tipo cajón prefabricados pueden también ser una fuente de las fugas. Las siguientes son sugerencias para estructuras tipo cajón:

- Sellar los agujeros de diámetros pequeños a través de las losas de los tableros usados para levantar, asegurar los encofrados móviles, el equipo de protección u otros objetos temporales. Si es posible, los agujeros hacerlos cónicos proporcionando una característica de goteo en el lado inferior. Hacer lo mismo, para los bloqueadores pequeños.
- Considerar el uso de blisters temporales para las barras PT temporales para la erección de los segmentos en voladizo prefabricados cuando sea preferible en lugar de usar bloqueadores en las losas del tablero superior.
- Considerar minimizar el número de manholes para accesos temporales a través de las losas de los tableros que hay, sin embargo, a menudo esenciales para la construcción y estar seguros que estén correctamente reforzados y sellados. Cuando se sellen las juntas de concreto, usar selladores apropiados. (Por ejemplo, el metil-metacrilato puede causar problemas de adherencia para las capas de la superficie de rodadura).
- En los dispositivos de las juntas de construcción, evitar la necesidad de aberturas temporales en o a través del rebajo de asiento que soporta el dispositivo de expansión. Proporcionar alas o muescas de goteo para controlar el flujo de agua en áreas que contienen los anclajes de post-tensionado.
- En las vigas principales tipo cajón, proporcionar drenes de diámetros pequeños (aproximadamente 50 mm (2 pulgadas) de diámetro) a través de las losas inferiores en intervalos regulares (aproximadamente de 3 a 5 m (10 a 15 pies)) sobre el lado bajo del cajón y en todas las barreras interiores y puntos bajos para drenar cualquier agua que se filtre en el cajón. Proporcionar características de goteo al lado inferior de tales drenajes. Proporcionar filtros para bichos si fuera necesario.
- En las columnas huecas, considerar agujeros lloradores.