



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS DE CONCRETO

PRINCIPIOS PRÁCTICOS PARA LA PREFABRICACIÓN Y APLICACIÓN DE
PRESFUERZO EN CONCRETO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
Jaime Méndez Delgadillo

TUTOR PRINCIPAL
Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

MÉXICO, D. F. Junio del 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. MENDOZA ESCOBEDO CARLOS JAVIER

Secretario: M.I. MENDOZA ROSAS MARCO TULIO

Vocal: ING. COTTIER CAVIEDES JUAN LUIS

1^{er} . Suplente: DR. MEZA PUESTO JESÚS HUGO

2^{d o} . Suplente: DR. AIRE UNTIVEROS CARLOS MÁXIMO

Lugares donde se realizó la tesis: México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

JAIME MÉNDEZ DELGADILLO

FIRMA

A mis grandes maestras y fuentes de motivación: Aimeé y Xadani,

A mis generosos padres,

A mi paciente esposa,

A mis hermanos,

A mis maestros,

A todas aquellas personas y familiares que me rodean y
me comparten su tiempo y su amistad . . .

Gracias.

JMD

INDICE

Introducción

A. Objetivo

B. Necesidad de educación general y especializada en la construcción

B.1. La Prefabricación como especialización de la construcción

B.2. Causas

B.3. Consecuencias

C. Medición del problema

D. Situación actual de la industria del prefabricado y el presfuerzo

E. La información como parte de la solución

1 Temas básicos de diseño estructural de elementos prefabricados y presforzados

1.1 Consideraciones generales

1.2 Esfuerzos de cortante

1.3 Contracción y flujo plástico (*shrinkage* y *creep*)

1.4 Definición de presfuerzo

1.5 Ventajas del concreto presforzado y prefabricado

1.6 Exigencias del concreto presforzado y prefabricado

1.7 RCDF, Normas Técnicas Complementarias relativas al concreto prefabricado

1.8 American Concrete Institute (ACI) 318S-08

1.9 Precast Prestressed Concrete Institute (PCI)

2 Prácticas y procedimientos de producción

2.1 Objetivo

- 2.2 Instalaciones de producción y curado
- 2.3 Selección de cimbras
- 2.4 Identificación de elementos prefabricados
- 2.5 Manejo de elementos prefabricados
- 2.6 Acabados
- 2.7 Reparaciones

3 Seguridad

- 3.1 Objetivo

4 Materiales para concreto prefabricado y presforzado

- 4.1 Materiales para concreto
- 4.2 Refuerzo y accesorios
- 4.3 Materiales de presfuerzo
- 4.4 Electrodo

5 Concreto para elementos prefabricados

- 5.1 Introducción
- 5.2 Propiedades del concreto fresco y endurecido
- 5.3 Relación A/MC
- 5.4 Dosificación, mezclado, transporte, colocación y consolidación del concreto
- 5.5 Concreto premezclado para prefabricados
- 5.6 Requerimientos del curado de concreto en elementos prefabricados

6 Refuerzo y presfuerzo

- 6.1 Refuerzo
- 6.2 Presfuerzo
- 6.3 Pretensado

6.4 Postensado

7 Control de calidad

7.1 Inspección

7.2 Pruebas

7.3 Registros

7.4 Instalaciones del laboratorio

7.5 Tolerancias de fabricación

7.6 Apariencia

7.7 Agrietamiento

8 Soldadura

8.1 Soldadura de acero estructural

8.2 Soldadura de acero de refuerzo

8.3 Soldadura de vástagos, pernos o espárragos.

9 Introducción al montaje de elementos prefabricados

9.1 Consideraciones generales

9.2 Equipo y accesorios

9.3 Precauciones y seguridad

9.4 Procedimientos

Apéndice D

Conclusiones

Bibliografía

A. Objetivo

El objetivo general del trabajo que comprende esta tesis es el siguiente:

Elaborar un documento que contribuya al desarrollo de profesionistas especializados en **concreto prefabricado y presforzado**, aportando información práctica basada en el estado del arte; para resolver situaciones operativas y para reforzar los conocimientos de dicha especialidad.

Los objetivos particulares del trabajo que comprende esta tesis son los siguientes:

- Desarrollar un documento que presente conocimientos prácticos para el mejor desempeño de las actividades de un profesional e incluso personal calificado dedicado a esta especialidad de la construcción.
- Contrastar distintos procedimientos de prefabricación y sus beneficios económicos, de seguridad y de avance.
- Aprovechar los avances que están disponibles en la materia en cuestión y reducir el atraso respectivo.
- Presentar un panorama más claro de cómo está conformado el proceso de Certificación por parte del Instituto del Concreto Prefabricado y Presforzado (Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI) para alentar a más profesionales a certificarse y especializarse en este rubro.
- Proporcionar referencias actualizadas fidedignas para profundizar investigaciones o proyectos más especializados.

Este trabajo pretende ser una aportación a la Industria de la Construcción, especialmente la Prefabricación y el Presfuerzo, para la formación o reafirmación de conocimientos actuales que se demandan en un trabajo de muchos detalles y aspectos técnicos finos, además de que en nuestro país solo recientemente se le ha dado la importancia a este campo de aplicación de la ingeniería civil.

Si existen los suficientes conocimientos teórico-prácticos para el responsable de estos trabajos y que contribuyen operativamente al buen desempeño y aplicación correcta de la técnica en el campo de la prefabricación y la aplicación del presfuerzo, entonces no existirán problemas concernientes al mal desempeño ante sismos, problemas de calidad, sobrecostos, carencia de personal calificado, proyectos con deficiencias constructivas, retrasos en tiempo, entre otros.

B. Necesidad de la educación general y especializada en la construcción

La educación permite a cada ser humano poseer el conocimiento, habilidades, actitudes y valores necesarios para forjar un futuro a sí mismo y a su entorno. De hecho la educación es un derecho humano fundamental y esencial para el ejercicio de todos los demás derechos. Promueve la libertad individual, refuerza y sostiene muchas oportunidades de desarrollo.

La educación es una herramienta poderosa en la que niños y adultos marginados socialmente pueden apoyarse para salir de la pobreza, participar completamente como ciudadanos y aspirar a mejores condiciones de vida.

En general, ya que el concreto hidráulico es el material hecho por el hombre más usado sobre el planeta y el segundo más usado por la humanidad después del agua, (tan solo en el 2009 se usaron 6 billones de metros cúbicos, lo que equivale a un metro cúbico por cada persona en el mundo) y su uso está directamente ligado con la Construcción, el conocimiento acerca de este material representa un aspecto importante para cualquier individuo dedicado a esta rama de la Ingeniería Civil.

Ramírez y Valdez (2006) citan que: “al analizar los programas de licenciatura en Ingeniería Civil en México, se obtuvo que solamente en menos de 1% de ellos se tienen cursos curriculares relacionados con la prefabricación y el presfuerzo, y en 2.5% se tienen cursos optativos relacionados con este tema. En los programas de Arquitectura sucede algo similar, aunque en este caso los cursos se refieren generalmente al aspecto constructivo y no al diseño estructural”. Por lo tanto, es claro saber que la escasa mano de obra calificada y especializada y profesionistas dedicados a esta área se generen a través de la experiencia y la autoenseñanza, que no muchas veces es suficiente para formarse en esta disciplina, sobre todo, si consideramos la reducida cantidad de empresas prefabricadoras y además que los costos y las consecuencias de los errores pueden ser muy altos debido a características propias del proceso, como son: repetitividad, tiempos relativamente cortos de producción de cada elemento, costo de materiales, dimensiones, estrechas tolerancias y equipo involucrado.

La manufactura de concreto prefabricado y de estructuras presforzadas requieren de conocimiento técnico especializado y experiencia; que sumado a las buenas prácticas y bases de la construcción convencional con concreto, presentan un campo de oportunidad para el desempeño de esta gratificante actividad. Por lo tanto, es necesario que se implementen acciones para reforzar la capacitación, tanto de profesionistas como de obreros en aspectos básicos y de aplicación, implícitos en la prefabricación y el presfuerzo. Con la intención de aportar, aunque de forma sencilla este conocimiento, es que se ofrece el presente trabajo.

B.1 La prefabricación como especialidad de la construcción

La idea de presforzar concreto surgió desde fines del siglo XIX para posteriormente hacer práctica su aplicación y surgir como una especialidad de la Ingeniería. El uso del concreto prefabricado y presforzado se ha ido extendiendo especialmente en áreas donde los elementos que conforman la estructura son similares y permiten, por lo tanto, su fabricación en serie. Como ejemplos típicos podemos mencionar: trabes para puentes, dovelas para túneles, columnas, trabes y losas para edificaciones, muros para naves industriales, pilotes, tablestacas, durmientes, piezas para rompeolas, entre otras.

B.2 Causas

Se enumeran las siguientes causas que generan la carencia de conocimientos específicos y prácticos en la prefabricación y presfuerzo de elementos de concreto:

- En general, los conocimientos son de reciente creación, con tecnología generada en décadas pasadas,
- Usualmente toda la información se ha generado en otros países por lo que está escrita en otros idiomas, principalmente inglés,
- Existe una gran resistencia al cambio y una gran tendencia a permanecer en una zona de confort en nuestra sociedad,
- Existen pocas normas y regulaciones nacionales, así como poca investigación nacional al respecto,
- La falta de difusión alternada con una economía inestable,
- El acceso a fuentes de información de primera mano tiene un costo que se considera relativamente alto,
- Existe un atraso tecnológico evidente, que genera más atraso en muchas áreas por la dependencia del exterior.

B.3 Consecuencias

Se enumeran las siguientes consecuencias que se generan a partir de la carencia de conocimientos específicos y prácticos en la prefabricación y presfuerzo de elementos de concreto:

- Deficiente o mala calidad de los trabajos, incumplimiento de tolerancias, problemas y tiempos excesivos de montaje, estética deficiente, acabados deficientes.
- Comportamiento incierto ante cargas dinámicas, especialmente sismos, con sus respectivas secuelas: decesos, daños materiales, problemas legales, entre otros.
- El futuro puede volverse pasado si una técnica no se utiliza adecuadamente.
- Productos más costosos debido a los retrabajos, desperdicios, sanciones, rechazos, etc.

- Práctica peligrosa al ejecutar los trabajos, daño al equipo e instalaciones, falta de seguridad industrial, etc.
- Más atraso tecnológico con dependencia del exterior, fuga de talento, etc.

C. Medición del problema

El problema relativo a esta especialidad de la construcción, que muchas veces opera más como una fábrica que como una obra, radica principalmente a la falta de conocimientos básicos y enfocados *operativamente* a esta área, si adicionalmente agregamos que, la utilización de presfuerzo y equipos de grandes dimensiones generan una gran cantidad de esfuerzos y pueden disipar mucha energía en poco tiempo; todo esto se convierte en una práctica peligrosa sin los conocimientos debidos. Además esta carencia inhibe la adopción de nuevas técnicas, ya que no se han dominado los principios básicos completamente y se limita el desarrollo a un campo muy estrecho de aplicación y que además es muy competido.

En muchos proyectos de construcción, las partidas de prefabricados deben de adecuarse a un programa restringido de tiempo. La fabricación de elementos de concreto prefabricado/presforzado se vuelve una actividad crítica, por lo tanto, la selección del método, la mano de obra adecuada y el conocimiento adecuado del tema cobran cierta relevancia.

D. Situación actual de la industria del prefabricado y el presfuerzo

En México la primera aplicación fue en 1956, con la construcción de un puente sobre el Rio Sta. Catarina en la Cd. de Monterrey, lo cual significaría el inicio en nuestro país de la industria que nos compete.

Se han conformado diversas asociaciones para la investigación, aplicación, regulación y estandarización del concreto presforzado a diferentes niveles de influencia y territorialidad:

Mundial:	Federación Internacional del Presfuerzo, FIP Instituto del Concreto Prefabricado / Presforzado, PCI
México:	Asociación Nacional de Industriales de la Prefabricación y Presfuerzo, ANIPPAC

Dados los avances tecnológicos en concreto, diseño estructural, acero de presfuerzo y equipo de presfuerzo – principalmente – en las últimas décadas, se ha permitido que se desarrollen aplicaciones prácticas de forma económica y competitiva al comparar con otros sistemas de construcción.

Incuestionablemente, fue el arduo e innovador trabajo de Eugene Freyssinet que convenció al mundo de la ingeniería, de ese entonces, de la viabilidad del concreto presforzado como un material de construcción competitivo. A través de toda la vida de Freyssinet, hay un tema que es recurrente una y otra vez, llamado “una simplificación de formas y una economía de recursos (medios)”. Eugene Freyssinet nació en 1879 en la provincia sobre la meseta Corrèze, al este de Bourdeaux (oeste de Francia). Como estudiante tuvo un desempeño mediocre al inicio y en su primer intento de ingresar al prestigioso Ecole Polytechnique fue rechazado en 1898, para posteriormente graduarse en el lugar 19º., por lo que logro ser aceptado en el Ecole des Ponts et Chaussées donde en las lecturas de uno de sus maestros Charles Rabut le vino por primera vez la idea del presfuerzo. “La idea de reemplazar las fuerzas elásticas que son creadas en el refuerzo del concreto por deflexiones debidas a las cargas por esfuerzos permanentes previamente impuestos de magnitud suficiente, vinieron a mi mente por primera vez durante una serie de lecturas dadas por Charles Rabut en el Ecole des Ponts et Chaussées en 1903-1904. Estas lecturas fueron dedicadas, por una parte, al concreto reforzado y, por otra, al estudio sistemático de la deflexión provocada en las estructuras”. Esta idea nunca lo abandono y le sirvió como guía en su desarrollo inicial enfocado a la construcción de puentes en la agreste región sur de Francia central.

E. La información como parte de la solución

Esta tesis tiene la finalidad de servir como una primera guía para la producción de elementos de concreto prefabricado y presforzado en los diferentes proyectos y plantas donde se requiera. Además pretende ser una referencia para los cursos de inducción y capacitación que se implantan en las empresas prefabricadoras a fin de:

- Cumplir y avanzar en su sistema de gestión integral, control de calidad, certificaciones, etc.
- Asegurar la calidad de los productos,
- Establecer criterios bajo los cuales tomar decisiones técnicas,
- Promover la bibliografía actualizada relativa al concreto prefabricado,
- Incluir la durabilidad como valor agregado de la producción,
- Aumentar la rentabilidad de la empresa minimizando costos y tiempo de ejecución,
- Generar capital humano valioso, confiable y competente.

En este trabajo se hace referencia a artículos, reglamentos y publicaciones nacionales y extranjeras con el fin de presentar los estándares desarrollados y respetados por la industria, pero sin

dejar aparte las características propias de una buena organización y la ejecución en nuestro entorno nacional.

El contenido pudiera servir como referencia para la toma de decisiones por los profesionales, para conocer con una profundidad adecuada algunos principios básicos de la prefabricación y del presfuerzo desde el punto de vista del constructor, como material de consulta para estudiantes y personal interesado.

Se pretende dar al presente, un carácter práctico y enfatizar las explicaciones de los “por qué” para que cada profesionista o lector pueda establecer y mejorar los “cómo” en cada proyecto en que intervenga.

1 Temas básicos de diseño estructural de elementos prefabricados y presforzados

1.1 Consideraciones generales

El concreto ha sido usado como material de construcción por siglos. En tiempos más recientes, las edificaciones fueron masivas porque fueron construidas en formas tales que la colocación de sus componentes, piedra y otros tipos de albañilería, trabajaran a compresión.

El concreto simple o no reforzado es una buena selección de material resistiendo compresión, pero se fisura y falla si es sometido a cargas en tal forma que desarrollen esfuerzos excesivos de tensión. La capacidad del concreto simple de resistir tensión es limitada, usualmente comprendida entre el 10 al 20% de su capacidad a compresión; y es determinada generalmente en el laboratorio.

Colocar acero de refuerzo en zonas de tensión (como la parte inferior de una viga) incrementará la habilidad de un elemento de concreto de soportar cargas, debido a que las barras o varillas de acero resistirán la tensión y el concreto la compresión.

La figura 1.1 muestra una viga de concreto reforzada en forma convencional e ilustra las fisuras que se desarrollan en la parte inferior de la viga cuando se le aplica carga.

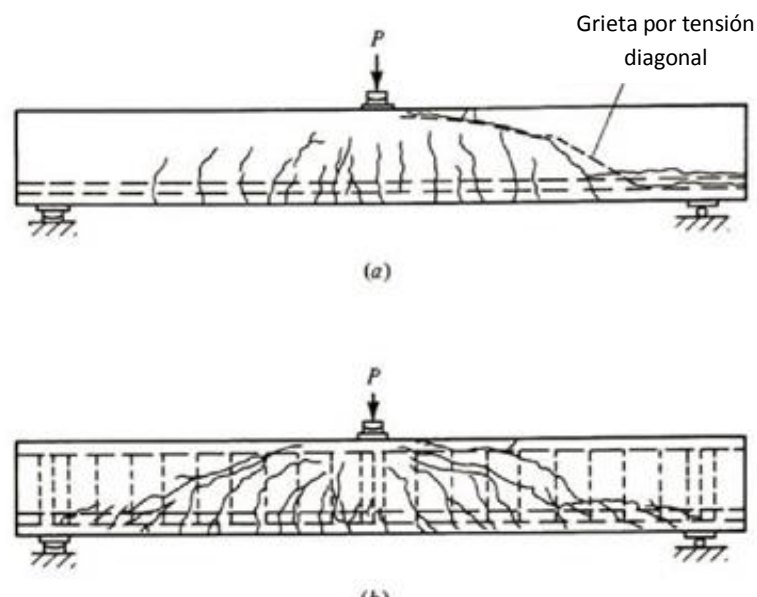


Fig. 1.1 Viga común de concreto reforzado

La fuerza de tensión que toma el acero de refuerzo combinada con la fuerza de compresión del concreto permite a la viga soportar cargas a lo largo del claro, como lo muestra la figura 1.2. La distancia

entre el plano de compresión y el plano de la fuerza de tensión del acero es llamado peralte efectivo. Ambas variables: cantidad de acero y el peralte efectivo afectan la capacidad de carga de la viga. Si el acero de refuerzo es colocado en otro plano distinto al solicitado en los planos estructurales, la capacidad de la viga cambiará y pudiera reducirse.

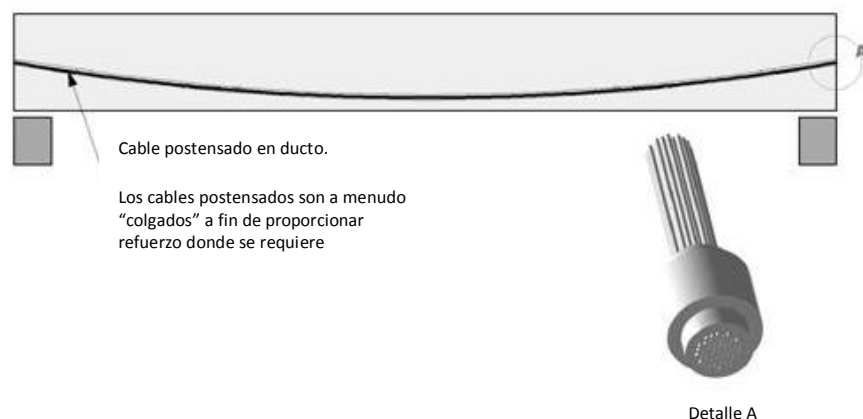


Fig. 1.2 Viga de concreto presforzada

Aunque las varillas incrementan la capacidad de una viga de concreto, la viga reforzada se agrietará bajo carga y se deformará más, conforme vaya agrietándose. Presforzando el acero (usualmente torones), en la viga producirá esfuerzos de compresión localizados en el concreto donde posteriormente las cargas (muertas + vivas) aplicadas producirán esfuerzos de tensión. El presfuerzo previene o reduce la cantidad de agrietamiento y proporciona a la viga capacidad de carga y al mismo tiempo reduce la deflexión (flecha).

Como se muestra en la figura 1.3 una viga sobre un solo claro es presforzada por compresión en la parte inferior de la viga para resistir la tensión resultante de las cargas aplicadas posteriormente. Este proceso se realiza colocando torones cerca de la cara inferior de la viga y tensándolos hasta un límite establecido.

Transfiriendo esta fuerza del torón al concreto produce compresión en la parte inferior de la viga y tensión en la parte superior de la misma, causándole una contraflecha. Las cargas aplicadas posteriormente en la etapa de servicio provocarán tensión en la parte inferior y compresión en la parte superior de la viga, por lo que los esfuerzos combinados finales son mucho menores que aquellos que se presentan en una viga convencionalmente reforzada. La deflexión final también es compensada o reducida debido a la contraflecha.

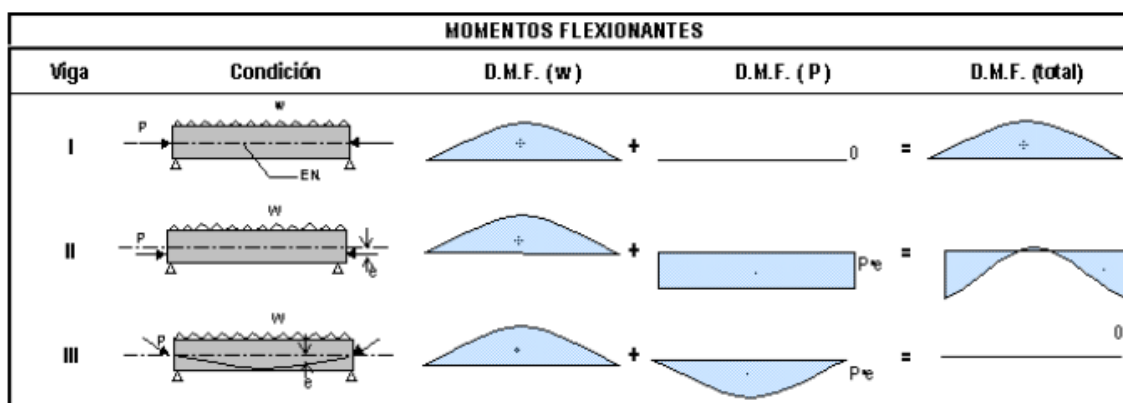


Fig. 1.3 Comparación de momentos flexionantes de vigas presforzadas

1.2 Esfuerzos de cortante

Las cargas en una viga de concreto también crean esfuerzos que actúan perpendiculares al eje longitudinal de la viga, llamados esfuerzos cortantes. Estos esfuerzos excesivos inducen grietas verticales o diagonales en la viga. Los esfuerzos de cortante son más grandes cerca de los apoyos en una viga simplemente apoyada.

Las varillas de refuerzo dobladas en forma de "U" llamadas horquillas, grapas o estribos abiertos, resisten los esfuerzos cortantes en vigas, tanto si son prefabricadas como convencionalmente reforzadas. En vigas presforzadas la compresión creada por el presfuerzo ayuda a resistir los esfuerzos cortantes pero las horquillas son aún requeridas.

Las cargas horizontales sobre una columna de concreto también inducen esfuerzos de cortante. Adicionalmente, las fuerzas de compresión en la columna crean esfuerzos que tienden a hacer que la columna se deforme o se agriete si los esfuerzos son excesivos.

- Varillas de refuerzo dobladas en forma rectangular o circular, llamadas estribos, resisten los esfuerzos de cortante y confinan el acero vertical.
- Alambres de acero doblados en forma rectangular o espirales circulares es también efectivo para este propósito.

El tamaño, forma y posición de las horquillas y estribos en una viga o estribos y espirales en una columna son importantes. Estos componentes del armado de acero deben ser revisados por el personal de producción y verificados durante la revisión previa al colado.

1.3 Contracción y flujo plástico

La contracción por secado (“shrinkage”) y la deformación por flujo plástico (“creep”) son dos propiedades conocidas del concreto y si se presentan en forma excesiva pueden producir problemas. Contracción y flujo plástico son nombres para cambios permanentes en la longitud que ocurren en el concreto y que también se llaman deformaciones permanentes. El anticipar la cantidad de contracción y flujo plástico que se pueden presentar se hace necesario para muchos usos del concreto y por lo tanto su evaluación se está haciendo cada vez más común. El prefabricador también necesita conocer con anticipación que magnitud de contracción y flujo plástico se presentarán en elementos largos o de dimensiones críticas para ajustar adecuadamente la longitud o dimensión del elemento a colar.

1.3.1 Contracción por secado (Shrinkage)

El concreto presenta una disminución de volumen debido al secado que experimenta después de ser colado. La cantidad de contracción será proporcional a la cantidad de agua usada en la mezcla. La contracción total y diferencial puede tener efecto sobre las tolerancias de las dimensiones. Casi toda la contracción se presenta en las etapas iniciales del curado, pero su efecto es significativo y deberá ser considerado en elementos particularmente largos. Se considera que la magnitud unitaria por contracción final ϵ_{cf} varía desde 0.001 para concretos clase 1; para concreto clase 2 se tomará igual a 0.002 y para concretos de alta resistencia la contracción por secado final, se supondrá igual a 0.0006 según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2004. Usualmente, la prueba ASTM C157 para determinar la contracción por secado, arroja resultados en el rango de 0.04% a 0.07%, con una relación volumen/superficie de 1.0

1.3.2 Deformación por flujo plástico (Creep)

Se define como el cambio de volumen del concreto bajo la acción de esfuerzos sostenidos. Es muy marcado durante edades tempranas de la vida del concreto. El concreto tiende a deformarse lentamente bajo los efectos de las cargas aplicadas y del presfuerzo, provocando que la forma y las tolerancias dimensionales de un elemento cambien en el transcurso del tiempo. Como regla general se dice: “Un tercio en tres días, el segundo tercio en tres meses y el último tercio en diez años”. Esto es más importante para elementos que tienen altos presfuerzos excéntricos que llevarán a cambios en contraflechas y alabeos con el paso del tiempo. La deformación por compresión ocasionada por el flujo plástico tiene un efecto importante sobre el presfuerzo provocando una pérdida o disminución de la fuerza efectiva. Se presenta en los agregados y en la pasta. Se mantiene una proporcionalidad directa esfuerzo – contracción. Las temperaturas elevadas incrementan el “creep”. La deformación es esencialmente irreversible, cuando los esfuerzos se retiran, la contracción se detiene pero no se regresa el elemento a una condición inicial apreciable.

La prueba estándar para la determinación de la deformación por flujo plástico es la ASTM C512.

Se dice que este fenómeno es particularmente importante considerarlo en el diseño y construcción de estructuras muy altas, instalaciones nucleares y estructuras con claros muy largos.

1.4 Definición de presfuerzo

El presfuerzo consiste en inducir deliberadamente esfuerzos permanentes en un elemento con la finalidad de mejorar su comportamiento estructural, ya sea aumentando su resistencia, reduciendo agrietamiento e incrementando por lo tanto características deseables como la durabilidad del producto, entre otras. Específicamente en elementos de concreto que es resistente en compresión pero relativamente no resistente a la tensión, el presfuerzo es usado para controlar esfuerzos de tensión y “precomprimir” el concreto. Esto equivale a decir que se le provee una capacidad “almacenada” de resistir cargas las cuales pudieran de otra forma producir tensión excesiva y agrietamiento en el concreto.

Existen dos formas de presfuerzo, y diferencian entre sí principalmente por el tiempo y el procedimiento en que es aplicado o transferido al elemento:

- Pretensado
- Postensado

El *pretensado* de concreto prefabricado es acompañado por la tensión de acero de presfuerzo de alta resistencia, **antes** de colocar el concreto alrededor de él. Cuando el concreto endurece se adhiere al acero de presfuerzo. Cuando los dispositivos que sostienen el acero son liberados, la fuerza en el acero es aplicada a (o resistida por) el concreto. Esto provoca al concreto compresión. La mayoría de los elementos pretensados se producen en serie en plantas adecuadas para este propósito, donde se pueden controlar en mayor grado ciertas condiciones, entre los elementos pretensados más comunes están: trabes AASHTO, trabes Nebraska, tabletas, viguetas, losas, entre otros.

El *postensado* de concreto prefabricado es el proceso en el cual se tensan los tendones o acero de presfuerzo y anclarlos en los extremos de los elementos **después** de que el concreto ha endurecido o fraguado y ha alcanzado su resistencia necesaria para soportar las cargas. Puede realizarse este proceso dejando ductos (rectos o curvos) previamente colocados en el concreto o torones encamisados o recubiertos. En el postensado la acción del presfuerzo se ejerce externamente y los tendones se anclan al concreto con dispositivos mecánicos; por lo que no necesariamente debe de hacerse en una planta, si no que puede realizarse en el sitio definitivo donde es colocado el elemento. Los ductos, una vez realizado el postensado, se rellenan con mortero y/o grout a fin de evitar corrosión y evitar movimientos relativos entre los torones durante la aplicación de cargas dinámicas. Los usos más importantes para elementos postensados se dan en vigas de grandes dimensiones, vigas hiperestáticas, dovelas para puentes, tanques de agua, cabezales de grandes dimensiones, entre otros.

Es importante señalar que el presfuerzo se ha llegado a aplicar en forma combinada pretensado - postensado o aplicar en diferentes etapas durante el proceso constructivo.

1.5 *Ventajas del concreto presforzado*

Debido a que los esfuerzos de presfuerzo disminuyen los esfuerzos de tensión como los momentos en la sección al centro del claro de una viga libremente apoyada (ejemplo); la deformación y el agrietamiento producidos disminuyen por la compresión y los momentos producidos por el mismo presfuerzo; haciendo más eficiente el elemento, como lo muestra la figura 1.3 donde se comparan los diagramas de momentos flexionantes de vigas reforzadas y presforzadas bajo la acción de la misma carga.

Entre algunas de las ventajas (estructurales) del sistema de presfuerzo se tienen las siguientes:

- Mejor comportamiento estructural ante las cargas de servicio por el control de agrietamiento y deflexión,
- Se mejora la capacidad del elemento a resistir esfuerzos cortantes (p.e. vigas),
- Optimización y aplicación de materiales de alto desempeño,
- Menor utilización de acero de refuerzo,
- Se obtienen elementos más eficientes y esbeltos, con menor uso de materiales; por ejemplo, en vigas: se utilizan peraltes en el rango de $L/20$ a $L/23$ contra $L/10$ para concreto reforzado (L =claro entre apoyos),
- Mejor control de detalles “finos” tales como recubrimientos, relación agua/material cementante, entre otros,
- Control de la contracción por secado,
- Reducción de contracción por flujo plástico,

Entre las ventajas como sistema constructivo se pueden enunciar las siguientes:

- Tiempo relativamente más corto de producción,
- Menor impacto y menor uso de espacio en el sitio de los trabajos.

1.6 *Exigencias del concreto presforzado*

En definitiva, como cualquier sistema, presenta desventajas que pueden afectar el resultado de un proyecto, principalmente relacionados con los altos costos asociados a este tipo de construcción como los que podemos mencionar: materiales de alta especificación, dimensiones de elementos, costo de equipo, costo de mano de obra especializada, aspectos de seguridad y riesgos. Entre las exigencias podemos citar:

- Diseños especializados de elementos comunes que requieren de revisiones minuciosas,
- Diseños especializados de conexiones, preparaciones y apoyos muy detallados, que demandan conocimientos más específicos sobre el tema,

- Planeación muy demandante, ya que el uso de prefabricados no acepta, generalmente, modificaciones importantes o cambios sustanciales una vez iniciado el proceso,
- A partir de proyectos medianamente complejos se hace necesaria la presencia directa en planta y muchas veces en obra; de personal relacionado con el diseño estructural para su consulta y reducción de tiempos de espera en la resolución de dudas o aclaraciones.
- Los procedimientos de aplicación de presfuerzo (incluyendo la determinación de las pérdidas) son más complejos, precisos y riesgosos por lo que requieren de la atención de personal calificado y entrenado.

Es importante señalar que a medida que avanza el tiempo se darán aplicaciones donde solo sea posible su solución con presfuerzo, y por lo tanto, será redituable tanto para el personal como para las empresas la inversión en anticipar soluciones a estos puntos anteriores.

1.7 RCDF, Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-C)

Considerando que el diseño de estructuras presforzadas en México se basa convencionalmente bajo los lineamientos de dos Reglamentos (RCDF y el ACI 318), es importante tomar en cuenta algunos puntos importantes de las Normas que complementan al Reglamento de Construcciones del D.F.

Las NTC-C en su capítulo 9 “Concreto Presforzado” establece: “En elementos presforzados y parcialmente presforzados deben revisarse los estados límites de falla y los de servicio. Se deberán tomar en cuenta las concentraciones de esfuerzos debidos al presfuerzo”.

Adicionalmente en el apartado 9.3, Estados Límites de Falla, dicta: “Se revisarán los estados límite de flexión, flexocompresión, fuerza cortante, torsión, pandeo y, cuando sean significativos, los efectos de fatiga”. En el punto 9.4, Estados Límite de Servicio: “Las deflexiones y agrietamiento bajo condiciones de carga que pueden ser críticas durante el proceso constructivo y la vida útil de la estructura no deben exceder a los valores que en cada caso se consideren aceptables”.

Estos lineamientos nos permiten comprender que, nosotros como ejecutores o realizadores de un producto, originado en un modelo físico – matemático y además regulado, debemos de reproducir al momento de ejecutar el proceso de prefabricación y aplicación de presfuerzo las mismas características que el diseñador está suponiendo, con la finalidad de que el desempeño estructural sea el esperado y el adecuado en las condiciones acotadas.

En el contexto anterior debemos considerar de manera importante las pérdidas de presfuerzo, las cuales como lo indica el punto 9.5.4 de las NTC-C, Indicaciones en planos, “Deberán indicarse en los planos estructurales las pérdidas de presfuerzo consideradas en el diseño, y no deberán excederse dichas pérdidas en la planta de fabricación ni en la obra”. Por lo que en el capítulo de “Refuerzo y Presfuerzo” trataremos más a detalle los cálculos y consideraciones al respecto.

1.8 American Concrete Institute (ACI) 318S-08

El Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08) en el Capítulo 18, Concreto Presforzado, establece disposiciones que se desarrollaron principalmente para elementos estructurales tales como losas, vigas y columnas que se utilizan comúnmente en las edificaciones. Sin embargo, muchas de estas disposiciones pueden aplicarse a otro tipo de estructuras tales como recipientes a presión, pavimentos, tuberías y durmientes.

Según el ACI, en el punto 18.2.2, indica: “El diseño de elementos presforzados debe basarse en la resistencia y en el comportamiento en condiciones de servicio durante todas las etapas de carga que serán críticas durante la vida de la estructura, desde el momento que el presforzado se aplique por primera vez”.

Otra consideración importante establecida en el punto 18.3.2, dice: “Para el estudio de los esfuerzos en transferencia del presforzado, bajo cargas de servicio y en el estado correspondiente a cargas de fisuración, se debe emplear la teoría elástica con las siguientes suposiciones:

- 18.3.2.1 Las deformaciones unitarias varían linealmente con la altura en todas las etapas de carga.
- 18.3.2.2 En las secciones fisuradas el concreto no resiste tracción¹”

Cabe señalar que los criterios de diseño entre el ACI y el RCDF difieren entre sí, su elección como base en el diseño dependerá del criterio del diseñador, de cuestiones contractuales, o de algunas otras cuestiones generalmente fuera de alcance del prefabricador.

¹ Tracción sinónimo de tensión.

1.9 *Precast Prestressed Concrete Institute (PCI)*²

Este instituto cuya sede se encuentra en Chicago, Illinois, EUA, se ha encargado de publicar y recopilar mucha información referente al diseño de elementos prefabricados y presforzados, presenta el estado del arte y otorga certificaciones³ relativas a control de calidad y montaje. Entre las publicaciones sobre diseño más importantes y significativas podemos citar:

- PCI Design Handbook, 7th Edition - (MNL-120)
- Design and Typical Details of Connections for Precast and Prestressed Concrete, 2nd Edition - (MNL-123)
- Design for Fire Resistance of Precast, Prestressed Concrete, 2nd Edition - (MNL-124)
- Design of Connections for precast prestressed concrete buildings for the Effects of Earthquake - (TR-5)
- Designer's Notebook: Energy Conservation - (DN-15)
- Fundamentals of Prestressed Concrete Design, Revised 2nd Edition - (MNL-115)
- Bridge Design Manual, 3rd Edition (MNL-133)

² www.pci.org/Design_Resources/

³ www.pci.org/PCI_Certification/

2 Prácticas y procedimientos de producción

En este capítulo se busca dar a conocer las prácticas y procedimientos que se efectúan en la mayor parte de las plantas fijas o móviles donde se producen prefabricados de concreto en México, pero también se presentan algunas otras prácticas que se efectúan con muy buenos resultados en otros lugares y que pudieran ser implementadas en nuestro país, lo que implicaría mejoras sustanciales en muchos casos.

2.1 *Objetivo*

Usualmente para iniciar un proyecto donde se requieran prefabricados y el costo del transporte desde una planta ya existente sea prohibitivo; se considera una opción muy viable la instalación de una planta móvil de carácter temporal. Pero cabe mencionar que se siguen los mismos principios para la instalación de una planta nueva fija. Para iniciar, desde el punto de vista de la ejecución, se realiza el planteamiento de un “layout” o distribución de la planta móvil y/o a pie de obra. El layout y los equipos son responsabilidad de la gerencia y personal de producción. Los productos de calidad pueden ser elaborados con diferentes distribuciones de plantas y con equipos de diferentes tipos y modelos. Algunos temas sobre las instalaciones, tales como superficies de almacenaje pobremente compactadas o muy limitadas, concreto no uniforme debido a problemas de mezclado, soldadura porosa debido a condiciones climáticas, etc., son temas de preocupación que afectan la calidad y el avance por lo que deben ser resueltos.

Cada layout debe ser minuciosamente analizado, considerando las dimensiones del equipo de transporte y de desmolde, circulación de equipo diverso, áreas de seguridad, accesos y salidas almacenaje de materiales, limpieza y reparación de cimbras, armados de acero, productos en proceso y terminados, disposición de espacios a través del tiempo, instalaciones especiales de almacenaje de combustibles, gases, residuos peligrosos, equipo; así como los ductos o pasos necesarios para la distribución de energía eléctrica, agua, vapor, etc. Siempre se debe considerar que los movimientos internos y repetitivos sean con los trayectos más cortos y de menor consumo de tiempo para lograr eficiencia. No siempre es posible anticipar todos los movimientos y duraciones de la producción de un elemento prefabricado, pero en la medida que esto se afine se reflejará en menor costo y menor tiempo invertido.

2.2 *Instalaciones de producción y curado*

Las necesidades de espacio deben ser previamente establecidas de acuerdo a las condiciones propias de cada proyecto en específico, a los programas de obra pactados, a la interacción entre diversos proyectos, entre otros, pero algunas recomendaciones generales pueden servir como referencias.

2.2.1 Instalaciones de producción

Son aquellas propiamente dicho, que son destinadas a la elaboración de elementos prefabricados de concreto y almacenaje temporal (figura 2.1 y 2.2). Cabe mencionar que los espacios adicionales como oficinas, casetas de vigilancia, enfermería, cercas, etc., no se consideran en este trabajo puesto que son similares a cualquier obra civil convencional y dependen muchas veces del criterio de la gerencia o dirección, de las políticas de las empresas y de la disponibilidad de espacio y recursos. Si dichas instalaciones son cubiertas o techadas se tiene una ventaja adicional por las condiciones controladas de producción sin la interferencia de situaciones externas como el clima.

2.2.1.1 Distribución

Las superficies y espacios para almacenamiento de productos utilizados posteriormente en la fabricación, deberán reunir las condiciones de almacenamiento establecidas por el propio proveedor. Dichas áreas de almacenamiento deben estar distribuidas de tal forma que no interfieran o se superpongan con la producción. Además estas superficies o almacenes deben de localizarse y construirse con el objeto de evitar contaminación, daños o interacción peligrosa entre productos almacenados. Como ejemplo citaríamos: almacenaje de torón cerca de talleres de soldadura o fuentes de calor (ver “Torones”, capítulo 3), acero de refuerzo cercano a despacho de combustible o materiales líquidos, gases de corte adyacentes a almacenes de combustible o lubricantes, etc.



Figura 2.1 Planta de prefabricación de dovelas, Stockton, CA, EUA.



1	Oficina Principal	5	Camas de colado	9	Nave de fabricación especial con marco pórtico
2	Taller mecánico	6	Vehículos de transporte	10	Planta dosificadora
3	Patio de habilitado de acero	7	Silos de agregados	11	Almacén de producto terminado
4	Almacén	8	Nave de fabricación		

Figura 2.2 Complejo de prefabricación de elementos de concreto, Fort Worth, TX, EUA.

2.2.1.2 Cimbras y su almacenamiento

Cabe distinguir que una buena parte del éxito en un proyecto a base de prefabricados está directamente relacionado con: 1) la cimbra o moldes, 2) el sistema con el que se resisten los esfuerzos previos a que los tome el concreto endurecido y 3) la mesa de colado. Estos componentes suelen confundirse entre sí, pero un buen prefabricador debe de identificar claramente cada uno de ellos, sus posibles interacciones estructurales, funciones y relaciones entre sí (figura 2.3).

Especialmente cuando existe un proyecto que requiere presfuerzo, se tendrá que hacer una revisión detallada de los componentes arriba enunciados.

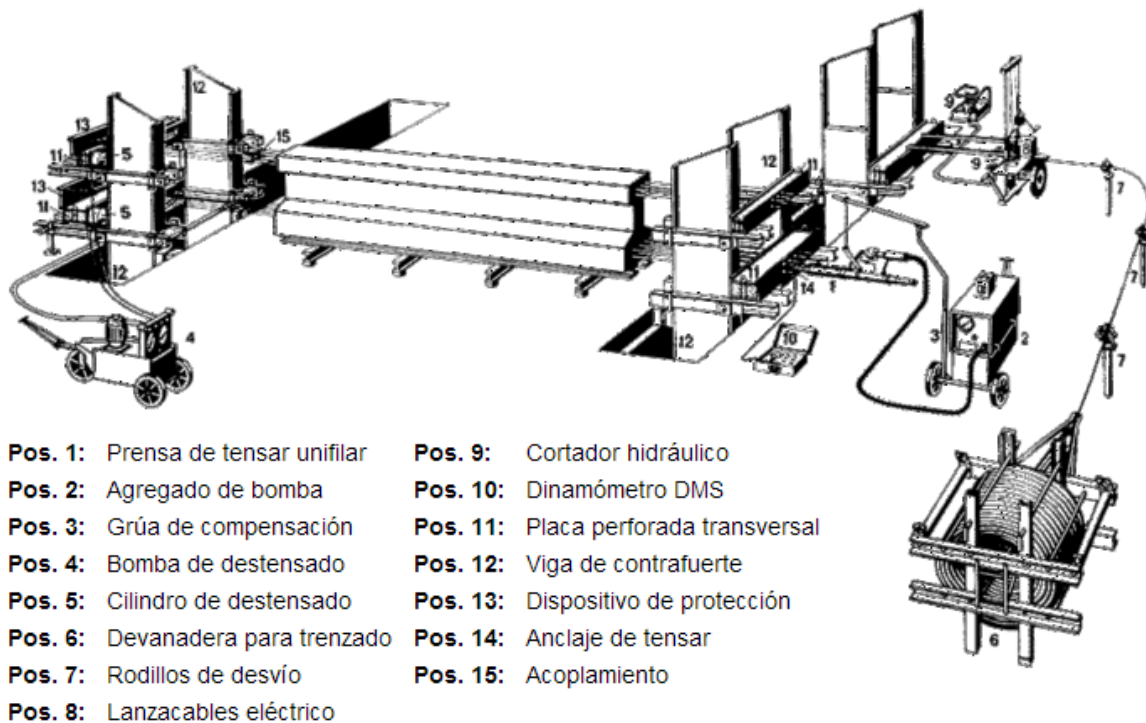


Figura 2.3 Esquema de una instalación para pretensado, PAUL Maschinenfabrik GmbH & Co. KG.

2.2.1.2.1 Moldes

Los moldes o cimbras tienen la función de contener el concreto fresco de tal manera que soporte los esfuerzos producidos sin deformaciones significativas y con una durabilidad y diseño tal que resulte viable económicamente su uso (figura 2.4). Cabe recalcar que los empujes más significativos para el diseño estructural de una cimbra son los producidos en la etapa en la que el concreto está siendo vibrado y serán críticos donde la altura del concreto sea mayor. Existen manuales y publicaciones especializadas en diseño de cimbras; debido a que es un tema extenso y especializado no lo trataremos a detalle en este trabajo, pero resulta importante que el lector interesado considere su estudio por separado. Los distintos materiales con los que se puede fabricar un molde varían ampliamente pero su selección estará en función de factores tales como: número de usos, acabados, costo, disponibilidad, tiempo de fabricación, etc.

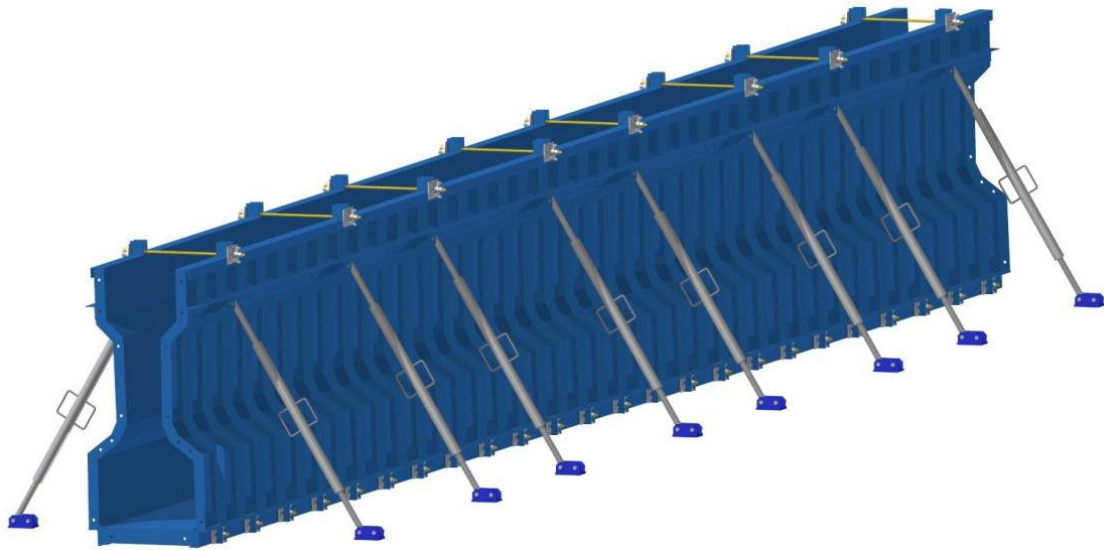


Figura 2.4 Molde o cimbra para trabe tipo AASTHO

2.2.1.2.2 Sistema para resistir esfuerzos

En el sistema de prefabricación pretensada, como se vio con anterioridad, se requiere de un sistema que reciba y soporte el esfuerzo de los tendones temporalmente mientras el concreto no ha endurecido lo suficiente para tomarlos él mismo (aplicar la transferencia de esfuerzos). Existen sistemas de cimbras que tienen la capacidad de tomar ellos mismos el esfuerzo inducido a los tendones, por lo que se les llama sistema de molde autotensable (self-stressing forms) y pueden ser de acero (figura 2.5), concreto o una combinación de estos materiales. Cabe señalar que existen sistemas, en especial fijos, que no tienen una interacción directa con los moldes y pueden variar en sus diseños y formas. Todos estos sistemas autotensables o no, requieren de un diseño estructural detallado en donde se especifica la capacidad máxima, la excentricidad máxima y otros factores que podrán resistirse con seguridad. Algunas dependencias oficiales en los Estados Unidos de Norteamérica exigen que el diseño sea revisado por un ingeniero calificado en estructuras. La razón de exigir que este tema sea cuidadosamente analizado y revisado es que cualquier falla en el diseño y utilización del sistema para resistir esfuerzos puede resultar en una falla frágil; en la que se verá implicada una gran cantidad de esfuerzo que será disipada de manera súbita (en un tiempo corto), por lo que representa un riesgo verdaderamente alto para las instalaciones, equipo y personal circundante.



Figura 2.5 Molde autotensable para viga “T” invertida

2.2.1.2.3 Mesa de colado

Existen diversos significados para este importante componente de una planta de prefabricados, pero en particular para fines de nuestro trabajo, lo consideraremos como la superficie horizontal en la cual se apoyará el molde o los moldes y el sistema para resistir esfuerzos, es decir, transmitirá los esfuerzos al suelo, incrementará la rigidez y además servirá de lastre o peso adicional cuando así se requiera para permitir el adecuado desmolde en caso de que el peso del molde no sea suficiente. La longitud de las mesas puede variar hasta 150 m, se podrán alojar en ellas varios moldes simultáneamente y dependerá de las condiciones, cantidades y tiempos de producción (figura 2.6). Será importante revisar el costo de estas mesas sobre todo si las plantas de prefabricados donde se utiliza son móviles, ya que pudiera considerarse la opción de prefabricarlas y poder amortizarlas en diferentes obras en vez de colarlas y abandonarlas o demolerlas posteriormente.

Las cimbras (moldes) y los sistemas para resistir esfuerzos o de autotensado o, así como cualquier otro elemento que sirva para moldear el concreto fresco y que se ocupe en el proceso de prefabricación y presfuerzo, deben ser almacenados de tal forma que se evite su daño estructural, imperfecciones en su superficie, deformaciones y cambios en su geometría. Específicamente si contemplamos que un solo molde puede ser usado, decenas e incluso centenas de veces, caemos en la cuenta que cualquier imperfección en el molde será reproducida indudablemente las mismas veces que sea utilizado en las piezas producidas en él, de ahí la importancia de su cuidado. Adicionalmente, si consideramos su costo, tiempos de fabricación y que forman parte de los activos de la empresa es importante que los moldes, los sistemas para resistir esfuerzos y las mesas de colado sean consideradas

una inversión por parte los responsables y/o usuarios y se ponga la debida atención a su cuidado y mantenimiento.

En el diseño de la plantas es importante considerar el espacio necesario para abatir los moldes, si así están diseñados; o para colocar temporalmente las cimbras después del desmolde de una pieza y antes del cimbrado, con el mismo molde, de la siguiente pieza a colar.



Figura 2.6 Mesa de colado permanente

2.2.1.3 Desmoldantes y otros agentes químicos

Los desmoldantes o productos cuya función sea la de impedir la adherencia del concreto a las cimbras, así como otros productos químicos deben ser almacenados en contenedores aprobados y en áreas designadas específicamente para tal fin. Dichos espacios deben de estar acordes a todas las recomendaciones del fabricante considerando temperatura, protección contra fuego y riesgos ambientales entre otros. Los productos deben ser fácilmente identificables por las etiquetas del fabricante y deberán de cumplir con la normatividad relativa a la identificación de productos peligrosos en los centros de trabajo establecida en la NOM-018-STPS, *“Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo”*. (D.O.F. 27-X-2000) vigente.

2.2.1.4 Accesorios metálicos, electrodos y su almacenamiento

El acero debe ser almacenado en áreas designadas y mantenerse libres de contaminación debido al ambiente, grasa, aceite, o daños provocados por manejo inadecuado. Los manuales del PCI, tal como el “Quality Control Technician / Inspector Level I & II Training Manual TM – 101”, indican que el acero de refuerzo debe ser marcado para su correcta identificación (figura 2.7). El acero inoxidable debe de protegerse o aislarse de tal forma que no entre en contacto con otros tipos de metal durante su fabricación y su almacenaje.



Figura 2.7 Etiqueta de identificación del acero de refuerzo

Los electrodos con bajo contenido de hidrogeno deben ser almacenados en contenedores herméticos para evitar su contaminación hasta su primer uso. No deben de ser golpeados, doblados o maltratados porque esto causara la remoción de su recubrimiento y en consecuencia su inutilidad. Los

electrodos almacenados en contenedores sellados pueden almacenarse indefinidamente. Pero una vez abiertos, estos electrodos deben almacenarse en hornos a las temperaturas recomendadas por los estándares (AWS 5.3.2.2) del American Welding Society (AWS) para prevenir la absorción de humedad proveniente del medio ambiente por parte del material fundente. La humedad afecta adversamente la habilidad del fundente para estabilizar el arco, desplazar aire, y aislar metal caliente soldado, en otras palabras reduce la calidad de la soldadura. Los electrodos que se han mojado o humedecido deben de ser desechados.

De acuerdo al PCI, TM 101, todos los accesorios soldados deben ser identificados de acuerdo a marcas preestablecidas usadas en los planos de accesorios metálicos.

2.2.1.5 Circulación y espacio para equipo móvil

Es de mucha importancia la disposición de espacios para la ubicación de: grúas, marcos pórticos, equipos de izaje; transportes diversos tales como camas bajas, modulares, tractocamiones, etc. Estos equipos previamente seleccionados para realizar las maniobras de colocación de armados de acero de refuerzo, desmolde, apertura de cimbras, carga de elementos al transporte, entre otros, deben considerarse operando simultáneamente con la circulación de otros equipos tales como retroexcavadoras, camiones mezcladores, tractocamiones, autotanques, servicios de emergencia, etc.

Puede darse el caso de que muchas de estas actividades se desarrollen al mismo tiempo, si el ciclo de producción así lo demanda, y que, la disponibilidad de grúas y su costo obliguen a tener radios cortos de trabajo u otras limitantes; pudiera darse que calles (o vialidades) entre mesas de trabajo para elementos pequeños (p.e. muros de 7.5 m x 2.5 m) pueden llegar a ser de por lo menos 12 m de ancho.

Por otro lado, podemos referir que siempre será mejor tener la menor dependencia de equipo posible con el fin de reducir costos y tiempos de producción; siguiendo esta teoría, debemos en la medida de lo técnicamente viable, planear la colocación de las cimbras de manera tal que, la colocación del concreto sea a tiro directo en lugar de bombeado, esto tiene la ventaja adicional de permitir un revenimiento menor en el concreto por lo que implica menor costo también.

2.2.1.6 Almacenamiento de la producción

Desgraciadamente en la prefabricación uno de los problemas frecuentes a los que se enfrenta un responsable de planta es la disponibilidad de espacio para almacenamiento debido a una sobreproducción, a un desfase producción – montaje, a donde la producción rebase la velocidad con que se monta o a la conveniencia de almacenar una sobreproducción para reducir la cantidad de moldes con una producción muy anticipada al inicio del montaje. Esto trae como consecuencia que los

elementos tengan que permanecer durante más tiempo del planeado en la planta, por lo que es preferible contar con área de reserva además de contar con suficientes apoyos (durmientes o polines generalmente) para permitir la estiba de los elementos prefabricados a alturas seguras que se revisarán más adelante.

2.2.2 Instalaciones de curado

Como se verá más adelante, el proceso de curado es uno de los más importantes en el trabajo con concreto para permitir que se den las condiciones de humedad y temperatura que permitirán que se alcance la resistencia, principalmente en los primeros días u horas posteriores a la colocación del concreto. Es posible que, por las características del diseño de la mezcla, las condiciones climáticas y por las necesidades de producción, se requiera la instalación de equipos de curado tales como calderas de vapor, tanques de almacenamiento de agua, tanques de almacenamiento de combustible, tubería para su suministro, etc.

La aplicación de vapor pudiera ser opcional en algunos casos, pero siempre serán indispensables componentes con los que se permita mantener la humedad en el concreto, lo más común y que ha dado buenos resultados en campo son las lonas térmicas. Siempre debe considerarse que el uso de éstas no debe dañar la textura y los acabados del concreto, por lo que también puede ser necesario el uso de estructuras provisionales para mantener una separación entre ellos. También es importante disponer con agua suficiente en todo momento, cerca de los elementos recién colados, porque con las relaciones bajas de agua/cemento que ahora se manejan, puede ser necesario proporcionar humedad adicional al ambiente o cámara circundante al elemento para aportar y reponer la humedad que se pierda. Es importante asegurarse que nunca exista una demanda mayor de agua por parte del concreto de la existente en el ambiente y en la mezcla, ya que esto desencadenará problemas tales como: agrietamiento por contracción plástica, cambios de coloración, entre otros.

Una buena práctica donde existen temperaturas ambientales altas y humedad relativa baja, es humedecer e incluso saturar el terreno, concreto, etc., cercano a la cimbra o mesa que queda cubierto con las lonas de tal manera que aporte humedad cuando se esté llevando a cabo el fraguado, la temperatura será aportada por el calentamiento de la lona y por la reacción exotérmica del cemento con el agua de la mezcla. Es importante señalar que siempre deben de hacerse las pruebas y las evaluaciones respectivas para determinar si un método de curado es adecuado o no, además de considerar las condiciones climáticas en determinado momento y de cómo afectarán el proceso si éstas llegaran a cambiar significativamente.

2.3 Selección de cimbras

Para cada proyecto se deberá realizar un análisis detallado de las diferentes opciones disponibles en el mercado, así como de solicitudes propias del mismo proyecto como: acabados, tiempos de entrega, métodos de curado, operación y facilidad de uso (figura 2.8), entre otras. Se ha preferido el uso de cimbras de metal, debido al acabado que proporcionan, al número de usos que puede darse, a la capacidad de resistir esfuerzos durante el colado y a la facilidad del desmolde.

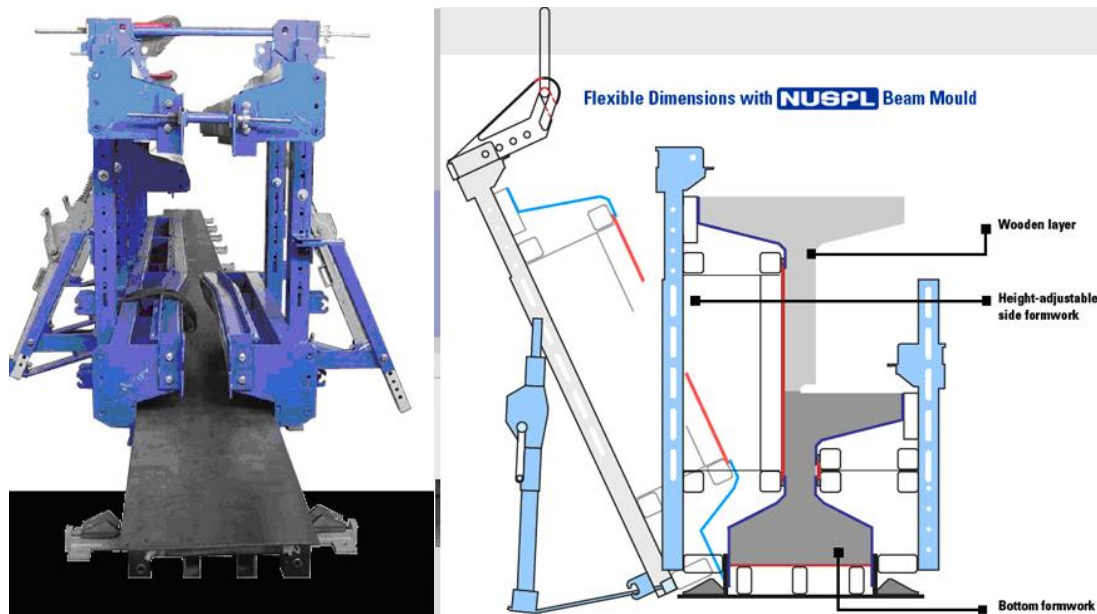


Figura 2.8 Molde abatible-ajustable para diversos elementos largos; Nuspl Schalungsbau GmbH + Co. KG, Alemania

Merece especial atención el hecho de que el molde o sistema de cimbra pueda anclarse o fijarse a las mesas, al suelo, o tener el peso propio tal que; en la maniobra de desmolde la cimbra permanezca en su posición. Es decir, que la adherencia, succión y/o fricción que se genera entre la superficie del molde en contacto con la superficie de concreto no provoque que la cimbra se deforme, se mueva o incluso colapse debido a las fuerzas de extracción (actuando en sentido opuesto a las de succión y/o fricción) que pueden ser muy altas. Según el “Código Aprobado de Práctica para la Manipulación, Transporte y Montaje Seguro de Concreto Prefabricado⁴”, editado por el Departamento del Trabajo de Nueva Zelanda establece el valor anterior en el rango del 10 al 50% del peso del elemento. Este efecto de “succión” estará en función del área de contacto cimbra-concreto, de la geometría del elemento

⁴ www.business.govt.nz/worksafe/information-guidance/all-guidance-items/acop-pre-cast-concrete/concrete-ac.pdf

prefabricado, de los cambios de dimensión debido a la transferencia del presfuerzo (en casos especiales), de la presencia de humedad libre y de la calidad del agente desmoldante utilizado.

El uso de madera como material para cimbra estará restringido debido a que el número de usos que puede darse es bastante limitado comparado con el metal, además de que no es conveniente usarse cuando se utilice curado con vapor porque las deformaciones que experimenta la madera por la presencia de humedad podrían ser perjudiciales al concreto.

De especial importancia son los acabados que deberá de tener el elemento prefabricado una vez terminado, la apariencia de las superficies deben considerarse cuando se hace la elección de una cimbra tomando en cuenta las juntas, las uniones, el método de ensamble, la resistencia al desgaste, entre otros. Usualmente, una cimbra que proporcione mejores superficies de acabado tendrá un costo mayor que aquellas donde se tengan ensambles y juntas, pero debe evaluarse cuidadosamente el tiempo y costo de reparar y resanar estos detalles y entonces determinar la opción más conveniente.

Una consideración importante en la selección de cimbras es que en la mayoría de los casos, donde se cuelen elementos de forma horizontal cuya posición final sea vertical; p.e. columnas cuadradas y muros; se considerará la mejor cara en cuestión de acabado a aquella que haya quedado en contacto con el fondo de la mesa o con la cara horizontal de la cimbra, lo ideal sería que no se distinga tal situación.

2.4 Identificación de elementos prefabricados

El Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08), Capítulo 16, apartado 16.8, “*Marcas de Identificación*”, punto 16.8.1; establece: “Todo elemento prefabricado debe ser marcado para indicar su ubicación y orientación en la estructura y su fecha de fabricación”. Atendiendo esta regla, cualquier elemento prefabricado que cuente con su marca de identificación, estará en condiciones de poder ser identificado en cualquier momento por cualquier persona interesada y sin necesidad de la intervención del área de producción. Es importante señalar que por principio de orden el elemento debe permanecer identificado desde el armado y dicha marca de identificación debe ser permanente, indeleble y clara en una posición tal que no afecte la estética del propio elemento, y que incluso una vez montado pueda ser leída.

La experiencia ha demostrado que la lluvia, el almacenamiento prolongado, el vandalismo, entre otras causas, pueden conllevar al extravío, confusión o errores de importancia mayor cuando dicha identificación se hace de forma provisional, p.e. papel impreso adherido; sobre todo en grandes proyectos donde muchas piezas puede ser similares exteriormente y solo tener diferencias en cantidades de acero de refuerzo, presfuerzo o ambas y que difícilmente son reconocidas a simple vista.

Está es una práctica simple cuya omisión o mala ejecución resulta en problemas severos y hasta graves, generalmente delegada a los niveles de responsabilidad inferior, pero que debe ser revisada y verificada por los más altos niveles de decisión en una planta de prefabricados.

2.5 Manejo de elementos prefabricados de concreto

Cualquier manejo inadecuado de elementos prefabricados, donde las solicitudes estructurales sean distintas a aquellas a las que fue diseñado el elemento prefabricado, pudieran llevar desde el desarrollo de fisuras hasta la falla del mismo en casos extremos. Este riesgo se incrementa potencialmente cuando además interviene el presfuerzo. El manejo y el transporte se pueden agrupar en cuatro etapas bien definidas:

- Manejo en la mesa de colado hasta el almacenamiento temporal,
- Manejo del almacenamiento temporal hasta el transporte,
- Transporte por cualquier vía hasta el destino u obra,
- Manejo desde el transporte hasta un lugar temporal de almacenamiento o su posición final definitiva.

Los primeros dos puntos quedan comprendidos en los alcances del presente capítulo, mientras que los dos últimos estarán incluidos en el capítulo 9 de manera introductoria.

2.6 Acabados

Los requerimientos o solicitudes de acabado deben ser claramente establecidos sobre los planos del proyecto para cada producto. Es una práctica común suponer los acabados en los elementos prefabricados estructurales como aparente liso que da la cimbra metálica. Es fundamental, en cuestión de tiempos y costos, que estos requerimientos estén perfectamente definidos incluso antes de que se haga la selección de la cimbra, ya que influirán de manera importante para la elección en particular de moldes y sus uniones. Todo profesional del concreto debe estar familiarizado con los distintos tipos de acabado.

En el caso de paneles arquitectónicos, donde el acabado adquiere una importancia especial, deben de elaborarse, en las mismas condiciones de planta y con los mismos materiales a utilizarse, ejemplos o muestras (conocidas en inglés como: mock-ups) para que sirvan como material de evaluación y comparación en toda la etapa de producción.

Las superficies de agregados marcadamente segregados, acabados no uniformes, color inconsistente, sombreado por refuerzo (radiografiado) y acero u otro material extraño expuesto son generalmente inaceptables y se consideran resultado de un trabajo muy deficiente.

Es importante adicionar que la selección de los apoyos para el acero (silletas o pollos) que serán utilizados en muros, columnas, o aquellos elementos que al ser colados presentarán caras o superficies visibles al ser montadas, deben ser cuidadosamente seleccionados y consultar al fabricante para disponer de la mejor opción posible.

En ocasiones, el concreto que se utiliza para fabricar un elemento estructural o arquitectónico debe quedar como acabado final. Si no es así, el concreto servirá de base para ser recubierto con algún otro acabado, pero deberá considerarse, para cualquier caso, que actividad o paso seguirá en el proceso constructivo para evitar complicaciones posteriores.

Un ejemplo de lo anterior, es que si la superficie recibirá algún acabado (que es poco común pero posible) tal como loseta cerámica, azulejo, etc., **es importante considerar curar el concreto con un método tal que no deje residuos que pudieran impedir la adherencia de la pasta que servirá como unión entre concreto – acabado.**

2.6.1 Acabado escobillado

Este tipo de acabado se especifica principalmente para elementos horizontales y de gran superficie (firmes, losas y pisos de concreto). Produce una textura rugosa y antiderrapante cuya ejecución es sencilla y práctica y se aplica de manera integral al concreto, por lo que puede ser una especificación de acabado final del concreto. El escobillado sirve también como base para asentar algún acabado de tipo cerámico.

Recomendaciones

- Se debe realizar cuando la superficie del concreto está semiendurecida y terminarse deslizando una plana de madera.
- Una vez que la superficie tenga uniformidad, la textura gruesa del acabado escobillado se proporciona por medio de cepillos de cerdas rígidas sobre la superficie del concreto aún no endurecido. La calidad de la textura media a fina se logra con cepillo de cerdas blandas.
- Para tener un acabado uniforme y adecuado, el cepillo debe enjuagarse en agua después de cada aplicación y retirar el exceso de agua del mismo. El concreto hidráulico es una mezcla de agregados pétreos naturales, procesados o artificiales, cementante y agua, a la que además se le puede agregar algunos aditivos. Generalmente, esta mezcla es dosificada en unidades de masa en plantas de concreto premezclado y, en masa y/o en volumen en las obras. Los aditivos se dosifican en volumen o en masa según su presentación: en polvo, en masa y líquidos en volumen.
- La aplicación de este procedimiento para dar acabado final al concreto no modifica el proceso del curado posterior; este deberá realizarse de manera cuidadosa a fin de no dañar el diseño, uniformidad y calidad del acabado.
- Es aceptable utilizar una escoba para este efecto.
- Los diseños del escobillado pueden ser líneas rectas, curvas u onduladas.

Alcances y criterios de medición y cuantificación

- Se mide en unidad de superficie, convencionalmente en metros cuadrados (m²).
- De manera práctica y para fines de presupuestación y análisis de costos, el acabado integral en un elemento de concreto se considera como un sobreprecio o sobreactividad que se valora por separado.

2.6.2 Acabado liso con plana de madera

Este acabado produce una textura semirugosa y antiderrapante que no tiene ningún diseño final. Se especifica cuando el concreto servirá de base para la aplicación de otro acabado que requiere, por necesidad de adherencia, una superficie de este tipo.

Recomendaciones

- La superficie de concreto semiendurecido debe terminarse mediante el deslizamiento de una plana de madera.
- No se requiere de otro tipo de acabado integral para la superficie del concreto.
- La aplicación de este procedimiento no modifica el proceso del curado posterior del elemento.

Alcances y criterios de medición y cuantificación

El acabado liso es parte integral del colado del concreto, por lo que generalmente se especifica en el mismo proceso o en los conceptos relativos al vaciado del concreto en el elemento (firme, losa, piso, etc.). Debido a esto no se presentan especificaciones detalladas ni grupos de trabajo para la realización de esta actividad.

2.6.3 Acabado pulido fino integral

La superficie que se logra al aplicar este tipo de acabado en el concreto es más lisa y menos porosa que las anteriores. Es muy utilizada en elementos tales como la cara superior de muros colados en forma horizontal o en una variación del proceso de prefabricado denominada en inglés: *tilt-up*.

Se especifica también para concretos que requieren una base para aplicar otros acabados como: aplicación de productos líquidos (pinturas, epóxicos), loseta vinílica, parquet, linóleums, etc.

Recomendaciones

- Una vez que el concreto esté debidamente colocado, compactado y nivelado, para poder proceder a dar el acabado pulido, es indispensable permitir que el concreto haya terminado de sangrar lo cual se detecta en el momento en que la superficie pierde el brillo original tornándose mate. En ese momento se debe iniciar el acabado mediante herramientas de madera o de magnesio en su etapa inicial. La llana metálica debe deslizarse sobre la superficie hasta obtener un acabado, liso y libre de porosidades.
- No debe aplicarse polvo de cemento para elevar la cantidad de finos sobre la superficie del elemento pues propicia la formación de una capa delgada que una vez endurecida se desprenderá con facilidad del resto.

- La aplicación de este procedimiento no modifica el proceso del curado posterior del elemento; este deberá realizarse de manera cuidadosa a fin de no dañar la textura, uniformidad y calidad del acabado.

Alcances y criterios de medición y cuantificación

- Se mide en unidad de superficie, convencionalmente, en metros cuadrados (m^2).
- De manera práctica y para fines de presupuestación y análisis de costos, el acabado integral en un elemento de concreto se considera como un sobreprecio o sobreactividad que se valora por separado.

2.6.4 Acabado martelinado

Es un acabado que se proporciona al concreto, ya sea de un elemento vertical u horizontal. Su textura es más rugosa que la de los acabados pulido y escobillado. El acabado martelinado no se considera un acabado integral, sino un acabado provocado una vez que el concreto ha endurecido lo suficiente para no deformarse y/o dañarse durante el proceso y que aún no ha endurecido tanto como para requerir mayor esfuerzo en su ejecución ni para ser susceptible de provocar fisuras.

Con este acabado se dejan expuestos los agregados pétreos de la mezcla del concreto.

Recomendaciones

- Debe usarse la herramienta adecuada para lograr el acabado, es decir la martelina con la cual se golpea cuidadosa y uniformemente el concreto a fin de remover la película superficial de mortero.
- El martelinado no debe ser tan excesivo que disminuya el espesor del recubrimiento especificado para el concreto. De ser necesario se debe especificar un recubrimiento mayor.
- Este proceso debe hacerse una vez que el período de curado haya concluido, o que el concreto adquiera al menos el 20% de la resistencia esperada.

Alcances y criterios de medición y cuantificación

Se mide en unidad de superficie, convencionalmente, en metros cuadrados (m^2).

2.6.5 Acabado con agregado expuesto

Este tipo de acabado se especifica para elementos horizontales y de gran superficie (firmes, losas y pisos de concreto) y puede utilizarse también para acabados arquitectónicos de muros prefabricados principalmente. Produce una textura rugosa y antiderrapante cuya ejecución es poco compleja y requiere pruebas previas y personal con cierta práctica, se aplica de manera integral al concreto, por lo que puede ser una especificación de acabado final del concreto arquitectónico. El agregado expuesto puede ser de distintos materiales que proporcionen textura y color muy distintos a una mezcla convencional de concreto, ya que pueden incluir grava de mármol, piedras graduadas de río, etc. Además se utiliza generalmente cemento blanco en la capa expuesta y tiende a ser de un costo significativamente mayor al concreto normal.

Recomendaciones

- Se deben realizar pruebas y diseños de mezclas previos, y se deben de fijar los criterios de aceptación/rechazo con el cliente o su representante antes de comenzar con los trabajos definitivos.
- Por cuestiones de economía se usan generalmente dos capas en la formación del elemento, la primera capa no visible es de un concreto “normal” y la segunda que presentará el acabado es de menor espesor cuya cara externa será la que reciba el tratamiento.
- Siempre debe preverse que el volumen total del agregado expuesto sea garantizado y almacenado previamente para evitar cambios significativos por diferencias en las características de las vetas del banco y su disponibilidad, para que de esta manera se asegure uniformidad en la textura y color.
- Se debe realizar cuando la superficie del concreto está semiendurecida y ocupando siempre la misma técnica que se utilizó en la realización de pruebas.
- Una vez que la superficie presente cierto fraguado, la textura expuesta del agregado se logra por medio de un lavado o retiro de la pasta de mortero que rodea hasta cierta profundidad las partículas gruesas y exponiéndolo. El lavado en la actualidad se puede lograr con más uniformidad utilizando hidrolavadoras con las boquillas adecuadas.
- Generalmente, esta mezcla es dosificada en unidades de masa en plantas de concreto premezclado y, en masa y/o en volumen en las obras.
- La aplicación de este procedimiento para dar acabado final al concreto no modifica el proceso del curado posterior; este deberá realizarse de manera cuidadosa a fin de no dañar el diseño, uniformidad y calidad del acabado.

Alcances y criterios de medición y cuantificación

- Se mide en unidad de superficie, convencionalmente en metros cuadrados (m^2) pero considerando las diferentes capas de que está formado el elemento.
- De manera práctica y para fines de presupuestación y análisis de costos, el acabado integral en un elemento de concreto se considera como un sobreprecio o sobreactividad que se valora por separado.

2.6.6 Acabado aparente producido por el molde (acabado directo)

Este acabado se refiere al acabado en la superficie que se adquiere por el concreto directamente de la superficie y/o cimbra utilizada. Típicamente ningún tratamiento adicional es requerido excepto que un ligero rebabeo o un pulido ligero con chorro de arena para recibir algún recubrimiento posterior si se especifica.

Tanto el área de producción como la supervisión deben estar pendientes de la mayoría de los detalles visuales potencialmente objetables y sancionables que pueden aparecer en este tipo de acabado:

- Líneas de unión entre cimbras
- Variaciones ligeras de color
- Veteo en la superficie
- Burbujas de aire
- Fisuramiento menor de la superficie

Las burbujas de aire o vacíos en el concreto son muy comunes en superficies que se cuelean verticalmente. La muestra aprobada debe exhibir el tamaño esperado, cantidad y uniformidad de la distribución de estos vacíos. De esto se deriva y se especifica el material y el procedimiento de reparación aprobado también.

2.6.7 Acabado aparente no producido por el molde

Este tipo de acabado en la superficie requiere del auxilio de una herramienta o un equipo de acabado tales como reglas, flotas, llanas, escobas, rastrillos o puntas, posterior a la consolidación del concreto. Es muy importante que ningún acabado sea realizado con agua de sangrado presente en la superficie, ya que esto alterara la relación a/mc (agua/material cementante) por el remezclado producido en la operación de acabado. El PCI y el ACI establecen que bajo ninguna circunstancia el agua de sangrado debe ser absorbida por la adición de alguna sustancia, cemento o una mezcla de arena y cemento. La razón de esta restricción es que debido a las distintas relaciones a/mc (ver apartado 5.3) sobre la superficie y debido a que el proceso de acabado no es suficiente por sí mismo como un proceso para incorporar los materiales adicionales al concreto original; pasado algún tiempo se comenzará a desprender una delgada capa que se haya formado con la adición de los materiales extras, resultando en una superficie defectuosa, irregular, con durabilidad reducida y además abriendo la posibilidad de reclamación por parte del cliente.

El hecho de sobre-trabajar el concreto provocará que los finos y el agua lleguen a la superficie, produciendo efectos indeseables tales como:

- Fisuras aleatorias capilares (cheeking)
- Fisuras capilares originadas en un punto (crazing)
- Película delgada de polvo sobre la superficie (dusting)
- Descoloramiento (decoloring)
- Desescamamiento (spalling)

Donde se planeé tener un segundo colado, debe de retirarse todo residuo suelto o polvo producido por el mismo concreto cuando tiene sangrado, preparando adecuadamente la superficie para garantizar una unión aceptable entre concretos de distintas edades.

2.6.8 Acabado arquitectónico

Este tipo de acabado requiere de personal calificado y entrenado, además de las pruebas y tiempo necesario para preparar un buen trabajo:

- Martelinado

- Lavado con chorro de arena
- Agregado expuesto
- Tratamiento con ácido
- Estampado
- Pulido

Algunos de estos puntos ya se trataron en los apartados anteriores, otros son técnicas especializadas que utilizan equipo y materiales que no están en el alcance de este trabajo. Las pruebas de color y textura a las que se hace referencia cuando se trabaja concreto arquitectónico, deben de ser completamente representativas de la producción en serie, es decir, deben de producirse bajo las mismas condiciones de diseño de mezcla, geometría, mano de obra, materiales, equipo, procedimientos de curado, etc. para que sean presentadas al cliente o su representante para su aprobación. Las condiciones de revisión e iluminación deben de consistir en una inspección visual a una distancia pre-establecida, generalmente no menor a 6 m, y una iluminación similar a la del proyecto terminado. Las muestras una vez aprobadas deben permanecer en el área de trabajo para servir como futuras referencias y comparaciones tanto por parte del personal de producción como por parte de la supervisión y representantes del cliente.

2.7 Reparaciones

Como se ha mencionado anteriormente, cuando se acepten las muestras de distintos acabados, es muy conveniente identificar las posibles desviaciones con sus magnitudes que ameriten ser reparadas así como los productos y procedimientos a seguir en el caso de que se presenten. Esto además de presentar un panorama real de trabajo, disminuye tiempo en caso de que se presentara una eventualidad, ya que se tendrían avanzadas las posibles soluciones y unificados los criterios de los involucrados.

Es de particular importancia mencionar que el proceso de “detallado de la pieza” debe representar una cantidad mínima de retrabajos, ya que usualmente, cualquier sobre costo que se presente en esta etapa del proceso del prefabricado incidirá negativamente sobre los resultados económicos del proyecto. Siempre que se presente el caso de acabados aparentes producidos por el molde, será importante el revisar minuciosamente el costo real de “detallar” la pieza contra el uso de una mejor cimbra que permita un mejor acabado, mejores uniones/juntas, superficies más uniformes y permita realizar adecuaciones para así tomar una decisión más informada basada en cuestiones económicas.

2.7.1 Definición

La reparación de concreto debe de hacerse siguiendo prácticas probadas que han garantizado el buen desempeño estético y aún más importante el desempeño estructural.

Las publicaciones de los Comités de ACI 201, 303, 364, 506 y 546, el International Concrete Repair Institute (ICRI) y el US Bureau of Reclamation⁵ son excelentes fuentes de información sobre reparaciones del concreto.

2.7.2 Sistema de reparación de concreto por el US Bureau of Reclamation

1. Determiné las causas del daño
2. Evalúe la extensión del daño
3. Evalúe la necesidad de reparación
4. Seleccione el método de reparación
5. Prepáre el concreto viejo para la reparación
6. Aplique el método de reparación
7. Cúre la reparación apropiadamente

2.7.2.1 Causas de Daño al Concreto

Entre las causas más importantes que causan daños al concreto se encuentran las siguientes:

A. Exceso de agua en la mezcla de concreto.- Es la causa más común de daño al concreto, ya que reduce la resistencia, incrementa la contracción por secado, incrementa la porosidad, incrementa la contracción por flujo plástico y reduce la resistencia por abrasión. Es difícil de diagnosticar debido a que se enmascara por otro tipo de daños como congelamiento, deshielo, deterioro por erosión, etc.

La única reparación permanente del concreto dañado por exceso de agua en la mezcla es demolerlo y reemplazarlo. Sin embargo, cuando el daño es detectado a tiempo (menor a 1.5" de profundidad) un buen número de reparaciones y métodos pueden ser útiles para prolongar la vida útil del concreto. Tales métodos pueden ser la aplicación de compuestos de sellado con alto contenido de sólidos (> 15%) tales como los sistemas de silano o el sistema monomérico metacrílico de alto peso molecular; que tienen que ser re-aplicados cada 5 – 10 años. El uso de adhesivos epóxicos puede ser utilizado para concreto dañado entre 1.5" y 6", mientras que la demolición y reemplazo se recomienda en profundidades dañadas mayores a 6".

B. Diseño fallido.- El diseño erróneo puede desencadenar muchos tipos de daño al concreto. Unos de los ejemplos más comunes de mal diseño es ahogar conductores eléctricos o cajas eléctricas demasiado cercanas al exterior de las superficies de las estructuras de concreto causando agrietamiento y corrosión. Otro ejemplo de mal diseño es proveer de juntas de contracción o de proveer de juntas de expansión muy estrechas para permitir las expansiones por temperatura en losas de concreto.

La forma de reparar estas fallas por diseño son a base de recolocar concreto, usar productos epóxicos en concretos o morteros. En caso de que no existan suficientes juntas, se podrán hacer más anchas o tendrán que cortarse para incrementar el número de juntas y por lo tanto de espacio para alojar las expansiones de las losas.

⁵ http://www.usbr.gov/pmts/materials_lab/repairs/guide.pdf

C. Defectos de construcción.- Algunos de los daños más comunes causados por defectos de construcción son bolsas de arena, apanalamiento, falla de cimbras, errores en dimensiones y defectos de acabado.

Los mejores métodos de reparación son a base de aplicación de morteros, concretos epóxicos o el reemplazo total. Si un error de dimensiones se detecta es mejor negociarlo con el propietario y en caso de no ser aceptado, debe de removerse y reconstruirse. En caso de acabados inaceptables la reparación con morteros epóxicos es lo más recomendable.

D. Deterioro por sulfatos.

E. Reacción álcali –sílice.

F. Deterioro por ciclos de congelamiento – deshielo.

G. Daño por abrasión – erosión.

H. Daños con cavitación.

I. Corrosión del acero de refuerzo.

J. Exposición a ácidos.

K. Agrietamiento.

L. Sobrecarga estructural.

M. Otras causas.

Es importante cuando se realiza una reparación, que el concreto normal tiende a presentar una reducción pequeña de volumen, producto de la contracción por secado (shrinkage), de la cual ya se habló en el capítulo 1. Esta disminución de volumen se acentuará entre más avance el tiempo después del colado y es por esto que siempre es más conveniente iniciar una reparación lo más antes posible para que las diferencias de cambios de volúmenes entre el concreto inicial y el de la reparación no presenten diferencias significativas.

Otra razón para iniciar la reparación tan antes sea posible es la decoloración que se sufre con el secado, por lo que se deben procurar utilizar los mismos materiales de origen para evitar cambios en tonos.

Una buena práctica es adicionar un aditivo estabilizador de volumen, cementos de contracción compensada y cemento blanco a las mezclas de reparación pero se requieren de pruebas y procedimientos bien diseñados.

Las superficies a cubrir o reparar siempre deberán estar limpias, libres de aceite, grasa, material suelto y mantenerse húmedas por varias horas pero sin encharcamientos. Es recomendable humedecer unos 15 cm adicionales alrededor del perímetro del área de resane.

Una reparación siempre será un proceso más complejo, requerirá de mayor supervisión y mano de obra calificada que un trabajo inicial bien ejecutado, y por lo tanto será más costosa también.

Parches superficiales y en capas superpuestas

Los parches normalmente aparecen más oscuros que el concreto circundante, por lo que se debe aplicar una cierta cantidad de cemento blanco al mortero o concreto de reparación cuando la apariencia sea importante. Se debe de curar como cualquier trabajo de concreto y se debe evitar el uso de llanas o herramientas de acabado de metal ya que oscurecen el parche.

El concreto empleado para llenar grandes parches y capas superpuestas delgadas deben de tener una baja relación a/mc (de la cual ya se habló anteriormente), frecuentemente con un contenido mayor o igual de cemento que originalmente tenía el concreto a reparar.

Es usual manejar en reparaciones de 360 a 500 kg por metro cubico de concreto y una relación a/mc de 0.45 o menor. **El tamaño máximo del agregado no debe superar 1/3 del espesor del parche o de la capa superpuesta.**

Es normalmente necesario el uso de métodos abrasivos de limpieza como chorro de arena, chorro de agua, escarificación o pulverizadoras.

En capas superpuestas es necesario aplicar previamente un agente de adherencia con cepillo o escoba que puede ser una lechada, grout, cemento-arena-látex o agente de adherencia con base epóxica. Según al ACI 301 – 05 “Especificaciones para el concreto estructural” en la preparación de la lechada de adherencia se mezcla aproximadamente una parte de cemento y una parte de arena fina con agua suficiente para lograr una consistencia de crema espesa. El grout se debe aplicar inmediatamente antes de la colocación del concreto. **Cuando la capa de adherencia empiece a perder el brillo del agua es el momento de aplicar el mortero o concreto de reparación.** Se acepta como espesor mínimo para la mayoría de los parches y capas superpuestas la cantidad de 20 mm (3/4”).

Todo el concreto con huecos o de mala calidad debe ser retirado para garantizar que la humedad posterior no afecte el parche adyacente, los bordes deben de ser cincelados y formar ángulos rectos (figura 2.9). No se deben permitir bordes biselados. De acuerdo al tamaño del parche se debe usar mortero o concreto para el parchado.

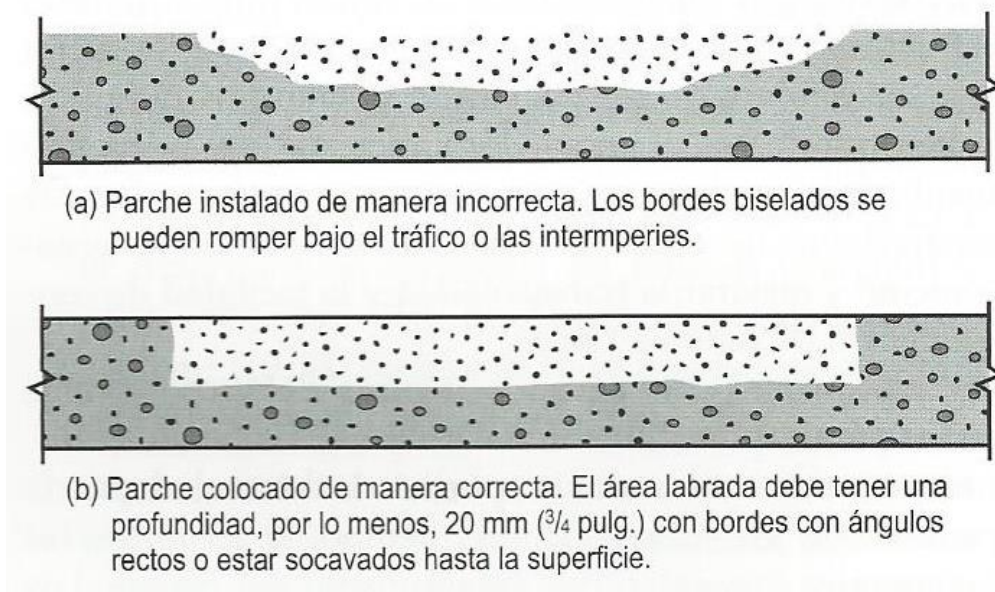


Figura 2.9 Preparación del espacio en el concreto para una reparación adecuada

Agujeros de pernos, ganchos y otras cavidades

Este tipo de cavidad que presenta un área pequeña y una profundidad relativamente grande, se deben llenar con mortero empacado en seco. Se debe de mezclar el mortero con la mayor cohesividad posible:

- 1 parte de cemento
- 2 ½ partes de arena cribada en el tamiz 1.25 mm (no. 16)
y agua suficiente para formar una pelota del mortero.

Parches profundos

Se puede llenar con concreto confinado mediante cimbras si así es necesario (figura 2.11). Estos parches se deben de reforzar y anclar con el concreto endurecido (USBR Concrete Manual 1981). Las reparaciones grandes, superficiales y verticales o elevadas se pueden realizar mejor con concreto lanzado.

Cimbras y Preparaciones para Reparación de Muros

Se puede llenar con concreto confinado mediante cimbras si así es necesario (2.11). Esta reparación debe de tener una preparación previa tal como se muestra en la figura 2.10.

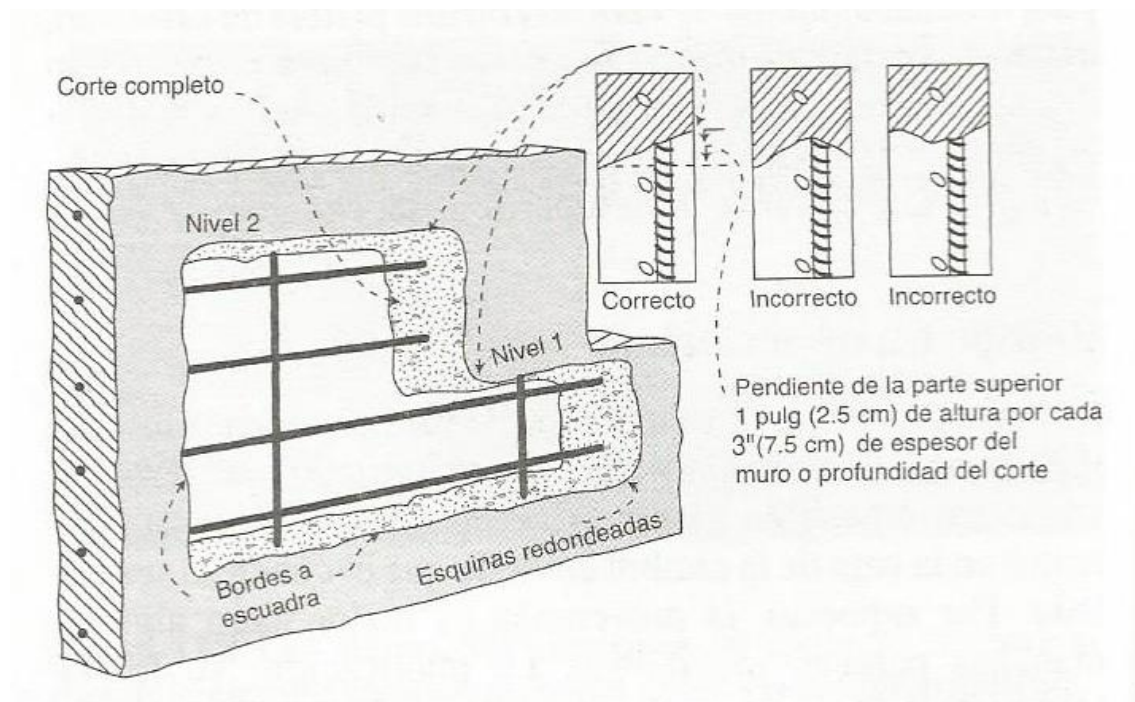


Figura 2.10 Pendiente en el borde superior de la abertura para permitir la vibración del concreto sin dejar bolsas de aire en la parte superior de la reparación

2.7.3 Reparaciones en Concreto Estructural

Es necesario poner especial atención y cuidado a las reparaciones del concreto estructural, especialmente si afectan el comportamiento estructural futuro del elemento. Debe llevarse a cabo un diseño y análisis de ingeniería utilizando las guías en el ACI 364.1R para asegurarse de que el concreto reparado funcionara tal como se pretende. Las causas comunes de reparaciones estructurales son:

- colocación inadecuada del refuerzo
- concreto defectuoso
- agrietamiento por esfuerzo
- agrietamiento por contracción térmica
- agrietamiento por secado

En estructuras viejas, el concreto dañado o deteriorado puede necesitar reparaciones.

En México recientemente se ha utilizado en grandes elementos estructurales la inyección de resinas ya sean epóxicas o a base de poliuretano para reparar grietas causadas por contracción térmica o juntas frías ocasionada por un mal colado.

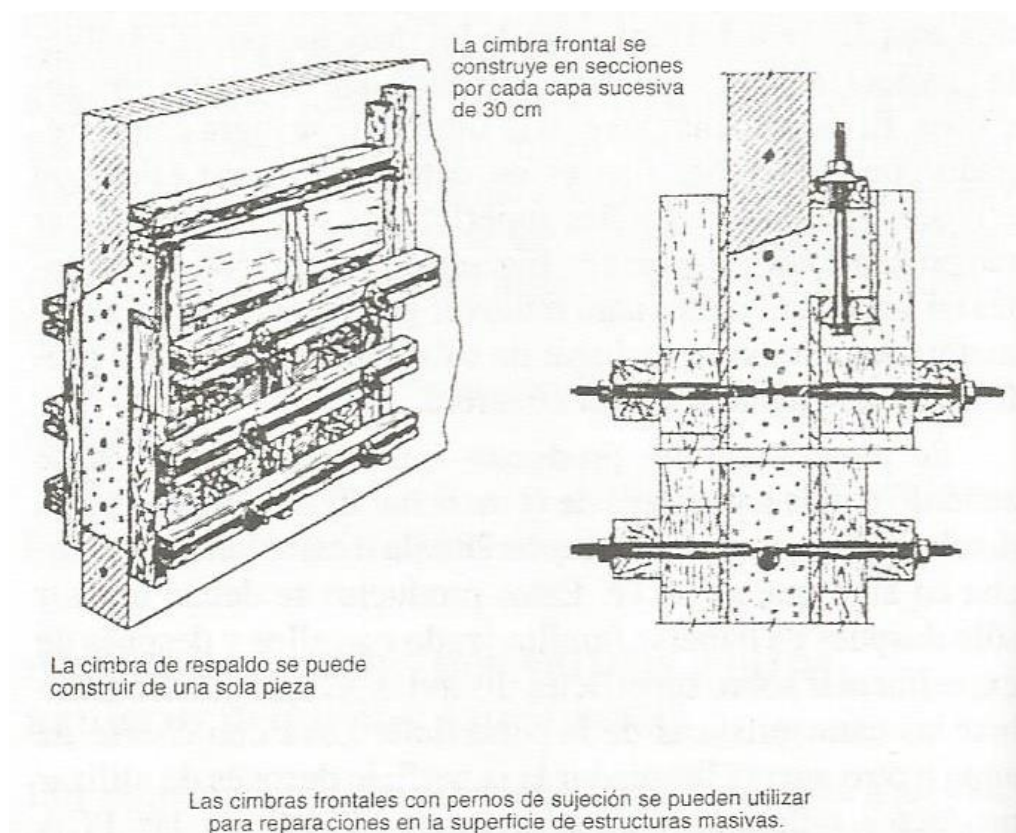


Figura 2.11 Cimbras para reparación de concreto en muros y parches grandes

3 Seguridad

3.1 Objetivo

Todo personal debe estar pendiente de los programas de seguridad en las plantas, que son dados a conocer a través del entrenamiento de personal, pláticas de inducción y subsecuentes reuniones de seguridad, simulacros, etc.

El reglamento interno de seguridad y aquella literatura relativa a la seguridad laboral, debe ser una lectura obligada para cualquier persona que tenga o no personal a su cargo, usada como una guía puede conducir muchas actividades diarias en la planta, además de crear un ambiente idóneo de trabajo; promueve un crecimiento importante dentro de una cultura muy atrasada en cuestión de seguridad laboral. Consideremos además que la Industria de la Construcción en nuestro país está clasificada de acuerdo a la Ley del Seguro Social y al Reglamento de la Ley del Seguro Social en Materia de Afiliación, Clasificación de Empresas, Recaudación y Fiscalización; dentro de la clase V (considerada la más alta, dentro de un rango del I al V) de acuerdo a la actividad más riesgosa que desarrollan sus trabajadores; comparada con otras industrias o giros. Pero si a esto le adicionamos actividades de riesgo agregado como el presforzado (ver apartado 6.2.1), el izaje, el montaje, etc. propias del prefabricado/presforzado, podremos dimensionar la importancia de prevenir e implementar acciones ya probadas que conduzcan a la mejora en la seguridad de nuestros procesos.

3.1.1 Seguridad — Tensión y liberación de torón

Como mencionaremos a lo largo del presente trabajo, las cuestiones de seguridad en la industria del concreto prefabricado y presforzado deben de analizarse, revisarse y evaluarse de forma continua, este apartado tratará solo de la seguridad que debe mantenerse en el proceso de tensión y liberación del torón. El “Manual for Fabrication of Precast Prestressed Concrete Products” elaborado por el Departamento del Transporte de Illinois, EUA, en su división 2, sección 2.1, apartado 2.1.4, menciona lo siguiente al respecto: “Al inspector (supervisor) se le aconseja ser precavido durante las operaciones de tensado porque las rupturas de los torones o fallas en los dispositivos de anclaje pueden causar daños personales. Se recomienda tomar las siguientes tres precauciones:

1) Escudo

El productor debe de proveer un escudo (figura 3.a) con las suficientes dimensiones y resistencia para proteger contra la ruptura de los torones o falla de los dispositivos de anclaje.

2) Área de seguridad

Es el lugar donde no puede ocurrir daño al personal cuando un torón se rompa o un dispositivo de anclaje falle. El productor debe asegurarse de que la salida de esta área no esté obstruida por diversos artículos o equipo.

El personal debe ser advertido de no permanecer directamente por detrás de un torón que este siendo tensado (figura 3.b), ya que la falla normalmente producirá que el mismo torón y escombros salgan proyectados justamente hacia la parte posterior.

El personal debe ser advertido de no apoyarse directamente sobre un torón que está siendo tensado, o mantener su cara y manos demasiado cerca durante la medida de la elongación, ya que nuevamente, la ruptura de un torón o la falla de un dispositivo de anclaje pueden resultar en daños personales severos o fatales.

3) Alarma audible y luminosa

Previamente al tensado en una mesa de colado, se deben de emitir una alarma audible y una señal luminosa (figura 3.c). La alarma y la señal luminosa, proporcionadas por el productor, deben ser adecuadas para ser escuchada y visualizada respectivamente; además de que ambas deben de estar siempre en condiciones de trabajo.

Una vez completado el trabajo de tensado, la mesa de colado aún debe considerarse como potencialmente peligrosa. El personal debe ser advertido para evitar la exposición innecesaria. Cuando se coloque el concreto, los sargentos que proporciona el productor para asegurar la cimbra en su parte superior, no deben de exceder los espaciamientos recomendados y deben de asegurarse apropiadamente a la mesa de colado. Una vez que el concreto ha endurecido, el personal aún necesita ser cuidadoso y precavido con relación al área segura, en particular, el personal debe tener precaución durante la transferencia de esfuerzos o corte del torón, así como cuando una trabe es retirada de la mesa de colado.”

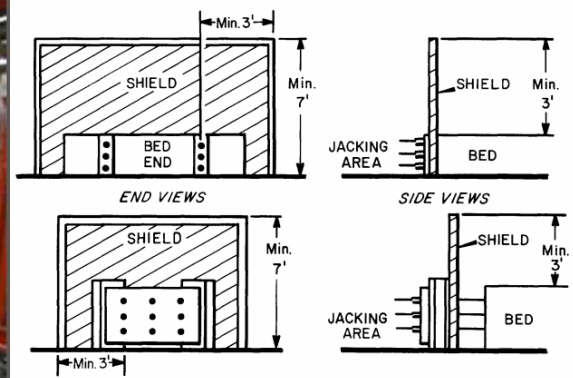


FIGURE IV-1. EXAMPLE OF MAIN SHIELD BED END PROTECTION
Adapted from PCI Safety and Loss Prevention Manual [39].

Figura 3.a Escudos de protección contra ruptura de torón. Fuente: Manual for Fabrication of Precast Prestressed Concrete Products” elaborado por el Departamento del Transporte de Illinois, EUA



Figura 3.b Anuncio que indica que se está efectuando la operación de tensado en el área.



Figura 3.c Gato monotorón para presfuerzo, con sirena que funciona como señal visual

Cuando se trata de torones deflectados (ver apartado 6.4.2.2) se han registrado ciertos accidentes y al respecto el Departamento del Trabajo de EUA, mediante la OSHA han emitido ciertos consejos y cambios al proceso para mitigar estos riesgos, los cuales se resumen en el uso de una cadena para restringir el movimiento brusco de los torones en caso de falla del dispositivo depresor en diversas

ubicaciones y cuando exista personal trabajando en el área cercana como se observa en las dos siguientes figuras 3.d y 3.e.

Se pueden notar toda la longitud de la mesa y la disposición de los mecanismos de restricción (cadenas)



Figura 3.d Dispositivos de seguridad adicionales en el proceso

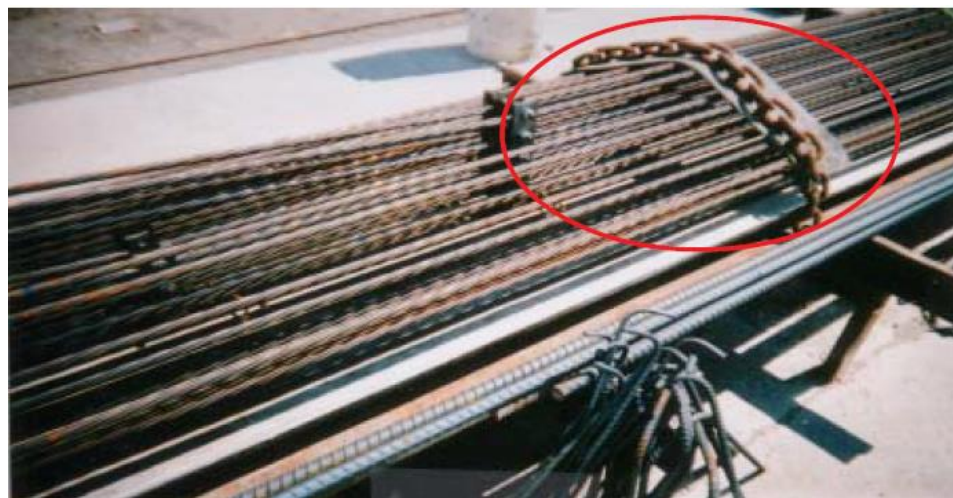


Figura 3.e Acercamiento del dispositivo adicional

4 Materiales para concreto prefabricado y presforzado

Todos los materiales utilizados en una planta de prefabricados deberán atender condiciones de adquisición basadas en estándares ASTM, u otras especificaciones, aprobadas para los materiales y darles un seguimiento posterior. Los materiales deben ser inspeccionados una vez que sean entregados en planta o almacén. El personal designado de la planta/almacén debe revisar los resultados de pruebas y/o los certificados de calidad para cada material recibido. Los contratos efectuados con los proveedores deben de contener expresamente que cada entrega de material debe de estar acompañada de los respectivos certificados de calidad. Es obligatorio que cada proveedor conozca y aplique las especificaciones o estándares para sus materiales.

Es muy útil el listado de “Proveedores Confiables” que deben ser aprobados anualmente basados en su desempeño satisfactorio sobre aspectos previamente bien establecidos para evitar sesgos o preferencias.

4.1 **Materiales para concreto**

Partiendo de la experiencia acumulada en el uso de materiales locales para el diseño de una mezcla de concreto, se debe considerar un factor importante que últimamente ha entrado en escena en la industria de la construcción moderna: la durabilidad. Precisamente las variaciones en materiales cementantes, agua, agregado fino, agregado grueso y aditivos afectarán las propiedades físicas tales como resistencia y durabilidad. Los documentos o certificados de los proveedores para estos insumos deben de revisarse y mantenerse archivados. El Reglamento del ACI 318 S – 08 establece en el Capítulo 3, “Materiales”; Apartado 3.1, Ensayos de Materiales; numeral 3.1.3:

“Un registro completo de los ensayos de materiales y del concreto debe siempre estar disponible para revisión durante el desarrollo de la obra y por 2 años después de terminado el proyecto, y debe ser conservado para este fin por el inspector”.

4.1.1 **Materiales Cementantes**

El cemento portland es un cemento hidráulico producido por la combinación de materiales crudos seleccionados, sobrecalentados y posteriormente pulverizados. Una pequeña cantidad de yeso es adicionada con el fin de controlar el tiempo de fraguado inicial.

El cemento portland gris tiende a variar en color de un lote a otro debido a sus contenidos de álcalis y óxidos. El cemento portland blanco es producido en base a materiales que contienen muy pocas cantidades de óxidos de manganeso y hierro, componentes que dan al cemento portland ordinario su característico color gris.

Los cementos deben cumplir las normas ASTM C150, “Especificación Estándar para el Cemento Portland” para el caso de E.U.A. y la NMX-C-414 ONNCE “Industria de la Construcción- Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba” aplica para nuestro territorio.

No existen métodos de prueba prácticos para asegurar la calidad del cemento que puedan ser realizados en un laboratorio promedio de una planta de prefabricados. Por lo tanto, el proveedor del cemento debe remitir un certificado que contenga la información de análisis químicos - físicos y certifique que se cumplen los requerimientos mínimos para los estándares aplicables o contratados.

El nivel de alcalinidad del cemento es importante, especialmente si se utilizan agregados reactivos. Cementos bajos en álcali deben contener un máximo de 0.6% (equivalencia de álcali expresada como Na_2O). Si los certificados o reportes de molienda no son recibidos con cada envío de cemento, dichos envíos deberán ser evaluados previamente a su uso por un laboratorio externo calificado y certificado.

El personal de calidad y de producción debe monitorear la temperatura del cemento. Si esta temperatura excede los 75°C puede desencadenar problemas de fraguado falso en el concreto. Se deben de tomar muestras del cemento de los embarques y deben de conservarse por 60 días o hasta la aceptación del producto, permitiendo al laboratorio evaluar el cemento si ocurriera algún inconveniente.

4.1.1.1 Pozolanas:

Las pozolanas son materiales que presentan pocas o ninguna propiedad cementante por sí mismas, exceptuando la escoria, pero que reaccionan químicamente con hidróxido de calcio (liberado durante el proceso de la hidratación del cemento portland) para producir componentes con propiedades cementantes. Estos materiales son silíceos y silíceos-aluminosos y deben ser finamente molidos para llegar a desarrollar sus propiedades; son generalmente subproductos de otras industrias.

Las pozolanas más comunes son la ceniza volante (tipos F y C), humo de sílice (microsílica), escoria granulada de altos hornos y una cantidad de productos no artificiales como tierras diatomáceas, metacaolín, pedernales de opalina, arcillas, lutitas, tobas y pumicitas.

El uso de las pozolanas se ha extendido debido a que, adicionalmente a sus propiedades cementantes, ellas mejoran notablemente la trabajabilidad y son usadas también como materiales complementarios cuando los agregados son deficientes en finos.

Las pozolanas reaccionan más lentamente que el cemento, por lo tanto el calor de hidratación es liberado más lentamente, por lo que su uso en estructuras masivas definitivamente es una ventaja. Sin embargo, debido a que su reacción es más lenta, el periodo de curado del concreto debe de extenderse.

En general las pozolanas pueden reducir la cantidad de cemento en la mezcla, también pueden mejorar la trabajabilidad, plasticidad, reactividad, permeabilidad y reducción de calor de hidratación.

Las cenizas volantes son normalmente utilizadas en concreto presforzado para reemplazar del 15 al 20% del cemento portland.

La microsílca es normalmente usada en la cantidad del 3 al 6% del cemento. El uso de porcentajes más elevados propician que la mezcla de concreto se vuelva “pegajosa o chiclosa” y se dificulte la colocación.

4.1.2 Agregados

El “Quality Control Technician/Inspector, Level III Training Manual, TM-103” (referencia Precast/Prestressed Concrete Institute PCI, 1996) establece que es necesario un conocimiento más completo de las propiedades de los agregados donde se espera una durabilidad a largo plazo del concreto o si el agregado es utilizado continuamente.

El concepto de durabilidad se aplica más a menudo en situaciones donde el producto final estará expuesto a la intemperie, humedad o agentes químicos; y también donde la magnitud de la obra y su vida útil esperada así lo exige. Ejemplos típicos son: durmientes, estructuras de estacionamientos, estructuras marinas, estructuras en puentes, presas, entre otras. Las pruebas ASTM más comunes son:

- Impurezas orgánicas, C40
- Resistencia congelamiento-deshielo, C666
- Reactividad potencial álcali-sílice de agregados (método químico) C289; o la C227; C1567; C1293; C1260;
- Reactividad álcali-carbonatos C586; C1105
- Sanidad de los agregados, C88
- Resistencia a la abrasión, C131 y C535
- Absorción, C127 y C128
- Contracción por secado, C157 y C490
- Contracción por flujo plástico, C512

Estas pruebas requieren equipo especial y son principalmente realizadas por laboratorios especializados. Algunas de estas pruebas son ejecutadas en especímenes endurecidos de concreto por lo que requieren de tiempo para obtener resultados significativos. Por ejemplo: una prueba realmente representativa de contracción por flujo plástico puede llegar a requerir un año completo o incluso más. Las pruebas de flujo plástico y contracción por secado requieren de un mínimo de seis meses de información de resultados, sin embargo, en situaciones especiales se requiere información de varios años de registro de comportamiento. Las curvas características y parámetros de caracterización se van ajustando con el tiempo para obtener información de mayor precisión.

La reactividad álcali-sílice entre ciertos agregados y cementos se ha estado volviendo un problema recurrente ya que la disponibilidad de agregados de alta calidad se ha visto disminuida. Una reacción química se desarrolla entre los álcalis del cemento (Na_2O – óxido de sodio y K_2O – óxido de potasio) y agregados reactivos si el concreto es expuesto a la humedad. El concreto en que se presenta

esta reacción tiende a expandirse y por lo tanto se agrieta. En la reacción, como se ha mencionado, intervienen los álcalis presentes en el cemento, por lo que, cementos de bajo contenido de álcalis deben de especificarse para su uso en los proyectos si se pretende emplear agregados potencialmente reactivos. Inicialmente este tipo de situaciones estaba limitado a ciertas regiones, pero actualmente se han comenzado a ver a través de toda Norteamérica incluyendo México.

Las pruebas para agregados potencialmente reactivos son:

- ASTM C227, “*Test Method for Potential Reactivity of Cement Aggregate Combinations (Mortar Bar Method)*”, es útil en determinar la susceptibilidad de que ciertas combinaciones cemento – agregado presenten reacciones expansivas álcali-sílice. Esta prueba no es recomendada para detectar reacciones álcali-carbonatos.
- ASTM C289, “*Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method)*”, es usado en combinación con otras pruebas para evaluar químicamente la reactividad potencial de agregados con álcalis en el cemento Portland. Es una prueba relativamente rápida y puede filtrar agregados considerados no reactivos.
- ASTM C295, “*Standard Practice for Petrographic Examination of Aggregates in Concrete*”, puede ser utilizado para identificar y enfocar la atención a partes constituyentes de los agregados potencialmente reactivos (álcali-sílice y álcali-carbonatos).
- ASTM C586, “*Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates (Rock Cylinder Method)*”, su finalidad es proporcionar un indicador relativamente rápido de la reactividad potencial de ciertos materiales pétreos carbonatados. Este tipo de reacción incluye la dolomita (mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio) que se encuentra en ciertas dolomitas calcíticas y calizas dolomíticas. Esta prueba ha sido utilizada principalmente para investigaciones y para revisiones preliminares de fuentes de agregados para obtener el potencial de expansión deletérea (nociva).
- ASTM C856, “*Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*”, útil para determinar si se han presentado reacciones álcali-sílice, álcali-carbonatos, o cemento-agregados y sus efectos en el concreto. Los análisis petrográficos son también utilizados para muchos otros propósitos.
- ASTM C1105, “*Test Method for Length Change of Concrete Due Alkali-Carbonate Rock Reaction*”, es usado para evaluar la susceptibilidad de combinaciones de cementos-agregados a presentar una reacción expansiva álcali-carbonatos. El método de prueba no es recomendable para detectar reacciones álcali-sílice.
- ASTM C1260, “*Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method)*”, es una prueba relativamente nueva (aprobada en 1994 y revisada en 2007) que permite la detección, en un periodo de 16 días, del potencial de presentar reacciones nocivas álcali-sílice en los agregados usando barras de mortero.

4.1.2.1 Agregados finos:

Los agregados finos (AF), o arena, se definen como aquellos materiales inertes que pasan a través de la criba o malla del No. 4 y que son retenidos en la criba No. 200. Los agregados finos más comunes son arenas naturales, pero también pueden ser obtenidas de la molienda de rocas o gravas, a las que se llama arenas manufacturadas.

En general los AF deben cumplir la norma ASTM C33, *Standard Specification for Concrete Aggregates*, a menos que se especifiquen otros requerimientos por parte del diseñador o se requieran otras granulometrías diferentes explícitamente para acabados especiales de concreto arquitectónico. La norma incluye requisitos de granulometría y calidad de agregados finos para su utilización en la elaboración de concreto.

La granulometría del agregado puede tener un efecto significativo importante en:

- la demanda de agua
 - sangrado
 - trabajabilidad
 - facilidad de acabado
 - economía
 - durabilidad
- } concreto fresco
- } concreto endurecido

Por ejemplo: si tenemos AF con exceso de partículas finas que pasan las cribas no. 30, 50 y 100, se puede incrementar la demanda de agua significativamente en la mezcla, esto implica que se deberá incrementar la cantidad de cemento para una resistencia dada y mantener así una relación a/cm. Una carencia de finos, por otra parte, puede resultar en sangrado excesivo y en casos extremos, pueden dificultar mucho la consolidación del concreto y el proceso de acabado.

Los proveedores de AF deben de proporcionar una prueba de granulometría al menos cada mes para cada banco de material. Cada envío debe ser revisado visualmente y en caso de presentar una variación inaceptable de su granulometría o presentar contaminación debe ser rechazado. Los análisis granulométricos, en planta, deben ejecutarse cada 500 ton o al menos semanalmente para cada tipo y tamaño de agregado fino⁶.

Según el PCI, el cumplimiento de los requisitos de granulometría de la ASTM C33 es generalmente satisfactorio (pero no requeridos) para la mayoría del concreto prefabricado. La tabla 4.1 muestra los límites de granulometría con respecto al tamaño de la criba.

El *módulo de finura* (MF) es un indicador de la consistencia del agregado fino. Entre más grande sea el MF, más grueso será el agregado. El MF debe determinarse para verificar la consistencia del material. El valor base del MF para el diseño de mezclas será el promedio de diversas pruebas. Para

⁶ Apuntes de Quality Control Scholl, Level I, Nashville, TN

asegurar el suministro de una mezcla consistente, especialmente aplicable para concreto prefabricado, el MF debe de mantenerse en un ± 0.2 del valor base⁷ y variar en rango de entre 2.4 a 2.8, según el PCI.

Tamaño de criba (mm)	Porcentaje que pasa por peso
¾ in (9.50 mm)	100
No. 4 (4.75 mm)	95 – 100
No. 8 (2.36 mm)	80 – 100
No. 16 (1.18 mm)	50 – 85
No. 30 (6.18 µm)	25 – 60
No. 50 (300 µm)	10 - 30
No. 100 (150 µm)	2 - 10

Tabla 4.1 Limites aceptados para AF según ASTM C33

Los colores de los agregados para concreto arquitectónico pueden variar considerablemente debido a su origen geológico y aún entre distintas rocas del mismo tipo. Se recomienda que una vez autorizadas las muestras, se realice el almacenamiento de todo el agregado a utilizar para evitar grandes variaciones y minimizar la variación en el color.

4.1.2.2 Agregados gruesos:

Los agregados gruesos (AG), o grava, se definen como aquellos materiales inertes que son retenidos completamente en la criba o malla del No. 4. Los agregados gruesos más comunes pueden ser naturales u obtenidos de la trituración de roca o una combinación de ambas.

El tamaño del AG, casi siempre se selecciona procurando utilizar el mayor que resulte práctico para un trabajo, siendo el límite superior de 15 cm. Cuanto mayor sea el tamaño del agregado grueso, se usará menos agua y cemento para producir un concreto. Los elementos de la grava pasan por las cribas de 3", 1 1/2", 3/4", 3/8" y es retenida en la no. 4.

En general los AG deben cumplir la norma ASTM C33, *Standard Specification for Concrete Aggregates*, a menos que se soliciten otras especificaciones por el propietario y/o el responsable del proyecto.

Los proveedores de agregado grueso deben de proporcionar una prueba de granulometría al menos cada mes para cada banco de material para verificar que el material sea acorde con la especificación de la orden de compra. Cada envío debe ser revisado visualmente y en caso de presentar una variación inaceptable de su granulometría o presentar contaminación –por ejemplo: arcilla- debe

⁷ Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual*, TM-103, Chicago p.67

ser rechazado antes de su utilización. Los análisis granulométricos, en planta, deben ejecutarse cada 1,000 ton o al menos semanalmente⁸.

El tamaño máximo del agregado grueso para prefabricados de concreto no debe exceder:

- un tercio de la sección más pequeña del miembro del elemento,
- tres cuartas partes del espesor mínimo de recubrimiento especificado,
- dos tercios del espaciamiento mínimo entre acero de refuerzo, torones o ductos.

Estos límites se establecen para asegurar que el concreto fluya libremente en las cimbras y alrededor de todo el refuerzo.

Mientras que la granulometría de los agregados finos afecta significativamente las propiedades del concreto fresco, las mismas propiedades no se ven realmente alteradas por la granulometría del agregado grueso. Los factores que realmente son importantes son:

- el tamaño máximo del agregado (TMA) y
- la uniformidad de la granulometría de una revoltura a otra.

La forma de la partícula varía de redondeadas en gravas naturales a prismáticas o cúbicas en algunos tipos de gravas trituradas, llegando a presentar largas aristas y partículas alargadas. La textura de su superficie puede variar de suave a muy áspera. Los agregados que presentan aristas vivas o formas planas y textura rugosa o áspera, pueden producir concretos muy difíciles de trabajar a menos que sea adicionado a la mezcla más material fino (arena, cemento y puzolanas).

Otra prueba usada en caso de agregados para concreto arquitectónico es la ASTM C641. Esta prueba es especialmente utilizada para determinar la presencia de materiales en agregados ligeros que produzcan sustancias que manchen o tiñan las superficies expuestas. Una segunda prueba es la ASTM C88 que indica la durabilidad de los agregados. Esta prueba mide la desintegración por exposición a los sulfatos de magnesio. Esta desintegración debe ser menor al 8%, salvo que, 5 años de experiencia bajo condiciones de medio ambiente similares, demuestren una durabilidad aceptable.

4.1.3 Agua de mezclado

El agua está presente de manera importante en la elaboración del concreto, morteros, mezclas, en el lavado de agregados, curado y riego de concreto; por consiguiente debe ser un insumo limpio, libre de aceite, ácidos, álcalis, sales y en general de cualquier material que pueda ser perjudicial, según el caso para el que se utilice. Según el uso, el agua debe presentar las características enunciadas en la tabla 4.2 de acuerdo a la normativa mexicana.

El agua utilizada para la fabricación de concreto, mortero o lechada debe ser potable, incolora, insabora e inodora, preferentemente de condiciones potables, aunque se puede emplear agua con

⁸ Apuntes de Quality Control Scholl, Level I, Nashville, TN

contaminaciones o impurezas que no sobrepasen los límites máximos establecidos en la tabla anteriormente citada.

Cuando el agua utilizada no cumple uno o varios de los requisitos ya conocidos, deberán realizarse ensayos comparativos empleando el agua en estudio y agua destilada o potable, con similares materiales y procedimientos. Estos ensayos incluirán la determinación del tiempo de fraguado de las pastas y la resistencia a la compresión de morteros a edades de 7 y 28 días.

4.1.3.1 Aguas Prohibidas

- Aguas ácidas,
- Aguas calcáreas; minerales; carbonatadas,
- Aguas provenientes de minas o relaves,
- Aguas que contengan residuos industriales,
- Aguas con contenido de $\text{NaCl} > 3\%$ ó $\text{SO}_4 > 3\%$,
- Aguas que contengan algas, materia orgánica, humus, partículas de carbón, turba, azufre, descargas de desagües,
- Aguas que contengan azúcares o sus derivados,
- Aguas con porcentajes significativos de sales de sodio y potasio disueltos, en especial en todos aquellos casos en que es posible la reacción álcali.

SALES E IMPUREZAS	CEMENTOS RICOS EN CALCIO LÍMITES EN P.P.M.	CEMENTOS SULFO- RESISTENTES LÍMITES EN P.P.M.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50 000	35 000
Cloruros como CL (a)		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos preesforzados en ambientes húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1 000 (c)
Sulfato como $SO_4 = (a)$	3000	3 500
Magnesio como $Mg++(a)$	100	150
Carbonatos como CO_3	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO_2	5	3
Alcalis totales como $NA+$	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4 000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del PH	No menor de 6	No menor de 6.5

Tabla 4.2 Límites aceptados para el agua de mezclado según NMX-C-122

De la anterior tabla es importante tomar en cuenta las siguientes notas:

- (a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.
- (b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C- 088.
- (c) Cuando se use cloruro de calcio ($CaCl_2$) como aditivo acelerante en concretos convencionales, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla 4.2. (NMX-C-122), pero en el caso del concreto para su uso en prefabricados, el uso de este aditivo por su efecto corrosivo está prohibido o restringido por el PCI (ver apartado 4.1.4.4).

Es interesante señalar que otras publicaciones⁹ señalan que las limitaciones sugeridas en el agua para trabajos con prefabricados deberían de ser aún más estrictas que con la construcción convencional, tal como se enlista a continuación:

- a) El agua no debe de contener impurezas que causen un cambio en el tiempo de fraguado mayor a 25% ni una reducción en la resistencia a la edad de 14 días mayor al 5%, comparadas con muestras realizadas con agua destilada.
- b) El agua debe presentar menos de 650 partes por millón de ión cloro.
- c) El agua debe presentar menos de 1300 partes por millón de ión sulfato. Algunas autoridades limitan este punto a 1000 ppm.
- d) El agua debe estar libre de aceite.

Para complementar la información sobre este tema se sugiere consultar las normas mexicanas:

- NMX-C-122-2004. Agua para concreto.
- NMX-C-277-1979. Agua para concreto. Muestreo.
- NMX-C-283-1982. Agua para concreto. Análisis.

Además de lo anterior, referente a las normas ASTM, existen métodos de prueba para utilizarse en la determinación de concentraciones químicas. El agua de mezclado de una fuente distinta a la red municipal debe ser examinada anualmente. Este examen consiste en probar cubos de mortero con la norma ASTM C109. La resistencia a la compresión a la edad de siete días será de al menos 90% de los cubos realizados con agua potable. El tiempo de fraguado determinado por medio de la aguja de Vicat (ASTM C 191) puede variar de una hora antes hasta una hora y media después. El agua de mar o cualquier otra fuente de agua que contenga concentraciones de sustancias nocivas, tales como cloros, no debe ser utilizada.

El agua de lavado puede ser utilizada como agua de mezclado sólo si cumple los requisitos después de algún tratamiento.

4.1.4 Aditivos

Los aditivos, según el PCI, son ingredientes adicionados al concreto diferentes al cemento portland, agua y agregados que son incorporados a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

Los aditivos influyen la reacción o modifican las propiedades físicas del concreto. Todos deben cumplir las especificaciones aplicables de la ASTM. Los cloros son nocivos al concreto reforzado y presforzado, de tal forma que la cantidad exacta de ésta sustancia en la mezcla debe ser conocida.

⁹ Gerwick, Ben C. Jr., Construction of Prestressed Concrete Structures, 2a. Ed., Wiley Inter Science

Cuando dos o más aditivos son usados en una mezcla, su compatibilidad debe ser revisada para asegurar un desempeño apropiado. Algunos aditivos no pueden ser usados conjuntamente y la mayoría de ellos tiene requerimientos específicos de dosificación.

Existen dos tipos de aditivos:

- Aditivos químicos: aditivos no puzolánicos en la forma de líquido, suspensión o sólidos solubles en agua.
- Aditivos minerales: (materiales cementantes suplementarios, SCM), contribuyen a las propiedades plásticas y endurecidas del concreto a través de una reacción hidráulica, puzolánica o ambas en presencia de agua y cemento.

4.1.4.1 ASTM C494 Aditivos químicos

La especificación ASTM C494, en su alcance, cubre los materiales utilizados como aditivos químicos que son adicionados a las mezclas de concreto elaboradas a base de cemento hidráulico para los siguientes propósitos indicados por siete tipos como se enuncia a continuación:

- Tipo A Aditivo reductor de agua
- Tipo B Aditivo retardador de fraguado
- Tipo C Aditivo acelerante de fraguado
- Tipo D Aditivo retardador - reductor de agua
- Tipo E Aditivo acelerante - reductor de agua
- Tipo F Aditivo reductor de agua de alto rango
- Tipo G Aditivo reductor de agua de alto rango y retardador

Dicha norma estipula las pruebas para aditivos compatibles con materiales para concretos o con cementos, puzolanas, agregados y aditivos inclusores de aire.

La norma establece tres niveles de pruebas:

- Nivel 1. Etapa de prueba inicial donde debe cumplir con los requerimientos de la tabla 4.3.
- Nivel 2. Algunas pruebas repetidas y demostración del cumplimiento de la especificación.
- Nivel 3. De aceptación de un lote o para medidas de uniformidad dentro o entre lotes.

La norma se complementa o refiere también a otras normas ASTM, describe brevemente cierta terminología, acotando los significados o explicando algunos términos propios del lenguaje técnico usado en esta industria como son: aditivo acelerante, aditivo reductor de agua, aditivo retardante de fraguado, etc.

	Type A, Water Reducing	Type B, Retarding	Type C, Acceler- ating	Type D, Water Reducing and Retarding	Type E, Water Reducing and Accelerating	Type F, Water Reducing, High Range	Type G, Water Reducing, High Range and Retarding
Water content, max, % of control	95	...	...	95	95	88	88
Time of setting, allowable deviation from control, h:min: Initial: at least not more than	... 1:00 earlier nor 1:30 later	1:00 later 3:30 later	1:00 earlier 3:30 earlier	1:00 later 3:30 later	1:00 earlier 3:30 earlier	... 1:00 earlier nor 1:30 later	1:00 later 3:30 later
Final: at least not more than	... 1:00 earlier nor 1:30 later	... 3:30 later	1:00 earlier ...	... 3:30 later	1:00 earlier ...	... 1:00 earlier nor 1:30 later	... 3:30 later
Compressive strength, min, % of control: ^B							
1 day	...	...	...	...	...	140	125
3 days	110	90	125	110	125	125	125
7 days	110	90	100	110	110	115	115
28 days	110 (120) ^C	90	100	110 (120) ^C	110	110 (120) ^C	110 (120) ^C
90 days	(117) ^C	n/a	n/a	(117) ^C	n/a	(117) ^C	(117) ^C
6 months	100 (113) ^C	90	90	100 (113) ^C	100	100 (113) ^C	100 (113) ^C
1 year	100	90	90	100	100	100	100
Flexural strength, min, % control: ^B							
3 days	100	90	110	100	110	110	110
7 days	100	90	100	100	100	100	100
28 days	100	90	90	100	100	100	100
Length change, max shrinkage (alternative requirements): ^D							
Percent of control	135	135	135	135	135	135	135
Increase over control	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Relative durability factor, min ^E	80	80	80	80	80	80	80

^A The values in the table include allowance for normal variation in test results. The object of the 90 % compressive strength requirement for a Type-B admixture is to require a level of performance comparable to that of the reference concrete.

^B The compressive and flexural strength of the concrete containing the admixture under test at any test age shall be not less than 90 % of that attained at any previous

Tabla 4.3 Requerimientos físicos para aditivos según la ASTM C494

La norma establece criterios de uniformidad y equivalencia, empaquetado y etiquetado, almacenamiento y muestreo e inspección.

También se establecen criterios de rechazo para los aditivos como son:

- En caso de no cumplir con los requerimientos de esta misma norma.
- Si ha sido almacenado por más de seis meses en el lugar de manufactura antes de su venta.
- Si existe una diferencia mayor al 5% en el peso o volumen especificado en los contenedores o empaques.

En la norma se incluyen referencias a métodos de prueba divididos en dos grandes grupos:

- Pruebas para usos no específicos.
- Pruebas para usos específicos.

Establece que todos los proporcionamientos deben realizarse de acuerdo al ACI 211.1 – 91. El equipo de mezclado debe cumplir lo estipulado en la Práctica C 192/C 192 M, así como las pruebas y propiedades del concreto fresco.

Otros puntos que comprende esta norma son los relativos a la preparación de los especímenes de prueba, las pruebas a dichos especímenes, siendo establecido que deben de ser 3 al menos, curándose de acuerdo a la norma C 192/ C 192 M para resistencia a la compresión, para resistencia a flexión y resistencia al congelamiento – deshielo. Para el cambio de longitud la elaboración y curado debe de realizarse de acuerdo al C 157/ C 157 M.

Para las pruebas en especímenes de concreto endurecido establece los métodos a utilizar.

Finalmente los reportes de las pruebas deben de contener la marca, el productor o nombre de la empresa manufacturera, número de lote, la característica del aditivo, detalles sobre las mezclas utilizadas, relaciones agua/cemento, etc.

4.1.4.2 ASTM C260 Aditivos inclusores de aire

Los aditivos inclusores de aire deben cumplir la ASTM C260, *Especificación Estándar para Aditivos Inclusores de Aire para Concreto*.

Estos aditivos son usados para mejorar sustancialmente la durabilidad del concreto que llega a ser crítica cuando éste se encuentra saturado y es sujeto a ciclos de congelamiento y deshielo y mejora la resistencia del concreto al desescamamiento causado por las sales del deshielo, ataques de sulfatos y agua corrosiva. La inclusión de aire también reducirá la permeabilidad, reducirá la segregación y el sangrado y mejorará la plasticidad y la trabajabilidad.

Éste aditivo produce una red uniforme de pequeñas burbujas/espacios esféricos a través de toda la pasta de cemento que proveen el contenido específico de aire en el concreto endurecido. Estos espacios funcionan como reservas de alivio para el incremento de volumen del agua cuando ésta se congela, previniendo el daño por congelamiento-deshielo.

4.1.4.3 ASTM C494 Aditivos retardadores de fraguado

Los aditivos retardadores deben cumplir la ASTM C494, *Especificación Estándar para Aditivos Químicos para Concreto*.

Estos aditivos son usados para:

- Contrarrestar los efectos adversos del clima caluroso (temperaturas ambientales que exceden los 30 °C), demorando el fraguado inicial del concreto y manteniendo su trabajabilidad por un periodo más largo de tiempo.

- Demorar la velocidad en el incremento de temperatura y disminuir el pico de temperatura en concreto masivo para reducir el agrietamiento por efectos de la temperatura.
- Eliminar juntas frías cuando se presentan problemas de colocación debido a condiciones existentes en el proyecto.

Se pueden presentar reducciones en la resistencia a edades tempranas (de 1 a 3 días), sin embargo, las resistencias a edades mayores no se ven afectadas.

4.1.4.4 ASTM C494 Aditivos aceleradores de fraguado

Los aditivos aceleradores o acelerantes del fraguado deben cumplir la ASTM C494, *Especificación Estándar para Aditivos Químicos para Concreto*.

Estos aditivos son usados para acelerar el tiempo normal de fraguado e incrementar la resistencia a edades tempranas. Solo se permiten por el PCI los aditivos libres de cloruros y no corrosivos para el uso en elementos de concreto prefabricado y presforzado. Algunos ejemplos son: trietanolamina, tiocianato de sodio, formiato de calcio, nitrito de calcio y nitrato de calcio. **El cloruro de calcio estrictamente no debe ser usado en productos de concreto prefabricado y presforzado** ya que el ión cloruro induce corrosión al acero de refuerzo, a los torones de presfuerzo y a los accesorios ahogados.

4.1.4.5 ASTM C1017 Aditivos reductores de alto rango

Los aditivos reductores de agua de alto rango, también llamados superplastificantes, deben cumplir la norma ASTM C1017 Tipo 1 ó 2 y la ASTM C494.

Estas especificaciones definen las calidades y métodos para probar éstos aditivos que producen concreto fluido. El concreto fluido puede ser definido como un concreto altamente trabajable (revenimiento mayor a 19 cm) que puede ser colocado con menos vibraciones, sin segregación o excesivo sangrado cuando es colocado de acuerdo a las prácticas probadas mencionadas en el ACI principalmente.

La incorporación de los superplastificantes al concreto presforzado ha sido uno de los avances más significativos de los pasados 25 años en la producción de concreto prefabricado y presforzado. Su primer uso se debió a la trabajabilidad mejorada, la cual ayudaba a colar productos con un acero de refuerzo muy congestionado.

Los superplastificantes se componen de:

- Condensados de melaminas sulfonatadas formaldehidas
- Condensados de naftaleno sulfonatado formaldehidos
- Lignosulfonatos

La mayor consistencia del concreto se da cuando estos aditivos se incorporan al agua de mezclado. La mezcla inadecuada de un concreto superplastificado puede causar variación en el color del concreto o la aparición de parches de concreto de diferente color.

Muy a menudo, la combinación de reductores de agua y superplastificantes es usada para aumentar la economía y la efectividad en reducir la pérdida de revenimiento rápida.

4.1.4.6 ASTM C494 Aditivos reductores agua

Los aditivos reductores de agua, deben cumplir la norma ASTM C494.

Los aditivos reductores de agua son usados para reducir la cantidad de agua en la mezcla necesaria para mantener su trabajabilidad. Esto permite también disminuir su relación a/mc y generalmente aumenta resistencia. Se pueden utilizar para obtener determinada resistencia con menos cemento o incrementar el revenimiento sin la adición de agua.

4.1.4.7 ASTM C1582 Aditivos inhibidores de corrosión

Los aditivos inhibidores de corrosión deben cumplir las especificaciones generales de todos los aditivos establecidos en la norma ASTM C494. La ASTM G109 es un método de prueba para evaluar la efectividad de los aditivos químicos en la protección contra la corrosión del refuerzo en el concreto.

El concreto naturalmente protege el acero embebido en él, formando una delgada capa protectora alrededor del acero, pero la carbonatación o los iones de cloruro pueden penetrar el concreto y destruir esta barrera protectora. Para reforzar esta barrera se utilizan estos aditivos, que consisten principalmente en nitrito de calcio.

4.1.4.8 ASTM C979 Pigmentos

Los agentes colorantes deben de cumplir la norma ASM C979, *Especificación Estándar de Pigmentos para Concreto con Color Integrado*, esta especificación define la calidad y métodos para probar colorantes o pigmentos. Los pigmentos generalmente están elaborados a base del negro del carbón, del óxido de hierro natural, del óxido de hierro artificial, del óxido de cromo, del dióxido de titanio y del azul del cobalto.

La variedad de materiales sintéticos y naturales de los que están elaborados los pigmentos utilizados como colorantes pueden afectar las propiedades físicas del concreto; por lo tanto, se deben de realizar pruebas previamente al uso de un pigmento para determinar la solidez dl color, la estabilidad química y sus efectos sobre las propiedades del concreto.

4.1.5 Materiales de curado

Los materiales para el curado (ver apartado 5.6) son utilizados para prevenir:

- Pérdida de humedad por evaporación
- Pérdida de temperatura por exposición al medio ambiente

Estos materiales se pueden dividir en dos categorías:

4.1.5.1 Compuestos de curado

Deben satisfacer la norma ASTM C309, *Especificaciones Estándar para Compuesto Líquido Formador de Membrana para Curado de Concreto*. La mayoría de los componentes líquidos formadores de membrana están formulados a partir de ceras, resinas y caucho tratado con cloro y son generalmente de color claro o blancos. Los componentes claros pueden contener un colorante temporal que desaparece en corto tiempo después de la aplicación. Los pigmentos y colorantes permiten realizar una inspección visual para verificar una adecuada cobertura sobre la superficie de concreto. Aún un pequeño orificio en la membrana permitirá la salida de agua en forma de vapor.

4.1.5.2 Cubiertas

Deben satisfacer la norma ASTM C171, *Especificaciones Estándar para Hojas/Películas/Cubiertas para Curado de Concreto*. Las hojas plásticas son las barreras de vapor más comunes usadas en la industria de la prefabricación en Estados Unidos. La película de polietileno con un espesor mínimo de 0.004 in (100 μm) es un material ligero fácil de instalar. Las películas claras o blancas opacas deben de ser utilizadas más a menudo, sin embargo, el polietileno negro puede utilizarse en lugares protegidos o techados todo el tiempo y también puede usarse al aire libre durante clima frío para absorber los rayos de sol. El yute blanco laminado con hoja de polietileno de espesor de 0.004 in (100 μm) es otro ejemplo de un material adecuado para curado (figura 4.1).

En México se utiliza, regularmente, para los trabajos con prefabricados una lona térmica plástica (figura 4.2), que proporciona muy buenos resultados en cuanto a la durabilidad, pero es pesada y tiene un costo significativamente mayor a los otros materiales disponibles en el mercado nacional.

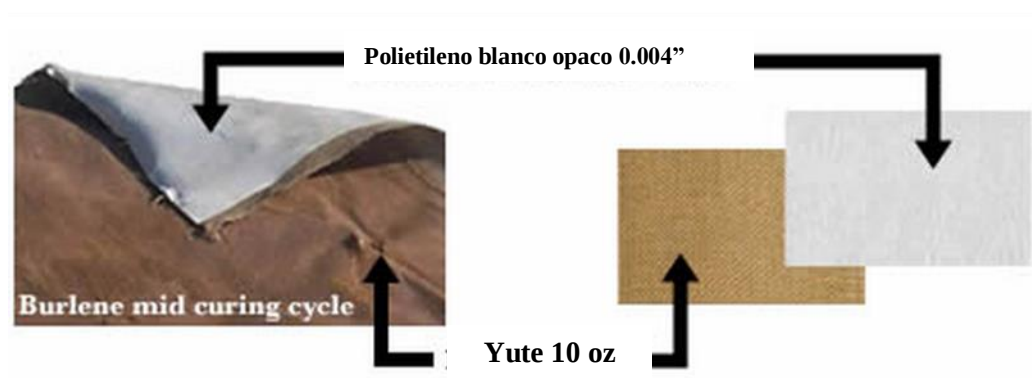


Figura 4.1 Manta de yute con polietileno



Figura 4.2 Lona térmica cubriendo muros prefabricados

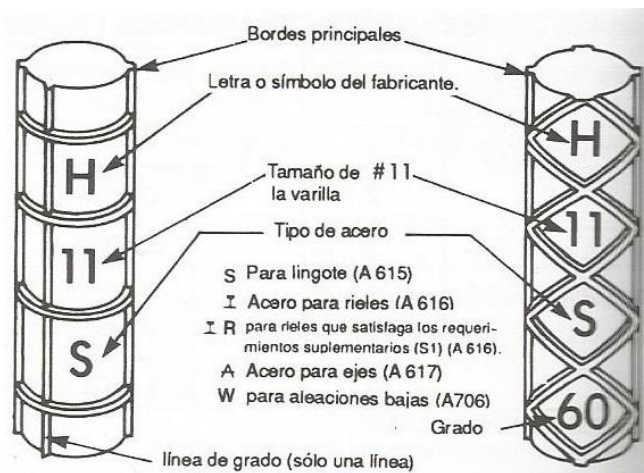
4.2 Refuerzo y accesorios

En este apartado se tratará lo referente al refuerzo y accesorios, desde el enfoque de materiales, que generalmente solo son usados en la industria del concreto prefabricado y solo se revisaran algunos temas muy específicos relativos a materiales de uso común entre la construcción tradicional y la prefabricación.

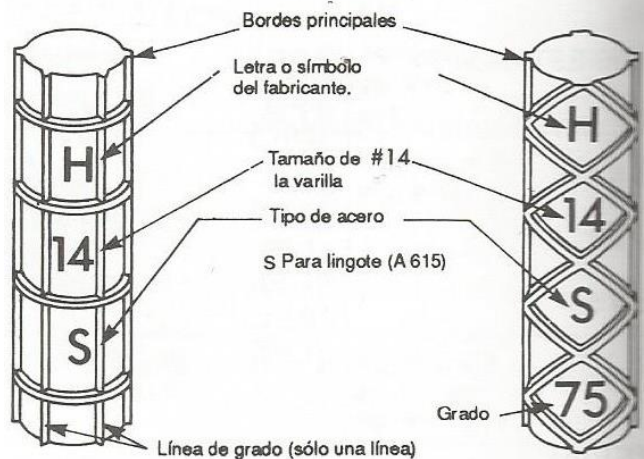
4.2.1 Acero de refuerzo sin recubrimiento

El acero de refuerzo debe cumplir la norma ASTM A615, *Especificaciones Estándar para Varillas Corrugadas y Lisas de Acero de lingote para Concreto Reforzado*, que es el más frecuentemente utilizado en el concreto prefabricado y presforzado. La soldabilidad, o capacidad de ser soldable, de las varillas no está incluida en estas normas ASTM. Los requisitos para determinar la soldabilidad y los procedimientos de soldadura deben ser determinados utilizando la especificación de la American Welding Society (AWS) D1.4 y las prácticas de soldadura cubiertas en la sección 2.3.2 del Quality Control Technician Inspector Level I & II, del PCI y del MNL-116, también del PCI. Las varillas de refuerzo presentan corrugaciones (deformaciones) para aumentar la adherencia del concreto circundante. Las varillas deben estar marcadas por el fabricante con:

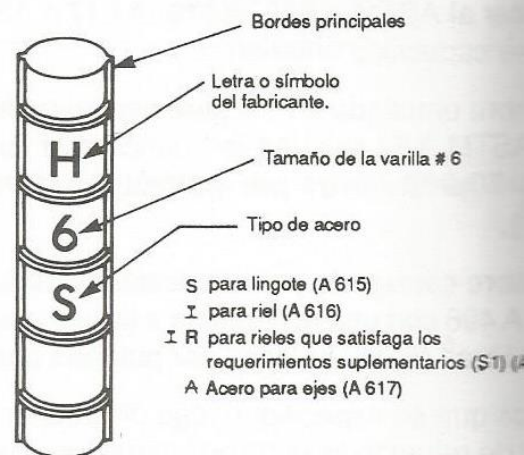
- Un símbolo designando el horno de producción o fabricante (generalmente una letra).
- El diámetro de la barra o varilla, expresado en un número que expresa



GRADOS 60 Y A 706



GRADO 75



GRADO 40 y 50

la cantidad de octavos de pulgada (#3 al #18).

- Un símbolo para el tipo de varilla -ASTM A615 (lingote), ASTM A616 (rieles), ASTM A617 (ejes), ASTM A706 (aleaciones bajas, es decir, el tipo de acero de origen); y
- Una designación de clase o identificación de grado que indique el límite de fluencia en ksi (1000 psi).

La varilla suele ser fabricada en los grados 40, 50, 60 y 75 alrededor del mundo, sin embargo; en México el grado comercial que se produce es el 42.

La norma de calidad que aplica en la varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto, que exigen los reglamentos de construcción del país, es: **NMX-C-407-ONNCCE-2001**.

4.2.1.1 Norma Aplicable

- NMX-C-407-ONNCCE-2001
- Industria de la construcción
- Varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto

Especificaciones y métodos de prueba

Según las normas aplicables, la varilla, se clasifica por su esfuerzo de fluencia nominal, en tres grados:

- Grado 30
- Grado 42
- Grado 52

La varilla debe ir marcada por un sólo lado con un espacio máximo de 2 metros con los siguientes elementos realzados y en el orden que se indica (figura 4.4):

- 1.- Identificación del fabricante con letras o símbolos.
- 2.- Número correspondiente a la designación (calibre).
- 3.- Designación de la norma NMX-C-407 con la letra N.
- 4.- Identificación del grado también en ksi.



Figura 4.4 Marcas de identificación en acero de refuerzo

La norma ASTM A706 fue publicada por primera vez en 1974 y se desarrolló en respuesta a la necesidad de soldar varillas de refuerzo de concreto. El material de estas varillas es producido con la intención de soldarse, y la cantidad de aleaciones y compuestos químicos deben permanecer en ciertos límites. Los certificados de calidad deben mencionar la cantidad de carbón equivalente (ver apartado 8.2.1) para las varillas. Las marcas sobre las varillas deben incluir la letra “W”. Puede necesitarse un precalentamiento al soldado dependiendo de la cantidad de carbón equivalente y del diámetro de la varilla.

Una vez que los envíos de varillas de acero de refuerzo llegan a la obra o planta, los certificados de calidad deben de revisarse para confirmar que el diámetro y el grado corresponden a la orden de compra, especificaciones y requerimientos del proyecto.

Las varillas de acero deben de ser inspeccionadas visualmente para evaluar su condición general a la llegada a la planta de prefabricados. Se puede aceptar un cierto grado de desescamamiento o descostramiento y una cierta oxidación. Las varillas no deben de presentar picaduras o pérdida de sección causada por corrosión, máximo un grado A₁ de la tabla 4.2. Si la presión de los dedos o un frotado ligero en la superficie eliminan el óxido y no se observan picaduras significativas, las varillas son aceptadas.

Para ejemplificar mejor los grados de corrosión se presenta la tabla 4.2 que está disponible también en la siguiente dirección electrónica:

http://www.matco.cl/publicaciones/Manuales_y_Catalogos/Manual_Armaduras.pdf

Existen otros materiales de acero que son utilizados en la industria del concreto prefabricado pero no utilizados hasta ahora en México, por lo que solo los mencionaremos para fines de conocimiento general:

- ❖ Acero de refuerzo cubierto con epóxicos (ASTM A775, ASTM A934)
- ❖ Acero de refuerzo galvanizado (ASTM A767)
- ❖ Alambre soldable de refuerzo (ASTM A185, ASTM A497, ASTM A82, ASTM A496)

Tabla 4.2 Grados de oxidación en acero de refuerzo

Grados de corrosión en barras individuales oxidadas

	Descripción de la visualización	Recomendaciones previas a su uso
Grado A₀: Barra recién laminada⁽¹⁾ 	Superficie lisa y uniforme color gris oscuro o gris acero, con firmes y delgadas películas adheridas producto de la laminación (laminillas) y sin nada de óxido aparente.	Sin restricción de uso
Grado A₁: Barra levemente oxidada⁽¹⁾ 	Superficie lisa y uniforme color gris oscuro o gris acero, con firmes y delgadas películas adheridas producto de la laminación (laminillas), pero con algunas zonas manchadas con un polvillo color pardo amarillento, producto de una oxidación superficial por condensación de la humedad del medio ambiente mezclada con elementos de naturaleza orgánica o química poco agresivos. Este polvillo se pierde generalmente con la manipulación.	Sin restricción de uso
Grado B: Barra poco oxidada⁽²⁾ 	Superficie con zonas mayoritariamente de color pardo rojizo, donde algunas poquitas costras y laminillas comienzan a soltarse, pero el núcleo, todos los resaltes y los nervios longitudinales se notan relativamente sanos. Las barras presentan pocas, pequeñas e insignificantes picaduras (puntos de corrosión) y prácticamente no pierde óxido suelto por manipulación.	Sin restricción de uso, salvo que en algunos casos se podría requerir una leve limpieza superficial con herramienta manual o mecánica (SP-2 o SP-3).
Grado C: Barra oxidada⁽²⁾ 	Superficie de color pardo rojizo, donde un porcentaje de los resaltes y nervios longitudinales se notan dañados y casi han perdido su forma original. Tiene varias costras y laminillas sueltas y solo unas pocas aún están adheridas, a simple vista presenta herrumbre y varias picaduras y cráteres (puntos de corrosión), pero pierde un poco de óxido suelto por manipulación.	Estas barras requieren obligatoriamente de limpieza superficial manual o motriz enérgica y profunda (SP2 o SP-3), y por ello su uso está condicionado a una verificación previa de la masa y características dimensionales de sus resaltes y nervios longitudinales, para verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos por la norma oficial chilena NCh204.Of2006.
Grado D: Barra muy oxidada 	Superficie de color rojizo y en ocasiones con zonas manchadas con matices de otros colores, producto del hollín y de otros agresivos del medio ambiente. La laminilla se ha desprendido en su totalidad y presenta muchas costras, muchas de las cuales se desprenden solas o con escobillado manual. El núcleo, los resaltes y los nervios longitudinales con bastantes cráteres o picaduras. Los resaltes y nervios desaparecen en algunas partes confundidos con los elementos de la corrosión. Las barras pierden bastante óxido y herrumbre por manipulación.	No sería recomendable el uso de estas barras, ya que al ser manipuladas y tratadas mediante cualquier método de limpieza superficial, es altamente probable una pérdida importante de su masa o de las características dimensionales de los resaltes, no cumpliendo así con los requisitos mínimos exigidos por la norma oficial chilena NCh204.Of2006.

Fuente: Gerdau AZA Manual de Armadura de Refuerzo para Hormigón. Año 2008.

4.3 Materiales de presfuerzo

Para entrar en este tema es preciso establecer las siguientes definiciones utilizadas y aceptadas comúnmente en la industria mexicana del presfuerzo:

4.3.1 Alambre

Elemento formado por una sola pieza de metal de forma cilíndrica y que usualmente presenta un diámetro menor a 3/8 de pulgada.

4.3.2 Torón

Elemento formado por un grupo de alambres dispuestos helicoidalmente sobre un alma central de alambre en la mayoría de los casos (figura 4.5). Un torón de siete alambres esta hecho de seis exteriores situados sobre un solo alambre que funciona como núcleo o alma.



Figura 4.5 Distintos tipos de torón

4.3.3 Cable o tendón:

Elemento formado por un grupo de torones, barras o alambres de alta resistencia para impartir presfuerzo al concreto (figura 4.6).

4.3.4 Barra

Elemento formado por una sola pieza de metal de forma cilíndrica y que usualmente presenta un diámetro mayor a 20 mm y que es posible aplicarle presfuerzo pero en una longitud significativamente menor a las usadas en un torón (figura 4.7).

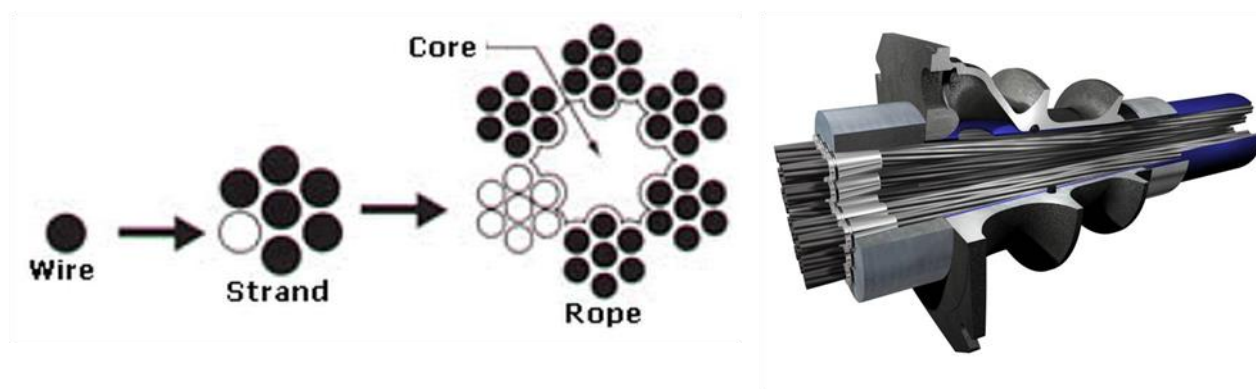
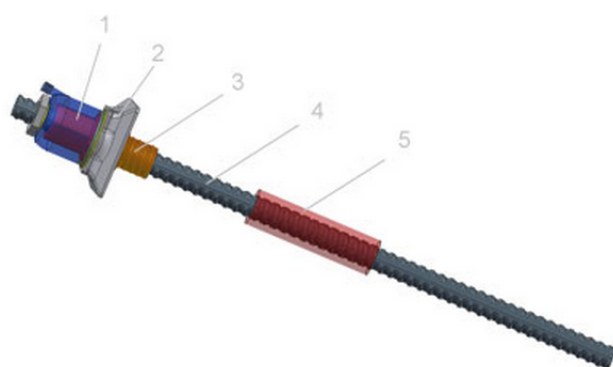


Figura 4.6 Esquemas de cables y forma de anclarlos



Sistema de Pretensado de Barra DYWIDAG

1. tuerca hexagonal
2. placa de apoyo
3. vaina
4. DYWIDAG barra roscada
5. acoplador

Figura 4.7 Barra DYWIDAG

4.3.5 Datos técnicos relevantes del torón

La especificación más común para torones de presfuerzo es la ASTM A416/A416M, *Especificación Estándar para Torón de Acero de Siete Alambres para Concreto Presforzado*.

Otras especificaciones menos comunes están disponibles para alambre de acero, torón con recubrimiento epóxico y torón indentado o estriado.

La ASTM A416/A416M establece el tamaño, resistencia a la ruptura, área nominal de sección transversal, peso nominal y requisitos de elongación para los torones. La especificación también incluye el grado 250 (1700 MPa) y el 270 (1900 MPa) para torón relevado (aliviado) de esfuerzos y de baja relajación.

Los certificados de calidad proporcionan la sección transversal real y el módulo de elasticidad; deben acompañar a todos y cada uno de los rollos de torón. Estas dos propiedades físicas son indispensables para los cálculos de tensado. Los torones de baja relajación tienen un límite de fluencia mínimo mucho más grande que el torón relevado de esfuerzos, por lo que el material debe ser

perfectamente identificado como “baja relajación” o “relevado de esfuerzos” en el certificado de calidad. También este mismo certificado debe especificar que los torones cumplen con la adherencia mínima de acuerdo al procedimiento de prueba de la National Strand Producers Association. El incumplimiento de lo dicho anteriormente es causa suficiente para rechazar torón que no cumpla esta certificación. Para que en México sea posible que todos estos requisitos se cumplan en el certificado, es necesario que previamente sean establecidos como especificaciones en el contrato celebrado con el proveedor.

Cuando los embarques de torón son recibidos en la planta de prefabricados, los certificados de calidad del proveedor deben de revisarse para verificar el cumplimiento de las condiciones y especificaciones de la orden de compra. Los rollos de torón deben ser revisados para verificar que han sido apropiadamente etiquetados e identificados. La etiqueta debe contener la siguiente información:

- Fabricante
- Tamaño del torón (diámetro)
- Grado
- Número de colada

El torón debe ser inspeccionado para detectar la posible presencia de óxido excesivo, mellas (nicks) y rizos (kinks) ya que ellos pueden afectar negativamente en el desempeño del material. La ausencia de picaduras y una ligera oxidación, similar a mencionada en el apartado anterior de acero de refuerzo, son generalmente aceptadas, y se estudia más ampliamente en el apartado 6.3.2.

Los rizos y las mellas o melladuras en el torón, barras o alambres proveen una zona donde se propicia una concentración de tensión y el material puede fallar. El material que presente estas deformaciones debe ser rechazado. Los procedimientos de manejo en la planta de prefabricado deben evitar amellar o rizar el torón o alambre cuando están siendo manipulados en la planta o cuando se colocan para la aplicación del presfuerzo.

4.3.5.1 Aplicación de calor al torón

Otra situación relacionada con la integridad del torón que será utilizado en presfuerzo y que debe ser seriamente atendida es la relacionada a la aplicación intencional o no de calor por fuentes externas tales como equipos de corte con soplete, arco eléctrico o algún otro que son comúnmente utilizados en las plantas mexicanas de prefabricados.

Los alambres utilizados para fabricar los torones son mucho más complejos que el acero de refuerzo, por lo que, deben ser tratados con mucho más cuidado.

Para hacer más entendible el por qué se deben de cuidar las condiciones térmicas del torón es preciso entender el proceso de fabricación.

Los alambres del torón obtienen su alta resistencia de la composición química del acero, del enfriamiento controlado de las palanquillas o planchones en la siderúrgica y de su trabajo en frío. La composición química es tal que solo los planchones tendrán una resistencia última de 965 MPa. La palanquilla es entonces procesada a través de una serie de cuñas, cada una de las cuales reducen su

diámetro e incrementa su longitud. Durante el proceso de extrusión de los alambres, **los granos originales en el acero son laminados en fibras alargadas interconectadas** que incrementan la resistencia a más de 1862 MPa.

Un torón de siete alambres es creado cubriendo helicoidal y ajustadamente con seis alambres externos un solo alambre central para formar un torón “verde”. Como resultado del forjado del alambre y colocación de los seis alambres, los alambres del torón verde presentan esfuerzos internos. Si un torón verde fuera tensado alcanzaría rápidamente el punto de fluencia, la relación carga-deformación no sería más que una línea recta y la pérdida de tensión debido a la relajación sería alta.

El torón verde es sometido a un tratamiento térmico subcrítico a una temperatura de unos 385°C por un tiempo muy reducido y entonces se somete a enfriamiento por agua. Este tratamiento corto no tiene un efecto apreciable sobre las propiedades de los alambres, pero ya que el punto de fluencia cae conforme la temperatura se eleva, muchos de los esfuerzos creados en la fabricación de los alambres son aliviados. El torón aliviado de esfuerzos presenta mejores propiedades elásticas y de relajación que el torón verde.

El acero de baja relajación, que es un desarrollo reciente, ahora es usado en la mayoría de las estructuras de concreto presforzado; tiene una pérdida de tensión debida a la relajación menor al 20% del que presenta el torón aliviado de esfuerzos cuando ambos son sometidos a tensión del 70% de su capacidad última. El torón de baja relajación es elaborado a partir de torón verde pero sometiéndolo a una alta tensión durante el proceso de alivio de esfuerzos. Este tratamiento provoca un 1% de deformación permanente y elimina muchas de las condiciones que causan la relajación por tensión.

Cuando un torón es sometido a calor excesivo, y ya que el enfriamiento no es controlado como en el tratamiento térmico subcrítico, **las fibras revierten su condición a cristales o granos** los cuales son idénticos a aquellos que le dieron origen en la palanquilla con una resistencia última de unos 965 MPa.

La microfotografía mostrada (figura 4.8) fue obtenida cortando longitudinalmente un alambre por la mitad, puliendo la superficie cortada y tomando fotografías a muy alta magnificación. Se puede apreciar la estructura fibrosa de un alambre sano del lado izquierdo y la estructura recristalizada de una parte sobrecalentada del lado derecho.

El alambre no tiene que estar bajo tensión para sufrir el daño por calentamiento y, en muchos casos, el daño no es perceptible a simple vista después de que el alambre se ha enfriado.

Las fuentes más comunes de calor que dañan al torón en un patio de colado son: arcos de corrientes eléctricas, calor directo de sopletes de corte y metal caliente salpicado y derivado (escoria) de procesos de soldadura o corte. Afortunadamente, tomando precauciones simples, el daño por calentamiento de estas fuentes puede ser evitado.



Figura 4.8 Microfotografía tomada a 150X de magnificación. Note la transición de la estructura fibrosa fría del lado izquierdo a una estructura granular afectada por calor en el lado derecho. *Fuente: Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute, V. 35, No. 6, November-December 1990*

Como regla general, nunca ejecute algún proceso de soldadura cerca de torones. Un arco puede saltar de una cimbra metálica, de un accesorio de deflexión o de un carrete metálico a un torón.

Nunca corte acero de presfuerzo sobre la bobina o carrete usando corte con flama. Mejor utilice cortadores de cuchillas o cizallas.

Se puede utilizar equipo de oxiacetileno para cortar torones cuando sean demasiado largos en la cama o línea de colado, o para cortarlos después de que el concreto ha sido curado (transferencia de presfuerzo). En estos dos casos, si el torón es quemado directamente en sentido perpendicular, el área dañada por calentamiento rara vez se extenderá más de 2.54 cm del extremo del corte. Se debe asegurar que el calor de la antorcha y el metal derretido salpicado se mantenga alejado del torón que estará en algún momento bajo tensión.

Al momento de escribir este trabajo, no ha sido posible establecer numéricamente la cantidad de accidentes graves o fatales debidos a la falla de un torón bajo tensión, pero sin duda, la mayoría de esos accidentes pueden evitarse si se obedecen los principios y reglas arriba mencionados y además se hacen del conocimiento del personal de campo para que ellos mismos eviten en la medida de sus posibilidades y responsabilidades el daño del torón por calentamiento.

4.3.5.2 Mecanismos de adherencia del torón

Adicionalmente se tratará el tema de la adherencia entre el torón y el concreto, partiendo de la siguiente definición:

Adherencia: mecanismo a través del cual la tensión de un torón es transferida al concreto pero en compresión. El torón de presfuerzo y el concreto en un elemento presforzado interactúan mediante la adherencia. El concepto completo de presfuerzo y concreto presforzado como un material estructural está, en sí, basado en esta adherencia entre el torón y el concreto. Sin adherencia, no ocurriría la transferencia de presfuerzo y el elemento no trabajaría integralmente.

Los tres mecanismos por los cuales se genera la adherencia entre el concreto y el torón, en un elemento presforzado, son:

- ✓ Adhesión
- ✓ Efecto de Hoyer (acción de cuña)
- ✓ Trabazón mecánica

Adhesión — Existe un efecto adhesivo pequeño de origen electro-químico entre el tendón y el concreto que lo circunda y que contribuye con la adherencia en los elementos pretensados. Esta adhesión existirá solo previamente a que se presente algún deslizamiento que pudiera ocurrir entre el torón y el concreto. Por lo tanto, este componente de la adherencia es a menudo despreciado.

Efecto de Hoyer (acuñamiento) — Cuando un torón se tensa, su diámetro y área de sección transversal se reduce a una cantidad determinada por la relación de Poisson del torón. Una vez realizada la transferencia de presfuerzo (torón → concreto), el torón cercano a los extremos, de una viga por ejemplo, tiende a regresar a su estado original sin presfuerzo. Sin embargo, el concreto circundante impide la expansión lateral del torón para regresar a su estado inicial en diámetro y área. Esta restricción, en la forma de una fuerza normal (radial) del torón, induce una fuerza de fricción a lo largo del eje longitudinal del torón. Dicha fuerza de fricción se opone a cualquier movimiento relativo entre el torón y el concreto que lo rodea. Ya que el efecto de Hoyer puede ser visualizado como un acuñamiento del torón de sí mismo reaccionando contra el concreto que está cerca e impide el deslizamiento o penetración del torón, a menudo se le llama acción de acuñamiento o cuña. (Figura 4.9)

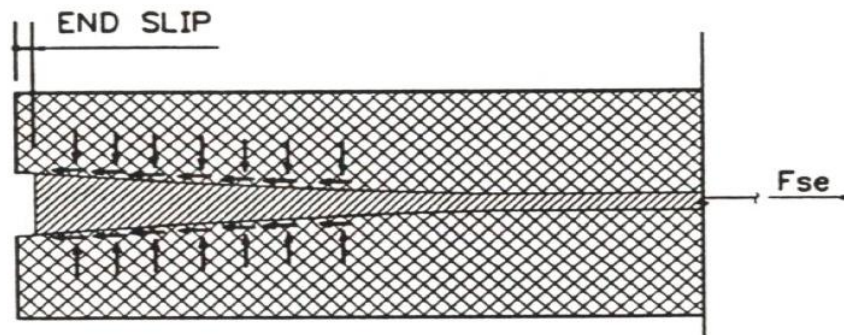


Figura 4.9 El efecto de acuñamiento (Hoyer) tomado de Russell y Burns, 1996

Fuente: Tesis para obtener el grado de Doctor, Development of High Performance Precast/Prestressed Bridge Girders Amin K. Akhnoukh, University of Nebraska, aakhnoukh@mail.unomaha.edu

Trabazón mecánica — Como ya lo mencionamos anteriormente, los torones de siete hilos consisten en seis colocados de forma helicoidal sobre uno central llamado alma. A causa de esta geometría helicoidal, una componente de la fuerza normal entre los alambres externos del torón y el concreto que los rodea actúa a lo largo del eje del torón. Esta componente actúa para resistir el deslizamiento entre el torón y el concreto. Este mecanismo es similar a la resistencia de extracción que proveen las corrugaciones del acero de refuerzo en el concreto reforzado. La trabazón mecánica se desarrollará en elementos presforzados solo si se impide la torsión del torón. Cuando la torsión del torón no se restringe, el torón simplemente se deslizará dentro del elemento, ya que las fuerzas normales no se generarán. Este mecanismo es altamente dependiente de diferentes factores y parámetros de diseño incluyendo el nivel de confinamiento en los extremos del elemento, resistencia del concreto, condición de la superficie del torón, número y espaciamiento entre torones. La distribución de esfuerzos del concreto alrededor del torón debido a la trabazón mecánica no es uniforme como puede observarse en la siguiente figura 4.10.

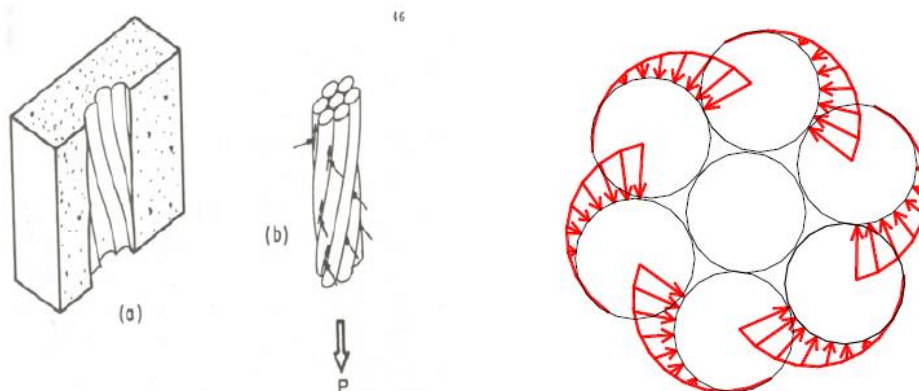


Figura 4.10 Trabazón mecánica, tomado de Salmons y McCrate, 1973

La contribución de los tres efectos a la longitud de transferencia puede mostrarse en un esquema en la figura 4.11 que muestra las magnitudes esquemáticas; de donde se puede observar que la mayor aportación viene del acúñamiento, seguido de la trabazón mecánica, como se muestra en la figura 4.11.

El desarrollo de la longitud de adherencia de los torones de presfuerzo, representados por L_d , definida como el empotramiento mínimo necesario para alcanzar la capacidad última de la sección sin el deslizamiento del torón (ligada directamente a la adherencia torón - concreto) representa un parámetro importante para cuestiones de diseño. La tensión del torón deberá alcanzar un punto de fluencia máximo sin que se presente la falla de la adherencia torón – concreto.

Para cuestiones constructivas es importante que se tenga el debido cuidado de que la adherencia se garantice siguiendo las buenas prácticas constructivas que se mencionan en éste y otros documentos.

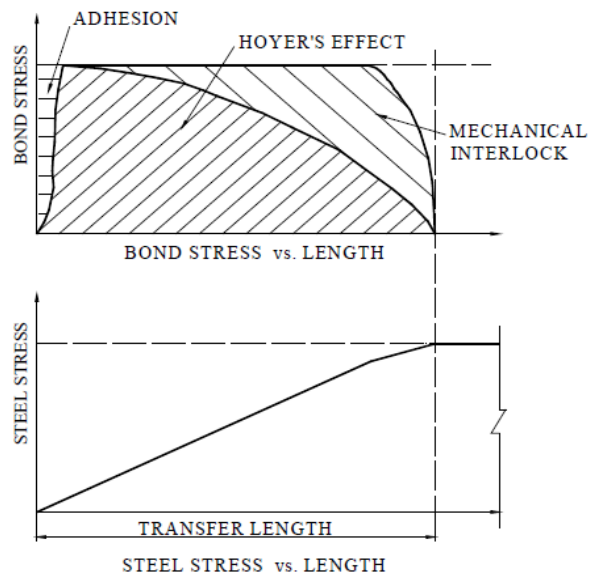


Figura 4.11 Interrelación entre las fuerzas que causan adherencia, tomado de Russell y Burns, 1996

4.3.6 Anclajes del acero de presfuerzo

Los anclajes de los torones que incluyen barriles, cuñas y tapas con resorte (figura 4.12), para presfuerzo deben ser designados y manufacturados para soportar los esfuerzos impuestos por el torón tensado.

- Las cuñas cónicas deben soportar al menos 95% de la resistencia última del torón.
- Los barriletes deben soportar al menos 100% de la resistencia última del torón.

Estos dispositivos deben anclar positivamente el torón sin deslizamientos o asentamientos después de que ajusten en su lugar. La misma marca y tamaño de cuñas, barriletes y tapas deben ser usados siempre juntos. Es decir, no deben mezclarse barriletes y cuñas de marcas distintas ya que eso pudiera significar tamaños ligeramente distintos que pudieran causar algún problema serio o incompatibilidad.

Los anclajes de cables de postensado deben cumplir los requisitos establecidos en la sección 3.2.2 del MNL- 116, *Manual for Quality Control for Plants and Production of Structural Precast Concrete Products* del PCI:

- 1) Los anclajes para cables o tendones adheridos probados en un estado de no adherencia deben desarrollar 95% de la capacidad última del acero de presfuerzo, sin exceder el asentamiento previsto.
- 2) Los anclajes para cables o tendones no adheridos deben desarrollar 95% de la capacidad última del acero de presfuerzo. La cantidad de deformación permanente debe limitarse a un nivel tal que no disminuya la capacidad última del ensamble.

- 3) La mínima elongación de torones no adheridos en un ensamble de anclaje, durante la carga de prueba, no debe ser menor que el 2% cuando sea medido en una longitud de 3 m.

Los arreglos de anclaje deben de carecer de poros y estar libres de arena, cavidades, vacíos y otros defectos. Los anclajes deben de inspeccionarse para detectar estos posibles defectos cuando sean recibidos y rechazarlos cuando sea necesario.

Algunos fabricantes, como por ejemplo MIBATEC, establecen un periodo de vida útil (expresado en número de usos máximos) para los componentes de los anclajes que producen, como en este caso:

- Usos máximos del barril: 140 reusos
- Usos máximos de las cuñas: 50 reusos

4.3.7 Ductos y vainas (fundas)

Los ductos utilizados para cables postensados adheridos deben ser lo suficientemente resistentes para mantener su geometría, resistir deterioro irreparable durante la producción y prevenir la entrada de pasta de cemento y agua excesiva durante el colado de concreto. Los ductos para tendones adheridos deben revisarse para el cumplimiento dimensional de los parámetros de diseño.

El grout para la adherencia de los tendones postensados es generalmente una mezcla de cemento, agua y un aditivo compensador de volumen para evitar la contracción por secado. Si la sección transversal de las vainas o ductos engargolados es más que cuatro veces la sección transversal del tendón de postensado, se puede adicionar un agregado fino al grout. Las vainas para tendones no adheridos (sin grout) deben de ser de polipropileno, polietileno de alta densidad u otro componente plástico que no sea reactivo con el concreto (figura 4.13), con el recubrimiento del tendón o con el acero del tendón. Los tendones son normalmente recibidos en la planta ya enfundados y deben ser revisados para confirmar el enfundado completo del tendón. El tendón o el torón está cubierto de grasa u otro “rompedor” o inhibidor de adherencia aprobado y entonces la funda o vaina es colocada de forma ininterrumpida sobre el tendón. El recubrimiento del tendón debe ser químicamente estable y no reactivo con el tendón, el concreto o la funda. El recubrimiento ocupará el espacio anular entre la funda o vaina y el torón.



Figura 4.12 *Diversos elementos de anclaje y conexión.*



Figura 3.13 *Fundas de torón y ductos (engargolados) para postensado.*

4.3.8 Accesorios y materiales diversos

Puede darse el caso que materiales adicionales se tengan que utilizar para conexiones, insertos, aparejos de izaje u otras aplicaciones. La información referente al tamaño y límite elástico se le debe proporcionar al ingeniero o responsable del proyecto para su aprobación y aceptación. Los proveedores de material deben emitir certificados de calidad. Los materiales deben ser supervisados a la llegada y deben ser inspeccionados para revisar si cumplen la geometría especificada y las cantidades solicitadas.

Todas las superficies metálicas expuestas al medio ambiente o que serán sujetas a condiciones de corrosión durante su vida de servicio deben estar protegidas por o ser construidas con materiales no corrosivos. El daño por corrosión puede causar desconchaduras o picaduras y éstas pueden reducir significativamente la resistencia del elemento. Cuando se usan recubrimientos, como por ejemplo epóxicos, se debe tener cuidado de proteger el recubrimiento tanto como sea posible durante su manejo. El deterioro o daño se puede aún presentar, aunque no esté instalado, requiriendo de un resane utilizando el recubrimiento original. La protección contra corrosión puede consistir en uno de los siguientes puntos:

- ✓ Pintura primaria de taller.
- ✓ Pintura enriquecida de zinc.
- ✓ Revestimiento metalizado de zinc.
- ✓ Revestimiento de cadmio.
- ✓ Galvanizado en caliente por inmersión.
- ✓ Cubierta epóxica.
- ✓ Uso de acero inoxidable.

Existen normas ASTM o especificaciones de proyecto que deben cumplirse dependiendo del recubrimiento deseado.

4.3.9 Dispositivos o aparejos de izaje y manejo

Los dispositivos de izaje generalmente se ubican dentro de tres categorías:

- ❖ Ojal de torón
- ❖ Insertos manufacturados estándar
- ❖ Varillas pulidas

El acero de refuerzo nunca debe ser usado como dispositivo de izaje, porque es frágil y puede fallar debido a cargas accidentales como las que se presentan durante el desmolde y el manejo. En ocasiones muy especiales donde el ingeniero, responsable del proyecto estructural, indica que este

material si puede ser utilizado; deben seguirse una serie de reglas muy específicas para evitar confusiones, inseguridad, fallas estructurales entre otros problemas.

Puede darse el caso de que algunos elementos se prefabrican en posición horizontal y su posición final es vertical, p.e. columnas y muros (figura 4.14); en estos casos especiales donde existe un giro, la operación mecánica de los dispositivos de izaje cobra especial importancia, ya que se deben de resistir esfuerzos distintos a los generados en el izaje simple.



Figura 4.14 Muros prefabricados en posición horizontal

De no ser adecuadamente diseñados los dispositivos de izaje (figura 4.15) presentarán problemas que en ocasiones resultan en daños que implican reparaciones costosas o problemas más serios o graves.

Los ojalos de torón, equivocadamente llamados ganchos de izaje, son ampliamente utilizados en la industria para el izaje de elementos prefabricados de concreto (figura 4.16). El número de ojalos requerido es determinado considerando el total de la carga esperada incluyendo el peso del producto y las fuerzas de impacto que se presentan durante el proceso de desmolde y manejo. Cuando es utilizado más de un ojal por punto de izaje, todos los torones deben ser doblados similarmente y colocados para asegurar que la carga se distribuya uniformemente entre los torones. Para asegurar la alineación de dos o más torones se deben introducir en un conduit antes de su doblado, en algunos proyectos también se

puede utilizar tubo de mofle. Los torones sometidos a cambios físicos cuando son doblados o hechos ojales pueden generar esfuerzos, por lo que, se debe tener cuidado al realizar dobleces en torones múltiples.



Figura 4.15 Daños causados en el elemento por la aplicación de esfuerzos en los puntos de izaje.

Los planos de taller deben definir claramente las dimensiones del ojal para su fabricación y colocación o hacer referencia a un detalle estándar desarrollado por el departamento de ingeniería de la planta.

Los insertos prefabricados especializados o dispositivos de izaje para uso en la industria del concreto prefabricado (figura 4.17) están disponibles con numerosos proveedores. Los fabricantes de estos dispositivos deben proporcionar información de pruebas, así como cargas de trabajo y cargas últimas o de ruptura para servir como guía a los ingenieros en la selección de los aparejos apropiados. Existen muchos tipos de dispositivos (figura 4.17), pero las recomendaciones del fabricante son críticas si se quiere que los dispositivos tengan un desempeño como el diseñado.

Los accesorios de conexión permanente pueden en algunos casos ser utilizados para el manejo. En éste caso, los accesorios deben ser apropiadamente diseñados para asegurar que no ocurra algún daño a la conexión o al elemento. La resistencia del concreto debe tenerse en consideración al momento del desmolde. Los esfuerzos debido al desmolde y al manejo pueden exceder las cargas de servicio. El ingeniero debe tener en cuenta esto y tomar consideraciones en el número y ubicación de los dispositivos de izaje (figura 4.18) con el fin de limitar los esfuerzos en los aparejos y el concreto.

Existen trabajos de investigación que se están realizando con referencia a los dispositivos de izaje, al momento de realizar el presente trabajo no se cuenta con la información estandarizada suficiente al respecto, como se puede leer en la siguiente liga electrónica:

<http://ict.illinois.edu/projectspotlight/081507spotlight.html>



Figura 4.16 Ojales de izaje previos al colado en un muro.



Figura 4.17 Diversos dispositivos de izaje especializados.

También resulta que en México muchos de estos accesorios no se encuentran disponibles comercialmente, debido a la poca demanda o conocimiento que se tiene de ellos. Su utilización e importación o fabricación puede ser económicamente viable, dependiendo de la magnitud y características de los proyectos, ya que ofrecen numerosas ventajas entre las que podemos destacar:

- rapidez de maniobras y colocación,
- estética,
- seguridad,
- control de calidad,
- en ciertos casos: economía.



Figura 4.18 Ubicación y operación de dispositivos de izaje en losas.

4.4 Electrodo

Los electrodos para la soldadura de arco con electrodos revestidos (SMAW) deben cumplir los requisitos de la AWS A5.1 ó A5.5. Los electrodos y el revestido para la soldadura de arco en presencia de gas (GMAW) y la soldadura de arco con fundente (FMAW) deben de cumplir la norma AWS A5.18 ó AWS A5.20.

SMAW es un método simple y versátil para soldadura de diferentes metales base. El proceso utiliza un electrodo compuesto de un alma de alambre rodeado de fundente, el cual tiene la apariencia de una mezcla de arcilla. El fundente provee una protección para el alambre y adiciona componentes químicos a la soldadura.

Los electrodos de bajo contenido de hidrogeno son empaquetados en contenedores herméticos para prevenir contaminación hasta su primer uso. Los electrodos en contenedores sellados pueden ser almacenados indefinidamente sin peligro de absorción de humedad. Estos electrodos, una vez abiertos, deben ser almacenados en hornos a la temperatura recomendada en los estándares de la AWS D1.1 para prevenir la absorción de humedad dentro del fundente proveniente del medio ambiente. La humedad afecta adversamente la habilidad de cobertura para estabilizar adecuadamente el arco, desplazar el aire y aislar el metal soldado caliente; por lo que, reduce la calidad de la soldadura. Adicionalmente, la humedad aporta hidrogeno a la soldadura fundida potencializando que se desarrolle una soldadura frágil. Los electrodos que llegarán a humedecerse deben ser desechados.

Por otra parte, los electrodos que no son bajos en hidrogeno no deben mantenerse en hornos de secado. Deben almacenarse a la temperatura ambiente.

GMAW y FMAW son procesos diferentes, pero tienen similitudes en el equipo y la aplicación. Los electrodos para el proceso GMAW son sólidos y todo el gas de revestimiento es aportado por una fuente externa. Los electrodos para el proceso FMAW son tubulares y contienen todos o algún fundente.

Al arribo de algún envío de equipo o electrodos se debe revisar, por parte del soldador, para determinar si dicho envío cumple con las especificaciones solicitadas. En caso de utilizar electrodos o gas inadecuados se puede reducir enormemente la calidad y capacidad de una soldadura.

5 Concreto para elementos prefabricados

5.1 Introducción

El concreto hidráulico es una mezcla de agregados pétreos naturales, procesados o artificiales, cemento hidráulico y agua, a la que además se le puede agregar algunos aditivos. Generalmente, esta mezcla es dosificada, en unidades de masa (más recomendable), en plantas de concreto premezclado y; en masa y/o en volumen en las obras. Los aditivos se dosifican en volumen o en masa según su presentación: en polvo, en masa y líquidos en volumen.

Existen diferentes instituciones a nivel nacional e internacional que tienen por objeto la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, recomendaciones y normatividad relacionada con el concreto, entre las que podemos mencionar:

Instituto Mexicano de Cemento y del Concreto (IMCYC)
American Concrete Institute (ACI) Capítulo Centro – Sur
Portland Cement Association (PCA)
Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), entre otros.

5.2 Propiedades del concreto fresco y endurecido

El concreto fresco tiene las siguientes propiedades importantes:

Trabajabilidad.
Consistencia.
Temperatura.
Contenido de Aire.
Masa Unitaria.

El concreto endurecido tiene las siguientes propiedades importantes:

Durabilidad.
Impermeabilidad.
Cambio de volumen (contracción por secado y contracción por flujo plástico).
Resistencia a la compresión.

Cada elemento que constituye la mezcla que forma el concreto participa en mayor o menor grado en alguna característica y se esquematiza en la tabla 5.1.

	<i>Costo</i>	<i>Resistencia</i>	<i>Masa</i>	<i>Volumen</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Trabajabilidad</i>
Cemento	++++	++++	++	++	+	+
Agregado grueso	+++	+++	++++	++++	++++	++++
Agregado fino	++	++	+++	+++	++	+++
Agua	+	+	+	+	+++	++

Tabla 5.1. Incidencia esquemática de los componentes del concreto normal en algunas propiedades/características importantes

- **Trabajabilidad.** Es la facilidad con que pueden mezclarse los ingredientes de la mezcla, aunada a la capacidad de ésta para manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de homogeneidad. Se mide por la consistencia o fluidez con la obtención del revenimiento (norma mexicana NMX-C-156-1997-ONNCCE). Una mezcla bien proporcionada y trabajable perderá el revenimiento lentamente, en cambio una mezcla deficiente no tendrá cohesión, ni plasticidad y se segregará. Según las normas mexicanas, es posible rechazar un camión premezclador (olla) si el revenimiento no cumple con las tolerancias de revenimiento que es una medida indirecta de trabajabilidad.
- **Consistencia.** Se refiere al carácter de la mezcla respecto a su fluidez tanto en su estado seco como fluido.
- **Temperatura.** Es uno de los factores más importantes que influyen en la calidad, el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto. Una mezcla con temperaturas iniciales altas tenderá a tener una resistencia superior a la normal en edades tempranas y más baja de la normal a edades tardías. La temperatura del concreto afecta el desempeño de los aditivos. El control de la temperatura del concreto dentro de los límites aceptables puede evitar problemas inmediatos y futuros. La prueba para determinarla está basada en la ASTM C 1064M – 05.
- **Contenido de aire.** Se refiere a la cantidad de vacíos de aire tanto atrapado como incluido, usualmente utilizado para adicionar protección al concreto contra condiciones adversas de uso; tales como congelamiento, deshielo, ambientes marinos, entre otros. Las pruebas para determinarlo son ASTM C231, ASTM C173 y la ASTM C138. En el caso de México se tiene la NMX-C-158-ONNCCE-2006 referente al Método Volumétrico, la NMX-C-162-ONNCCE-2010 para determinar el contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico y la

determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión mediante la norma NMX-C-157-2006.

- **Masa unitaria.** Es una característica importante para controlar la calidad del concreto, ya que una densidad más baja puede afectar el desempeño del concreto. Un cambio en la densidad de un diseño de mezcla dada, puede indicar: 1) cambios de agregados, 2) cambio de contenido de aire, 3) cambio en el contenido de agua, 4) cambio en proporciones de ingredientes, 5) cambio en el contenido de cemento. Para México aplicaría la norma NMX C-162 2010.
- **Durabilidad.** Es la capacidad de resistencia a la intemperie, a la congelación y descongelación, a la acción de agentes químicos y al desgaste. Esta propiedad se relaciona directamente con la vida útil y el desempeño que la estructura tendrá bajo ciertas condiciones y situaciones. Depende mucho de llevar a cabo una serie de prácticas durante la fase de construcción de un proyecto. No existe una medida directa pero se puede relacionar a diversos parámetros.
- **Impermeabilidad.** Se logra reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. El exceso de agua deja vacíos y cavidades después de la evaporación y si estos están interconectados, el agua puede penetrar o atravesar el concreto. El contenido bajo de agua en la mezcla, la inclusión de aire y el curado óptimo y eficiente del concreto, aumentan la impermeabilidad.
- **Cambio de volumen.** La expansión debida a las reacciones químicas de los ingredientes del concreto durante su hidratación ocasiona la *contracción del concreto durante su secado*, así como la aparición de grietas; este fenómeno conocido también por su nombre en inglés como *shrinkage* tiene sus efectos más severos cuando se presenta una evaporación rápida de las superficies del concreto expuestas tanto al frío, calor, corrientes de viento, radiación solar, etc.

La *contracción por flujo plástico (creep)* es una contracción a largo plazo que se presenta en el concreto debido principalmente a las cargas que actúan sobre él; incluyendo la gravedad, ésta característica es poco estudiada aún, pero tiene relevancia en obras de magnitud e importancia altas, tales como:

- Puentes con grandes claros,
 - Edificios muy altos,
 - Instalaciones nucleares.
- **Resistencia.** Se determina mediante una muestra en forma de cilindro de 30 x 15 cm usualmente, sometida a esfuerzos de compresión aplicados a una velocidad normada. Como el concreto aumenta su resistencia conforme pasa el tiempo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad. Desde el punto de vista normativo se toman como referencia los siguientes códigos del ACI (American Concrete Institute): C192 (Investigaciones y pruebas de laboratorio), C31 (Investigación y pruebas con especímenes de

campo), C39 (Procedimiento de prueba) y C42 (Pruebas de núcleos de concreto obtenidos por perforación) y las normas mexicanas NMX-C-83-ONNCCE-2002 (Prueba de resistencia a la compresión con especímenes de concreto cilíndricos) y NMX-C-169-1997-ONNCCE (Extracción y prueba de núcleos o corazones de concreto y sometidos a compresión).

5.2.1 Trabajabilidad

Según la Portland Cement Association (PCA) se le llama trabajabilidad a la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y al grado que resiste a la segregación. El concreto debe ser trabajable pero los componentes no deben separarse durante el transporte y el manejo. Desde el punto de vista práctico y operativo del productor de prefabricados, en esta característica reside una gran importancia e impacto para la producción.

El nivel de trabajabilidad que se requiere para una buena colocación de concreto depende de:

- método de colocación,
- tipo de consolidación,
- tipo de concreto,
- geometría del elemento,
- densidad de acero.

Los factores que influyen en la trabajabilidad de un concreto son:

- el método y la duración del transporte,
- cantidad y características de los materiales cementantes,
- revenimiento del concreto,
- tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos,
- aire incorporado,
- cantidad de agua,
- temperatura del concreto y del aire,
- aditivos.

La distribución de las partículas del agregado y la presencia de aire incorporado participan considerablemente en el control de la segregación y en el incremento de la trabajabilidad. La figura 5.1 indica la relación de la temperatura del concreto al momento de la colocación sobre la consistencia o revenimiento y el efecto sobre la trabajabilidad potencial en las mezclas.

La granulometría -en su conjunto de los agregados- puede afectar significativamente la trabajabilidad. Una curva granulométrica suavizada, aproximadamente paralela a los límites de indicados en la norma ASTM C33, puede marcadamente incrementar la trabajabilidad. En contraste, una granulometría abierta o con intervalos abiertos como las utilizadas en el concreto arquitectónico o poroso para obtener ciertos acabados, con prácticamente todo el agregado retenido en dos o tres mallas o cribas, puede representar un verdadero problema con respecto a su trabajabilidad.

Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad son: consistencia, segregación, movilidad, cohesión, capacidad de ser bombeado, sangrado y facilidad de acabado. La consistencia es considerada una buena referencia de trabajabilidad. El revenimiento se usa como una medida de la consistencia y de la humedad del concreto. Un revenimiento bajo indica que se trata de una consistencia rígida y que la muestra presenta poca humedad. En este caso, la colocación y compactación del concreto se dificultarán y las partículas más grandes de agregados pueden separarse de la mezcla. Sin embargo, no debe inferirse que una mezcla más húmeda y fluida será más trabajable. Si la mezcla es muy húmeda puede presentarse segregación y formación de huecos. Lo más recomendable es que siempre la consistencia sea lo más baja posible pero que se permita una colocación adecuada con la ayuda de los equipos de consolidación disponibles.

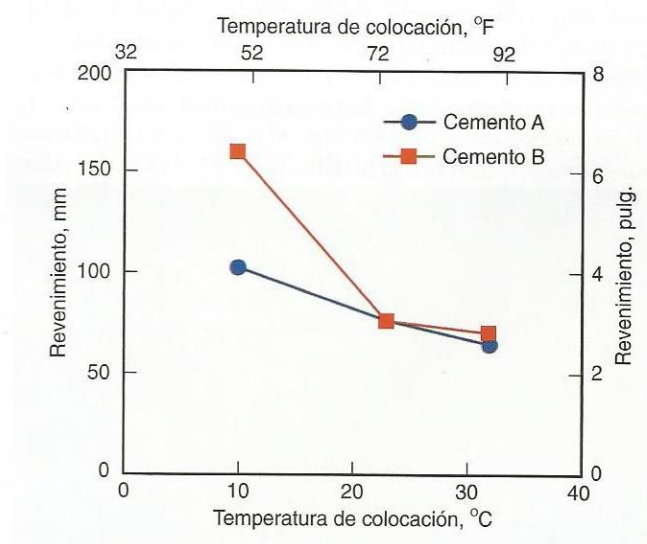


Figura 5.1 Efecto de la temperatura de colocación en el revenimiento y la trabajabilidad de dos concretos con diferentes cementos. Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, PCA

El aire incluido mejora la trabajabilidad del concreto, especialmente en mezclas pobres (de bajo contenido de cemento). Debido a que la trabajabilidad se mejora con la inclusión de aire, se puede reducir considerablemente el contenido de agua y arena.

El revenimiento no debe de incrementarse por la sola adición de agua, en una cantidad mayor a la del diseño de la mezcla, sin la autorización específica del ingeniero responsable o de la gerencia. La adición de agua puede reducir la resistencia y durabilidad, causar segregación y sangrado y cambiar el color del concreto arquitectónico. Es una responsabilidad del personal de supervisión verificar que en las operaciones de mezclado y colocación de concreto no sea adicionada agua a la mezcla sin la autorización correspondiente.

Los aditivos reductores de alto rango pueden utilizarse para incrementar el revenimiento y mejorar la trabajabilidad sin la necesidad de adicionar agua. Estos aditivos son efectivos incrementando el revenimiento de 2.5 cm ó 5.0 cm a 20 cm sin la adición de agua. Este efecto desaparece con el tiempo, pero si el efecto de un reductor de agua desciende en el concreto provocando un revenimiento menor

debido a algún retraso - en caso de ser autorizado - más que agregar agua se puede agregar nuevamente aditivo si aún el concreto puede ser remezclado, es decir, si no ha comenzado su fraguado inicial.

Concreto autocompactable

Estos concretos son un resultado del desarrollo de nuevos aditivos, especialmente el reductor de agua de alto rango y a estos concretos se les conoce por sus siglas en inglés como SCC (Self-Consolidating Concrete). Se diseñan especialmente con agregados y aditivos que producen un concreto que no se segrega y que es altamente fluido, hasta tal punto que puede omitirse la vibración si se coloca apropiadamente.

En caso de requerirse, la siguiente guía PCI, *Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants* (TR-6) incluye detalles de calificación del material para SCC, proporcionamiento y aprobación de mezclas, cimbras, transporte, colocación, acabado, curado, pruebas de control de calidad y desempeño en general.

La calidad y el desempeño de un SCC dependen de las correctas proporciones de todos los componentes. Los cambios menores en las relaciones de agregados finos y gruesos o el agua de mezclado pueden conllevar a segregación de la mezcla o la pérdida de la habilidad de fluir. Es por esta razón que se requieren numerosas pruebas para afinar el diseño hasta lograr el desempeño deseado.

El personal de producción y de control de calidad no debe alterar cantidades de ingredientes al mezclar si no se está obteniendo la mezcla deseada. Se debe recurrir al diseñador de la mezcla para poder realizar los ajustes y reevaluar la mezcla para su utilización en la producción.

5.3 Relación: a/mc

El desempeño de un concreto está influenciado, en una gran parte, por la cantidad de todos los materiales cementantes y la cantidad de agua. Tales materiales como ceniza volante, puzolanas naturales, escoria de altos hornos y humo de sílice (microsílica) tienen propiedades similares al cemento y son llamados cementantes. Su peso es también incluido en el cálculo de la relación agua/materiales cementantes (*cementitious materials*).

La relación de peso del agua y el peso de todos los cementantes en una mezcla es llamada relación agua/materiales cementantes (a/cm). Por ejemplo 1.0 m³ de concreto que contiene 350 kg de cementantes y 140 kg de agua tiene una relación agua/materiales cementantes de 0.40, tal como se calcula a continuación:

$$\frac{a}{cm} = \frac{140 \text{ kg}}{350 \text{ kg}} = 0.400$$

Los concretos con una a/cm dentro del rango de 0.35 a 0.40 pueden ser diseñados apropiadamente con el uso de aditivos para resultar en un concreto que puede ser colocado y consolidado usando equipo y procedimientos convencionales.

Según el PCI, la relación a/cm establecida para un cierto diseño de mezcla no se debe exceder, y la a/cm para elementos prefabricados de concreto no debe exceder el valor máximo de 0.45 con una

tolerancia permitida durante la producción de ± 0.02 . La relación a/cm debe ser evaluada para juzgar la trabajabilidad requerida, para la colocación adecuada y para la consolidación efectiva.

La relación a/cm tiene efectos importantes en el volumen y la densidad del concreto, como se observa en la figura 5.2 y 5.3, lo que resulta finalmente en resistencias a la baja cuando se adiciona una mayor de cantidad de agua a la mezcla.

Una vez que se establece la a/cm para determinado diseño, está relación no debe ser alterada, en caso dado que se requiera un mayor revenimiento, éste debe ser alcanzado con el uso de aditivos.

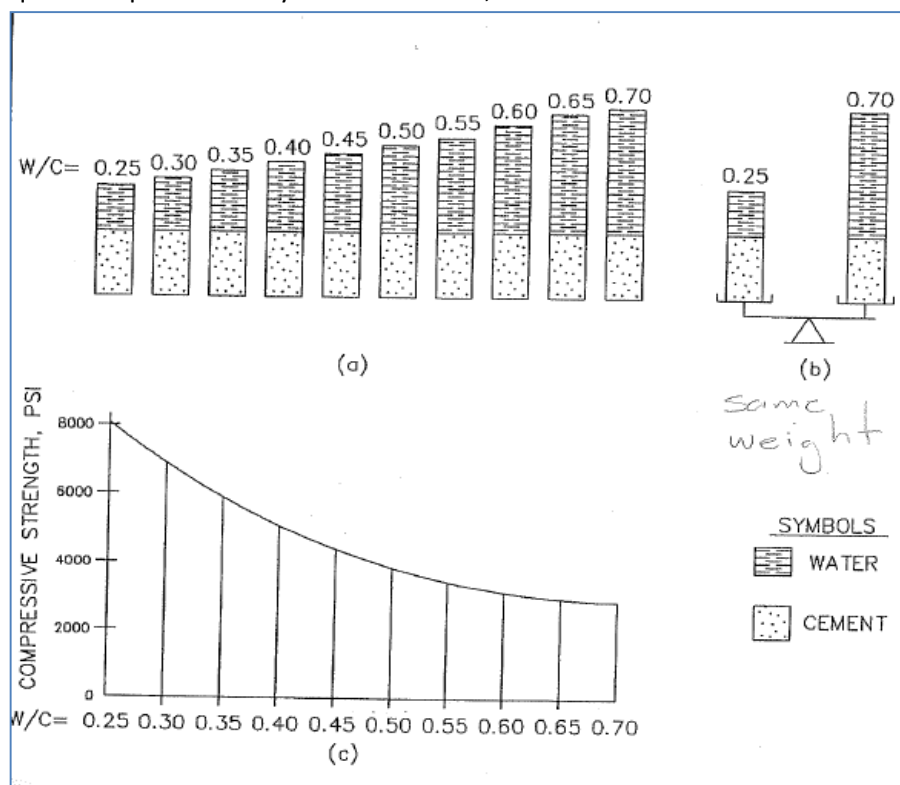


Fig. 5.2 (a) Especímenes elaborados con la misma cantidad de cemento variando su contenido de agua, la parte superior de cada espécimen representa el volumen de agua y la parte inferior el volumen de cemento (b) Una vez secos todos los especímenes tienen un peso igual aprox. (c) Esfuerzos de compresión típicos de concreto elaborados con las relaciones agua/material cementante.

Los especímenes con bajas relaciones a/cm son más impermeables que aquellos con una relación a/cm más alta. También los de baja relación a/cm son más resistentes a la abrasión, (forma indirecta de durabilidad en ciertos elementos) y al ataque de sulfatos; que aquellos con un alto a/cm . Resumiendo, las propiedades deseables del concreto son incrementadas utilizando bajas relaciones agua-materiales cementantes.

Usualmente en México cuando se requiere que los concretos tengan una buena impermeabilidad y se busca una alta durabilidad en estructuras de mucha importancia, se diseña el concreto con una a/cm por debajo o igual a 0.45.

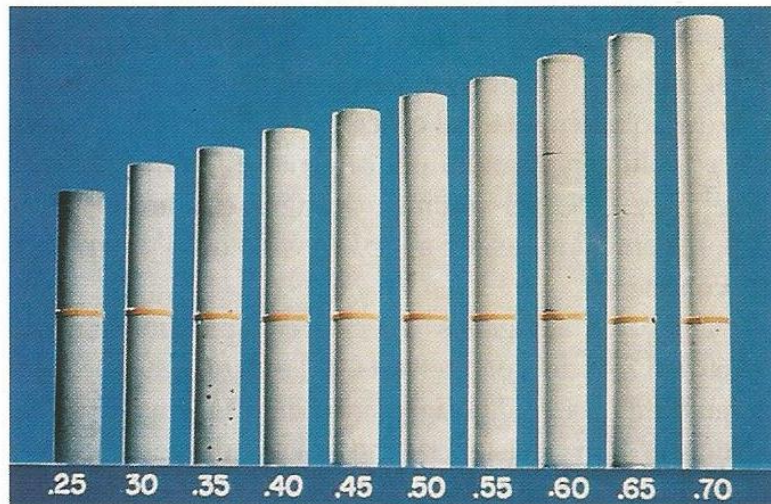


Fig. 5.3 Diez cilindros de pasta de cemento con relaciones agua-cemento de 0.25 a 0.70. La faja indica que cada cilindro contiene la misma cantidad de cemento. El aumento del agua, diluye el efecto de la pasta de cemento, aumentando el volumen, reduciendo la masa volumétrica y disminuyendo la resistencia. Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, PCA

5.3.1 Recomendaciones

- ✓ **Nunca debe permitirse que la gente de campo, operadores de equipo u otro personal no capacitado adicione agua a una mezcla ya diseñada**, ya que la relación a/cm se verá alterada, y como se ha visto, teniendo consecuencias directas con la pérdida de resistencia, pérdida de responsabilidad de la premezcladora en cuanto a la calidad, alteraciones de otras características del concreto, entre otras.
- ✓ La relación a/cm debe de evaluarse previamente al inicio de los trabajos, sobre todo en obras de gran magnitud o dificultad, para verificar una colocación y consolidación satisfactoria.
- ✓ En caso dado, es conveniente revisar previamente con el proveedor del concreto, las medidas a tomar en caso de que el revenimiento sea menor al solicitado (mezcla dura); usualmente su laboratorio deberá de tener aditivo adicional en obra para incrementar el revenimiento que ellos mismos deberán adicionar bajo su propia responsabilidad, cuidando que una vez adicionado el aditivo se haga lo homogeneización de los componentes a velocidad de mezclado al menos unas 30 revoluciones para garantizar uniformidad.
- ✓ Una vez que esté terminado el proceso anterior realizar la toma de muestras y pruebas requeridas; nunca antes.
- ✓ Considerar que el bombeo, clima y uso de ciertos aditivos combinados tienden a presentar un diferencial negativo en el revenimiento desde el camión revolvedor hasta el final de la bomba, por lo que es conveniente considerarlo sobre todo en trabajos donde está pérdida de

revenimiento afecte el rendimiento de colocación o cause problemas de consolidación entre otros.

- ✓ Es conveniente aclarar que, una vez dada la instrucción por parte del cliente al operador de un camión revolvedor, de adicionar cualquier componente extra al del diseño original de la empresa premezcladora, la calidad del concreto pasa a ser en automático responsabilidad del cliente que ordena dicho cambio, desligando a la empresa premezcladora del resultado final.

Existen concretos con muy bajo a/cm que son llamados a menudo “cero revenimiento”; dichos concretos son usados en máquinas para prefabricación de elementos de concreto (generalmente en extrudizadoras como las que fabrican losas Dy-core™, entre otras patentes) y en cortinas de presas principalmente. Una a/cm de 0.25 es considerada la mínima relación necesaria para proporcionar una hidratación completa del cemento en una mezcla tradicional, aunque operativamente es muy difícil lograrlo.

Cabe mencionar que los factores que influyen en el éxito de la colocación y consolidación de una mezcla con una a/cm dada, y que pueden variar incluso en horas, están:

- Clima,
- Sistema de transporte del concreto,
- Tiempo de mezclado y agitación,
- Temperatura del concreto en el lugar de la descarga,
- Geometría del elemento a colar,
- Densidad de acero,
- Forma de las partículas del agregado grueso,
- Granulometría.

La forma en tratar con cada uno de los puntos anteriores se revisará más adelante y cabe mencionar que muchos aspectos estarán ligados con la experiencia en obra. Es importante citar que existen actualmente cursos especializados y/o certificaciones que son de gran utilidad para lograr trabajos de excelente calidad y conocer a fondo las razones de muchos problemas prácticos que se presentan en obra.

5.4 Dosificación, mezclado, transporte, colocación y consolidación del concreto

5.4.1 Dosificación

Según la PCA, la dosificación es el proceso de medida, por masa o por volumen, de los ingredientes del concreto y su introducción en la mezcladora. Para producir un concreto con calidad uniforme, los ingredientes se deben medir con precisión para cada revoltura (coloquialmente llamada

bacha o bachada). La mayoría de las especificaciones requieren que la dosificación sea por masa y no por volumen. El agua y los aditivos líquidos se pueden medir con precisión tanto por volumen como por masa.

Las especificaciones, en general y normalmente, requieren que los materiales se midan para cada bachada en forma individual con la siguiente precisión:

- ✓ material cementante $\pm 1\%$
- ✓ agregados $\pm 2\%$
- ✓ agua $\pm 1\%$
- ✓ aditivos $\pm 3\%$

Las especificaciones, en particular para el concreto prefabricado, requieren de las siguientes tolerancias:

5.4.1.1 Tolerancias en el equipo de dosificación

Como ya se mencionó, los equipos de dosificación miden el peso o el volumen de cada componente usado en la mezcla y deben ser capaces de medir dentro de las tolerancias requeridas por el MNL-116 o MNL-117 (tabla 5.2).

Cemento	$\pm 1 \%$
Agua	$\pm 1.5 \%$ ó ± 1 galón, cualquiera que sea mayor, para bachas de un metro cúbico o más; para bachas de menos de un metro cúbico, el ± 1 galón debe ser reducido proporcionalmente.
Agregados finos	$\pm 2 \%$
Agregados gruesos	$\pm 2 \%$
Agregados acumulados	$\pm 1 \%$
Aditivos	$\pm 3 \%$ ó $\pm$ dosificación por saco de cemento, cualquiera que sea mayor. (Nota: esta última tolerancia es solo aplicable a bachas o revolturas de volumen grande asociadas a la producción de concreto premezclado. En bachas muy pequeñas, como las usadas frecuentemente en las plantas de prefabricados de elementos arquitectónicos, puede dificultarse mucho realizar mediciones dentro de $\pm 3 \%$)

Tabla 5.2 Tolerancias de peso en dosificación (según el ASTM C-94)

El personal de control de calidad debe inspeccionar periódicamente el equipo para asegurarse que está siendo operado y mantenido de acuerdo a los requerimientos de tolerancia.

5.4.1.2 Requerimientos en las básculas

Los manuales del PCI MNL-116 y MNL-117 requieren básculas separadas para el pesaje de cemento y agregados. Las básculas pudieran operar usando contrapesos o celdas de carga con indicadores de peso consistentes en una vara con indicador de balance, un reloj indicador o un indicador digital.

El personal de control de calidad debe inspeccionar periódicamente las básculas para asegurarse que están siendo operadas, mantenidas y son calibradas a intervalos de tiempo no mayores a seis meses. El peso total usado para la calibración debe exceder el peso máximo de la dosificación para cada báscula.

5.4.1.3 Requerimientos para el equipo de medición de agua

El agua puede ser medida por peso o volumen. Si el agua es medida por volumen, el aparato de medición debe tener una disposición tal que la presión variable en la línea de abastecimiento no afecte la medición.

El personal de control de calidad debe inspeccionar periódicamente los dispositivos de medición de agua para asegurarse que están siendo mantenidos apropiadamente y que están siendo calibrados a intervalos de tiempo que no exceden los tres meses.

5.4.1.4 Requerimientos para dosificadoras y plantas de mezclado

Existen diferentes tipos y tamaños de dosificadoras y plantas de mezclado que generalmente caen en una de las tres siguientes categorías: manual, semiautomática y automática.

Cualquiera de éstas es aceptable en tanto que la calidad del concreto sea consistente y las operaciones cumplan con la ASTM C94.

En caso de que algunos productores de concreto prefabricado no cuenten con su propia planta dosificadora y mezcladora, el personal de control de calidad debe inspeccionar regularmente las plantas internas o externas que suministren el concreto para confirmar el cumplimiento del PCI MNL-116, PCI MNL-117, las normas aplicables de la *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA) y las normas ASTM.

5.4.2 Mezclado

Es el proceso de integrar, uniformemente distribuidos en una mezcla homogénea, todos los componentes del concreto.

Si se realizó adecuadamente este proceso se obtendrán muestras tomadas de diferentes porciones de la mezcla con la misma masa volumétrica, contenido de aire, revenimiento y contenido de agregado grueso. Las diferencias máximas permitidas en la evaluación de la uniformidad de la revoltura (bacha o bachada) del concreto premezclado se encuentran en la ASTM C94.

5.4.2.1 Requerimientos para mezcladoras de concreto

La función más importante de cualquier mezcladora de concreto es la capacidad de producir un concreto que presente uniformidad de bacha en bacha. Existen tres tipos de mezcladoras básicas:

- Mezcladora de tambor: consiste en un tambor giratorio con aspas internas. Los materiales son cargados dentro de la mezcladora mientras está girando y mezclando por la caída sobre las aspas. El concreto es descargado ya sea inclinando el tambor o con la rotación en reversa del mismo. El concreto no debe dejarse acumular sobre las aspas ya que reduce enormemente la capacidad del tambor de mezclar apropiadamente.

Los camiones mezcladores de concreto (olla) deben estar equipados con contadores de revoluciones y deben de usarse para verificar tiempo de mezclado.

- Mezcladora de agitadores: consiste en un tambor fijo con aspas rotatorias sobre un eje horizontal (figura 5.4). Los materiales son cargados dentro de la mezcladora a través de una abertura en la parte superior. El concreto es mezclado con el giro de las aspas rotatorias y es descargado abriendo una puerta ubicada en la parte inferior, permitiendo a las aspas empujar el concreto hacia fuera.

- Mezcladora de centrifugado: existen dos tipos; de eje vertical dual o sencillo. Una mezcladora fija es una charola y un arreglo de aspas o pies que rotan internamente alrededor de una charola fija para mezclar el concreto (figura 5.5). Los materiales son cargados a través de un orificio en la parte superior y descargados por la apertura de una puerta situada en la parte inferior.

Una mezcladora rotatoria consiste en una charola que rota, que consta con uno o dos arreglos de aspas montados en un eje vertical girando internamente para mezclar el concreto. Las aspas pueden rotar en diferentes direcciones dependiendo del tipo de mezcladora.

El concreto para ser utilizado mezclas de fachadas arquitectónicas debe ser mezclado, para asegurar una integración uniforme, en una mezcladora de agitadores o una mezcladora de centrifugado y no en una de tambor estacionario o camión revolvedor.

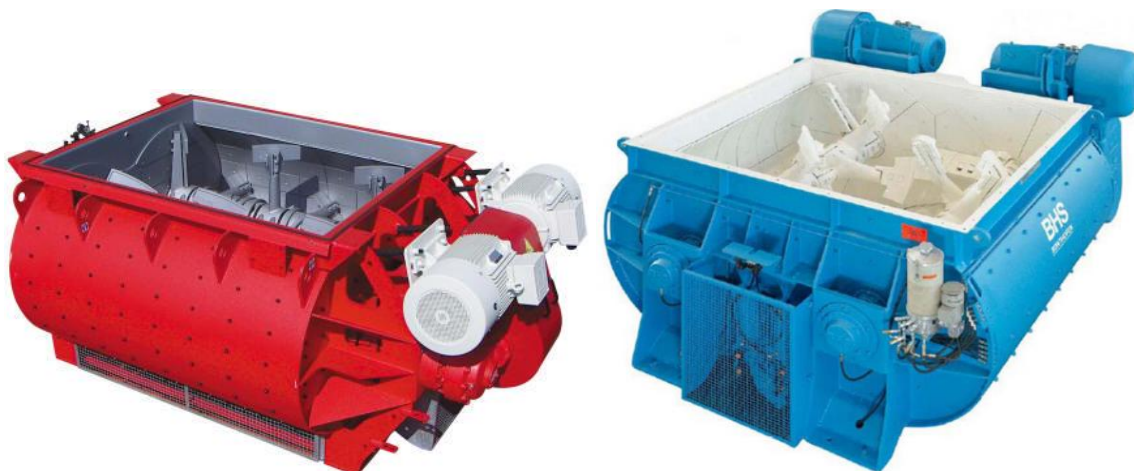


Figura 5.4 Mezcladoras de agitadores



Figura 5.4 Mezcladoras de centrifugado

Muchas compañías usan una combinación de éstos métodos llamada: “mezclado acortado”, donde el concreto es parcialmente mezclado en la planta central y depositado en camiones de tambor, los cuales completan el mezclado mientras se dirigen al lugar del colado; ya sea con el mezclado en el camión o un mezclado acortado, puede ser necesario tener la capacidad de ajustar la mezcla con aditivos y después proporcionar suficiente mezclado para asegurar una mezcla uniforme.

Si se utilizan camiones revolvedores para realizar el mezclado, la cantidad de concreto en el tambor no debe de exceder de $5/8$ ($\approx 63\%$) del total de la capacidad del tambor. Si se ocupa la planta de mezclado central y el camión de mezclado es usado sólo para transporte, la cantidad puede incrementarse al 80%.

El concreto elaborado en mezcladoras centrales debe mezclarse al menos un minuto para mezcladoras con capacidad de una yarda cubica (0.76 m^3) o menos. El tiempo de mezclado debe incrementarse 15 segundos por cada yarda cubica adicional o fracción sin importar la capacidad de la mezcladora. Por lo que si tenemos una mezcla de 2.5 m^3 , el tiempo de mezclado deberá ser al menos de 1 minuto 45 segundos.

Para el concreto mezclado en camión revolvedor son requeridas, para un completo mezclado, de 70 a 100 revoluciones a velocidad de mezclado, la cual es designada por el fabricante del equipo y está explícitamente marcada en la placa de información ubicada sobre el equipo mezclador. Si después de 100 revoluciones la uniformidad del concreto no cumple con la tabla 5.3, el mezclador no debe de utilizarse hasta que las deficiencias sean corregidas. Las correcciones pueden ser tan simples como cambiar la secuencia de dosificación, pero puede ser que se requiera el retiro de concreto endurecido en el tambor o el remplazo de las aspas. Es deseable realizar la descarga del mezclador antes de alcanzar las 140 revoluciones.

Si después de mezclar el concreto se le adiciona agua o aditivo en un camión revolvedor, el concreto debe ser mezclado al menos unas 30 revoluciones adicionales a velocidad de mezclado.

Si el “mezclado acortado” es parcialmente hecho en una planta central y descargado a un camión revolvedor donde el mezclado del concreto es completado, el número de revoluciones del tambor debe ser suficiente para que se cumplan los requerimientos de la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Requisitos de uniformidad de concreto (según la ASTM C94)

Ensayo	Requisitos, expresados como diferencia máxima permisible en los resultados de los ensayos de las muestras tomadas en dos ubicaciones de la revoltura de concreto
Masa por pie ³ [masa por m ³] calculada sin aire, lb/ pie ³ [kg/m ³]	1,0 [16]
Contenido de aire, % en volumen de concreto	1,0
Revenimiento:	
Si el revenimiento promedio es 4 pulg [100 mm] ó menos, pulg [mm]	1,0 [25]
Si el revenimiento promedio es de 4 a 6 pulg [100 a 150 mm], pulg [mm]	1,5 [40]
Contenido de grava, porción en masa de cada muestra retenida en el tamiz N°4 [4,75 mm], %	6,0

Masa por volumen unitario de mortero sin aire ^A a, basada en el promedio para todas las muestras comparativas ensayadas, %	1,6
Resistencia promedio a la compresión a los 7 días para cada muestra ^B , basada en la resistencia promedio de todas las probetas de ensayo en comparación, %	7,5 ^C

^A "Test for Variability of Constituents in Concrete", designación 26, *Bureau of Reclamation Concrete Manual*, 7ª edición.⁶

^B Deben moldearse al menos 3 cilindros y ensayarse para cada muestra.

^C La aprobación de la mezcladora es tentativa, dependiendo de los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días.

5.4.2.2 Métodos para mezclado de concreto

El concreto debe ser mezclado por uno de los siguientes métodos:

Concreto de mezclado central: Es el concreto que es mezclado en una mezcladora estacionaria central y entregado en el lugar de colado por tolvas, camión mezclador, camión agitador o camiones sin agitadores.

Concreto de mezclado acortado: Es el concreto que es parcialmente mezclado en una mezcladora estacionaria después mezclado completamente en un camión mezclador que a su vez lo entrega en el lugar del colado.

Concreto mezclado en camión mezclador (revolvedor): Es el concreto que es completamente en un camión mezclador que a su vez lo entrega en el lugar del colado. El mezclado en camión solo es adecuado para concreto estructural o mezclas de respaldo ya que usualmente resulta en una uniformidad insuficiente para unidades o elementos de concreto arquitectónico.

El tiempo transcurrido entre el mezclado y la colocación no debe exceder de una hora, según el PCI, en esta indicación radica una de las principales diferencias con el uso de concreto en otros sistemas de construcción, basándose en el hecho de que el sistema de prefabricación de concreto establece controles de calidad más rigurosos. El retemplado o remezclado del concreto que ha iniciado el fraguado o ha empezado a endurecer no debe de ser permitido. La adición de un aditivo reductor de agua de alto rango para contrarrestar la pérdida de revenimiento debe ser cuidadosamente monitoreado para evitar problemas potenciales de uniformidad.

5.4.3 Colocación

El colado o vaciado es el proceso de colocación del concreto dentro del molde o cimbra.

La colocación del concreto es determinante, ya que con esta actividad se concluye la fabricación de elementos estructurales o arquitectónicos, importantes, definitivos y perdurables de una obra; además de cumplir con las exigencias de un funcionamiento estructural eficiente y seguro. Aunque las actividades de vibrado y curado son sumamente importantes, con la colocación se determina el volumen, la posición y la geometría de los elementos.

Usualmente en la prefabricación, el concreto se coloca en capas para producir un elemento monolítico y con un acabado visualmente aceptable; es importante que cada capa de concreto tenga el suficiente peralte de manera tal que la capa consecutiva sea colocada mientras la capa anterior este lo suficientemente fresca. De esta manera se permite una consolidación apropiada entre capas. Entre más bajo sea el revenimiento, más delgada será la capa a utilizarse. Se aconseja que las capas no sean más peraltadas a 50 cm, pero las condiciones propias de cada elemento, el clima, las dimensiones, la disponibilidad de equipos, entre otros factores; definirán el espesor de la capa a colar.

La colocación del concreto en las cimbras con todos los insertos y cables en ellas, debe continuarse hasta el nivel superior del colado y todo lo contenido en la cimbra quedará cubierto por él, sin embargo, la pasta del concreto debe evitarse o limpiarse de todo el acero de refuerzo, disparos y elementos embebidos que sobresalgan de la sección de concreto. Es de especial importancia, proteger la cuerda de las roscas de anclas embebidas con una cinta o algún otro material que asegure que la pasta no retardará las actividades de la colocación de las tuercas cuando llegue ese momento. Este tipo de detalles hace que las interfaces entre actividades de la construcción o ejecución, en general, faciliten el trabajo y se haga más eficiente la consecución de tareas.

En términos generales, la colocación de concreto en climas severos debe limitarse al siguiente rango de temperatura que va desde los 10°C a los 35°C.

Es importante, como procedimiento constructivo, que al menos 24 horas antes del colado se notifique a las autoridades técnicas de la obra; con el fin de que se lleve a cabo la inspección del elemento a colar y se emita la “liberación del colado” con las firmas requeridas.

Segregación: Proceso que se presenta durante la colocación y/o compactación del concreto en el que se separan las partículas pesadas (agregado grueso) de la pasta o mortero, dando como resultado:

- baja calidad por los cambios de densidad,
- cambios en las propiedades mecánicas del elemento en general,
- problemas estéticos,
- rechazos y observaciones de elementos,
- reparaciones costosas a cargo del constructor.

5.4.3.1 Inspección para la colocación del concreto:

En esta inspección se deben revisar aspectos como:

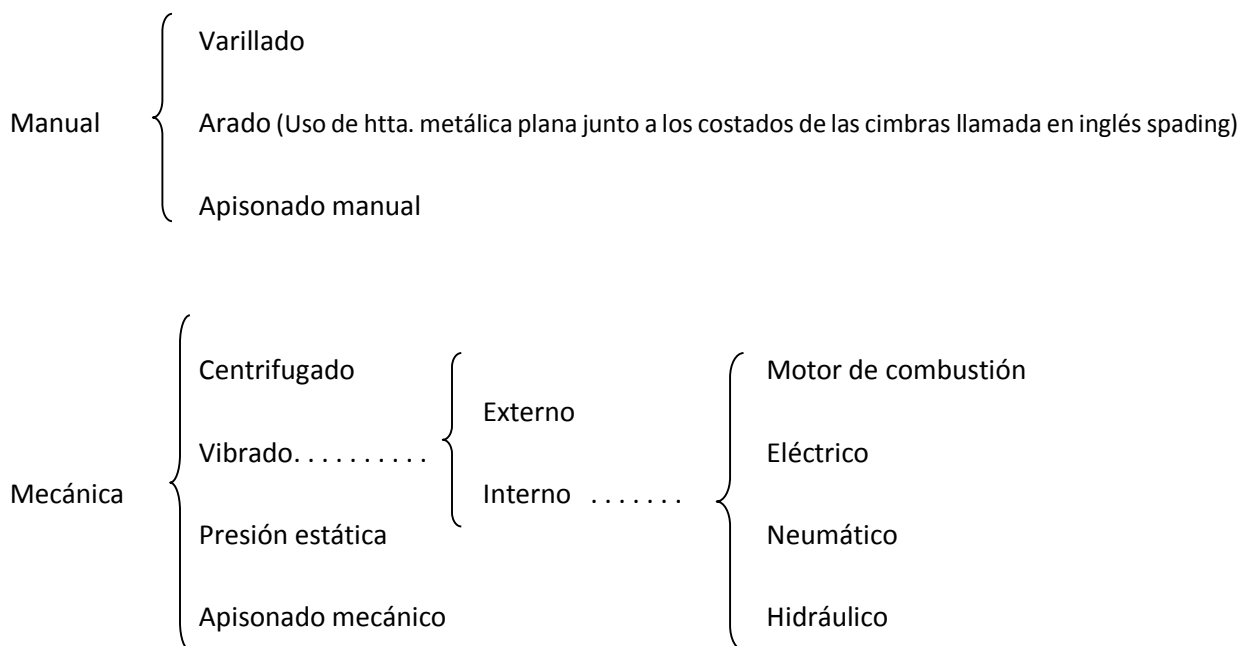
- Que la cimbra y el acero cumplan con los requisitos comentados en el apartado 2.3 y 4.2 del capítulo 2 y 4 respectivamente.
- Que dentro de la cimbra, en la revolvedora y en el equipo de transporte no haya elementos perjudiciales y ajenos al funcionamiento y manejo eficiente del concreto.
- Considerar las condiciones climáticas, si éstas no son adecuadas, llevar a cabo los cuidados necesarios para realizar el colado y tomar en cuenta la posibilidad de interrumpirlo.
- Evitar colar debajo de los 5°C a menos que se utilice un aditivo para eliminar los efectos de la congelación o se calienten los agregados y/o agua o se controle la temperatura circundante al concreto recién colado.
- Revisar los trabajos previos complementarios tales como la colocación y posición de las instalaciones inmersas y/o accesorios en el concreto.
- Si hay ductos de instalaciones dentro de una columna deben colocarse en el centro de ésta y su área de sección no debe ser mayor a 4% del total de la sección transversal de la columna.
- Las tuberías de agua, gas, vapor y sanitarias no deberán ahogarse en el concreto estructural.
- No se debe colocar concreto que presente a simple vista muestras de segregación.
- Evitar que la colocación del concreto en la cimbra provoque un impacto que dé lugar a la segregación de la mezcla.
- La altura máxima de caída libre del concreto es de 0.80 m. Si se tienen elementos más altos, deben abrirse ventanas temporales de verificación y colado (fácilmente sellables y seguras) por donde se pueda verter el concreto sin problema.
- El proceso de colocación debe ser por capas y cada una de éstas deberá ser compactada correctamente antes de que la capa anterior haya iniciado el fraguado.
- **No es aceptable acumular la mezcla dentro de la cimbra o cimbras, para extenderla posteriormente, así como, traspalear concreto para llenar otras cimbras.** Estas prácticas propician la segregación de la mezcla.
- Si las especificaciones del proyecto no señalan otra cosa, el acabado final de la superficie debe ser liso, continuo, libre de bordes, rugosidades u oquedades.
- Cuando los colados se llevan a cabo en condiciones y circunstancias deficientes y el proceso y el producto no satisfacen a las autoridades técnicas de la obra, es posible que se solicite la reposición total o parcial, lo cual depende de la gravedad del resultado. Si este es el caso, será bajo la responsabilidad y a cargo del constructor.

5.4.4 Consolidación o compactación

La consolidación del concreto es el proceso que facilita la colocación del concreto recién vaciado dentro de las cimbras, eliminando al máximo los vacíos dentro de la mezcla fresca, uniformizando la distribución de materiales, garantizando un buen contacto entre el concreto, la cimbra y el acero de refuerzo/presfuerzo entre sí.

El tipo de compactación está íntimamente ligado a la plasticidad de la mezcla (trabajabilidad), geometría de la cimbra, densidad de acero, condiciones de colocación, clima, revenimiento, aditivos utilizados, entre otros factores.

Existen diversas formas de compactar o acomodar el concreto y se dividen en dos grandes grupos:



También se utilizan técnicas que combinan estos diferentes métodos de compactación y se usan en aplicaciones especiales como: la colocación y compactación con rodillos de concreto con revenimiento cero (RO) en cortinas de presas, uso de concretos demasiado fluidos tal como el SMO™ de Cemex™ llamado en inglés SCC, fabricación de tubos con centrifugación, etc., pero no son el tema de estudio de este trabajo. (Para información adicional referirse a: ACI, Guía para Consolidación de Concreto ACI 309R – 05).

Usualmente la forma más eficiente y económica de consolidar el concreto es mediante la vibración interna. Este proceso se realiza con vibradores de inmersión que proporcionan a la mezcla vibraciones con frecuencias mayores a 3,000 vibraciones por minuto.

El equipo disponible funciona con energía eléctrica, aire comprimido, aceite hidráulico, o a base de combustión de gasolina, con cabezales de diferentes tamaños y diámetros y son de varios tipos: de inmersión (con chicote y cabezal – ver figura 5.5), externos (vibradores adheridos a la cimbra que se usan cuando la densidad del acero es alta) y de superficie (reglas vibratorias que se usan para la colocación y vibrado de pisos y superficies horizontales – ver figura 5.6).



Vibrador con motor a gasolina



Vibrador eléctrico

Figura 5.5 Vibradores internos



Figura 5.6 Regla de vibrado (usada en superficies con poco peralte) y muros prefabricados.

Es importante, como **regla de seguridad**, considerar que un vibrador eléctrico aunque es más manejable y versátil, trabaja usualmente a una tensión de 220 V y a una potencia de 1,400 W por lo que, tiene el inconveniente de que **en caso de que el cable de alimentación de energía sea dañado o presente malas condiciones de aislamiento mientras esta sobre el concreto fresco y hace contacto con la superficie húmeda puede provocar electrocución o choque eléctrico** al personal que este en contacto con el concreto, que es conductor, en su fase plástica.

Para seleccionar el tipo de vibrador se debe tomar en cuenta:

- El volumen de concreto que se someterá a este procedimiento.
- Velocidad de compactación deseada.
- Peso y tamaño del vibrador.
- Tiempo requerido de vibrado en función del fraguado del concreto.
- Dimensiones de los elementos de concreto a vibrar y la densidad de acero.

Los vibradores de inmersión deben introducirse en el concreto verticalmente, separando cada inmersión entre 45 y 75 cm como regla general; el ACI menciona que la distancia entre inserciones contiguas debe ser 1.5 veces su radio de acción (que es aproximadamente entre 8 y 10 veces el diámetro del cabezal); el proceso hay que hacerlo rápidamente a la entrada y hacia abajo y **sacarlo lentamente cuando:**

- ✓ **la superficie visible del concreto se torne brillante** debido al flujo de la lechada de la mezcla. A este efecto se le conoce como sangrado del concreto,
- ✓ **se produzca un cambio en el sonido del vibrador**, debido al cambio de densidad en el concreto,
- ✓ **se aprecie claramente que se ha terminado la expulsión de burbujas grandes de aire**,
- ✓ **se observe claramente que el agregado grueso está descendiendo** al fondo.

En elementos de poco espesor se puede introducir el cabezal de manera inclinada y cada inmersión puede durar entre 5 y 15 segundos.

No se debe vibrar el concreto endurecido. Los huecos que se forman por la entrada del cabezal no podrán ser ocupados fácilmente por la misma mezcla al extraerlo.

Se debe evitar el sobrevibrado para no segregar la mezcla y no afectar al concreto en proceso avanzado de fraguado de las capas inferiores; si es el caso. Aunque es importante decir que; **es más perjudicial al elemento de concreto una falta de vibrado que un exceso de éste (sobrevibrado).**

No debe vibrarse colocando el cabezal en contacto directo con el acero, ya que al iniciarse el fraguado, las vibraciones pueden provocar la separación entre el acero y el concreto, sobre todo si éste último ha iniciado su endurecimiento en algún lugar.

En caso de que el peralte del elemento a colar sea mayor a 50 cm, este se debe de colar en capas superpuestas (ver: “Colocación”, apartado 5.4.3), pero para evitar problemas de juntas frías y/o líneas de flujo (figura 5.7) que presentan un problema estético y de confiabilidad de los trabajos, **se debe de insertar la cabeza del vibrador a través de toda la capa de concreto superior y al menos unos 15 cm en la capa inmediata inferior, logrando el efecto de “cosido”** que evita engorrosos problemas de reparación (figura 5.7).



Figura 5.7 Líneas de flujo que pueden ser confundidas muy a menudo con juntas frías, pero que se evitan con una secuencia planeada de colado, una disposición adecuada y suficiente de equipos de colocación y las prácticas de vibrado descritas.

5.5 Concreto premezclado

El concreto premezclado cumple con la definición del “concreto” del inicio del capítulo pero además el proceso de dosificación y mezclado son cuidadosamente controlados en planta por el fabricante. El concreto premezclado se entrega, para su utilización, en estado plástico.

La utilización del concreto premezclado ofrece las siguientes ventajas:

- Elaborado con cemento de marcas recocidas que garantiza una calidad uniforme bajo un mismo estándar de calidad a nivel nacional.
- Medición correcta y calidad controlada en todos los insumos.
- Para cumplir los requisitos de resistencia de esta norma, con un nivel de confianza del 98%, los resultados de las pruebas de resistencia deben cumplir con los requisitos que se indican.
- Uniformidad en aspecto, color y resistencia.
- Permite acelerar el ritmo de la obra.
- Menor empleo y costo de mano de obra.
- Elevada capacidad de producción, suministro y control.
- Asesoría profesional y directa por parte de la empresa premezcladora.

5.5.1 Calidad del concreto en estado endurecido:

- El productor de concreto debe tener información de ensayos que respalden el cumplimiento de los requisitos especificados.

- Cuando la resistencia es la base de la aceptación del concreto, deben elaborarse especímenes de acuerdo con la NMX-C-160-ONNCCE- 2004.
- El número de muestras debe estar de acuerdo con lo indicado en la tabla 5.4 A y B que considera para la prueba de resistencia como mínimo dos especímenes a la edad especificada, de la muestra obtenida según la NMX-C-161-1997-ONNCCE. Pero es necesario hacer énfasis en que esta tabla indica frecuencias mínimas, lo que significa que de acuerdo a los requerimientos o necesidades de la obra o elementos a fabricar pueden incrementarse las frecuencias.

FRECUENCIAS MÍNIMAS DE MUESTREO PARA CONTROL DE PRODUCCIÓN

PRUEBA Y MÉTODO	CONCRETO DOSIFICADO POR MASA
Revenimiento (NMX-C-156-1997-ONNCCE)	Al inicio del colado y cuando se detecte visualmente cambio de consistencia, pero no menos de una por cada 100 m ³ o fracción
Masa unitaria (NMX-C-162-ONNCCE-2000)	Una por cada día de colado
Temperatura. Si la temperatura ambiente es menor de 280 K (7° C) o mayor de 305 K (32° C)	No menos de una por cada 60 m ³ o fracción Una por cada entrega
Contenido de aire (NMX-C-162-ONNCCE-2000), en concretos con aire incluido	Cada entrega. En caso de producción continua, cada 12 m ³
Resistencia a la compresión (NMX-C-083-ONNCCE-2002)	Cada 100 m ³ o fracción
Módulo de elasticidad (NMX-C-128-ONNCCE-2000)	Cuando lo solicite el usuario (cliente)

Nota: Para la prueba de resistencia a la compresión de la muestra obtenida y mezclada de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-161-ONNCCE deben hacerse, como mínimo dos especímenes para probar a la edad especificada.

Fuente: norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2004.

Tabla 5.4 A Frecuencias mínimas para control de producción

- El resultado de una prueba debe ser el promedio de las resistencias obtenidas en los especímenes compañeros, excepto si se observa en alguno de ellos una deficiencia de muestreo, elaboración, manejo, curado o prueba, no se tomarán en cuenta y el promedio de las resistencias de los especímenes restantes debe ser considerado como el resultado de la prueba. El que se obtenga una resistencia inferior a la especificada no es motivo para rechazar el espécimen.
- Para cumplir con los requisitos de resistencia de esta norma, con un nivel de confianza de 98%, los resultados de las pruebas de resistencia deben estar de acuerdo a los requerimientos indicados.

FRECUENCIAS MÍNIMAS DE MUESTREO EN OBRA

PRUEBA Y MÉTODO	CONCRETO DOSIFICADO POR MASA
Revenimiento (NMX-C-156-1997-ONNCCE)	En todas las entregas o de acuerdo con especificaciones
Masa unitaria (NMX-C-162-ONNCCE-2000)	Una por cada día de colado
Temperatura. Si la temperatura ambiente es menor de 280 K (7° C) o mayor de 305 K (32° C)	Cada entrega. En caso de producción continua, cada 12 m³.
Contenido de aire (NMX-C-162-ONNCCE-2000), en concretos con aire incluido	Cada entrega. En caso de producción continua, cada 12 m³.
Resistencia a la compresión	Cada 40 m³ o fracción
Resistencia a la compresión en columnas y muros (NMX-C-083-ONNCCE-2002)	Cada 14 m³ o fracción
Módulo de elasticidad (NMX-C-128-1997-ONNCCE)	Tres determinaciones por obra como mínimo y cuando lo solicite el director responsable de obra

Nota: Para la prueba de resistencia a la compresión de la muestra obtenida y mezclada de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-161-ONNCCE-1997 deben hacerse, como mínimo dos especímenes para probar a la edad especificada.

Fuente: norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2004.

Tabla 5.4 B Frecuencias mínimas de muestreo en obra

5.5.2 Resistencia a la compresión

Según la normativa mexicana NMX-C-155-2004 para el concreto premezclado se establece que la resistencia debe ser igual o mayor a 19.6 MPa (200 kg_f/cm²), a menos que de común acuerdo con el productor, el estructurista y el usuario se establezca otra.

El concreto debe alcanzar la resistencia especificada a la compresión (f'_c) a 28 días o a otra edad convenida y cumplir con lo siguiente:

- Se acepta que no más del 10% del número de pruebas de resistencia a la compresión, tengan valores inferiores a la resistencia especificada f'_c . Se requiere un mínimo de 30 pruebas.
- Se permite no más del 1% de los promedios de 3 pruebas consecutivas de resistencia a la compresión, puede ser inferior a la resistencia especificada. Se requiere un mínimo de 30 pruebas.

Nota: Debido a la variación en los materiales, operaciones y pruebas, la resistencia promedio para alcanzar estos requisitos, deber ser considerablemente más alta que la resistencia especificada.

Esta resistencia es más alta en la medida en que las variaciones aumenten y más baja en la medida en que éstas disminuyan.

En la utilización del concreto premezclado se distinguen las siguientes etapas desde su dosificación hasta el manejo y cuidado en la obra una vez colado:

5.5.2.1 Dosificación

- ° El concreto se dosifica y proporciona en planta de acuerdo a lo que se establece en la norma mexicana NMX-C-155-2004 y los insumos utilizados estarán dentro de las normas respectivas ya comentadas anteriormente en este manual.
- ° El mezclado puede hacerse totalmente en la planta, parcialmente en la planta o en el camión mezclador (olla).
- ° La dosificación del cemento se mide en kilogramos (kg) de masa, ya sea por peso directo de la cantidad requerida o por medio del uso de sacos enteros. Se acepta una tolerancia de $\pm 1\%$ con respecto a la cantidad requerida.

5.5.2.2 Transporte

- ° El concreto premezclado se traslada desde la planta dosificadora hacia la obra en el camión mezclador (olla).
- ° La descarga total del concreto debe realizarse durante un período no mayor a 90 minutos después de la introducción inicial del agua de mezclado, pero como vimos anteriormente debido a que los requisitos de calidad de los elementos prefabricados son más rigurosos este tiempo se debe limitar a solo una hora según el PCI.
- ° Bajo condiciones especiales de temperatura ambiente, del empleo de aditivos y otras técnicas, el tiempo máximo para su descarga puede ser diferente pero tiene que ser específicamente establecido previamente por todas las partes involucradas y generalmente será a la baja.
- ° Si la mezcla se realiza totalmente dentro del camión mezclador (olla) se requiere en total de 70 a 100 revoluciones, a razón de 10 a 12 revoluciones por minuto (velocidad de mezclado). Con esto se tiene una mezcla uniforme y homogénea.
- ° Si se requiere mezclado adicional se debe hacer a una velocidad de entre 2 y 6 revoluciones por minuto (velocidad de agitación).
- ° Estos procesos de mezclado, posteriores al primero, pueden afectar a la uniformidad del concreto.

Si se tiene duda al respecto se deben aplicar pruebas cuyos resultados cumplan con los requisitos que se indican en la tabla 5.5; del resultado de éstas se podrá determinar si es aceptable o no la mezcla.

5.6 Requerimientos de curado de concreto

El curado es la forma de controlar la humedad y la temperatura del concreto recién vaciado que permite, durante el fraguado inicial, la adquisición de las propiedades deseadas (resistencia, rigidez, durabilidad, impermeabilidad, entre otras). El método adecuado de curado está en función de las circunstancias y del tipo de la obra, además de las características de los elementos de concreto que se someterán a este proceso. Se tienen los siguientes métodos de curado:

REQUISITOS DE UNIFORMIDAD DE MEZCLADO DEL CONCRETO

PRUEBA	DIFERENCIA MÁXIMA PERMISIBLE ENTRE RESULTADOS DE PRUEBA CON MUESTRAS OBTENIDAS EN DOS PORCIONES DIFERENTES DE LA REVOLTURA O DESCARGA(*)
1. Masa unitaria según la NMX-C-162-ONNCCE-2000, en kg/m ³	±15
2. Contenido de aire en porcentaje del volumen de concreto determinado según la NMX-C-157-ONNCCE-2006 para concretos con aire incluido.	±1
3. Revenimiento en cm. Si el revenimiento promedio es menor a 5 cm. Si el revenimiento promedio está comprendido entre 5 cm y 10 cm	± 1.5 ± 2.5 ± 3.5
4. Contenido del agregado grueso retenido en la criba 4.75 (No. 4) expresado en porcentaje de la masa de la muestra.	6
5. Masa del mortero por unidad de volumen, determinada sobre el promedio de todas las muestras comparativas ensayadas, en porcentaje (a).	1.6
6. Promedio de la resistencia a la compresión a 7 días de edad de cada muestra, expresado en porcentaje(**) determinado de acuerdo a la NMX-C-83-ONNCCE-2002.	7.5

(*)Las dos muestras para efectuar las determinaciones de esta tabla deben obtenerse de dos porciones diferentes tomadas al principio y al final de la descarga.

(Principio: del 10 al 15% del volumen aproximadamente. Final: del 85% al 90% del volumen aproximadamente).

a) La masa por unidad de volumen del mortero, libre de aire, se determina como sigue:

$$M = \frac{B - C}{V \left[\frac{V \times A}{100} + \frac{C}{G} \right]}$$

Donde:

M	es la masa por unidad de volumen del mortero libre de aire, en kg/m^3
B	es la masa de la muestra de concreto en el recipiente, en kg
C	es la masa del agregado saturado y superficialmente seco, retenido en la malla No. 4, en kg
V	es el volumen de la masa por unidad de volumen del recipiente, en m^3
A	es el contenido de aire del concreto determinado en la muestra en estudio, en porcentaje.
G	es la densidad del agregado grueso

(**) La aprobación tentativa de la mezcladora puede ser otorgada antes de obtener los resultados de la prueba de resistencia.

Si se requieren revoluciones adicionales en el camión mezclador, éstas deben desarrollarse a la velocidad agitación indicada por el fabricante (normalmente de 2 rpm). En caso de duda sobre la uniformidad de mezclado, el supervisor puede realizar las pruebas indicadas en la tabla 37 y con base en los resultados, aceptar o rechazar el uso de la unidad, la cual no puede utilizarse hasta que la condición sea corregida. Cuando se encuentre satisfactorio el mezclado de alguna revolvedora, puede considerarse el mezclado de revolvedoras del mismo diseño y con el mismo estado de espas, igualmente satisfactorio.

Fuente: norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2004.

Tabla 5.5 Requisitos de uniformidad en el mezclado de concreto

° **Método tradicional.** Consiste en proteger el concreto contra la pérdida de agua por evaporación durante el período inicial de endurecimiento. Es aceptable mantener la humedad colocando sobre la superficie del concreto:

- El papel de los bultos de cemento vacíos saturados de agua.
- Aserrín o arena saturados de agua.
- Rociar agua constantemente.
- Inundar.

° **Método químico.** Evita la pérdida de humedad sellando la superficie del concreto, lo cual puede lograrse aplicando un producto o compuesto directamente sobre la superficie visible del concreto para que forme una membrana. En elementos verticales que se pueden descimbrar al día siguiente, el producto o compuesto químico se aplicará inmediatamente después del descimbrado.

Se debe tomar en cuenta que la humedad del concreto se pierde a través de todas las caras expuestas al medio ambiente; las caras cimbradas están protegidas satisfactoriamente contra la pérdida de humedad (siempre y cuando las otras caras o superficies no cimbradas se curen adecuadamente), por lo que es recomendable dejar colocada la cimbra el mayor tiempo posible, lo cual dependerá de la velocidad o del programa de reusó de los moldes utilizados para cimbrar.

Durante el curado debe cuidarse que la temperatura del agua no sea 11°C menor a la del concreto para evitar esfuerzos de contracción que propicien agrietamientos inconvenientes.

El período mínimo para la aplicación del curado debe ser de 7 días para concretos convencionales colados a una temperatura ambiente de más de 10°C, a menos que el concreto sea muy sensible al curado o que las condiciones ambientales sean muy agresivas para el concreto, en cuyo caso el curado se prolongará por lo menos por 7 días más. Esta práctica puede ser recomendable cuando no se requiere que los elementos prefabricados sean desmoldados a la brevedad o pudieran tratarse de piezas únicas y que no requieren forzosamente otro tipo de curado acelerado como el curado a vapor.

Si el concreto se cuela en climas fríos, menores a los 10°C, o incluso en estado de congelamiento sin ninguna precaución, es posible que resulte un concreto de calidad deficiente y de resistencia indeterminada. Para que esto no suceda, el concreto se debe mantener sobre los límites de temperatura indicados en la tabla 5.6.

REQUISITOS DE TEMPERATURA DEL CONCRETO PARA CLIMAS FRÍOS

TEMPERATURA AMBIENTE	TEMPERATURA MÍNIMA DEL CONCRETO	
	SECCIONES DELGADAS Y LOSAS SOBRE PISOS (°C)	SECCIONES GRUESAS Y CONCRETO MASIVO (°C)
De 7 a -3	16	10
De -3 a -18	18	13
Menor de -18	21	16

Fuente: norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999.

Tabla 5.6 Requisitos de temperatura para clima frío

Para mantener el concreto por arriba del punto de congelación y de los límites de la tabla anterior, los materiales se pueden calentar antes de mezclarse o el concreto puede mantenerse en lugares caldeados tales como hornos. Si el clima es moderadamente frío sin llegar a la congelación, el calentar el agua para la mezcla es una práctica aceptable. Si se llega a niveles de congelamiento habrá que calentar los agregados también, cuidando de que los materiales no rebasen los 32°C al ser calentados..

5.6.1 Curado acelerado

El concreto produce calor, debido a la reacción exotérmica que se genera en la hidratación del cemento, durante la fase de desarrollo de resistencia temprana. La retención de este calor puede ser utilizada para proveer parte del calor que es utilizado en el curado acelerado.

El calor puede proporcionarse para incrementar la velocidad de hidratación. El uso de un curado acelerado puede provocar una pérdida de resistencia a los 28 días, opuesto a lo que ocurre con un concreto curado de forma simple con retención de humedad a 22°C. Sin embargo, esta pérdida de resistencia, la cual generalmente no debe exceder el 10%, es compensada *a priori* en el diseño de la mezcla.

El ciclo de curado acelerado generalmente toma de 6 a 10 horas para luego retirar el elemento de la cimbra. De esta manera, las cimbras son reutilizadas con una periodicidad de un solo día, lo cual es necesario para tener una producción económica de prefabricados. La figura 5.8 representa el comportamiento de la resistencia del concreto en un proceso de curado acelerado.

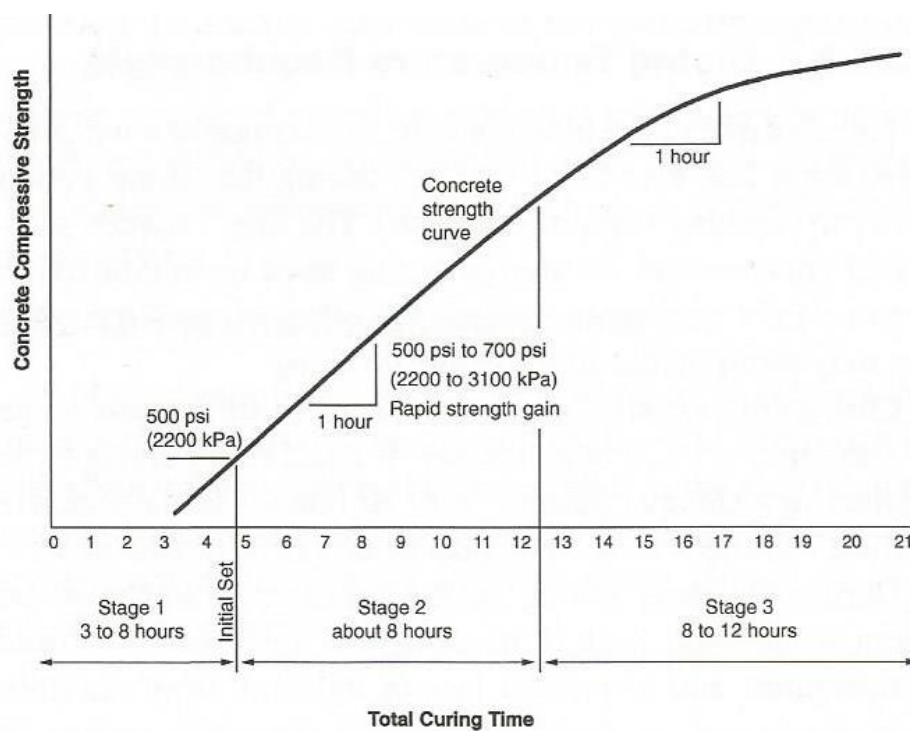


Figura 5.8 Curado acelerado del concreto

Primera etapa: Colocación al fraguado inicial.

Esta etapa puede durar de 3 a 8 horas y comprende desde la hora en que el concreto está fresco o plástico hasta que alcanza el fraguado inicial, el cual se define cuando el concreto adquiere una resistencia de 35 kg/cm². El tiempo de fraguado inicial para cada tipo de mezcla debe ser determinado de acuerdo a la norma ASTM C403, *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*.

Segunda etapa: Ganancia de resistencia rápida

Esta etapa dura aproximadamente 8 horas más, y el concreto experimenta una ganancia de 35 a 50 kg/cm² por hora. El calor externo para un curado acelerado debe ser aplicado durante esta etapa porque aquí es cuando resulta ser más eficiente.

Tercera etapa:

Ganancia de resistencia moderada

Esta etapa puede durar de 8 a 12 horas más, posterior a la etapa dos, y la ganancia de resistencia del concreto es lenta de aproximadamente 4 a 7 kg/cm² por hora. Durante esta etapa, el calor debe de mantenerse en el producto. Una de las formas más eficientes de retener el calor es con el uso de cobertura o lona térmica como se mencionó en el capítulo 4, apartado 4.1.5.

La combinación de la aplicación de calor durante la etapa dos y la retención de calor durante una parte de la etapa tres es la manera más eficiente (costo-beneficio) de curar concreto prefabricado. Posterior a la etapa tres, la ganancia de resistencia disminuye significativamente hasta que se completa la hidratación del cemento. El aplicar calor durante todo el tiempo de hidratación no es efectivo.

Para maximizar los beneficios del curado acelerado del concreto y minimizar el posible daño debido a un exceso de calor, se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Las temperaturas controladas deben darse dentro los elementos de concreto, no en la temperatura del ambiente de curado,
- Después del colado, la consolidación y el terminado, el concreto debe alcanzar su fraguado inicial antes de la aplicación de calor que elevará la temperatura del concreto arriba de 40°C. Si se aplicara calor demasiado pronto, posiblemente se tendría un efecto negativo en la resistencia a largo plazo.
- La duración de la etapa uno (previo al fraguado) depende de factores como tipo de cemento, aditivos, relación a/cm, temperatura y otras características de la mezcla. Debido a las amplias variaciones posibles del inicio del fraguado, la determinación del tiempo de fraguado inicial es importante y debe determinarse mediante la ASTM C403 utilizando un simple penetrómetro.
- En caso de ser necesario, la temperatura del concreto puede ser incrementada durante el periodo previo al fraguado a una razón de 5 °C por hora. La temperatura total permisible que se puede tener en el periodo previo al fraguado no debe exceder los 22 °C arriba de la temperatura de colocación o 40 °C cualquiera que sea la menor.
- Para un curado acelerado, el calor debe ser aplicado con un incremento controlado posterior al fraguado inicial, en combinación con un método efectivo de aportación y retención de humedad. El incremento de calor no debe exceder los 20 °C por hora, pero medido en el concreto.
- La temperatura óptima de curado varía de 54 °C a 66 °C. La temperatura máxima de curado no debe exceder los 66 °C a menos que se tomen medidas especiales para reducir los efectos adversos de las temperaturas muy altas.
- Los elementos de concreto prefabricado que estarán continuamente húmedos o sumergidos cuando estén en servicio quizá puedan ser curados a más de 77 °C si el cemento se modifica apropiadamente con ceniza volante, escoria granulada de altos hornos o metakaolín.
- Los elementos de concreto prefabricado que estarán secos o sujetos a un humedecimiento poco frecuente cuando estén en servicio quizá puedan ser curados a más de 82 °C. El

concreto debe ser probado para reacciones álcali-sílice y formación retardada de etringita, manteniendo registros de desempeño a largo plazo.

- La temperatura debe ser medida en la parte del elemento que posiblemente recibirá la mayor cantidad de calor durante el curado. La duración del curado con calor debe establecerse considerando los requerimientos de resistencia para el desmolde basándose en las medidas de cilindro de prueba curados de manera similar que los elementos.
- A los elementos debe permitírseles enfriarse gradualmente para prevenir un choque térmico, el cual pudiera producir agrietamientos. La máxima velocidad de enfriamiento partiendo de una temperatura sostenida de curado acelerado es de 28 °C por hora. A fin de prevenir un fisuramiento superficial o algún otro daño térmico, el enfriamiento a esta velocidad debe continuar hasta que la temperatura del concreto sea cuando más de 4 °C sobre la temperatura ambiente que rodea exteriormente a la cámara de curado.
- Deben de proveerse termómetros de autoregistro para mostrar la relación tiempo-temperatura durante el periodo completo de curado o hasta el desmolde o la transferencia de presfuerzo. Al menos debe ser usado un termómetro de éste tipo por un grupo continuo de cimbras y una fuente continua de calor, para monitorear el elemento en ubicaciones apropiadas.

5.6.1.1 Curado con vapor vivo

El curado con vapor o vapor vivo implica la inyección de vapor dentro de una cámara que rodea el elemento de concreto prefabricado. La cámara debe minimizar la pérdida de calor y humedad y debe permitir una circulación libre del gas de vapor; los chorros de vapor se deben posicionar de manera tal que permitan una distribución uniforme de calor pero sin descargar directamente sobre el concreto, la cimbra y los especímenes o cilindros de prueba.

Puede obtenerse mayor información en el reporte ACI 517.2 (1992) *Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure*.

En general, el proceso está dividido en cuatro etapas que se resumen en reposo inicial, elevación gradual de temperatura, sostenimiento y reposo final o enfriamiento, cada una de estas etapas debe ser perfectamente monitoreada y revisada para lograr la resistencia requerida pero sin afectar las características físicas de resistencia del concreto a largo plazo y el costo del curado (figura 5.9).

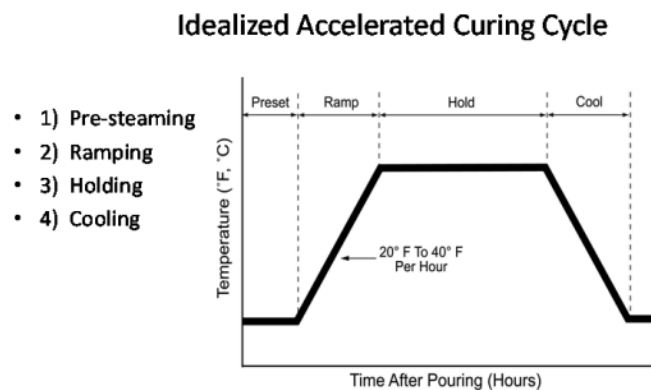


Figura 5.9 Ciclo de curado acelerado ideal

5.6.1.2 Curado por retención de humedad sin calor suplementario

El concreto que es curado sin calor suplementario debe mantenerse cubierto, caliente y húmedo hasta que se logre la resistencia a compresión del concreto, el valor especificado para la transferencia de presfuerzo o la resistencia para el desmolde.

Los métodos de curado aceptables son:

- ✓ dejar el elemento en la cimbra con los costados colocados y mantener la superficie más elevada continuamente húmeda, ya sea por nebulización, aspersión o cubriendo con cubiertas mojadas. También se puede mantener la superficie húmeda cubriéndola con una cubierta impermeable o aplicándole un compuesto formador de membrana, y
- ✓ remover los costados de la cimbra y curar todas las superficies expuestas con los métodos aplicables descritos previamente.

Las cámaras utilizadas para retener la humedad durante los periodos de curado deben asegurar que el agua libre esté presente sobre las superficies de concreto todo el tiempo. Las cámaras de retención de humedad deben resistir el uso rudo, punzonamientos, desgarre y deben ser aseguradas de forma positiva en el lugar para evitar su movimiento por el viento u otras causas durante el ciclo de curado, es decir, deben permanecer en su lugar hasta que el curado sea completado.

Los compuestos formadores de membrana para el curado pueden ser utilizados para retener la humedad dentro del concreto durante el periodo de curado, pero deben atenderse las siguientes consideraciones:

- el compuesto de curado debe ser aplicado tan pronto como el brillo del agua de sangrado en la superficie desaparezca;
- el compuesto de curado debe ser aplicado a la proporción de cobertura y cubrir la superficie expuesta completamente con una membrana uniforme;
- el compuesto de curado debe permanecer en el lugar hasta que el ciclo de curado se haya completado y,
- el compuesto de curado debe ser compatible con recubrimientos u otros materiales que serán aplicados al elemento en etapas posteriores de construcción.

Algunos compuestos de curado actúan como rompedores de adherencia y puede interferir con la adhesión de productos de reparación o recubrimientos tales como pintura, telas, materiales aislantes u otro tipo de recubrimientos protectores.

Las membranas de curado no deben ser usadas en superficies en donde van a ser aplicados selladores de juntas u otros materiales adhesivos, a menos que, estas membranas sean totalmente removidas al final del periodo de curado.

Las membranas de curado deben ser sólo utilizadas sobre superficies donde la decoloración o el manchado no resulten en un producto rechazado.

6 Refuerzo y presfuerzo

6.1 Refuerzo

Como nos enseñaron en nuestras clases de estructuras de concreto, el concreto simple o sin refuerzo tiene un buen desempeño en compresión, pero presentará grietas y llegará a la falla si se le aplican cargas de manera tal, que se desarrollen elevados esfuerzos de tensión no resistidos por el concreto.

El acero de refuerzo es el que se coloca para absorber y resistir esfuerzos provocados por cargas, por cambios volumétricos debidos a la temperatura y por tensión, quedando ahogado dentro de la masa del concreto, ya sea colado en obra o precolado. El colocar acero de refuerzo en zonas donde se desarrolla tensión, como por ejemplo el lecho inferior de una viga, incrementa la habilidad de un elemento de concreto para soportar cargas.

Es importante considerar ciertos aspectos en la producción tanto de elementos reforzados como presforzados de concreto, como ejemplo usaremos una viga:

Viga reforzada:

- habilitado de acero,
- tamaño y número de varillas,
- posición de las varillas,
- tolerancia en la colocación de las varillas.

Viga presforzada:

- posición de torones y de varillas,
- tamaño y número de torones y de varillas,
- tolerancia en la colocación de torones y varillas,
- tensado de torones.

En las siguientes líneas se desarrollaran más ampliamente estos puntos, que en general describen los criterios que deben cumplirse al reforzar elementos de concreto.

6.1.1 Varilla corrugada de acero.

Desde el no. 3 ($3/8''$) al no. 12 ($1\ 1/2''$) se encuentra en forma comercial. La designación por número corresponde a la cantidad de octavos de pulgada que representa el diámetro nominal, así tomando los límites anteriores de tamaño como ejemplo, tenemos que la varilla del número 3 le corresponde un diámetro nominal de $3/8''$, mientras que una varilla del número 12 le corresponde un diámetro nominal de $12/8''$, lo que es igual a $1\ 1/2''$ (ver tabla 6.1). La varilla corrugada ha sido especialmente fabricada para usarse como refuerzo en el concreto. La superficie de la varilla está provista de rebabas o salientes

llamadas corrugaciones, las cuales evitan el movimiento relativo longitudinal entre la varilla y el concreto que la rodea (ver apartado 4.2). Tiene diferentes clasificaciones de acuerdo a su límite de fluencia (tabla 6.2).

Tabla. 6.1 Características físicas de las varillas corrugadas de acero

NÚMERO	PESO/m	DIMENSIONES NOMINALES				CANTIDAD DE VARILLAS DE 12M PO TONELADA
		DIÁMETRO (mm)	DIÁMETRO (pulgada)	ÁREA (mm ²)	PERÍMETRO (mm)	
2.5	0.388	7.90	5/16	49.00	24.80	-
3	0.560	9.50	3/8	71.00	29.80	150
4	0.994	12.70	1/2	127.00	39.90	84
5	1.552	15.90	5/8	198.00	50.00	53
6	2.235	19.10	3/4	285.00	60.00	37
8	3.973	25.40	1	507.00	79.80	21
10	6.225	31.80	1 1/4	794.00	99.90	13
12	8.938	38.10	1 1/2	1140.00	119.70	9
14	12.147	44.50	1 3/4	1552.00	139.60	-
16	15.890	50.80	2	2026.00	159.60	-
18	20.076	57.20	2 1/4	2565.00	179.50	-

Nota 1. El número de designación de las varillas corrugadas corresponde al número de octavos de pulgada de su diámetro nominal.

Nota 2. El término peso utilizado en esta tabla debe considerarse más adecuadamente como masa refiriéndose a la cantidad de materia que contienen los cuerpos.

Nota 3. La información de esta tabla fue obtenida de la norma mexicana NMX-C-407 ONNCCE-2001 relativa a las varillas corrugadas y lisas de acero y a la información proporcionada por fabricantes de varillas.

Tabla. 6.2 Clasificación del acero de refuerzo por su límite de fluencia

GRADO	LÍMITE DE FLUENCIA MÁXIMA newtons/mm ² (kg/cm ²)	
30	294	3000
42	412	4200
52	510	5200

Nota: Información extraída de la norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001 relativa a las varillas corrugadas y lisas de acero.

Para fines de construcción de elementos prefabricados, es muy importante considerar el **diámetro externo real** del acero de refuerzo (ver figura 6.1) en vez del diámetro nominal. Esta práctica se vuelve crítica en elementos muy reforzados y esbeltos sobre todo al momento de elaborar los planos de taller. Es en esta etapa del proceso donde realmente se representarán las dimensiones y geometría

de los componentes (varillas, ductos, placas de acero, torones, huecos para conexión, etc.) de los elementos a construir y es aquí donde se puede hacer una revisión detallada de los espacios disponibles y proyectados para evitar posteriores demoras por la corrección o modificación del diseño, debido a la falta de espacio para alojar todos los componentes inicialmente considerados. Estos detalles finos resultan en trabajos más planeados y de mejor calidad.

Como puede verse en la figura 6.1 por la presencia de las corrugaciones el diámetro real es un poco mayor. Además de la importancia debido al espacio mayor que representa en la realidad al momento de construir elementos prefabricados, también debe considerarse cuando se hacen perforaciones en miembros de acero estructural para alojar varillas, cuando se desea calcular el tamaño de un grupo de varillas, cuando existen cruces y/o contactos con otros componentes del elemento, entre otras consideraciones. Para incluir la altura de las corrugaciones de varillas corrugadas se debe agregar al diámetro nominal de la varilla aproximadamente:

- ✓ 1/16" (1.6 mm) para varillas del #3, #4 y #5
- ✓ 1/8" (3.1 mm) para varillas del #6, #7, #8 y #9
- ✓ 3/16" (4.7 mm) para varillas del #10, #11 y #14
- ✓ 1/4" (6.0 mm) para varillas del #18

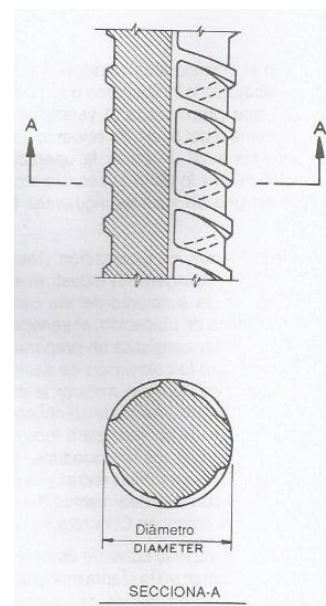


Figura. 6.1 Diámetro externo del acero de refuerzo

Quedándonos la siguiente tabla:

Tamaño de la varilla	Diámetro exterior aprox. incluyendo las corrugaciones (cm)	Tamaño de la varilla	Diámetro exterior aprox. incluyendo las corrugaciones (cm)
# 3	1.11	# 8	2.86
# 4	1.43	# 9	3.18
# 5	1.75	# 10	3.65
# 6	2.22	# 11	4.13
# 7	2.54	# 14	4.76
		# 18	6.35

Tabla. 6.3 Diámetro exterior de varillas de acero de refuerzo

Alambrón. Varilla de acero que está desprovista de rebabas o salientes o si los tiene, no cumple con las especificaciones de corrugación. No está permitido su uso por el ACI 318. Rara vez utilizado en elementos prefabricados de concreto.

Malla electrosoldada. Es un elemento fabricado con acero grado 60, laminado en frío, corrugado o liso electrosoldado (ver tabla 6.4). Se utiliza para reforzar firmes de concreto y capas de compresión en sistemas de losas aligeradas de concreto. Tiene forma cuadriculada y se llega a utilizar en losas “T” o elementos prefabricados menores ornamentales no estructurales.

DISEÑO	CALIBRE DE ALAMBRE		MALLA
	DIÁMETRO mm	ÁREA cm ²	ÁREA TRANSV. cm ² /m
66-1/4-1/4	6.35	0.32	2.08
66-44	5.72	0.26	1.69
66-66	4.88	0.19	1.23
66-88	4.11	0.13	0.87
66-1010	3.43	0.09	0.61

Tabla. 6.4 Características de la malla electrosoldada de acero

6.1.1.1 Características y requisitos de las corrugaciones para varillas corrugadas:

- Deben estar distribuidas de manera uniforme en la varilla.
- Deben estar colocadas a 45° con respecto al eje longitudinal de la varilla.
- La distancia entre las corrugaciones no debe exceder del 70% del diámetro nominal.

6.1.1.1.1 Recomendaciones generales en el manejo del acero de refuerzo

- El acero de refuerzo debe estar libre de oxidación, sin grasa, quiebres, escamas, deformaciones e imperfecciones que afecten su uso.
- La presencia de escamas u oxidación superficial no será causa de rechazo sólo si éstas desaparecen al limpiar el acero manualmente con un cepillo de alambre además de que la varilla cepillada cumpla con las características de dimensión (sobre todo del área transversal) y los requerimientos mecánicos

especificados. **Es aceptable la superficie áspera que se forma durante la oxidación ya que no impedirá la buena y eficiente adherencia entre el acero y el concreto.** (Ver apartado 4.2.1)

Para una completa y adecuada designación o descripción, al solicitar el acero de refuerzo se deben señalar los siguientes datos:

- ° Cantidad expresada en kilogramos (kg), toneladas (ton) o metros (m).
 - ° Número y nombre de la norma a la cual haya que apegarse.
 - ° Número de varilla (ver tabla 6.1).
 - ° Característica de la superficie de contacto (corrugada o lisa).
 - ° Grado.
 - ° Presentación (rollo, barra recta o doblada).
-
- Los embarques, pedidos o remisiones de acero de refuerzo que se reciban en la obra, se estibarán de tal manera que se aisle al material de la humedad excesiva para evitar oxidación; además de considerarlos como lotes independientes entre sí cuidando de no revolver un lote con otro, cuya calidad haya sido verificada o aprobada.
 - Del material estibado se tomarán las muestras para realizar las pruebas y en caso de que los resultados no sean satisfactorios o no cumplan con las normas de calidad establecidas, el material del lote completo será rechazado (ASTM-A-700 Practices for Packing, Marking and Loading Methods for Steel Products for Domestic Shipment).
 - El acero de refuerzo debe estibarse y almacenarse por diámetros y grados en un lugar limpio, libre de contaminación y sobre alguna base para protegerlo contra la oxidación o cualquier otra afectación.
 - Si por alguna circunstancia el acero de refuerzo que ha permanecido almacenado un tiempo considerable (o no se tiene certeza de su procedencia) se encuentra oxidado o deteriorado, se deben realizar una vez más, las pruebas de laboratorio necesarias para determinar si el acero es apto para utilizarse o no.
 - Cuando las pruebas determinen que el grado de oxidación superficial no es tan grave, el retiro del polvo del óxido podrá hacerse mediante el uso de cepillo de alambre.
 - Los procedimientos anteriores se aplicarán para retirar de la superficie del acero de refuerzo residuos de lechadas, cemento, concreto o pintura antes de colar.
 - Debe evitarse el contacto de sustancias grasosas con la superficie de las varillas. Si esto sucediese se limpiarán con solventes que no dejen residuos grasos.
 - El acero de refuerzo no se debe doblar o enderezar de ninguna forma que pueda dañarlo. Salvo lo que se señala en la tabla 6.5 y el doblado normal para el embarque.
 - En aquellos casos en que sea necesario aplicar calor para doblar las varillas, la temperatura no debe ser mayor a 530°C y se debe dejar enfriar lentamente, sin inmersión, mediante la pérdida de calor por contacto con el medio ambiente. Esta práctica será válida si se realiza en el taller, donde se puede verificar y controlar la temperatura de doblado.
 - Los dobleces en obra se deben hacer en frío.

- Si las varillas se encuentran parcialmente inmersas o ahogadas en el concreto, la temperatura de calentamiento debe estar entre los 315 y 400 °C.
- De acuerdo a sanas prácticas de construcción no se permite re-enderezar y desdoblar varillas, ya sea por corrección de armado o para su reutilización.
- Las varillas se deben colocar y amarrar en los lugares indicados en los planos. Es importante verificar el alineamiento y colocación del acero antes de vaciar el concreto. Antes y durante el colado se debe evitar que las varillas se muevan de la posición especificada, mediante amarres, separadores, calzas, etc.

Al respecto cabe señalar que, a diferencia de lo que se cree muchas veces en obra y ha sido motivo de muchas discusiones entre constructores y supervisores, **el alambre de amarre no representa ni tiene alguna función estructural**, por lo que su cantidad y colocación será únicamente la necesaria para garantizar que el acero no cambie de posición durante las actividades de colado y compactación del concreto. Pero en lo relativo a la construcción de elementos prefabricados existe la excepción y la observación a lo anteriormente dicho, única y exclusivamente cuando el armado de acero de refuerzo, parcial o completo, es realizado fuera de la cimbra y va a ser trasladado o izado para colocarlo en su lugar final dentro de la cimbra misma. Es conveniente revisar al armado en sí, como una pequeña estructura en conjunto con sus amarres de alambre y determinar si el amarre denso o alternado, doble o sencillo, etc. y su disposición en la geometría junto con los puntos de izado o sujeción son suficientes y adecuados para garantizar la estabilidad durante el movimiento. En caso negativo tendrá que reforzarse con algunos otros mecanismos (usualmente temporales) como vigas de acero, cables, estobos, cadenas, acero de refuerzo adicional, etc.

Aún en la mayoría de los casos, solo algunos elementos del armado que resistirán una cantidad mayor de esfuerzos necesitarán un amarre especial o “sobrado”, ya que en general, con la práctica actual de fijar (amarrar) el acero de refuerzo en México se logra un buen desempeño al movilizar un armado. Lo anterior tampoco debe de usarse para justificar una cantidad deficiente de amarre, disminución de recursos para este fin o una mala ejecución del amarre del acero de refuerzo en perjuicio de la calidad y seguridad del trabajo en general.

- El acero de refuerzo debe calzarse una vez colocado y armado para lograr el recubrimiento especificado. Se puede hacer con calzas prefabricadas de plástico (figura 6.2) o con calzas elaboradas de concreto o silletas de varilla. Estas últimas no deben utilizarse cuando el concreto estará expuesto directamente a los sulfatos, ya que las puntas de la silleta pueden funcionar como conductores para penetrar al concreto y dañarlo, a menos que las puntas tengan un recubrimiento plástico. **No utilizar madera (o materiales similares) en ningún caso y bajo ninguna circunstancia debido a que la madera pudrirá y dejara el espacio vacío en un corto lapso de tiempo, lo que afectará la continuidad y el área de la sección donde esto ocurra.**
- Tomar en cuenta las siguientes tolerancias en la colocación y ubicación del acero de refuerzo (CSRI: *Concrete Reinforcing Steel Institute. Recommended Practice for Planning Reinforcing Bars. Manual of Standard Practice*).

° En vigas y losas: ± 6 mm en la distancia especificada desde la cara de tensión o de compresión; ± 25 mm en el corte longitudinal y ± 30 mm en la colocación longitudinal.

NÚMERO DE DESIGNACIÓN	DIÁMETRO DEL MANDRIL PARA PRUEBAS DE DOBLADO		
	GRADO 30	GRADO 42	GRADO 52
2.5		3.5 veces d	
3, 4 y 5	3.5 d	3.5 veces d	
6	5 d	5 veces d	5 veces d
8		5 veces d	5 veces d
10		7 veces d	7 veces d
12		8 veces d	8 veces d
14, 16 y 18		9 veces d	9 veces d

Nota 1. La probeta o pedazo de varilla debe doblarse alrededor de un mandril (máquina dobladora de acero en barra, que para el efecto de la prueba se apoya en un punto circular rígido) sin que se agriete en la parte exterior de la zona doblada.

Nota 2. "d" es el diámetro de la varilla utilizada.

Nota 3. Las probetas de varilla con números de designación del 2.5 al 12 deben doblarse alrededor de un mandril a 180° y las del número 14 al 18 en un mandril a 90° .

Fuente: norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001.

Tabla. 6.5 Diámetro del mandril para doblado de acero de refuerzo en frío

° En vigas y columnas, el peralte "d" (distancia entre el armado del lecho sujeto a compresión y el lecho sujeto a tensión) no es permisible que se reduzca más de 3 mm con relación a lo especificado, ni que se reduzca el recubrimiento más de 5 mm.

° En cualquier elemento estructural el recubrimiento no debe variar ± 5 mm de lo especificado.

° En armados críticos se recomienda especificar 75 mm más de longitud con relación a la mínima calculada para varillas, a fin de compensar la acumulación de tolerancias.

- Tomar en cuenta las siguientes tolerancias en los espaciamientos del acero de refuerzo (CSRI: *Concrete Reinforcing Steel Institute. Recommended Practice for Planning Reinforcing Bars. Manual of Standard Practice*).

° En las losas anchas y en muros altos: ± 13 mm de espaciamiento entre varillas con relación a lo especificado.

° En las vigas y columnas, el espaciamiento lateral y el espaciamiento entre capas múltiples de varillas no debe ser menor al especificado pero puede excederse 6 mm como máximo.

° En las columnas, la distancia libre mínima entre varillas paralelas será la que resulte mayor al dividir entre 1.5 veces el tamaño máximo del agregado y, para varillas del no. 2.5 al no. 8, de 38 mm y para varillas del no. 10 o mayores, 1.5 veces el diámetro nominal de la varilla.

° En las vigas y trabes, la distancia libre mínima entre las varillas paralelas será la que resulte mayor al dividir entre 1.5 veces el tamaño máximo del agregado y, para varillas del no. 2.5 al no. 8, de 38 mm y para varillas del no.10 o mayores, 1.5 veces el diámetro nominal de la varilla.

° En las vigas y columnas, el espaciamiento entre los estribos será ± 25 mm, pero es importante evitar que se acumule el error sucesivamente.

° Para muros y losas macizas (no reticulares o nervadas) el espaciamiento máximo entre los ejes del refuerzo principal será el que resulte menor entre 46 cm y 3 veces el espesor del muro o losa.

- Se permite el uso de paquetes de varillas de acero de refuerzo corrugadas paralelas y atadas para hacerlas funcionar como una unidad, debidamente amarradas y confinadas dentro de estribos. El número máximo de varillas en paquete es de 4. Es permisible tener traslapes en las varillas de estos paquetes a manera de escalonamiento: mínimo 40 veces el diámetro de la varilla que se trate. Este escalonamiento aumentará 20% para un paquete de 3 varillas y 33% para uno de 4.

6.1.1.1.2 Recomendaciones y requisitos para el habilitado de dobleces

- En la elaboración de bastones a base de acero de refuerzo el gancho del extremo será un doblez semicircular de 180° más una extensión mínima de 4 veces el diámetro de la varilla, pero no menor a 65 mm (tabla 6.6)

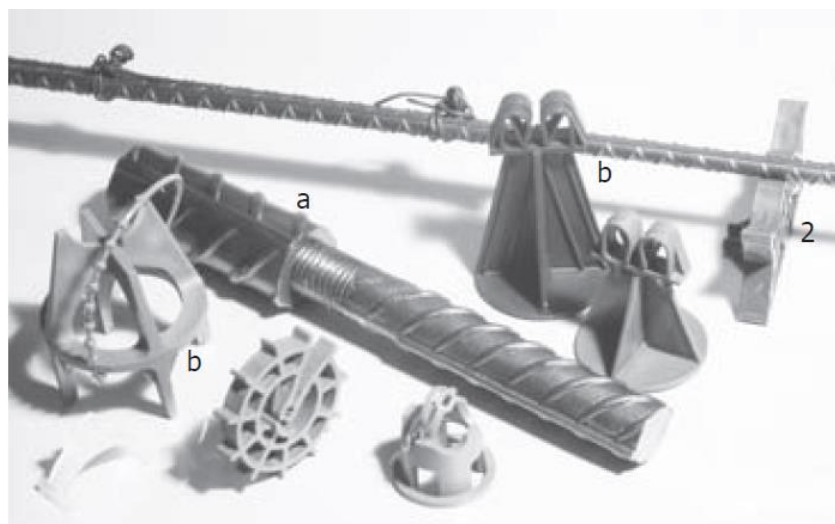


Figura. 6.2 Accesorios para acero de refuerzo.

a. Conector mecánico que sustituye traslapes del acero de refuerzo.

b. Separadores de plástico para garantizar el recubrimiento del acero de refuerzo.

- La escuadra a base de acero de refuerzo será un doblez perpendicular (90°) al eje longitudinal de la varilla más una extensión 12 veces el diámetro de la varilla como mínimo y en el extremo libre.
- Para varillas o alambIÓN que funcionen como estribos, el doblez debe ser a 135° más una extensión mínima de 6 veces el diámetro de la varilla o alambIÓN pero no menor de 65 mm.

6.1.1.1.3 Recomendaciones y requisitos para el habilitado y armado de traslapes y juntas

- Todas las uniones de varillas se harán mediante traslapes con un empalme de 40 veces el diámetro de la varilla que se empalma, excepto cuando se determine otra especificación diferente.
- Los traslapes no deben coincidir con secciones de máximo esfuerzo. A menos que se tomen las acciones necesarias avaladas por el proyectista, como aumentar la longitud del traslape o especificar un refuerzo adicional a base de estribos alrededor y a lo largo de la longitud empalmada.
- La ubicación aceptable para un traslape es donde el esfuerzo de tensión sea menor. Ese lugar no debe excederse de 1/5 de claro desde los apoyos principales en los elementos estructurales.
- Es aceptable el traslape y amarre entre sí de las varillas desde el no. 3 al no. 10.
- Los traslapes no podrán hacerse entre varillas de diferente diámetro.
- Si se requiere dar continuidad a varillas mayores del no. 10 no es aceptable el traslape. En este caso es recomendable la conexión por medio de soldadura.
- La especificación de resistencia para la junta soldada debe ser igual al 125% de la resistencia de fluencia del acero de refuerzo utilizado (Código AWS D12.1, *Reinforcing Steel Welding Code. American Welding Society*).
- Es deseable realizar pruebas físicas y radiográficas de las soldaduras para verificar la calidad y la eficiencia. Para tal efecto es importante revisar las condiciones contractuales y especificaciones que indiquen la obligatoriedad y la frecuencia para llevar a cabo estas inspecciones.
- Las conexiones a tope se ejecutarán con soldadura de relleno. El diseñador estructural del proyecto debe especificar el procedimiento más adecuado.
- Evitar traslapar o soldar más del 33% del acero de refuerzo en una misma sección.

6.1.1.1.4 Recomendaciones y requisitos para el recubrimiento del acero de refuerzo

- Para proteger a las varillas de los efectos del fuego y de la corrosión, el recubrimiento de concreto debe estar de acuerdo con el contenido de las tablas 6.7, 6.8 y 6.9.

6.1.1.1.5 Recomendaciones y requisitos para la colocación del acero de refuerzo

- Durante el proceso del vaciado del concreto, las varillas deben colocarse y mantenerse de manera firme en su posición, forma, longitud y separación.

NÚMERO DE VARILLA	GANCHOS DE 180°		ESCUADRAS DE 90°	
	cm A o G (pulg)	cm J (pulg)	cm A o G (pulg)	
2.5	13	6 (2 1/2")	13	(5")
3	(5")	8 (3")	15	(6")
4	13	10 (4")	20	(8")
5	(5")	13 (5")	26	(10")
6	15	15 (6")	31	(12")
8	(5")	20 (8")	41	(16")
10	18	32 (12 1/2")	54	(21 1/2")
12	(7")	46 (23 3/4")	69	(27")

Nota 1. Información obtenida de A.C.I.318.63

Nota 2. Aplicable a varillas grado 42

Tabla. 6.6 Dimensiones recomendadas para ganchos y escuadras de varilla corrugada

- A ningún individuo se le otorgará la autoridad para cortar acero de refuerzo debido a una congestión, saturación o conflicto con otros elementos ahogados sin la revisión y aprobación por escrito del ingeniero responsable del diseño.

6.1.1.1.6 Alcances y criterios de medición y cuantificación

- Se considera la tonelada (ton) como unidad de medición, aunque en ocasiones es posible considerar el kilogramo (kg). Se calculará el peso de las varillas por la unidad de longitud que especifique la norma mexicana NMX-C-407 ONNCCE-2001 y las dimensiones del proyecto.
- Para fines de estimación o cobro, no se considera convencionalmente el peso del acero desperdiciado por los cortes, tampoco el utilizado para los traslapes, ganchos y escuadras. El acero que se ocupe en estas extensiones debe considerarse en el precio unitario. Generalmente se acepta el 7% adicional como factor de desperdicio, traslapes, ganchos y escuadras en construcción convencional, mientras que en prefabricación se reduce a la mitad, es decir 3.5%.

- En algunas ocasiones justificables, como la falta de varilla de algún diámetro especificado y con la autorización del proyectista, el constructor y/o prefabricador solicitará la sustitución del acero de la sección indicada.

TIPO DE EXPOSICIÓN	CONDICIONES AMBIENTALES
1	Ambiente seco. Interior de edificaciones habitables. Componentes interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni a suelos o agua. Regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor a tres meses al año.
2a	Ambiente húmedo sin congelamiento. Interior de edificaciones con humedad relativa mayor a 60% por más de tres meses al año. Elementos exteriores expuestos al viento pero no al congelamiento. Elementos en suelos no reactivos ni agresivos y/o en agua sin posibilidad de congelamiento.
2b	Ambiente húmedo con congelamiento. Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento. Elementos en suelos no reactivos ni agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento.
3	Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes. Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento y/o exposición a agentes descongelantes. Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes.
4	Ambiente marino. Elementos en zonas de humedad sumergidas en el mar con una cara expuesta al aire. Elementos en aire saturado de sales (zona costera).

Tabla. 6.7 Clasificación de la exposición ambiental

5a	Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.
5b	Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.
5c	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.
5d	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.

Nota 1. Información obtenida de la norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999 relativa al concreto hidráulico para uso estructural.

Nota 2. En todos los casos registrará la condición o combinación de exposición más agresiva.

Tabla. 6.7 Clasificación de la exposición ambiental (continuación)

TIPO DE EXPOSICIÓN	RECUBRIMIENTO MÍNIMO (mm) REFUERZO NORMAL	RECUBRIMIENTO MÍNIMO (mm) PRESFORZADO
1	15	25
2a y 2b	30	35
3 y 4	40	50
5a, 5b, 5c, 5d	ver nota 3	ver nota 3

Nota 1. Información obtenida de la norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999 relativa al concreto hidráulico para uso estructural.

Nota 2. Los valores mínimos de recubrimiento deben incluir tolerancias para asegurar su valor bajo cualquier circunstancia. El valor de la tolerancia depende del control de calidad de la construcción. Con un adecuado control de calidad y un curado eficiente, la tolerancia es de 5mm; sin control de calidad debe incrementarse a 10 mm y si el curado es inadecuado a 20 mm.

Nota 3. Depende del tipo de ambiente en que se encuentre (ver tabla 15).

Tabla. 6.8 Recubrimientos mínimos por tipo de exposición ambiental del concreto estructural.

UBICACIÓN	RECUBRIMIENTO
Concreto en contacto directo y permanente con el terreno o con el suelo.	75 mm
Concreto expuesto al agua de mar (no aplica a pilotes de concreto precolado)	100 mm
Concreto expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo: varillas desde el no. 2.5 al no. 5 varillas desde el no. 5 a mayores	38 mm 50 mm
Concreto en losas, muros, columnas y trabes: varillas desde el no. 2.5 al no. 5 varillas desde el no. 5 a mayores	desde 13 a 20 mm desde 19 a 40 mm

Nota 1: La dimensión mínima del recubrimiento en cualquiera de los casos debe ser igual a 1.5 veces el tamaño máximo del agregado utilizado.
Fuente: NMX-C-403-ONNCCE-1999

Tabla. 6.9 Recubrimientos mínimos por tipo de exposición ambiental del concreto convencional

6.2 Presfuerzo

El presfuerzo es un método altamente efectivo para tomar ventaja de la propiedad más importante del concreto: su resistencia a la compresión. El concreto presforzado trabaja comprimiendo zonas específicas que contrarrestan a la tensión producida por las cargas aplicadas.

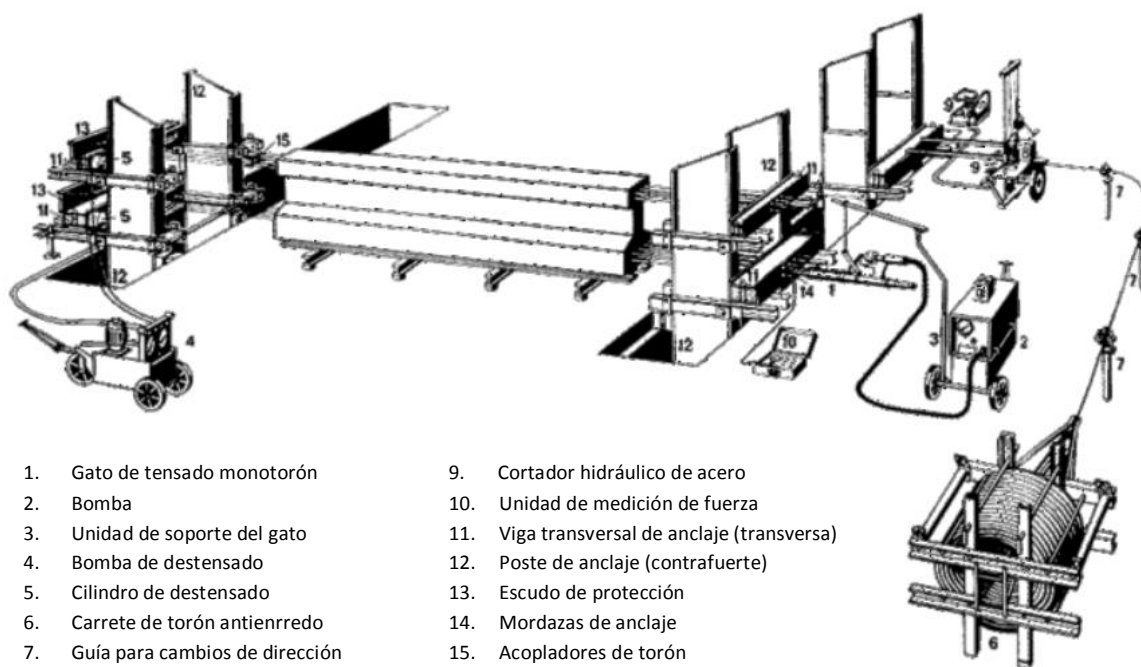
Como se vio en el apartado 1.4, existen dos tipos generales de presfuerzo:

- ❖ **Pretensado:** incluye el tensado de torones entre los anclajes **antes** de que el concreto sea colocado.
- ❖ **Postensado:** incluye el tensado de los torones **después** de que el concreto es colocado y ha alcanzado una adecuada resistencia.

La aplicación de la carga de tensado debe ser controlada cuidadosamente en ambos métodos tanto por parte de producción como por control de calidad. Un tensado impreciso puede dar como resultado una contraflecha diferencial o una resistencia inadecuada del elemento.

6.2.1 Proceso de tensado

En los planos ejecutivos de elementos presforzados se especifica una fuerza para cada torón. Esta fuerza es requerida antes de transferir en caso de elementos tensados, o posterior al tensado en el caso de elementos postensados. En cualquier caso, la fuerza debe de ser medida por medio de un monitoreo preciso de la fuerza aplicada; la elongación debe ser medida para asegurar y comprobar que la fuerza ha sido uniformemente distribuida en todo lo largo del torón. La figura 6.3 muestra un ejemplo simplificado de un arreglo para tensado monotorón.



- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. Gato de tensado monotorón | 9. Cortador hidráulico de acero |
| 2. Bomba | 10. Unidad de medición de fuerza |
| 3. Unidad de soporte del gato | 11. Viga transversal de anclaje (transversa) |
| 4. Bomba de destensado | 12. Poste de anclaje (contrafuerte) |
| 5. Cilindro de destensado | 13. Escudo de protección |
| 6. Carrete de torón antienredo | 14. Mordazas de anclaje |
| 7. Guía para cambios de dirección | 15. Acopladores de torón |

Figura. 6.3 Distribución para tensado de torón. http://www.paul.eu/planung_beratung+M52087573ab0.html

La figura 6.4 muestra un escudo de protección colocado en una cama de colado de losas huecas. El escudo portátil está colocado para protección de los trabajadores en caso de que el torón falle. La gran cantidad de energía liberada en tan poco tiempo por la falla es, en la mayoría de los casos, peligrosa o fatal. El tensado de torón es la práctica más peligrosa si los procedimientos correctos no se llevan a cabo. Todas las reglas, planes y procedimientos de seguridad de la planta deben de ser ejecutados estrictamente (ver capítulo 3).

La fuerza aplicada se mide usualmente con manómetros de presión conectados al sistema hidráulico del gato como se describe en el apartado 6.2.2. Los dinamómetros o celdas de carga también se pueden utilizar para medir la fuerza en el torón. La elongación se mide generalmente con una regla, flexómetro, u otro dispositivo con graduación adecuada.

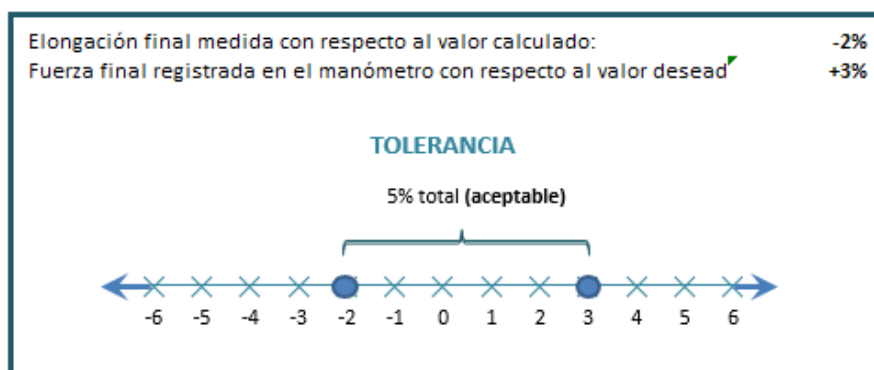
Se requieren tres revisiones de tolerancia diferentes entre sí para las operaciones de tensado.

- ✓ La **fuerza aplicada** debe de estar dentro del **5%** de la **fuerza calculada**.
- ✓ La **elongación (alargamiento) medida** debe de estar dentro del **5%** de la **elongación calculada** o esperada.
- ✓ La **desviación o diferencia de la fuerza aplicada** y la **desviación de la elongación medida** no debe presentar una separación mayor a **5 puntos porcentuales**.

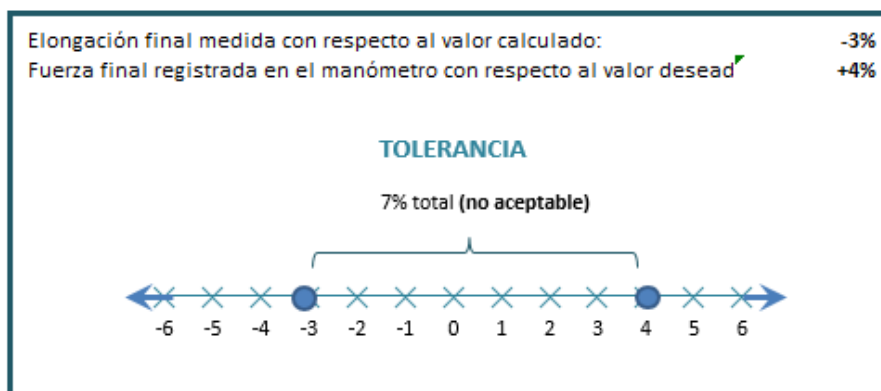


Figura. 6.4 Escudo para protección de los trabajadores.

Para entender mejor estos conceptos se utiliza una recta numérica donde se grafica el porcentaje de error de la fuerza aplicada y la elongación medida.



En este caso la diferencia entre la elongación final medida y la fuerza aplicada es de 5% por lo que cae dentro de la tolerancia y debe ser aceptada.



En este caso la diferencia entre la elongación final medida y la fuerza aplicada es de 7% por lo que cae fuera de la tolerancia y debe ser rechazada.

En los dos ejemplos anteriores se cumple que la fuerza aplicada y la elongación medida caen dentro de los rangos aceptados pero la diferencia total entre ambas solo en el primer caso es igual o menor que cinco por lo que se acepta; no el segundo caso donde la diferencia es 7% por lo que se rechaza.

6.2.2 Métodos para medición de fuerza

Los métodos para medir la fuerza de tensión generalmente incluyen uno o más de los siguientes dispositivos:

- Manómetros que miden la presión del fluido aplicado a los gatos hidráulicos y, en la mayoría de los casos, proveen una lectura directa de la fuerza aplicada,
- Dinamómetros conectados al sistema de tensado (ver figura 6.5),
- Celdas de carga conectadas dentro del sistema de tensión en tal forma que se produzca compresión en ellas durante el proceso de tensado,
- Lectores digitales que proporcionan una lectura directa de la fuerza aplicada basadas en la presión hidráulica en el gato o celdas de carga en el gato (ver figura 6.6)

El PCI indica que todos los sistemas para medición de fuerza de tensado deben de ser calibrados como sea requerido, algunos lineamientos que deben seguirse para tal efecto, dependiendo del tipo de equipo y de las recomendaciones del fabricante, son:

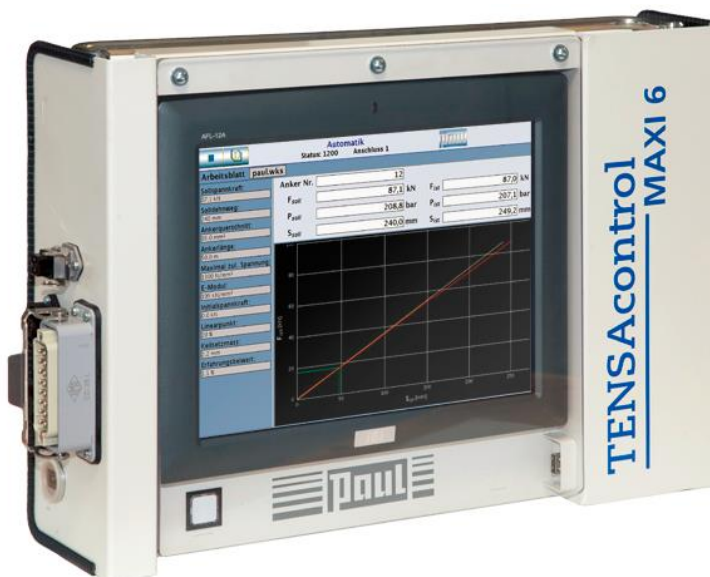
- ✓ Al inicio de cada obra.
- ✓ Cada vez que sea transportado.

- ✓ Cada vez que sea reparado o se hayan intercambiado componentes.
- ✓ Tras largos periodos de almacenamiento.
- ✓ Cuando los trabajos que se estén realizando representen un grado de seguridad alto, la frecuencia de calibración deberá incrementarse.
- ✓ Cuando se sospeche que los resultados son incorrectos.
- ✓ Cuando menos cada 12 meses.



Dinamómetro DMS

Figura. 6.5 Dinamómetro marca Paul



Sistema de medición y protocolo TENSACONTROL MAXI 6

Figura. 6.6 Lector digital para fuerza de tensado.

6.2.2.1 Sistemas de medición por manómetros

Todos los métodos para la medición de fuerza deben tener la capacidad de indicar la fuerza dentro de una precisión del 2% de fuerza real aplicada. El sistema completo de tensado consistente en manómetros, gatos, bombas, mangueras y conexiones debe ser calibrado como una unidad en la misma condición y disposición como ese conjunto será utilizado en la operación de tensado.

La calibración debe de ser realizada por una institución reconocida y certificada para tal fin, en el caso de México el Instituto del Cemento y del Concreto (IMCYC) puede proveer de ese servicio.

Se debe de construir una curva de calibración o gráfica para cada sistema de tensado. Si la fuerza indicada permanece dentro del 2% de la fuerza real, entonces la fuerza indicada puede ser leída sin corrección. Si la variación entre la fuerza indicada y la fuerza real es mayor al 2%, entonces se debe aplicar un factor de corrección. Generalmente la corrección consiste en ajustar la lectura del manómetro de acuerdo a una gráfica de calibración que indica lecturas del manómetro versus fuerzas reales.

Existen sistemas de tensado múltiples, los cuales son capaces de realizar el tensado de varios torones a la vez, que utilizan gatos de gran capacidad. Para calibrarlos se utiliza un manómetro maestro que debe de ser calibrado al menos cada 12 meses.

Los aparatos de medición suelen no ser precisos en los rangos extremos de su capacidad. Un manómetro de alta capacidad utilizado para medir una carga final de tensado puede carecer de una precisión requerida para medir la tensión inicial del torón. Por lo tanto, un sistema de tensado monotorón debe de ser equipado con un manómetro de baja capacidad para medir la fuerza inicial aplicada al torón y un manómetro de alta capacidad para medir la fuerza final. Los manómetros deben de ser utilizados en la parte media que comprenda el 80% de su graduación completa a menos que la calibración demuestre que existe precisión del 2% en el 10% superior o inferior de su rango.

Como un arreglo típico, se tienen manómetros de baja presión en relación a los de alta presión del orden de 1 a 10; es decir, si los manómetros de alta presión tienen un máximo de 36,000 kg se tendrá un manómetro de baja presión del orden de 3,600 kg. Se debe de contar con válvulas de control que direccionan el fluido hidráulico al manómetro de baja presión para la tensión inicial y al manómetro de alta presión para el tensado final. También de debe de proveer de válvulas automáticas de alivio de presión para controlar y prefijar la carga durante el tensado.

6.2.2.2 Control de la fuerza del gato

Los sistemas de tensado y manómetros deben estar equipados con válvulas automáticas de alivio de presión para detener automáticamente el movimiento del gato cuando la presión dentro del sistema hidráulico alcance el nivel preestablecido para la fuerza inicial y para la fuerza final. La precisión de la regulación de la válvula debe de ser revisada al inicio de la operación de tensado y cuando sea que se sospeche que la regulación no es precisa. Un incremento de temperatura del fluido hidráulico durante las operaciones de tensado afectaran la regulación, por lo tanto, el sistema del gato debe de precalentarse previamente a regular la válvula de derivación.

Los sistemas de tensado sin válvula de alivio de presión dependen de la habilidad del operador para detener manualmente el movimiento del gato cuando la fuerza de tensado se ha alcanzado. Cuando se utiliza un interruptor de corte manual la velocidad de aplicación de carga debe ser lo suficientemente lenta para determinar con precisión la fuerza aplicada. Las fuerzas de tensado deben ser monitoreadas adecuadamente y registradas para confirmar el cumplimiento de los requerimientos de tolerancia. El indicado para ejecutar este monitoreo es el inspector de control de calidad.

6.2.2.3 Falla o rotura de alambres en tendones o torones

Los torones usualmente están formados de siete alambres, algunas veces durante la operación de tensado se llega a romper un solo alambre. **El torón que contiene el alambre roto no necesita reemplazarse si el área del alambre roto no excede al 2% del área total del acero de presfuerzo en el elemento.** Por ejemplo, si 8 torones contienen 56 alambres (8 torones x 7 alambres/torón), un alambre roto en esta configuración es aceptable porque el área total de ese solo alambre es menor al 2% del total de todos los alambres. ($1/56 = 0.01786$). Tal disposición también está referida en el ACI 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural* (ACI 318S-05), en el punto 18.20.4.

Este límite del 2% de alambre roto no aplica en todos los casos. Si un alambre se rompe en un torón de tres hilos o si dos alambres se rompen dentro de un torón de siete hilos, el torón en su conjunto tendrá que ser reemplazado.

Los alambres fallan algunas veces en la punta del barrilete o anclaje debido al asentamiento no uniforme de las cuñas dentro del barrilete. Esto puede ser causado por mezclar diferentes cuñas de manufactura distinta dentro de un mismo barrilete. El uso de anillitas u o-rings dañados o el uso sin resorte y tapa de los barriletes también pueden desencadenar la falla de los alambres durante el tensado.

La forma correcta de dar mantenimiento a los barriletes después de cada uso se menciona en el apéndice D “Chuck Use and Maintenance Procedures” de los manuales:

- Manual for Quality Control for Plants and Production of Architectural Precast Concrete Products MNL 117, publicado por el PCI
- Manual for Quality Control for Plants and Production of Structural Precast Concrete Products MNL 116, publicado por el PCI

el cual se traduce de forma integral también como apéndice D al final de esta tesis.

La falla de los alambres también puede ser causada por la fricción del torón contra las cuñas si el gato de tensado no está debidamente nivelado durante el tensado. Cualquier falla de alambre durante el tensado debe ser investigada a fondo y reportada al departamento de ingeniería. Se debe poner todo el esfuerzo y empeño para prevenir la falla de alambres.

Como ya se había mencionado, la soldadura debe de evitarse en las cercanías de cualquier torón de presfuerzo, ya sea tensado o no tensado. Los torones no deben ser expuestos a escoria, calor directo o flujo de corriente eléctrica (ver apartado 4.3.5). La falta de atención a este punto puede desencadenar accidentes graves o incluso fatales por las explicaciones ya mencionadas en el apartado referido.

6.2.2.4 Registros de calibración para el equipo de tensado.

Los registros escritos de calibración deben de realizarse para cada uno de los distintos sistemas de tensado o combinaciones de sistemas utilizados. Como datos mínimos se requiere que se incluya lo siguiente:

- ✓ la fecha de calibración;
- ✓ el nombre de la institución o empresa que realizó la calibración o el ingeniero certificado y facultado que haya supervisado la calibración;
- ✓ el método de calibración (celda de carga, anillo de carga, máquina de prueba) y su referencia de calibración o patrón;
- ✓ el rango de calibración con el manómetro revisado o lector digital comparado con la presión real o fuerza indicada por el instrumento de calibración y,
- ✓ la gráfica de la lectura del manómetro revisado contra las lecturas reales mostradas en el instrumento de calibración.

El sistema de tensado debe ser calibrado en valores ligeramente mayores de la fuerza de tensión máxima que se espera sea aplicada por ese sistema. Esto asegura que el sistema es preciso en todas las cargas deseadas. El personal responsable de realizar los cálculos de tensado o evaluar las tolerancias de tensado debe utilizar los registros de calibración. Las operaciones de tensado pueden parecer fuera de tolerancia, pero cuando los errores en el sistema de tensado se corrigen, el tensado puede regresar a estar dentro de los parámetros de tolerancia aceptados. La figura 6.7 ilustra una gráfica de calibración para un gato monotorón equipado con un manómetro que muestra una escala en libras por pulgada cuadrada. Este gato no debiera ser utilizado a más de 4000 psi (40,000 lb), ya que ese es el límite de los datos de calibración.

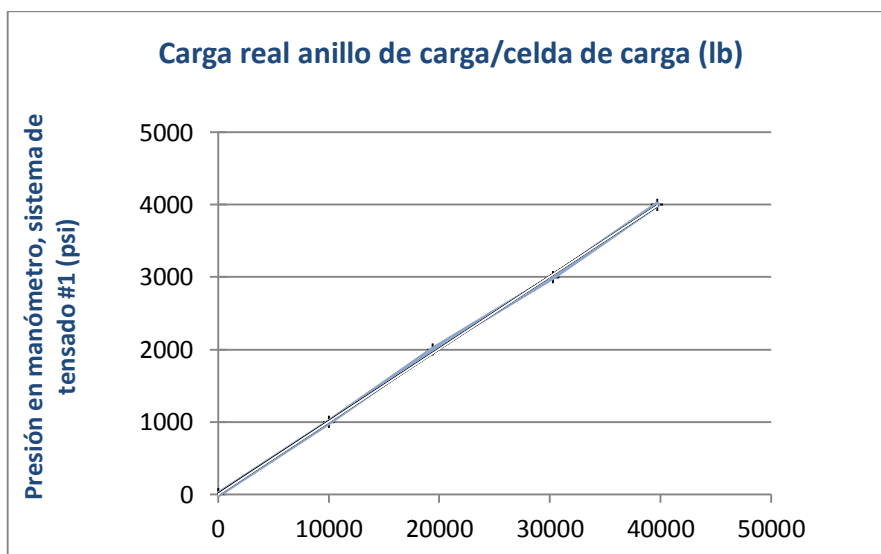


Figura. 6.7 Gráfica de calibración

6.3 Pretensado

6.3.1 Generalidades

La fuerza de tensado puede ser aplicada al torón en dos fases: fuerza inicial y fuerza final. Estos puntos serán explicados en secciones siguientes.

El manual de calidad de la planta de prefabricados debe de incluir, en forma escrita, procedimientos de tensado para todas las operaciones de tensado. El personal autorizado y entrenado que ejecuta y revisa el tensado debe de estar familiarizado con dicho manual.

Los procedimientos específicos deben de incluir:

- ✓ Operación y control del equipo de tensado,
- ✓ Operación y control del sistema de manómetros,
- ✓ Tensado a una fuerza inicial en preparación para la medición de la elongación,
- ✓ Tensado a una fuerza final, midiendo y registrando la elongación correspondiente,
- ✓ Revisión del asentamiento del anclaje del torón,
- ✓ Procedimiento en caso de resultados fuera de tolerancia,
- ✓ Procedimiento en caso de falla de alambres,
- ✓ Métodos alternativos de tensado y/o medición,
- ✓ Destensado y desmolde.

6.3.2 Almacenamiento del acero de presfuerzo

El torón de presfuerzo puede adquirirse en varios diámetros ya sea de material relevado de esfuerzo o de baja relajación. Se tiene disponibilidad de torón con resistencias últimas de 250 ksi, 270 ksi y 300 ksi. Es extremadamente importante que cada carrete o rollo de torón sea apropiadamente identificado con una etiqueta que permanezca en el torón hasta que se haya usado completamente el rollo. Estas etiquetas generalmente contienen la siguiente información:

- Nombre del fabricante.
- Diámetro.
- Grado.
- Numero de carrete o identificación de producción.
- Identificación de colada.

Esta información permite al usuario disponer de la trazabilidad de cada embarque y relacionarlo a un certificado de calidad que enlista las propiedades del torón. Las propiedades del torón en uso deben ser claramente conocidas e identificadas. El tensar un torón de baja capacidad a una carga

especificada para un torón de mayor capacidad puede causar la falla del torón durante el tensado. También reduce la capacidad de resistir cargas del elemento prefabricado.

El torón no debe permanecer expuesto al agua, sufrir abrasión, presentar melladuras o cocas (ver figura 6.8) mientras este almacenado o durante su colocación o instalación en las camas de colado.



Figura. 6.8 “Cocas” en cable, debidas a manejo inadecuado.

Los rollos de torón deben de almacenarse sin tener contacto con el suelo o cualquier material que pueda contener agua. Las losas de concreto, tarimas de madera o llantas de desecho se utilizan a menudo para este fin. El torón que presenta picaduras no debe ser utilizado. En general, se debe tener un cuidado razonable para proteger el torón mientras se encuentra almacenado. Algunas otras publicaciones también recomiendan que se mantenga en lugares cerrados con sistemas de ventilación y calefacción de forma tal que mantengan una humedad relativa menor al 20%, además que se eviten almacenamientos abiertos cercanos a refinerías o plantas industriales donde se queme carbón o petróleo ya que emiten sulfatos a la atmosfera.

Los torones ya pretensados no deben ser expuestos a la atmosfera más de 24 horas antes de que se cuele el concreto sobre ellos.

Se puede tener una referencia en *“Evaluation of Degree Rusting on Prestressed Concrete Strand”* en el *PCI Journal* de mayo-junio de 1992, con descripción y fotografías detalladas de distintos grados de oxidación que son aceptables. (Figura 6.9)

El documento recomienda el uso de una fibra Scotch, como la utilizada para lavar trastes, para limpiar el torón, remover los productos de la corrosión y exponer las picaduras. Dicho documento es una ayuda para los inspectores de campo en cuanto a tomar la decisión de utilizar o no el torón que presenta corrosión.

Las fotografías del 1 al 6 muestran torón con diferentes grados de óxido, tal como se describen a continuación:

- La foto 1 representa un torón nuevo sin óxido y con una superficie brillante,
- La foto 2 a la 6 ilustran torón con varias cantidades de corrosión que fueron expuestos a un ambiente corrosivo por diferentes periodos de tiempo e incluyen algunas picaduras que son consideradas causa de rechazo.

La causa de rechazo se debe a que una picadura detectada a simple vista sin ser una persona entrenada, representa un plano de falla y reduce enormemente la capacidad del torón de resistir cargas de fatiga o repetidas.

Para evaluar la extensión del picado del acero, el óxido superficial debe de removerse con la fibra Scotch Brite No. 96 elaborada por 3M, o su equivalente, elaborada de material sintético no metálico.

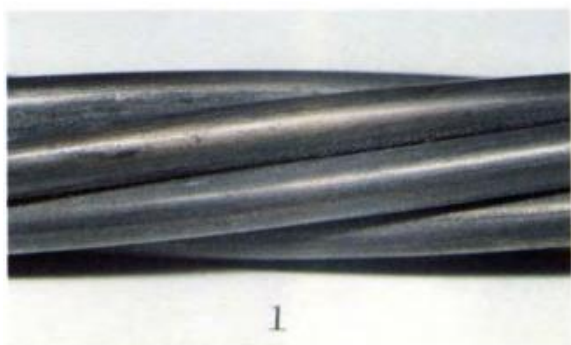


Photo 1. Strand surface before cleaning.

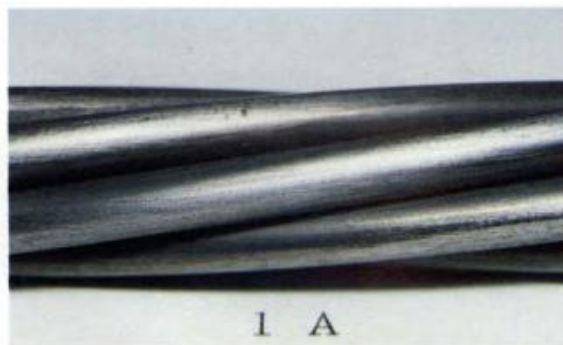


Photo 1A. Strand surface after cleaning.



Photo 2. Strand surface before cleaning.

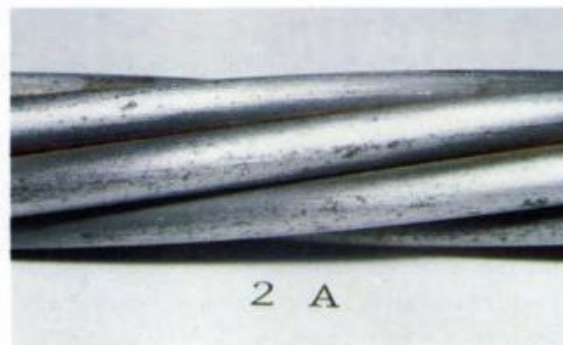


Photo 2A. Strand surface after cleaning.



Photo 3. Strand surface before cleaning.

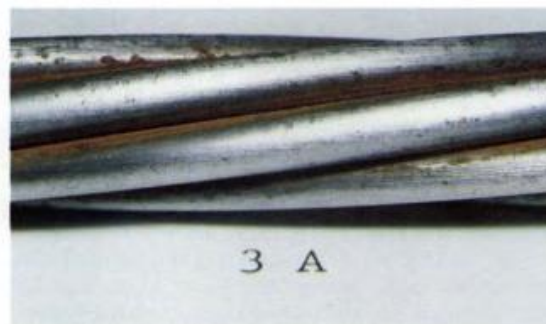


Photo 3A. Strand surface after cleaning.



Photo 4. Strand surface before cleaning.



Photo 4A. Strand surface after cleaning.



Photo 5. Strand surface before cleaning.



Photo 5A. Strand surface after cleaning.



Photo 6. Strand surface before cleaning.



Photo 6A. Strand surface after cleaning.

Figura. 6.9 Distintos grados de oxidación en el acero de presfuerzo (*PCI Journal* mayo-junio 1992).

Después de haber limpiado el torón se hacen las comparaciones con la fotografías de la figura 6.9 y se acepta o rechaza el torón en cuestión.

En opinión de Augusto S. Sason, P.E., quien escribe el artículo, “las fotografías 1 al 3 muestran torones aceptables. La fotografía 4 representa un torón que está en el límite y puede estar sujeto a discusión, acuerdos o compromisos. Algunos ingenieros pueden encontrar este nivel de corrosión objetable para algunas aplicaciones críticas. Las fotografías 5 y 6 representan un torón inaceptable”.

Las bandas de acero o flejes que sujetan el torón en los rollos no se deben de cortar antes de colocar el rollo en un marco apropiado o carrete, ya que se “almacena” una gran cantidad de energía en el proceso de enrollado y de su misma producción, lo que causa que el torón tienda a desenrollarse abruptamente si no se encuentra confinado, tal como suele pasar en un resorte comprimido. El corte del flejado debe de hacerse con tijeras mecánicas, nunca se debe hacer el corte con equipo de oxicorte o algún otro que cause calor y altere las propiedades del torón (ver apartado 4.3.5).

6.3.3 Superficie del torón

Para que el concreto presforzado se comporte como ha sido diseñado, el concreto debe de adherirse a las superficies del torón (ver apartado 4.3.5.2). El torón debe estar libre de agentes desmoldantes, suciedad, grasa, aceite, u otros contaminantes. Los desmoldantes y la suciedad son los contaminantes más comunes en las plantas de prefabricados.

- Las acumulaciones de agente desmoldante (pequeños charcos) sobre la cimbra deben de ser limpiados previamente a la colocación del torón. Los agentes desmoldantes nunca se deben de asperjar en la cimbra después de haber colocado los tendidos de torón. Si se contaminan los torones se deben limpiar con solventes especiales para que se realice una limpieza efectiva. Este proceso es muy difícil de ejecutar si los torones se encuentran al fondo de una cimbra con un peralte significativo.
- Los torones no deben de ser arrastrados a través de lodo durante la instalación o tendido. Las superficies pavimentadas al final de las camas de colado pueden prevenir esto.
- Es mucho mejor prevenir la contaminación del torón que intentar limpiar los torones después de que se han contaminado. El buen desempeño estructural de los elementos de concreto presforzado depende de la buena adherencia entre el concreto y el torón.

6.3.4 Colocación o tendido de torón

Los torones se deben de colocar entre anclajes y a través de dispositivos de cambio de dirección sin la interferencia de la cimbra, otros torones, acero de refuerzo, insertos o elementos ahogados dentro o al final de los elementos de concreto.

- Al cruzar torones dentro de un elemento se puede crear fricción durante el tensado y causar daño o falla del mismo torón. Los torones cruzados deben de corregirse.
- Los torones también pueden dañarse por frotarse contra el acero de refuerzo o las tapas de la cimbra durante el tensado. La fricción que se genera por el frotamiento reducirá la fuerza real aplicada al torón.

Cuando el torón es retirado del rollo en el que viene empaquetado, se debe retirar por la parte interior del lado correcto, de otra forma se producirá un enmarañamiento del cable. Los rollos de torón generalmente tienen una flecha que indica cual lado debe utilizarse. Al torón debe permitírsele rotar en tanto que está siendo extraído del rollo para prevenir torceduras o “cocas”. El torón también se debe de proteger de los daños que puedan causarle vehículos como camionetas, grúas u otros equipos móviles.

El torón entonces puede ser cortado con equipo de oxicorte, con disco de corte o mediante una cortadora de cizallas (figura 6.10). Si el torón se corta mediante oxicorte, el extremo (que sufrió calentamiento) debe de separarse de los barriletes al menos 10 cm porque el calor de la antorcha debilita el torón en un tramo corto (ver apartado 4.3.5).

Cuando un torón es amordazado o sujetado por un barrilete durante el tensado, se producen en su superficie unas pequeñas melladuras o cortes. Dichos cortes que producen los dientes de las cuñas del barrilete sobre el torón al comprimirse, debilitan esa parte, por lo que no se debe retensar o utilizar dentro de elementos presforzados. Estos pequeños cortes conllevan una reducción significativa en la resistencia del torón y pueden desencadenar una falla. En ciertos casos, la fuerza del torón puede ser liberada después de que se ha tensado. Es este caso, se deben extremar precauciones para proteger al personal durante el destensado y retensado. El torón quizá pueda ser sujetado nuevamente en el punto donde las marcas de los dientes se localizan, pero cualquier segmento de torón que contenga marcas de dientes, melladuras o pequeños cortes no debe de ubicarse dentro del colado.

6.3.5 Barriletes

Los torones y conectores deben de limpiarse e inspeccionarse después de cada uso. Los componentes típicos que componen un barrilete (figura 4.12) son:

- barril;
- cuñas dentadas; (figura 6.11)
- anillitas u o-rings (figura 6.11) que mantienen las cuñas en posición; y
- tapa con resorte que presiona las cuñas uniformemente hacia adentro del barril.

Todos los componentes de un barrilete deben de ser compatibles y proceder del mismo fabricante. Los componentes de diferentes tamaños y/o provenientes de diferente fabricante no deben de mezclarse entre sí.

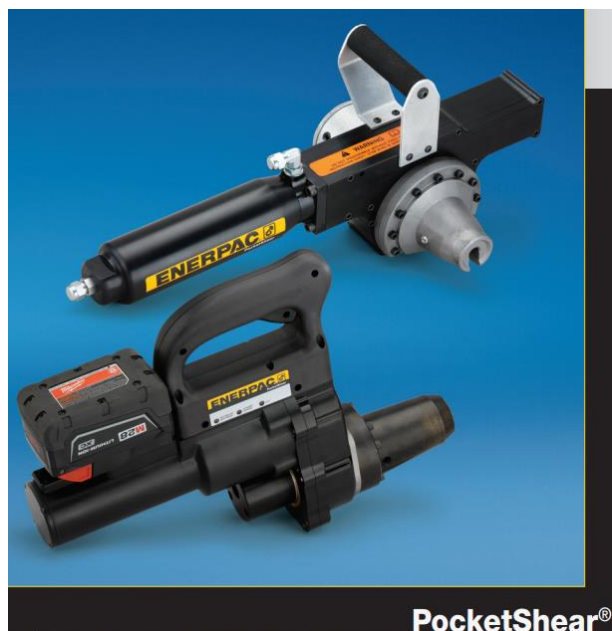


Fig. 6.10. Cortadoras de cizalla modernas Enerpac. (www.precision-surelock.com)



Fig. 6.11. Cuñas y o-rings

El apéndice D indica las recomendaciones de mantenimiento y uso de los barriletes. Los barriletes deben de retirarse de las camas o mesas de colado después de cada uso y deben de llevarse a un área específicamente destinada donde los barriletes deben de ser desensamblados, limpiados, inspeccionados, lubricados con un material apropiado y re ensamblados por personal entrenado. Los barriletes deben de liberarse de los torones con el uso de un martillo deslizante (figura 6.12) y nunca deben de ser golpeados con un objeto duro, tal como un martillo convencional. Solo los barriletes limpios e inspeccionados deben de ser utilizados para cada arreglo de la cama de presfuerzo.



Fig. 6.12. Martillo deslizante

6.3.6 Conectores de torón

Los torones pueden ser conectados entre sí para prevenir desperdicio de torón cuando elementos relativamente cortos son colados en una mesa de colado relativamente larga. Los tramos largos de torón que sobresalen de los elementos pueden conectarse a otros tramos que se extienden a través del producto o elemento y los torones ubicados por fuera del elemento pueden ser reutilizados para las operaciones diarias de tensado en lugar de ser desechados. Los torones pueden conectarse de forma segura cumpliendo los siguientes procedimientos:

- El torón de cada lado del conector debe de ser del mismo torcido (derecho o izquierdo). Para asegurar esto, cada torón en la mesa debe de extraerse de del mismo extremo y en la misma dirección.
- Los conectores de torón (figura 6.13) no deben ubicarse dentro del elemento a colar a menos que los barriletes sean del tipo que sea específicamente diseñados para eso.
- Los extremos del torón que serán insertados dentro del conector deben de cortarse con cizallas o sierras abrasivas, nunca con oxicorte, ya que el calor generado por el uso del equipo de oxicorte afectará las propiedades mecánicas del torón y puede propiciarse una falla en el tramo cercano al plano de corte (ver apartado 4.3.5).
- Los torones deben de marcarse cerca de los extremos para asegurar una penetración completa dentro del conector.
- Solo se permite un solo conector por torón.
- En operaciones de tensado con un gato monotorón, no existe limitante en cuanto al número de conectores en todo el conjunto de torones, ya que las pérdidas en el tensado por asentamiento pueden ser monitoreadas y consideradas para cada torón.
- En operaciones con gatos que hacen un tensado múltiple, se presentan dos casos: o no se tiene ningún conector o todos los torones cuentan con uno, ya que de otra forma no es posible

compensar la elongación diferencial de torones añadidos o continuos en el mismo arreglo o configuración.



Fig. 6.13. Conector de torón multiusos

6.3.7 Posición de torón

La posición final del torón dentro de un elemento prefabricado es importante. Los atraques, contrafuertes o “muertos”; los cabezales y los elementos para el posicionamiento de los torones deben de ser diseñados e instalados apropiadamente para sostener los torones en su correcta posición. La tolerancia en la posición en los torones varía dependiendo del tipo de elemento. La División 7 del MNL – 116 y el MNL – 117 publicados por el PCI enlista las tolerancias requeridas por producto o elemento, incluyendo la tolerancia de posición del torón. También en el capítulo 7 de este trabajo abordaremos dicho tema. El personal de producción y de control de calidad debe conocer la tolerancia de posición para el torón que aplique para cada uno de los elementos que esté produciendo.

La posición del torón debe de revisarse antes de colar para asegurarse de que presente una adecuada ubicación, ya que será muy difícil o, si no, imposible verificar la posición del torón en la inspección posterior al colado. Los torones deben estar bien asegurados en su posición para prevenir, que los movimientos que se generan durante el colado, los alteren. La posición del torón debe de revisarse en la medida de lo posible durante la inspección posterior al colado.

6.3.8 Separación o espaciamiento del torón

El espaciamiento a ejes de los torones en los extremos de los elementos debe de revisarse antes y después del colado. El espaciamiento debe de cumplir con los planos de taller y los mínimos establecidos en el MNL – 116 y MNL – 117 del PCI.

A los torones se les puede modificar su trayectoria (deflectar) dentro de un elemento —práctica poco usada en México, pero estructuralmente más eficiente— por solicitud de diseño y tal como se muestre en los planos de taller. La localización horizontal y vertical de dichos puntos de deflexión es crítica (figura 6.14). Estas dimensiones deben ser verificadas durante la inspección previa al colado. El método de soporte para los torones debe de conocerse por el personal involucrado.

La figura 6.15 muestra un arreglo de torones a la izquierda y un paquete a la derecha. La localización del centro de gravedad del conjunto de torones es importante. La localización se determina normalmente midiendo desde la parte inferior, considerando un punto de referencia, a la parte superior del torón en la posición más alta. La ubicación del centro de gravedad es diferente para cada uno de los arreglos mostrados. Los conceptos y métodos para torones deflectados se tratan en el nivel 3 del programa de certificación de personal de calidad en planta del PCI.

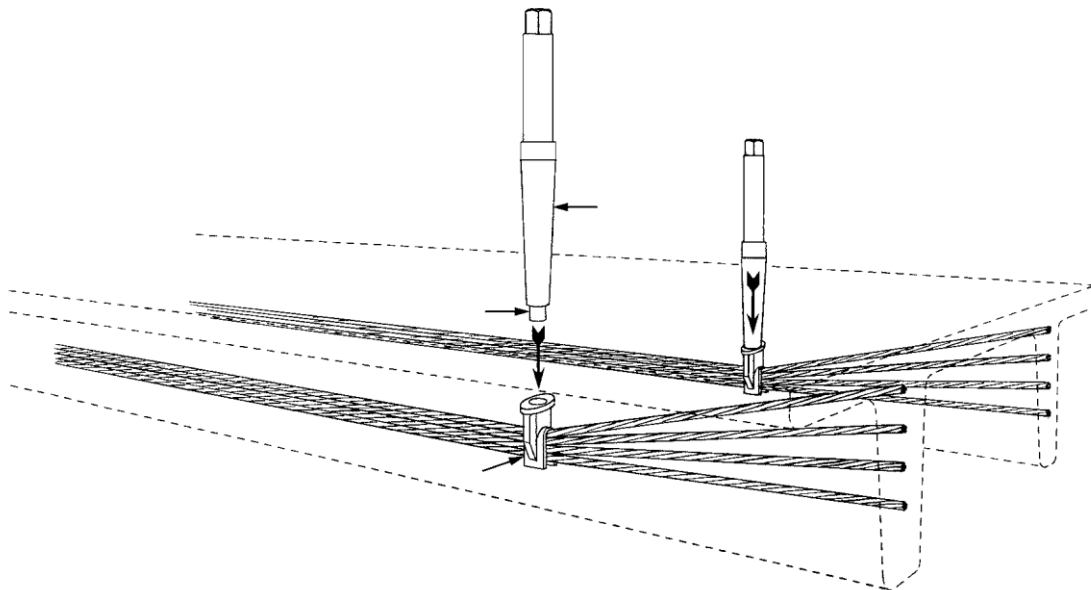


Fig. 6.14. Torones con cambio de trayectoria (deflectados).

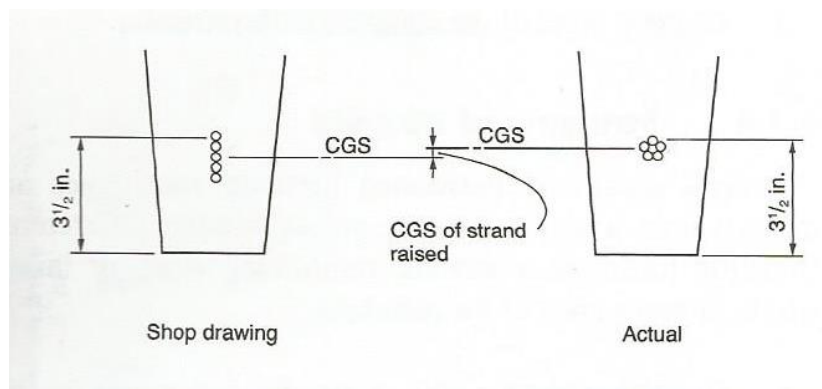


Fig. 6.15. Ubicación extrema de torones deflectados

6.3.9 Tensado inicial

Para tener un punto inicial de referencia preciso de la medida de la elongación, el extremo muerto del barrilete debe de haber asentado completamente, y el torón en exceso debe removerse antes de colocar la marca de referencia para la elongación. La fuerza inicial requerida para realizar esta actividad depende de cada arreglo y configuración que se tenga. Cada planta de prefabricados debe establecer estos estándares en su plan de aseguramiento de calidad, y estos valores deben de usarse en todo momento.

La **fuerza inicial mínima** recomendada es del **5%** de la fuerza final de tensado. Este valor mínimo está establecido para asegurar el asentamiento de los barriletes del lado muerto y la remoción del exceso de largo del torón.

La **fuerza inicial máxima** recomendada es del **25%** de la fuerza final. Este valor máximo se establece para asegurar que la elongación restante sea lo suficientemente larga para ser medida con precisión.

La tolerancia para la fuerza inicial es de ± 45 kg (100 lb) si la fuerza inicial es igual o menor al 10% de la fuerza final. La tolerancia es de ± 90 kg (200 lb) si la fuerza inicial es mayor al 10% de la fuerza final.

Se debe de utilizar un manómetro de baja capacidad para medir la fuerza inicial. En operaciones con tensados múltiples, la fuerza inicial debe de aplicarse igual y equitativamente en cada torón previamente a establecer la referencia de elongación.

6.3.10 Medición de la elongación

El típico procedimiento de tensado de torón es el siguiente:

1. Aplicar la fuerza inicial especificada al torón.
2. Marcar el torón en un punto de referencia específico.
3. Aplicar la fuerza final especificada al torón.
4. Liberar la fuerza del gato.
5. Medir la distancia entre la marca colocada sobre el torón y el punto de referencia original para determinar la elongación.
6. Registrar la elongación medida.
7. Comparar la fuerza final observada con la fuerza especificada antes de liberar la fuerza.
8. Comparar la elongación medida después de liberar la fuerza con el valor calculado de la elongación.
9. Asegurar que la fuerza y la elongación estén dentro de los límites de tolerancia descritos en el apartado 6.2.1.

La marca de referencia para la medición de la elongación debe de realizarse de acuerdo al plan aprobado de presfuerzo. El colocar la marca mientras el gato sostiene la carga inicial no es considerado un problema de seguridad debido a la fuerza relativamente baja. Usualmente la marca se coloca con pintura en aerosol de un color que pueda ser bien distinguido con el fondo gris o gris-ocre del torón.

Durante el tensado con gato monotorón, el personal no debe aproximarse al gato para realizar la medición de la elongación mientras el gato sostiene la fuerza final que se le aplica al torón. La fuerza final debe de liberarse del gato y la debe de tomar el extremo vivo del anclaje antes de medir la elongación.

Para operaciones de tensado múltiple, la elongación debe de medirse después de que la fuerza final ha sido liberada de los gatos de tensado. Los retenedores deben de ajustarse sobre las bases de anclaje, para que de este modo se haga la transferencia de la fuerza a estas bases.

Indistintamente del método elegido de tensado, todas las pérdidas operacionales deben de monitorearse y considerarse en la medida de la elongación real.

La elongación debe ser medida y registrada con una precisión de 0.5 cm para la mayoría de las mesas de colado. Esto correspondería a un error máximo en la medición de ± 0.25 cm. La elongación puede ser medida con una precisión de ± 0.25 cm en mesas de 15 m o menos de longitud, ya que la elongación que se presenta en esta longitud suele ser demasiado pequeña.

De una manera más esquemática se muestra la figura 6.16 para ilustrar el procedimiento:

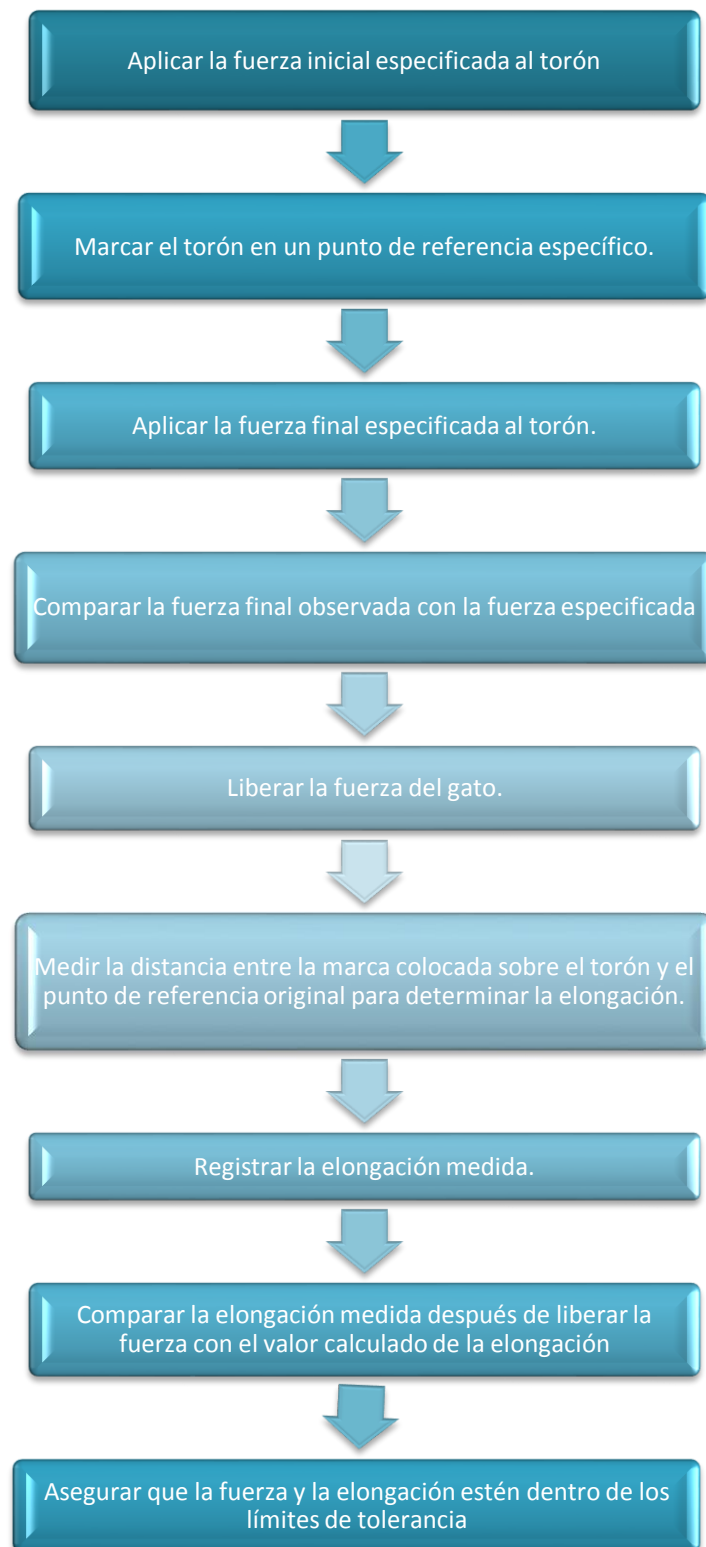


Fig. 6.16. Proceso típico de tensado.

6.3.11 Cálculo de la elongación y sus correcciones

Cuando una fuerza es aplicada a un torón, el torón presenta un alargamiento, mostrando una proporcionalidad directa; es decir, entre más grande la fuerza, más grande el incremento de longitud. A este incremento en longitud se le llama elongación. En el manual del PCI, y por consiguiente en esta tesis, la elongación se estudia desde tres aspectos diferentes:

- Elongación básica,
- Elongación bruta,
- Elongación neta.

Cada término tiene un significado especial y debe de entenderse para evaluar apropiadamente la operación de tensado.

6.3.11.1 Elongación básica

La elongación básica es la distancia que el torón se alarga considerando solamente lo siguiente:

- fuerza de tensado,
- longitud del torón entre anclaje y anclaje,
- área de la sección transversal del torón, y
- módulo de elasticidad del torón.

La ecuación para calcular la elongación básica es:

$$e_b = \frac{P}{A} \times \frac{L}{E}$$

donde:

e_b = elongación básica (m)

P = fuerza aplicada (N)

L = longitud entre anclajes (m)

A = área transversal (m²)

E = módulo de elasticidad del torón (N/m²)

La ecuación anterior no es otra cosa que la representación de la Ley de Hooke. Como en toda ecuación, se debe de conservar la consistencia entre las unidades involucradas. Como es el caso de

México, el sistema oficial de unidades es el Sistema Internacional de Unidades (SI) y según la NOM-008-SCFI-2002 la elongación (longitud) debe medirse en metros, la fuerza en newtons, el área en metros cuadrados y el módulo de elasticidad en newtons por metro cuadrado. De acuerdo a estas últimas líneas, es conveniente que cada vez nos acostumbremos a utilizar este sistema para aprovechar sus ventajas y evitar confusiones por la mezcla de otros sistemas no oficiales ni normados. Se obtienen muchas ventajas en adquirir equipos que utilicen las unidades habituales en las operaciones normales de la planta.

Operativamente hablando, muchos reportes de calidad del torón no respetan el SI, por lo que es importante revisar las unidades en que se presentan y establecer los factores de conversión que procedan en su caso.

Continuando con el análisis de la ecuación anterior, y considerando torones rectos no deflectados, tenemos las siguientes consideraciones:

- **Fuerza aplicada (P)** está determinada como la sustracción (resta) de la fuerza inicial a la fuerza final, observadas en los manómetros durante el tensado. Por ejemplo, si la fuerza inicial es de 13 kN (kilonewtons) y la fuerza final 130 kN, la fuerza aplicada utilizada para calcular la elongación básica es de 117 kN.
- **Longitud de torón (L)** está determinada como la distancia medida entre las placas o soportes donde están apoyados los barriletes o anclajes a cada extremo de la mesa.
- **Área de sección transversal del torón (A)** se toma de la información del reporte de calidad entregado por el proveedor o fabricante y es propia para cada rollo de torón. Cabe señalar que el área de la sección transversal del torón real (A) no es la misma área (a) que es obtenida de la operación con el diámetro nominal del torón en la fórmula $a = \pi (d)^2 / 4$. Este último dato no debe ser utilizado para el cálculo de la elongación básica.
- **Módulo de elasticidad del torón (E)** se toma de la información del reporte de calidad entregado por el proveedor o fabricante y es propia para cada rollo de torón.

El torón debe permanecer en su rango elástico durante el tensado. El rango elástico es idealizado en la gráfica mostrada en la figura 6.17.

Si el torón es tensado con una fuerza tal que produzca un esfuerzo por debajo de su punto de fluencia, el torón permanecerá en su rango elástico y regresará a su longitud original (sin esfuerzo) cuando la carga cese. Si un torón es tensado y se produce un esfuerzo mayor que el de fluencia, el torón no permanecerá más en su rango elástico y ocurrirá una deformación (elongación) permanente.

- ✓ El esfuerzo de fluencia para el torón es aproximadamente el 90% de su esfuerzo último.
- ✓ Las especificaciones de diseño del ACI y la AASHTO limitan, la máxima fuerza que puede ser aplicada por el gato a un torón, al 80% de su resistencia última. Este límite asegura que el torón permanecerá en su rango elástico durante el tensado.

Para un torón típico de ½ “de diámetro, 270 ksi, de baja relajación con un área de $9.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, tendremos la siguiente relación de fuerzas:

$$\begin{aligned}\text{Resistencia \u00faltima} &= 270,000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \times \frac{(1 \text{ in})^2}{(0.0254 \text{ m})^2} \times \frac{0.4536 \text{ kgf}}{1 \text{ lb}} \times \frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \times (9.87 \times 10^{-5}) \text{ m}^2 \\ &= 183.8 \text{ kN} \quad (18,738 \text{ kgf})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Esfuerzo de fluencia} &= 0.90 \times 183.8 \text{ kN} \\ &= 165.4 \text{ kN} \quad (16,864 \text{ kgf})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Fuerza m\u00e1xima tensado} &= 0.80 \times 183.8 \text{ kN} \\ &= 147.04 \text{ kN} \quad (14,990 \text{ kgf})\end{aligned}$$

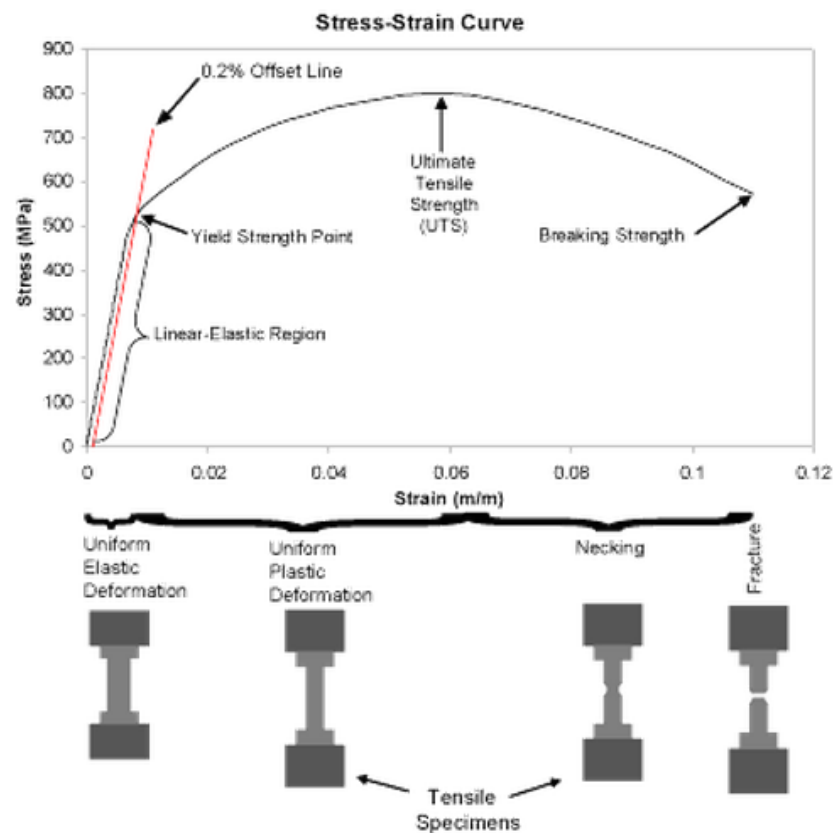


Fig. 6.17. Grafica esfuerzo – deformaci\u00f3n del tor\u00f3n.

El \u00e1rea del tor\u00f3n y el m\u00f3dulo de elasticidad pueden variar para diferentes coladas y fabricantes. Los valores promedio de \u00e1rea y m\u00f3dulo de elasticidad para diferentes rollos de tor\u00f3n pueden utilizarse para el c\u00e1lculo de la elongaci\u00f3n siempre y cuando los resultados finales est\u00e9n dentro de los l\u00edmites de tolerancia permitidos. Si el \u00e1rea y el m\u00f3dulo de elasticidad est\u00e1n dentro de un rango total de 2.5% para todo el tor\u00f3n en uso, entonces es posible utilizar el valor promedio. Si se presentan condiciones fuera

de tolerancia durante el tensado y las propiedades promedio del torón fueron usadas en los cálculos de tensado, la elongación se debe recalcular utilizando las propiedades reales del torón en uso. Los cálculos revisados pueden indicar que las operaciones están en tolerancia. Es importante monitorear y registrar qué rollos de torón están siendo utilizados en determinado trabajo para evaluar los resultados de tensado. Revisar los ejemplos de cálculo de mostrados.

6.3.11.2 Correcciones de elongación

Existen diferentes factores operacionales que afectan la elongación medida durante el presfuerzo. Las características de cada mesa y configuración deben de ser determinadas y analizadas, ya que existen compensaciones relacionadas apropiadas que deben de incluirse en los cálculos. Los factores mínimos que usualmente deben de considerarse:

- i. asentamiento del anclaje;
 - asentamiento del anclaje o barrilete en el extremo muerto
 - asentamiento del anclaje o barrilete en el extremo vivo
 - asentamiento del barrilete – conector
- ii. fricción en el sistema de tensado (gato)
- iii. acortamiento del molde cuando se usan sistemas autotensables
- iv. rotación de contrafuertes, atraques o “muertos” o movimiento de anclajes (en mesas con atraques fijos), y
- v. efectos de temperatura (térmicos)

Cada uno de estos factores se explicará por separado a continuación.

6.3.11.2.1 Asentamiento de barriletes (anclaje)

El asentamiento del barrilete en el extremo muerto ocurre, en el barrilete opuesto a donde se aplica el tensado (extremo vivo) en la mesa, al momento de la aplicación de la fuerza inicial y la fuerza final. El asentamiento se define como el resultado de que las cuñas, en el extremo muerto, se indenten (encajen) dentro del torón y se deslicen ligeramente hacia el fondo del cono (aproximadamente 1/8”, es decir, unos 3 mm). Este movimiento en el extremo muerto, ocurre a todo lo largo del torón y se adiciona en el extremo vivo a la medición de la elongación, aun cuando no es realmente una elongación. El asentamiento del barrilete en el extremo muerto debe ser medido y confirmado periódicamente realizando una marca aproximadamente a 2.5 cm hacia atrás del plano que forma la tapa del barrilete sobre el torón, después de la aplicación de la tensión inicial. La dimensión del asentamiento en el barrilete puede medirse después de que ha sido completado el tensado final, el valor obtenido debe sumarse a la elongación calculada.

El asentamiento del barrilete en el extremo vivo ocurre durante el tensado del torón una vez que la fuerza final del gato se ha transferido del barrilete o la mordaza del gato al barrilete de los atraques o los del extremo de los sistemas autotensables. Se presenta una pérdida de elongación perceptible durante el proceso de que las cuñas se mueven dentro del cono de los barriles. Se dice que

un barrilete para torón de $\frac{1}{2}$ " tendrá un movimiento de asentamiento en el extremo vivo de $\frac{1}{2}$ " (13 mm). Por lo anterior, se debe aplicar una fuerza adicional al torón con su correspondiente elongación de manera tal que la pérdida de fuerza y su correspondiente pérdida de elongación debida al asentamiento del barrilete en el extremo vivo sea contabilizado en la operación de tensado.

- ❖ **Elongación bruta** es considerada como la que se presenta antes del asentamiento del barrilete en el extremo vivo.
- ❖ **Elongación neta** es considerada como la que se presenta después del asentamiento del barrilete en el extremo vivo.

Por cuestiones de seguridad, las mediciones de elongación deben de realizarse únicamente después de que se ha realizado el asentamiento del barrilete en el extremo vivo y el gato se ha liberado de la aplicación de la fuerza. Por lo tanto, en operaciones de tensado con un solo torón, la elongación medida debe ser comparada con la elongación neta calculada.

Las pérdidas por asentamiento en el extremo vivo en operaciones con tensado multitorón son las mismas que se presentan en el extremo muerto porque las cuñas se acomodan dentro del barrilete una vez que la fuerza de tensión es aplicada.

La cantidad de asentamiento en el barrilete del extremo vivo debe verificarse periódicamente mediante la colocación de una marca sobre el torón mientras el gato está sosteniendo la carga y posteriormente realizar la medición del movimiento una vez que se ha liberado la carga y se ha dado el asentamiento. Se debe de tener especial cuidado cuando el personal se acerque al gato mientras esta ejerciendo la aplicación de carga. Se debe de realizar este procedimiento de acuerdo a los procedimientos de seguridad que cada planta establezca.

El asentamiento de los conectores de torón a base de barriletes es similar a los que se presentan en los extremos muertos y se presentan durante el tensado final. La cantidad de movimiento es aproximadamente el doble del largo que se presenta en un asentamiento de barrilete en un extremo muerto, ya que este toma lugar a cada uno de los dos lados de cada conector. Este movimiento se suma a la medición de la elongación en el extremo vivo aun cuando no es realmente una elongación. El asentamiento en los conectores de torón a base de barriletes debe medirse periódicamente para verificar las medidas que son utilizadas en los cálculos de la elongación. Esta medida debe hacerse realizando una marca sobre el torón a ambos lados del dispositivo de conexión después de la aplicación del tensado inicial. La cantidad de asentamiento puede entonces determinarse después de que se ha completado el tensado final, sumando el asentamiento o desplazamiento de la marca a cada lado del conector.

6.3.11.2.2 Fricción en el gato (sistema) de tensado

No se requieren correcciones en la elongación debido a la fricción que se produce en el gato o el sistema.

6.3.11.2.3 Acortamiento del sistema de cimbra autotensable

Este “acortamiento” o reducción de longitud se presenta durante la operación de tensado en un sistema autotensable como el que se muestra en la figura 6.18.

Los sistemas de autotensado a base de acero o concreto, no tienen atraques, contrafuertes o “muertos” fijos en cada extremo. Los barriletes se apoyan contra una placa gruesa de metal que transfiere la fuerza a la cimbra en ambos extremos: vivo y muerto.

La compresión resultante en la cimbra o sistema causa un acortamiento mientras la carga es aplicada. Cada torón provoca un incremento pequeño al acortamiento de la cimbra y/o sistema durante el tensado. El acortamiento de la cimbra o sistema puede no darse durante el tensado de los primeros torones debido a la fricción a lo largo de la base de la cimbra o sistema, y puede no ser uniforme en los torones adicionales. La figura 6.19 esquematiza el acortamiento de los sistemas autotensables.



Fig. 6.18. Sistema de cimbra autotensable

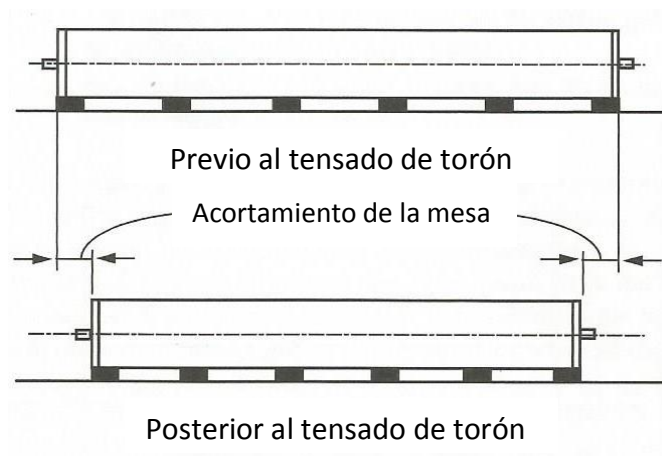


Fig. 6.19. Esquematización del acortamiento de un sistema de cimbra autotensable. Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

La cantidad total de acortamiento que se produce debe medirse periódicamente para diferentes números de torones en configuraciones comunes. La cimbra o sistema es referenciado a puntos fijos independientes de todo el proceso en cada extremo antes del tensado. El movimiento de las marcas sobre el sistema o la cimbra en relación a los puntos de referencia en ambos extremos representa el total de acortamiento.

La elongación final (y la fuerza de tensado) debe incrementarse ligeramente para compensar el acortamiento de la cimbra o sistema autotensable. Teóricamente, cada torón debería de tensarse con una ligera diferencia en la elongación para compensar el acortamiento de la mesa debido a ese torón y a los torones tensados posteriormente. Esto representaría un procedimiento complejo, por lo que se acepta un procedimiento más simple como solución a este comportamiento.

Esta cantidad simplificada de corrección en la elongación para todos los torones es considerada ser la mitad del total del acortamiento de la cimbra o sistema. Cuando se ha completado el acortamiento, la primera mitad de torones tensados estará a una fuerza de tensado ligeramente debajo de los requerimientos de diseño, mientras que la segunda mitad de los torones tensados tendrán una fuerza ligeramente superior a los requerimientos de diseño. La fuerza promedio de todos los torones en la configuración dada será aproximadamente igual al valor requerido.

6.3.11.2.4 Desplazamiento de los contrafuertes o atraques o movimiento de los anclajes

Este movimiento se presenta durante la operación de tensado en un sistema fijo de atraques o contrafuertes. La figura 6.20 muestra una mesa de colado con atraques o contrafuertes fijos.



Fig. 6.20. Mesa con atraques o contrafuertes empotrados al terreno.

Aún estos robustos atraques aunque estén bien diseñados rotarán y sufrirán pequeñas deflexiones de su posición vertical cuando sean cargados, como se ilustra en la figura 6.21. A pesar de que estos movimientos son pequeños, deben de ser monitoreados y revisados para cada mesa o conjunto de atraques con los patrones de torones comúnmente utilizados. El movimiento puede ser medido mediante una plomada referenciada al centro del patrón de torones antes de tensar, una vez que se ha tensado se mide nuevamente el desplazamiento al punto de referencia y esto nos indica que cantidad de movimiento se ha presentado.

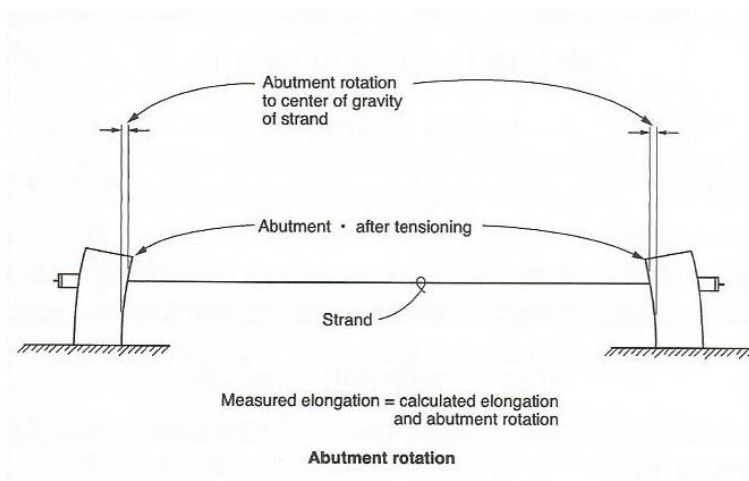


Fig. 6.21. Esquema de rotación de atraques. Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

Para el proceso de tensado con un solo torón se debe de incrementar ligeramente la elongación final y la fuerza de tensado para compensar el movimiento de los atraques. La cantidad de corrección para cada torón se asume que sea la mitad del total del movimiento de los atraques (la suma de ambos extremos). Cuando el tensado se ha completado, la primera mitad de torones tensados tendrán una fuerza ligeramente menor que la especificada, mientras que la última mitad tendrán una fuerza ligeramente mayor. Pero el promedio de la fuerza de todos los torones en el elemento, será aproximadamente igual al valor requerido por el diseño estructural.

La rotación de atraques es regularmente muy pequeña, en atraques muy bien diseñados, pero debe de ser tomada en cuenta en los cálculos de tensado. El que se presente un mayor movimiento o rotación bajo cargas es indicador de un problema potencial y debe reportarse al departamento de ingeniería.

6.3.11.2.5 Efectos térmicos

Cuando los torones son instalados entre atraques fijos, los cambios en la temperatura del torón después del tensado alterarán la fuerza en el mismo torón.

Si se tensa un torón en una mañana fría, este se dilatará y perderá fuerza cuando se le coloque un concreto más caliente y éste eleve la temperatura del torón. Los atraques no se ven afectados por la temperatura del concreto, pero el torón pierde fuerza a medida que este se dilata. En la figura 6.22 se ilustra esta condición.

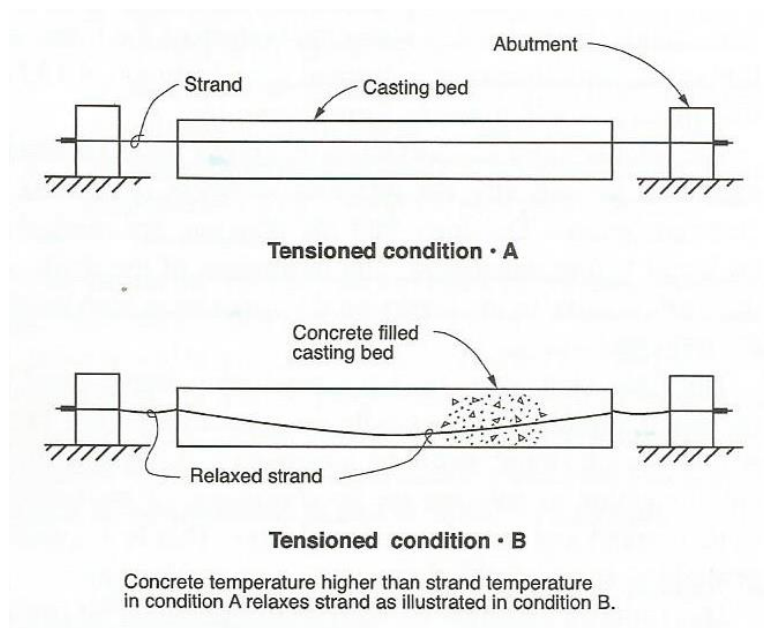


Fig. 6.22. Esquema de pérdida de fuerza por efecto de la temperatura. Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

El efecto opuesto ocurre para torones tensados en una tarde calurosa. Los torones se contraerán y ganaran fuerza cuando sea colocado un concreto más frío que disminuirá la temperatura del torón. El esfuerzo en el torón se incrementará a medida que éste se contraiga.

La elongación calculada y la fuerza de tensión deben de ajustarse para compensar estos cambios de esfuerzo en el torón. Estos ajustes se realizan basados en la diferencia de temperatura del torón al momento del tensado y la temperatura del concreto al momento del colado.

El modo usual de ajustar es incrementar la fuerza de tensado y la elongación en 1% por cada 5.5 °C de diferencia de temperatura entre el torón al momento del tensado y la temperatura anticipada del torón después del colado. En ningún caso, el torón se debe de tensar más allá de 80% de su resistencia última. Por ejemplo, si la temperatura del torón al tensado es de 4 °C y la temperatura del concreto es de 21 °C, el torón deberá aplicársele una fuerza y una elongación 3% mayor al valor usado para calcular la elongación básica.

Por el contrario, si la temperatura del concreto es menor que la temperatura del torón al momento del tensado, el ajuste se realizará disminuyendo la fuerza de tensado y la elongación a razón de la misma tasa: 1% por cada 5.5 °C de caída de temperatura.

Estos ajustes se requieren si el diferencial de temperatura es mayor a 14 °C, en caso contrario los ajustes se omiten por ser insignificantes, a menos que, la longitud del torón medido individualmente sea significativamente grande, en cuyo caso, deberá revisarse de manera individual.

Los ajustes por temperatura no aplican a los sistemas de cimbra autotensables de metal, porque después del tensado, el sistema (o la cimbra) y el torón se dilatarán o contraerán en la misma medida, por lo que la fuerza en el torón se mantendrá igual.

Relacionado con este tema se puede mencionar que ya que algunas veces los elementos de concreto presforzado son curados mediante la aplicación de calor o mediante la aplicación de vapor, el efecto que se tiene sobre el torón expuesto, entre elementos de concreto similares colados sobre la misma mesa, necesita ser considerado. Los tramos largos de torón expuesto no ahogado en concreto se expandirán rápidamente, reduciendo así la cantidad de presfuerzo en los elementos adyacentes, por lo que la longitud total de torón expuesto que será calentado mediante los métodos de curado mencionados, debe ser minimizada. Muchas veces se tiene la limitación de que se debe permitir el espacio para que un trabajador pueda tener acceso y realizar el corte del torón, esto se soluciona con el uso de antorchas de oxicorte especiales extra largas.

6.3.11.3 Correcciones de fuerza

La fuerza calculada debe de ajustarse para todos los factores conocidos que afecten la fuerza observada en los manómetros. Los factores son generalmente derivados de la fricción a lo largo del torón, errores menores en el sistema de manómetros o variaciones en las propiedades del torón. El

incrementar la fuerza calculada o aplicada para superar la fricción es solo aceptable a niveles muy bajos. En el caso de que el origen de la fricción este localizado en el extremo vivo de la configuración y es consistente y predecible, el sobre tensado por fricción sin ajuste para cierta elongación pudiera estar permitido.

Los siguientes puntos, en adición a los tratados en el apartado 6.3.11.2, afectan la fuerza calculada de tensado:

- asentamiento del extremo vivo (ver apartado 6.3.11.2.1)
- fricción en el sistema del gato
- acortamiento de la cimbra (sistemas autotensables; ver apartado 6.3.11.2.3)
- rotación de los atraques o movimiento de los anclajes (ver apartado 6.3.11.2.4)
- efectos térmicos (ver apartado 6.3.11.2.5)

6.3.11.3.1 Fricción en el sistema del gato

Los gatos monotorón son relativamente pequeños, ligeros y se componen de partes móviles libres. La producción de fricción durante la operación de tensado en este tipo de gatos es usualmente despreciable.

Los sistemas de tensado multitorón son usualmente grandes (figura 6.23), con partes móviles pesadas que si pueden generar fricción durante el tensado. Es estos casos, una parte de la fuerza generada por el gato se utiliza para vencer la fricción en el sistema. En este caso, el torón no recibe toda la fuerza que es generada por el gato. Si se presenta un exceso de fricción, el tensado del torón quizá se salga de tolerancia. Si se sospecha que existe este problema, y si la lectura del manómetro no genera una indicación confiable de la fuerza en el torón, entonces se deben de utilizar celdas de carga para verificar la fuerza real en el torón. Se pueden instalar celdas de carga pequeñas en torones de forma individual, o se pueden colocar también celdas de carga grandes en uno o más de los gatos.



Fig. 6.23. Proceso de tensado con gato multitorón.

6.3.12 Tensado final de torones rectos o no deflectados

El procedimiento recomendado por el PCI para el tensado de torones rectos (no deflectados) utilizando un gato para un solo torón es el siguiente:

1. Aplicar la fuerza inicial al torón.
2. Marcar el torón, usualmente en la tapa del barrilete ubicado en el extremo vivo, mientras la fuerza inicial es sostenida por el gato.
3. Despejar el área y aplicar la fuerza final calculada al torón usando el manómetro que registra la presión hidráulica como mecanismo de control.
4. Liberar el gato y medir la elongación neta una vez que se haya presentado el asentamiento del extremo vivo.
5. Comparar la elongación neta medida con la elongación neta calculada.
6. Los valores de la presión en el manómetro y la elongación neta deben de encontrarse dentro de valores límites aceptables de tolerancia.
7. Apuntar los valores de la presión dados por el manómetro y la elongación neta en la hoja de registro de tensado.

Los diseñadores estructurales algunas veces requieren que el tensado sea controlado jalando del torón hasta la elongación bruta calculada y entonces realizar la lectura de presión correspondiente como una comprobación. Mientras que esto pareciera ser una práctica que produce los mismos resultados, en realidad no es tan precisa como el método descrito en los siete puntos anteriores (preferido por el PCI). Es un procedimiento no seguro para la persona que está observando la elongación durante el tensado del torón; ya que se encuentra demasiado cercana al gato a fin de poder observar con precisión el desplazamiento y realizar la medición. El PCI recomienda encarecidamente controlar el tensado llevando el esfuerzo a la magnitud calculada (leída en el manómetro) y midiendo la elongación neta después de liberar la presión del gato y de que se den los asentamientos.

En la mayoría de las configuraciones, la elongación neta es medida en cada torón. Si la mesa de colado es abierta completamente, sin cabezales u otras fuentes de fricción a lo largo del torón, la medida de la elongación se requiere solamente en el primer y último torón tensado y el 10% del resto de los torones en dicha configuración.

Los torones deben de tensarse en un patrón simétrico con respecto a la vertical que pasa al centro de la mesa de colado para minimizar las cargas excéntricas del sistema que soporte las cargas provisionalmente. Las fuerzas excéntricas de presfuerzo en una cimbra o sistema pueden provocar que se deforme lateralmente formando un arco.

El procedimiento recomendado para el tensado multitorón es similar al utilizado en el procedimiento con un solo torón. Se debe de tener cuidado para asegurar que todos los torones presenten una elongación similar. Cualquier diferencia en la elongación de un lado a otro o de arriba hacia abajo del grupo de torones (cable) debe ser monitoreada y registrada. Como se efectúa en el tensado de un solo torón, la elongación no debe ser medida hasta que los torones se encuentran anclados en su posición final y la carga del gato es transferida a las calzas o a las barras de anclaje.

6.3.13 Torones no adheridos

Los elementos de concreto prefabricado presforzado pueden necesitar una gran cantidad de torones en el centro de los claros, pero los esfuerzos inducidos por estos torones pueden ser demasiado elevados en las partes cercanas a los extremos del elemento. En este caso, los planos de taller indicarán que algunos de los torones sean no adheridos. En México es común utilizar los términos: encamisado, enductado o “engrase” de los torones porque se solía usar grasa para romper la adherencia entre el torón y el concreto, situación que actualmente no se recomienda. Cualquier método que rompa la adherencia entre el torón y el concreto y no afecte adversamente el concreto circundante puede ser utilizado. En México es muy común el uso de poliducto de plástico, similar al que se emplea en las instalaciones eléctricas.

En general, los revestimientos plásticos son los más aceptados. Se debe de prevenir que no ingrese lechada por los extremos o por los traslapes de los revestimientos ya que esto puede ocasionar problemas estructurales. Esta indicación cobra especial relevancia e importancia, cuando se utilicen concretos demasiado fluidos tales como SMO, autocompactables, entre otros.

No está permitido el uso de grasas animales u otras que sean reactivas por el efecto adverso al concreto que rodea al torón.

El ducto de policloruro de vinilo (PVC) no debe de contener iones libres de cloro, ya que estos pueden dañar los aceros y el concreto.

6.3.14 Transferencia del esfuerzo.

El corte de los torones tensados, liberando los atraques o el sistema autotensable, transfiere las fuerzas de tensión al concreto, al tiempo mismo que lo comprime.

En elementos presforzados simétricamente, tales como columnas o muros, la fuerza de pretensado generalmente crea esfuerzos uniformes de compresión en el concreto.

En elementos presforzados excéntricamente, tales como trabes, losas doble “T”, o losas alveolares, la fuerza de pretensado generalmente genera esfuerzos de compresión en la parte inferior y esfuerzos de tensión en la parte superior. Si estos últimos esfuerzos son de magnitud mayor a los que el

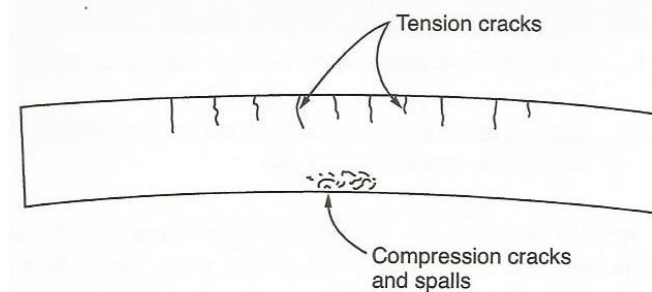


Fig. 6.24. Fallas posteriores a la transferencia. Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

concreto puede resistir, se presentará agrietamiento y si los esfuerzos de compresión en la parte inferior son mayores a los que el concreto pueda resistir se presentara una falla por compresión o aplastamiento como se esquematiza en la figura 6.24.

La fuerza de tensado no puede transferirse al concreto mediante el corte del torón, hasta que la resistencia del concreto sea verificada por alguna prueba, y esta resistencia sea igual o mayor a la resistencia especificada a la compresión del concreto al momento del preesforzado inicial (f_{ci}) según el ACI 318.

La resistencia al momento de la transferencia es calculada por el diseñador estructural para asegurar que el concreto no se agrietará excesivamente bajo tensión o fallará bajo compresión. Puede requerirse la colocación de acero de refuerzo para controlar el agrietamiento por tensión y su colocación debe ser realizada al detalle.

Los cilindros usados en las pruebas de resistencia a compresión deben de representar con precisión el concreto del elemento presforzado. Por esta razón, deben de ser curados en las mismas condiciones de humedad y temperatura que las del elemento que representan. La temperatura del concreto en los cilindros y en los elementos prefabricados de concreto debe de tener valores muy cercanos, esto se puede lograr curando los cilindros junto con el elemento o a través del uso de otros sistemas, principalmente electromecánicos, que garanticen lo ya mencionado.

Los planos de taller deben de indicar la resistencia mínima a cual debe de hacerse la transferencia al concreto. Esta resistencia se le llama comúnmente resistencia de transferencia.

El PCI recomienda una resistencia mínima de 21 MPa (210 kg_f/cm²), aún si los cálculos arrojan una resistencia menor para realizar la transferencia. La adherencia del torón al concreto es importante (ver apartado 4.3.5.2) y la adherencia es reducida en concretos con resistencias menores a 21 MPa.

La resistencia del concreto afecta la contraflecha de los elementos. Si el control de la contraflecha es importante, tal como se da en losas dobles "T" para estructuras de estacionamientos, la transferencia en los elementos se debe realizar cuando se tengan valores muy parecidos en la resistencia del concreto cada día.

Si los elementos han sido curados con calor suplementario, es importante que se les aplique la transferencia mientras aún se encuentren húmedos y tibios. Si se permite que se enfríen antes de realizar el corte del torón, se pueden presentar grietas transversales por contracción debido a que el concreto se contrae una vez que comienza a enfriarse. Los torones sin cortar, que estén aún anclados a cada lado de los atraques o contrafuertes, restringen el movimiento, por lo que puede presentarse agrietamiento.

Durante la transferencia, es importante minimizar el deslizamiento de los elementos en la mesa y minimizar la aplicación de cargas excéntricas al elemento, esto generalmente se logra realizando los cortes sobre el torón simultáneamente y simétricamente a cada lado de la mesa. Cualquier cosa que restrinja el movimiento, como por ejemplo: la cimbra, los sargentos, pernos, insertos, puntos de soldadura, entre otros, deben obligatoriamente de ser removidos. Si se permite el movimiento de los elementos en la mesa durante la transferencia, estos pueden atorarse o trabarse en la cimbra causando desportillamientos o daños aún más serios.

Cada torón debe liberarse gradualmente calentando una porción de él, antes de cortar completamente. Algunos estudios han demostrado que el corte rápido de los torones incrementa la

longitud de transferencia y causa un deslizamiento del torón al interior del concreto aún en un elemento bien vibrado y consolidado.

En elementos tensados mediante gatos monotorón, el torón debe de cortarse en un patrón preestablecido. El patrón de transferencia debe ser relativamente simétrico respecto al eje vertical del elemento. La fuerza máxima desbalanceada respecto al eje vertical no debe ser mayor que un 10% de la fuerza total ejercida por el conjunto de todos los torones. El proceso de transferencia en una losa doble "T" se ilustra en la figura 6.25 siguiente.

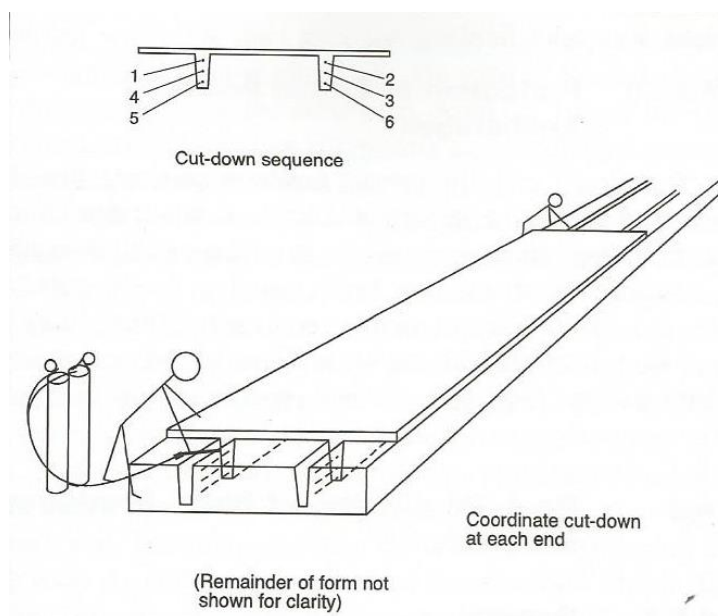


Fig. 6.25. Secuencia de transferencia de presfuerzo en dos piezas de losa doble "T". Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

Las fuerzas desbalanceadas respecto del eje vertical de una losa doble "T" tenderán a deformar el elemento horizontalmente (pandeo) y la trabaran en la cimbra. Si la fuerza está demasiado desbalanceada se causara agrietamiento en la pieza.

En operaciones de tensado múltiple, la fuerza de tensado es gradualmente liberada a los elementos mediante la disminución gradual de la presión en los gatos o prensas. La mayoría de las configuraciones con tensado de torones múltiples también requieren de una transferencia en cada torón utilizando equipo de corte en el extremo muerto de los contrafuertes. Esta operación también debe ser cuidadosamente coordinada como se ha descrito para la transferencia de un solo torón.

La transferencia de torones múltiples debe seguir un patrón preestablecido. Cualquier restricción, sujeción o conexión debe de retirarse para permitir movimiento, lo cual evitará cualquier desportillamiento o agrietamiento del elemento. Cabe recordar que las magnitudes de las fuerzas utilizadas son elevadas, por lo que las transferencias deben de realizarse cuidadosamente. El movimiento potencial de los elementos debe, obligatoriamente, de restringirse para evitar daños al elemento o producto. La cantidad de torones expuestos determina el potencial de movimiento. Se

deben comunicar por escrito los procedimientos especiales de transferencia y su secuencia al área de producción y de control de calidad.

6.3.14.1 Protección de las puntas del torón y anclajes

Los extremos o puntas en los elementos prefabricados que son expuestos a la intemperie en su etapa de servicio, como pueden ser las trabes en los puentes, elementos estructurales en los estacionamientos, durmientes, entre otros, deben de protegerse contra la corrosión. Los torones que se puedan recortar hacia el interior del elemento se pueden proteger rellenando el espacio con algún material apropiado (figura 6.26), o en caso de que el recorte sea a ras de la superficie de concreto el área expuesta del torón debe pintarse o protegerse con algún material especialmente diseñado y aprobado. Estos procedimientos deben de establecerse en los planos de taller o definirse en los procedimientos de control y aseguramiento de calidad en la planta.



Fig. 6.26. Torones que pueden ser recortados hacia el interior del concreto.

6.4 Pretensado con torones deflectados

6.4.1 General

La utilización de torones deflectados en un elemento presforzado de concreto proporciona una mejor y más eficiente distribución de esfuerzos que aquella que se logra con el uso de torones rectos, ya que los torones deflectados reducen la presencia de esfuerzos de tensión en los extremos de las vigas o trabes y permite utilizar resistencias más bajas al momento de la transferencia en el concreto. Algunos productores de elementos presforzados han encontrado que el utilizar torones rectos con tramos sin

adherir pudiera resultar en una disminución de costos. Pero el usar torones sin adherir, sin embargo, no produce el mismo grado de flexibilidad al diseñador estructural para controlar esfuerzos a todo lo largo de la viga o; en algunas condiciones la deflexión puede resultar la mejor alternativa (Figura 6.27)

Los principales productos prefabricados en los que comúnmente se utiliza torón deflectado son:

1. Trabes para puentes, las cuales usualmente tienen torones deprimidos en dos puntos simétricamente colocados con referencia al centro de la trabe, tal como se muestra en la figura 6.28 A.
2. Losas doble "T", "T" sencillas, trabes cajón y diferentes trabes para edificación las cuales tienen solo torones deflectados al centro del claro comúnmente, ver la figura 6.28 B.

Ocasionalmente, se usa torón deflectado en otros productos y los perfiles de deflexión pueden cambiar. El perfil que contiene 2 puntos de depresión aventaja, en una mayor resistencia a la flexión, al perfil que solo presenta un solo punto de depresión.

La localización de los puntos de depresión a lo largo de un elemento rara vez se vuelve crítica, se permite una tolerancia de ± 50 cm.

Existen dos métodos de colocación de torón deflectado. Algunas veces, se utiliza la combinación de ambos métodos. El primer método consiste en colocar el torón en su perfil final deflectado sin tensión y posteriormente realizar el proceso de tensado.

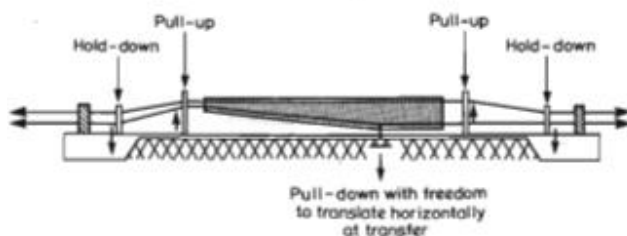


Figura 6.27 Elemento con torón deflectado para su uso en cantiléver.

Con este método, la fricción en el punto deprimido y en el punto elevado puede conllevar a una menor fuerza de presfuerzo a medida que la distancia al gato se incremente (pérdida por fricción). El segundo método es tensar los torones en una línea recta y entonces deflectarlos hacia arriba o hacia abajo dependiendo de su perfil final. La pérdida por fricción en este segundo método puede reducirse significativamente, pero la secuencia de deflectar los torones juega un papel importante en controlar la variación de esfuerzos en el torón a lo largo de él.

Cada productor debe desarrollar su procedimiento estándar para cada mesa de colado y tipo de configuración que maneje, de tal modo que la distribución de esfuerzos en los torones entre los puntos deprimidos y los elevados permanezca dentro de los límites permitidos.

En todos los procedimientos de tensado o donde se involucre el gato hidráulico, se deben de aplicar tolerancias como se vio en el apartado 6.2.1. Los diferentes métodos de deflectar torón requieren de una evaluación especial del proceso de tensado.

El deflectar torón puede ser un proceso peligroso. Si se diera la falla de un dispositivo de depresión, los torones regresarán abruptamente de forma peligrosa y proyectarán el dispositivo, tal como sucede con una flecha y la cuerda de un arco. Las fuerzas verticales en los dispositivos depresores son altas. Para el mismo número de torones deflectados, la misma fuerza de tensado y el mismo claro, el perfil con dos puntos deflectados representa aproximadamente la mitad de la fuerza vertical que se presenta en el perfil de un solo punto.

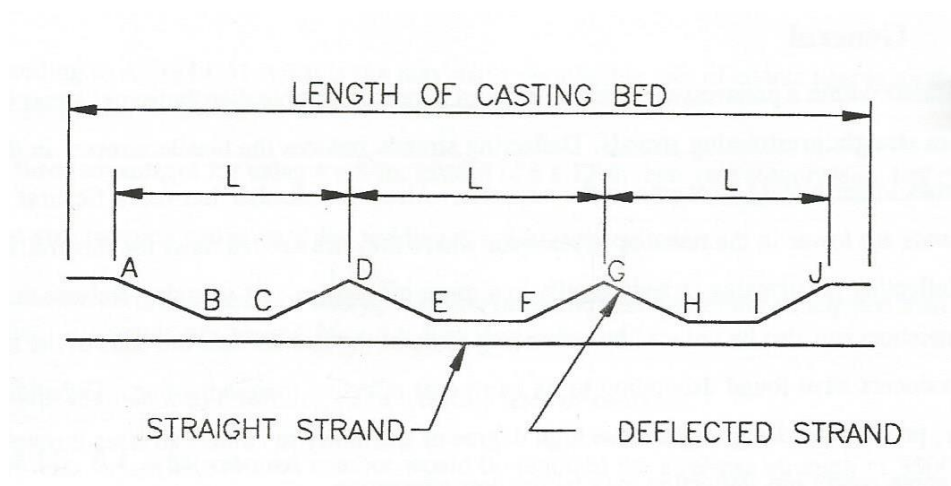


Fig. 6.28 A. Perfil típico del torón para 3 traveses con 2 puntos de deflexión por trabe. Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

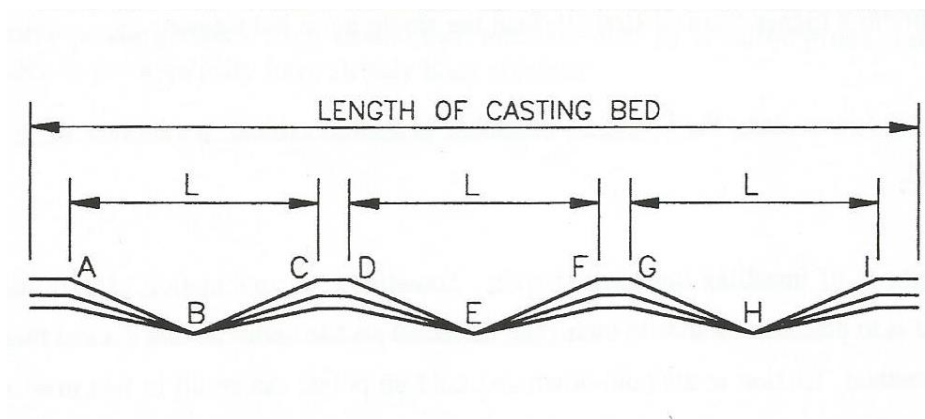


Fig. 6.28 B. Perfil típico de torones para 3 "T" con 1 punto de deflexión por trabe. Fuente: Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

Se requiere que los dispositivos depresores y elevadores cuenten con un diseño apropiado, una inspección cuidadosa y el mantenimiento respectivo, a fin de asegurar que estos aparatos funcionen como se pretende. Los dispositivos que se encuentren dañados, gastados o inapropiadamente diseñados pueden derivar en una ruptura del torón mientras se realiza el tensado.

6.4.2 Métodos de tensado para torones deflectados

6.4.2.1 Tensado de torones en posición deflectada

En este método los torones son tensados al valor final especificado desde su posición suelta en todo lo largo de la mesa. Este método es comúnmente utilizado en trabes de puentes con dos puntos de deflexión. Los dispositivos de depresión y elevación (figura 6.29) deben de ser lo suficientemente rígidos de manera tal que no permitan que la posición del torón se modifique sustancialmente bajo las cargas de tensado. Los dispositivos de depresión o depresores deben de permitir rotación.



Fig. 6.29. Dispositivo para deflectar torones.

Los pernos y los baleros se usan para reducir la fricción en los depresores y los elevadores. Los puntos de elevación se localizan más allá de los límites del elemento de concreto, por lo que los soportes de los elevadores son reutilizables y se obtienen buenos beneficios económicos si se protegen contra la corrosión y se utilizan baleros de baja fricción. Al utilizar este método, las tolerancias de tensado y elongación deben de cumplir lo especificado en el apartado 6.2.1 o lo establecido en el TM-101 del PCI.

En la figura 6.30 se esquematiza un tipo de dispositivo elevador que se utiliza en la fabricación de trabes para puentes. Este elevador debe ser lo suficientemente angosto para entrar entre las paredes

continuas de la cimbra. Los elevadores también pueden soportarse por arriba de las mesas de colado mediante marcos torre como se muestra en la figura 6.31.

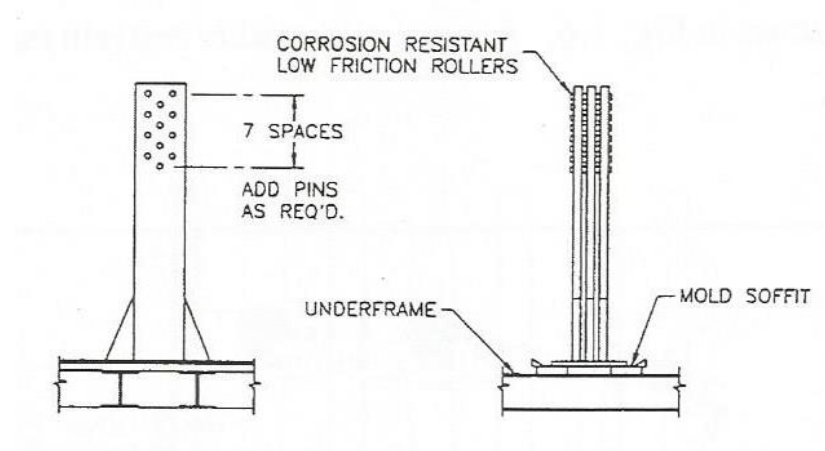


Fig. 6.30. Esquema de un elevador interior.



Fig. 6.31. Elevador de tipo marco - torre

6.4.2.2 Depresión de torones iniciando en posición recta

En este método, los torones son tensados en una posición recta o en una posición parcialmente deflectada a su valor de tensado final menos una fuerza predeterminada causada por la deflexión del torón.

Los torones deflectados en las losas “T” son frecuentemente empujados desde arriba o jalados desde abajo. Este método empujando desde arriba se ilustra en la figura 6.32. Se utiliza un clip de metal para restringir el desplazamiento en sentido transversal como se muestra en la figura 6.33.

En traveses para puentes, los torones son jalados desde abajo. Uno de esos sistemas se puede ver en la figura 6.34. Con este dispositivo, la parte inferior del aparato es anclado a la mesa de colado. En algunos casos, se utiliza un gato de vástago para empujar los torones hacia abajo. Los torones son anclados en su posición deflectada con barriletes convencionales (figura 6.35).

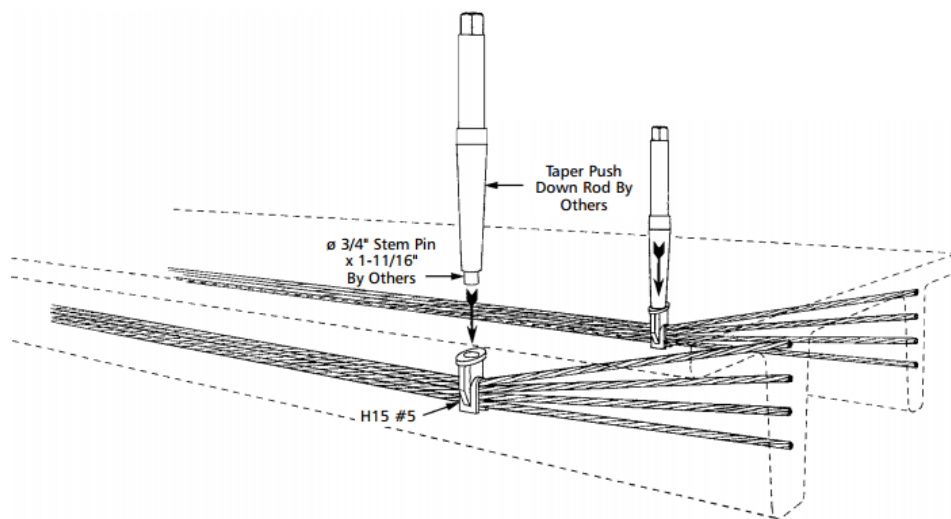


Fig. 6.32. Aplicación de las anclas depresoras multitorón. (Dayton Superior; Concrete Prestressing Handbook)

La fricción y las deformaciones del torón en los dispositivos de deflexión evitan que la elongación en el torón se presente uniformemente a todo lo largo de la mesa de colado; esto causa que la fuerza en el torón tenga variación en toda su longitud. La mayoría de la elongación se presenta cerca de los extremos de las mesas de colado donde se presentan los últimos puntos deflectados. Los torones en esta ubicación pueden llegar a sobre-esforzarse lo cual puede llevar a la ruptura si solo se monitorea la elongación del torón. La variación en el esfuerzo del torón a lo largo de toda la mesa de colado puede limitar el número de elementos que pueden ser producidos en una línea con torones agrupados en conjunto en los depresores. Por experiencias pasadas de la misma planta se debe de determinar el número máximo de elementos que pueden ser colados en una sola línea de producción y se deben documentar los procedimientos.

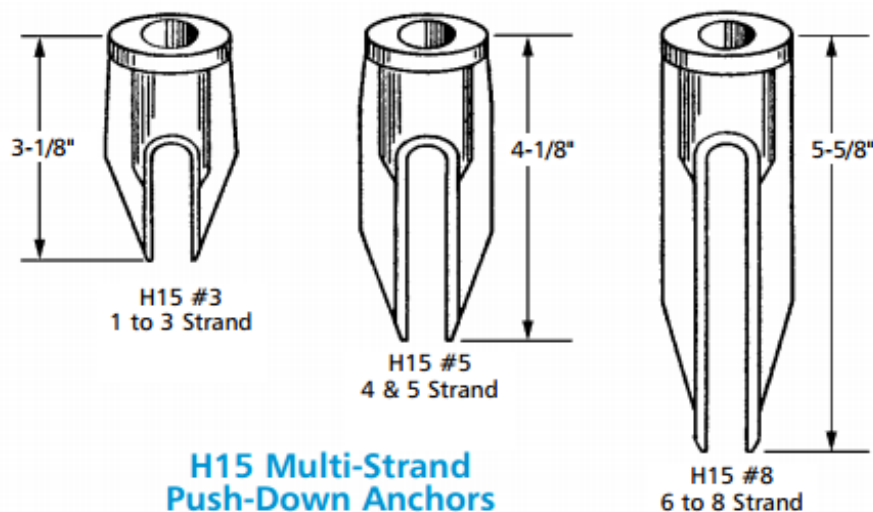


Fig. 6.33. Anclas depresoras multitorón. (Dayton Superior; Concrete Prestressing Handbook)

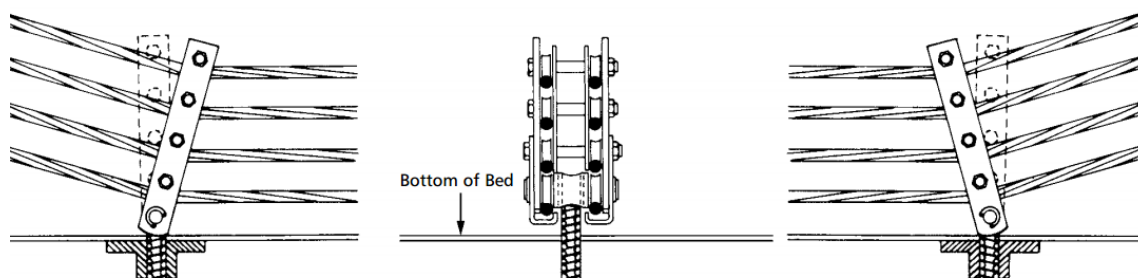


Fig. 6.34 Depresores multitorón. (Dayton Superior; Concrete Prestressing Handbook)

A fin de distribuir la fricción uniformemente a lo largo de la mesa de colado, los depresores deben de utilizarse de acuerdo a una cierta secuencia. El método ideal sería deprimir todos los depresores en la mesa de forma simultánea, sin embargo, ya que esto no siempre es práctico y operativo, el procedimiento para deprimir torones hacia abajo en los depresores debe comenzar en el depresor central con respecto a la mesa y posteriormente proceder simétricamente con respecto a este punto hasta terminar todos los dispositivos tal como se ilustra en la secuencia de la figura 6.36.

La fuerza en cada anclaje a cada extremo de la mesa debe ser acorde a las fuerzas del torón calculadas dentro de la tolerancia del $\pm 5\%$. Esta verificación debe hacerse obligatoriamente de forma previa al primer colado para un nuevo diseño, configuración de torones o uso de un equipo nuevo. Después de eso, se recomienda realizar revisiones periódicas.

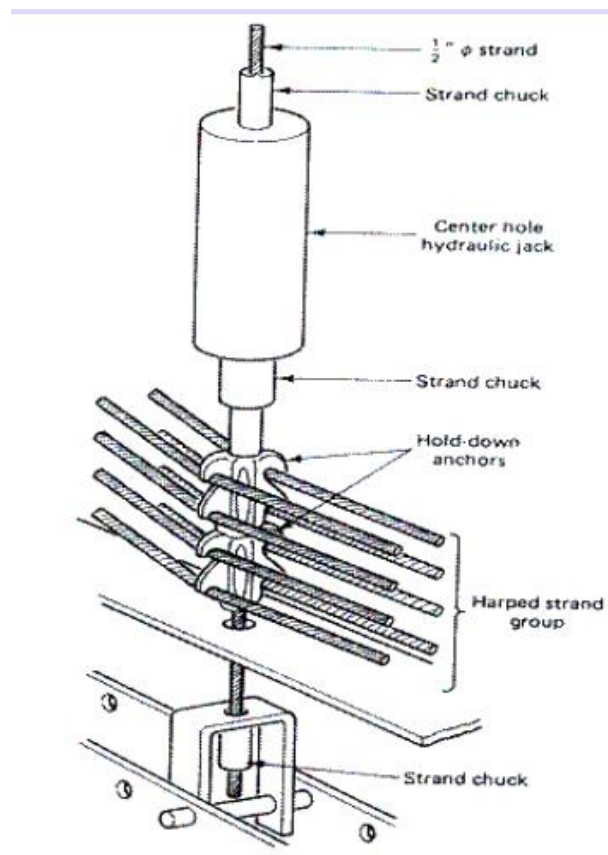


Fig. 6.35 Utilización de gatos hidráulicos de vástago para deflectar torón.

3 elementos	#2	#1	#3					
4 elementos	#4	#1	#2	#3				
5 elementos	#5	#2	#1	#3	#4			
6 elementos	#5	#4	#1	#2	#3	#6		
7 elementos	#6	#2	#5	#1	#4	#3	#7	
8 elementos	#8	#3	#4	#1	#6	#5	#2	#7

Fig. 6.36. Secuencia recomendada para depresión de torones en relación a diferentes elementos por mesa (según el TM 103 del PCI).

6.4.2.3 Elevación de torones con soportes entre extremos de elementos

Este método puede utilizarse para elementos con perfiles de torones deflectados paralelos. Los torones son tensados en la posición más baja y anclados a mesa en los puntos donde se requiera la ubicación de los dispositivos depresores (ver figura 6.37), después los torones son levantados mediante un gato hidráulico o levantados con elevadores. Tal como en el método donde se ejerce un empuje en dirección de arriba hacia abajo, la elongación del torón, provocada por la elevación en los puntos de suspensión, se incrementa la tensión en los torones, tal como se calcula en el apartado correspondiente.

Se reitera que es necesario distribuir la fricción uniformemente en los elevadores y en los depresores con la instalación de un primer elevador cercano al centro de la mesa e irse desplazando desde esta ubicación de forma simétrica. Las mediciones de la fuerza deben de hacerse en cada anclaje a cada lado de la mesa cumpliendo la tolerancia de $\pm 5\%$.

6.4.3 Control del tensado de torones deflectados

6.4.3.1 Valores de tensión

La tensión en los torones es determinada usualmente por el estructurista y se plasma en los planos. También se pueden mostrar en una tabla de tensado que es referenciada a cada pieza con su identificación. Algunas veces, el valor de tensado es establecido por la políticas de la compañía para un determinado tamaño y tipo de torón además de estar limitado por especificaciones. El ACI 318 y “The Standard Specification for Highway Bridges” de la AASHTO fijan valores máximos de esfuerzo efectivo en el torón así como esfuerzos temporales máximos en el gato.

Ambas publicaciones limitan los esfuerzos temporales durante el tensado a 80% de la resistencia de tensión especificada para cada torón. Esta limitación aplica a torones tanto de baja relajación así como relevados de esfuerzo (ordinarios). El valor tuvo cambios para la especificación de AASHTO a partir del 92, ya que anteriormente el valor era menor.

La fuerza efectiva en los torones es enfocada de forma algo diferente en cada una de las dos principales especificaciones que rigen en Estados Unidos de Norteamérica. El código o reglamento del ACI define como las fuerzas efectivas a las que se dan “inmediatamente después de la transferencia del presfuerzo”, esto es, al efectuar el corte del torón (detensioning). Para el torón de baja relajación, el esfuerzo máximo es el 74% de la resistencia de tensión especificada, mientras que para el torón ordinario, el máximo es el 70% de la resistencia de tensión especificada.

La especificación AASHTO aplica estos límites para el “esfuerzo en los anclajes después del asentamiento”. Para torón de baja relajación, el esfuerzo máximo es el 75% de la resistencia a la tensión especificada y para torón ordinario es el 70% de la resistencia a la tensión especificada.

La pregunta surge a menudo acerca de cómo interpretar estos límites establecidos y el $\pm 5\%$ de tolerancia establecidos en el PCI MNL – 106. El 80% de la resistencia a la tensión especificada para los esfuerzos máximos en el gato debe ser un tope máximo para el presfuerzo. Para torones ordinarios, el punto de fluencia es el 85% de la resistencia a la tensión. Para torón de baja relajación, el punto de

fluencia es el 90% de la resistencia a la tensión. Por lo tanto, el tensado más allá del 80% se acercará al punto de fluencia y se presenta la posibilidad de una deformación permanente. Igual de importante, se presentan cuestiones de seguridad; los barriletes, las cuñas, los gatos, los contrafuertes, los dispositivos

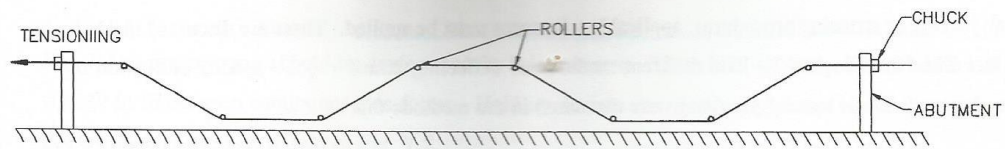


Fig. 7.2a Tensioning after strand is in its final deflected profile.

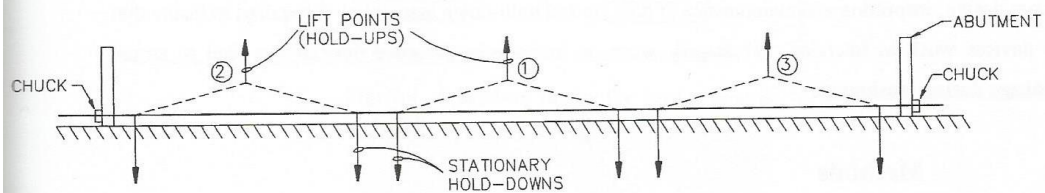


Fig. 7.2b Lifting strands to hold-up points after tensioning.
Note sequence to distribute forces.

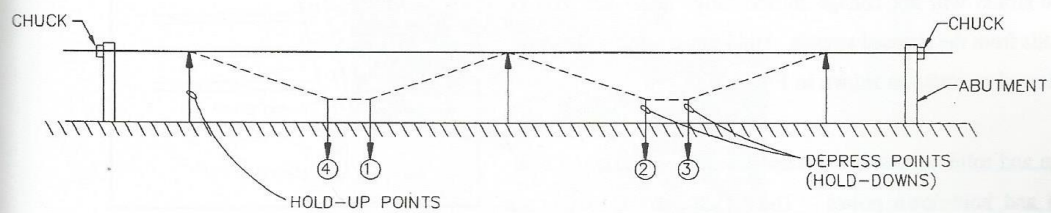


Fig. 7.2c Depressing strands to hold-down points after tensioning.
Note sequence to distribute forces.

Fig. 6.37. Esquema de los métodos de deflexión de torón.

de deflexión, entre otros, en su conjunto llegan a ser mucho menos confiables en estos rangos superiores de esfuerzos.

El esfuerzo efectivo máximo establecido en el torón pudiera incluir el $\pm 5\%$ de tolerancia estándar. Como ejemplo, usando el torón de baja relajación, que es el más utilizado, el cual tiene una resistencia a la tensión especificada de 1862 MPa (270,000 psi), el esfuerzo máximo efectivo, sería según AASHTO, de $0.75 (1862) = 1396.5$ MPa. Se puede dar un sobre tensado temporal por el gato hasta el 80% de la resistencia a la tensión especificada de 1489.6 MPa $= 0.80 (1862)$. Para un torón de $\frac{1}{2}$ " de diámetro con un área de 0.987 cm^2 , la máxima fuerza aplicada sería $(9.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2) (1489.6 \text{ MPa}) = 147 \text{ kN}$ que son aproximadamente 15 toneladas fuerza.

El esfuerzo temporal adicional que ejerce el gato puede ser necesario para compensar las pérdidas por asentamiento del barrilete en el extremo vivo, de tal modo que, el sobre tensado se disipara una vez que se dé el asentamiento del barrilete o se remueva el gato. Sin embargo, si el sobre tensado temporal es requerido para compensar las correcciones por temperatura en el torón, el sobre tensado permanecerá en el sistema que toma el presfuerzo hasta la colocación del concreto más caliente, en cuyo momento se disipará el sobre tensado. La pérdida por asentamiento es relativamente un valor constante para un arreglo y dispositivo de anclaje a un cierto nivel de esfuerzo. Puede obtenerse como se ha descrito, pero básicamente es mediante la comparación del movimiento en el torón a través del anclaje.

6.4.3.2 Reducción de fricción

El tensado de torones deflectados requiere de métodos que reduzcan la fricción que se presenta entre los torones y los dispositivos depresores y elevadores. La lista que a continuación se presenta, describe algunos de los métodos que se han utilizado para reducir el efecto de la fricción.

- a. Tensar el torón por ambos extremos de la mesa.
- b. Utilizar baleros en cada depresor y elevador durante el tensado.
- c. Deprimir o elevar el torón comenzando en el dispositivo localizado en la parte más próxima al centro de la mesa y entonces proceder simétricamente con respecto a esa ubicación.
- d. Aplicar vibración a los torones cuando están siendo tensados (actualmente los instructores del PCI no recomiendan esta práctica)
- e. Lubricar los baleros de los dispositivos depresores y elevadores.

6.4.4 Control de la transferencia de torones deflectados

Se debe de tener cuidado cuando se libere la conexión entre los dispositivos depresores y la mesa de colado. El diseñador o el ingeniero de planta deben indicar cuando, en el proceso de

6.4.5.1 Relaciones fundamentales

A right triangle is shown with a horizontal base labeled a , a vertical side labeled b , and a hypotenuse labeled c . The right angle is at the top-right vertex.

El incremento en longitud, Δ , de un torón deflectado es:

Al igual que con la fuerza, P , en el torón; y utilizando semejanza de triángulos:

$$\frac{C_{vp}}{b} = \frac{P}{c}$$

A right-angled triangle is shown. The hypotenuse is labeled P . The vertical side is labeled $P(b/c)$. The horizontal side is unlabeled.

La otra relación fundamental entre la fuerza aplicada al torón, P y la elongación, Δ , es la siguiente:

$$\Delta = \frac{PL}{AE} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (ec. 4)$$

donde: L = longitud bajo consideración (m)

$A = \text{área del torón (m}^2\text{)}$

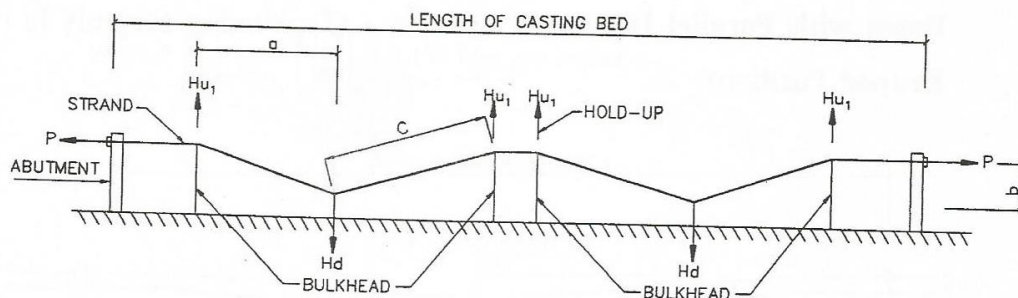
E = módulo de elasticidad del torón, usualmente varia alrededor de $1.965 \times 10^8 \text{ kPa}$

Reacomodando la ec. 4 y despejando P ; tenemos:

$$P = \frac{\Delta A E}{L} \quad (ec. 5)$$

6.4.5.2 Componente vertical de la fuerza – Un depresor

Considere el sistema de un solo depresor por elemento, tal como se muestra enseguida:



En este caso, la fuerza vertical en el depresor, H_d , es aplicada en la terminación de dos diagonales (concurrentes), de manera tal que:

[illegible]

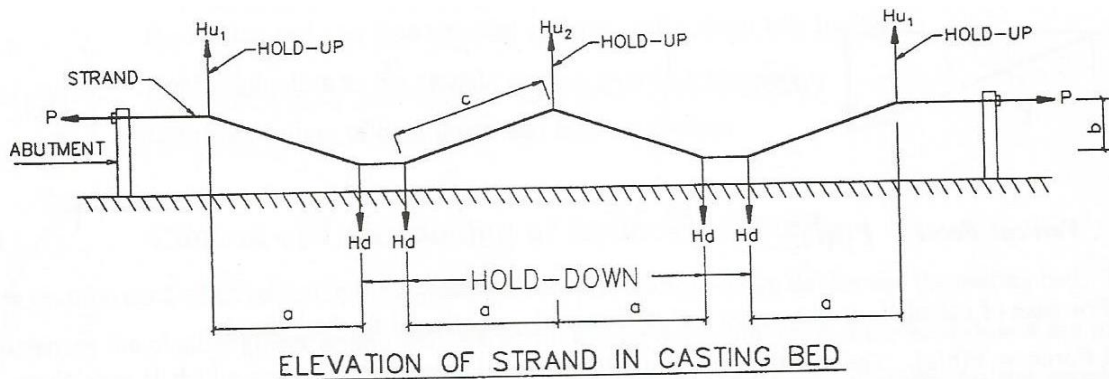
Las mamparas actúan como elevadores para cada diagonal, de modo que:

$$H_{u1}=P(b/c)=\frac{H_d}{2} \quad (ec. 7)$$

Nota importante: siempre realizar la comprobación de los cálculos mediante la verificación de las condiciones de equilibrio.

Componente vertical de la fuerza – Dos depresores

Considere el sistema de dos depresores por elemento, tal como se muestra enseguida:



Para calcular las fuerzas verticales de depresión y elevación, utilizamos la ec. 3:

$$H_d = P(b/c) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (ec.8)$$

Considerando que se debe mantener el equilibrio:

$$H_{u1}=H_d \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (ec. 9)$$

Una vez que dos diagonales terminan en el punto donde H_{u2} es aplicada:

[illegible]

Nota importante: siempre realizar la comprobación de los cálculos mediante la verificación de las condiciones de equilibrio.

6.4.5.4

Fuerza neta aplicada por el gato

Quando los torones son deflectados después del tensado, se introduce una nueva fuerza al sistema la cual es inducida a los torones. Para fines de calcular la fuerza del gato, la fuerza adicional debe ser restada de la fuerza final requerida.

El incremento en la longitud es calculado mediante la ecuación 2 para cada torón diagonal a lo largo de la mesa. La fuerza causada por este incremento en longitud se calcula mediante la ecuación 5. Estos incrementos en fuerzas y longitud son restadas de la fuerza y la elongación que se obtienen calculándolas como si el torón no estuviera deflectado. Para fines de revisar algunos ejemplos resueltos referirse al apartado 6.4.6.

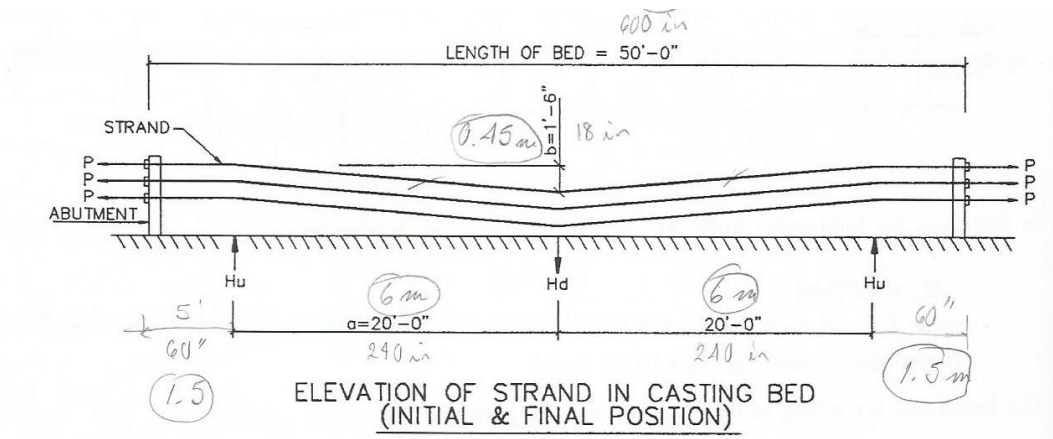
6.4.5.5

Otros factores que afectan la fuerza en el torón

Algunas otras situaciones pueden afectar a la fuerza final de tensado aplicada por el gato y a la elongación; tales como: los cambios de temperatura, los asentamientos en el barrilete y los movimientos de los contrafuertes, tal como se ha explicado en el apartado 6.3.11.2. La diferencia entre los efectos sobre torones rectos y deflectados es despreciable, de tal manera que pueden ser calculados como si el torón estuviera recto en combinación con los efectos propios de la deflexión ya discutidos.

6.4.6 Problemas resueltos

6.4.6.1 Trabe con torones paralelos deprimidos – (Tensado de torones en posición suelta)



Tenemos: El perfil de la trabe mostrado arriba

Área por torón = $9.871 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

Módulo de elasticidad, $E = 193,053 \text{ MPa}$

Fuerza final especificada por torón = 128,998 kN

Obtener:

- Longitud total de cada torón entre contrafuertes
- Fuerza en el elevador, H_u , por torón
- Fuerza en el depresor, H_d , por torón

Solución:

- a) Utilizando la ec. 1, se obtiene la longitud de la diagonal:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \Rightarrow c = \sqrt{(6)^2 + (0.45)^2} \Rightarrow c = 6.017 \text{ m}$$

De la ec. 2, tenemos que $\Delta = 6.017 - 6.000 \Rightarrow \Delta = 0.017 \text{ m}$

Longitud total entre contrafuertes (a paño exterior) = $15 \text{ m} + 2(0.017) = 15.034 \text{ m}$

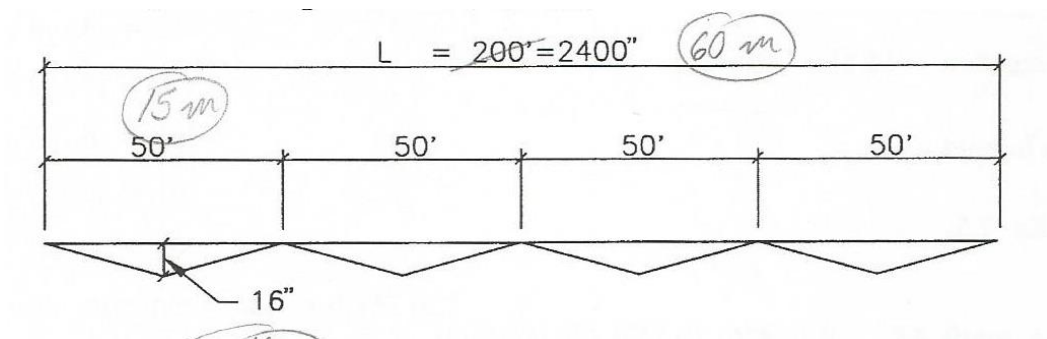
- b) De la ec. 8 tenemos que:

$$H_u = P(d/c) \Rightarrow H_u = 128,998 (0.45/6.017) \Rightarrow H_u = 9,647.5 \text{ kN por torón}$$

- c) Tenemos que por equilibrio de fuerzas, en el eje Y:

$$2H_u = H_d \Rightarrow H_d = 2 (9,647.5) \Rightarrow H_d = 19,295 \text{ kN por torón}$$

6.4.6.2 Depresor en un solo punto, simplificado



Tenemos: El perfil del torón mostrado esquemáticamente arriba

$$\text{Área por torón} = 9.871 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Módulo de elasticidad, } E = 197,190 \text{ MPa}$$

$$\text{Fuerza final especificada por torón} = 128.643 \text{ kN}$$

Obtener:

- a) Fuerza básica del gato y su correspondiente elongación

Solución:

- a) Utilizando la ec. 1, se obtiene la longitud de la diagonal:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \Rightarrow c = \sqrt{(7.5)^2 + (0.40)^2} \Rightarrow c = 7.511 \text{ m}$$

De la ec. 2, tenemos que $\Delta = 7.511 - 7.500 \Rightarrow \Delta = 0.011 \text{ m}$ / fracción diagonal de torón

Longitud adicional por la deflexión, $\delta = 8(0.011) = 0.088 \text{ m}$

De la ec. 4 tenemos que la elongación para el torón recto con esas características es:

$$\Delta = \frac{P L}{A E} \Rightarrow \Delta = \frac{((128,643) (60))}{((9.871)(1,971,900))} \Rightarrow \Delta = 0.397 \text{ m}$$

Por lo que:

Elongación básica calculada para compararse con la elongación medida (según apartado 6.3.10) = $\Delta - \delta \Rightarrow e_{bc} = 0.397 - 0.088 \Rightarrow e_{bc} = 0.309 \text{ m}$

Para calcular la fuerza en el torón inducida por los depresores:

$$P = \frac{\Delta A E}{L}$$

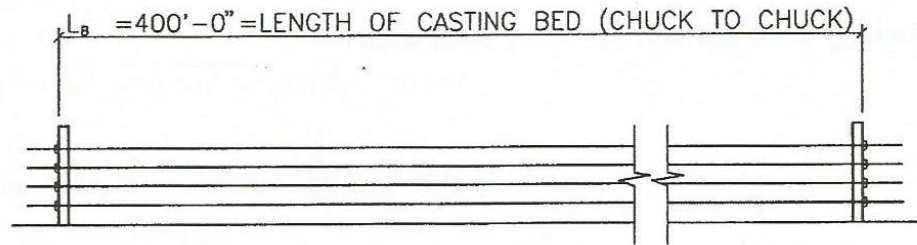
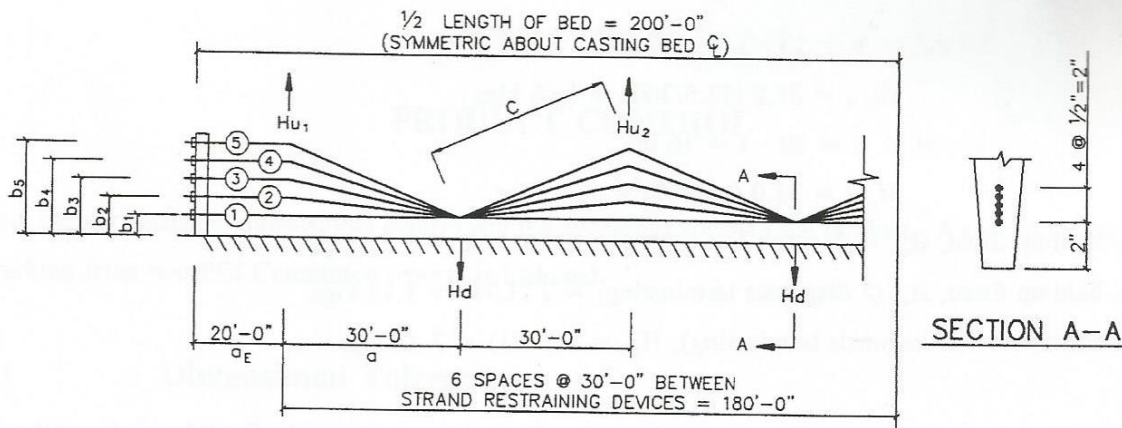
$$P = \frac{(\Delta \text{ total}) A E}{L} \Rightarrow P = \frac{(8)(0.011)(9.871 \times 10^{-5})(197,190 \times 10^6)}{8(7.511)} \Rightarrow P = 28.501 \text{ kN}$$

Por lo que la fuerza básica en el gato será: $128.643 \text{ kN} - 28.501 \text{ kN} = 100.137 \text{ kN}$

Conclusión: La fuerza final de 28.501 kN y la elongación correspondiente de 0.088 m se presentarán durante la depresión del torón.

6.4.6.3

Doble "T" con torones agrupados en un supresor

**Elevation of Strand - Initial Position****Elevation of Strand - Final Position**

Tenemos: El perfil del torón mostrado arriba

$$h_1 = 5 \text{ cm}$$

$$h_2 = 20 \text{ cm}$$

$$h_3 = 30 \text{ cm}$$

$$h_4 = 40 \text{ cm}$$

$$h_5 = 50 \text{ cm}$$

$$\text{Área por torón} = 9.871 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Módulo de elasticidad, } E = 193,053 \text{ MPa}$$

$$\text{Fuerza final especificada por torón} = 137.895 \text{ kN}$$

Obtener:

- a) Fuerzas de elevación y depresión

Solución:

a) Utilizando la ec. 1, se obtiene la longitud de la diagonal para cada torón:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \Rightarrow$$

$$c_1 = \sqrt{(9.0)^2 + (0.0)^2} \Rightarrow c_1 = 9.000 \text{ m}$$

$$c_2 = \sqrt{(9.0)^2 + (0.137)^2} \Rightarrow c_2 = 9.001 \text{ m}$$

$$c_3 = \sqrt{(9.0)^2 + (0.225)^2} \Rightarrow c_3 = 9.002 \text{ m}$$

$$c_4 = \sqrt{(9.0)^2 + (0.312)^2} \Rightarrow c_4 = 9.017 \text{ m}$$

$$c_5 = \sqrt{(9.0)^2 + (0.399)^2} \Rightarrow c_5 = 9.022 \text{ m}$$

De la ec. 3 y la ec.8 , tenemos que $H_u = P(d/c) \Rightarrow$

$$H_{u1-1} = 137.895 (0.00/9.000) \Rightarrow H_{u1-1} = 0.000 \text{ kN}$$

$$H_{u1-2} = 137.895 (0.137/9.001) \Rightarrow H_{u1-2} = 2.098 \text{ kN}$$

$$H_{u1-3} = 137.895 (0.225/9.002) \Rightarrow H_{u1-3} = 3.447 \text{ kN}$$

$$H_{u1-4} = 137.895 (0.312/9.017) \Rightarrow H_{u1-4} = 4.771 \text{ kN}$$

$$H_{u1-5} = 137.895 (0.399/9.022) \Rightarrow H_{u1-5} = 6.098 \text{ kN}$$

Por lo que:

$$\text{Total de la fuerza en el elevador } H_{u1} = 0.000 + 2.098 + 3.447 + 4.771 + 6.098 = 16.415 \text{ kN}$$

$$\text{Total de la fuerza en el elevador } H_{u2} (\text{concurrencia de dos diagonales}) = 2(16.415) = 32.83 \text{ kN}$$

$$\text{Total de la fuerza en el depresor } H_d (\text{concurrencia de dos diagonales}) = 2(16.415) = 32.83 \text{ kN}$$

6.5 Postensado de elementos producidos en planta

6.5.1 General

El postensado es utilizado en las plantas de prefabricados por diversas razones. Puede darse por que en plantas relativamente pequeñas donde el espacio se ve limitado, puede ser necesario para hacer

un desmolde y un manejo adecuado de la pieza dentro de la planta o durante el transporte al sitio de montaje.

En algunos casos el postensado es el principal elemento de refuerzo de concreto como resultado del diseño estructural.

Muchas veces, el postensado es utilizado en puentes con múltiples claros, donde las trabes se unen y la estructura prefabricada puede ser más larga que utilizando una sola pieza de trabe pretensada.

Otra aplicación del postensado en campo es en la unión de secciones cajón en puentes segmentados.

Se utilizan dos métodos típicos para la construcción de estructuras postensadas. El primer método tiene que ver con torones o cables colocados previamente antes de colar el elemento. Este tipo de torón o cable es llamado monotorón, que es un solo torón cubierto de una vaina (camisa) plástica. Para reducir la fricción durante el tensado y para proteger el torón contra la corrosión, al torón se le lubrica durante el proceso de encamisado. Este tipo de sistema es utilizado en muros prefabricados y, en algunos casos, trabes prefabricadas. Los torones sin adherencia son anclados al elemento solo a cada extremo del torón. Si el torón o el anclaje llegaran a dañarse, puede romperse y perder completamente su efectividad como refuerzo del concreto.

El segundo método está relacionado con la colocación de un ducto de varios centímetros de diámetro dentro del elemento previamente a la colocación del concreto. Los torones de presfuerzo se pueden colocar dentro del ducto después de que el elemento es desmoldado. Los gatos multitorón son utilizados para tensar varios torones al mismo tiempo en estas operaciones. Una vez que se ha tensado, es inyectado, mediante bombeo, un grout con el fin de unir el torón en el ducto.

Se deben de tener los mismos cuidados y monitoreo de los torones como en el pretensado durante el proceso de tensado. Esto también incluye el cálculo, el monitoreo y el registro de la elongación.

Los torones en sistemas no adheridos de postensado se anclan en ensambles con barriletes o cuñas que se ubican remetidos en el concreto a cada extremo. La fuerza de tensión en el torón es transferida al concreto como una fuerza concentrada en cada barrilete. La concentración de esfuerzos en los ensambles de anclaje en cada extremo del arreglo del postensado produce esfuerzos grandes y concentrados alrededor de la zona de anclaje, lo que puede colapsar el concreto a menos que se refuerce dicha zona adecuadamente. Por esta razón, todos los sistemas postensados requieren detalles de refuerzo en las terminaciones que deben obligatoriamente ser instalados cuidadosamente alrededor del anclaje previamente al colado.

6.5.2 Detalles y posición de ductos.

El posicionamiento de los torones de postensado y/o los ductos deben obligatoriamente mantenerse en estrechas tolerancias con respecto a las posiciones indicadas en los planos de taller. La trayectoria de los ductos no debe variar de la posición indicada en más de 13 mm por cada 3 m de longitud. La posición de los ductos con respecto a su altura o profundidad de los elementos debe de mantenerse en posición de + 6 mm.

Los ductos previamente instalados al colado, deben sellarse de tal modo que no se permita la entrada de concreto o mortero durante el proceso de colado y deben obligatoriamente de fijarse y

sujetarse de manera tal que se mantengan en la posición indicada respetando las tolerancias ya mencionadas. Los ductos deben de soplearse con aire comprimido o limpiarse de tal manera que después del colado se remueva cualquier residuo de concreto, mortero o agua que se pudiera haber filtrado al ducto. El ducto y sus drenes deben de ser revisados después del desmolde para confirmar que están libres de obstrucciones.

El posicionamiento de los torones monotorón o los ductos es una parte importante del diseño de elementos postensados. Después de que el concreto ha endurecido y durante el proceso de tensado se desarrolla fricción entre el ducto o recubrimiento del monotorón. Los cálculos del tensado para cierta fuerza y la elongación deben obligatoriamente de ajustarse para cantidades específicas de fricción anticipada o una desalineación del ducto, frecuentemente llamada cabeceo. Si la alineación del ducto o tendón produce fricción en cantidad mayor a la que se esperaba mediante el cálculo, se dificultará mantener la tolerancia dentro del 7% requerido. La distribución no uniforme de esfuerzos a lo largo de los tendones de postensado pueden llevar a reducir la capacidad en el extremo opuesto del tendón tensado.

6.5.3 Fricción en ductos.

La fuerza especificada de tensado, ejercida por el gato, requerida para tensar en tendones postensados incluye una fuerza que supere la fricción durante el proceso de tensado. Las instrucciones plasmadas en los documentos de producción deben de ser cuidadosamente observadas a fin de tensar el elemento de manera consistente con el objetivo de diseño. El cálculo real de la fuerza ejercida por el gato no cae dentro del alcance de este trabajo. Los cálculos deben hacerse por parte de ingenieros experimentados, sin embargo, el personal de planta debe estar pendiente de la fuerza máxima que el gato debe de aplicar a un torón o tendón postensado. Estas fuerzas máximas ejercidas por el gato son el 80% de la resistencia última del torón. Esto representa una fuerza de 146.791 kN para un típico torón de ½" de diámetro y grado 270 ksi, y 208.177 kN para un típico torón de 0.600 in de diámetro y grado 270 ksi. En ningún caso se debe exceder la máxima fuerza de tensado ejercida por el gato. Si no se ha alcanzado la elongación con la fuerza máxima de tensado, se le debe de notificar al ingeniero responsable del diseño inmediatamente.

6.5.4 Proceso de tensado.

El plano de taller debe indicar la secuencia de tensado para mantener los esfuerzos en el elemento dentro de determinados límites. La resistencia a compresión del concreto requerida debe obligatoriamente ser determinada mediante pruebas con cilindros.

El tensado de tendones postensados es similar al realizado en pretensado. Se requiere una fuerza mínima del 10% aproximadamente de la carga del gato aplicada a los tendones para suprimir la catenaria y así proporcionar un punto de partida para la medida de la elongación. Posteriormente se aplica la fuerza final que debe incluir cualquier fuerza adicional para compensar pérdidas por fricción,

asentamiento del anclaje y liberación de fuerza. La elongación resultante se mide y compara con el valor teórico. La tolerancia para la variación de la elongación con el valor teórico para tendones postensados es + 7%. Esta cantidad aplica a la fuerza final y la elongación final. La suma algebraica del error con la lectura del manómetro y el error en la medida de la elongación debe también estar dentro del 7% de tolerancia.

6.5.5 Anclajes.

Los dispositivos de anclaje para todos los sistemas de postensado deben alinearse cuidadosamente con referencia al eje del tendón en el punto de unión o contacto. Cualquier coca (figura 6.8) en el tendón cercana al punto de anclaje, especialmente el extremo vivo, causará una mayor fricción durante las operaciones de tensado.

Tal cual en la operación de pretensado, los dispositivos de anclaje para tendones postensados tienen, en algunos casos, una gran cantidad de pérdida por asentamiento en los extremos vivos, la cual es en cierto punto considerada por el ingeniero de diseño. Estas pérdidas por asentamiento deben de revisarse durante las operaciones de tensado. Las pérdidas previstas que fueron incluidas en los cálculos de tensado deben expresarse en los planos de taller. Si las pérdidas previstas para los asentamientos en los extremos vivos varían con respecto a aquellas que se indican en los planos de taller, se debe de notificar al ingeniero responsable.

La sujeción mediante el anclaje a cada extremo del tendón postensado debe sellarse y asegurarse rígidamente en su lugar en la posición indicada por los planos de producción durante el colado. El concreto no debe introducirse en los anclajes donde se alojará el tendón. Si se permite que se introduzca concreto en los anclajes, las cuñas no anclarán correctamente el torón, desencadenando problemas de seguridad durante el tensado y deslizamientos hacia el interior del elemento a largo plazo a través de la vida del elemento.

6.5.6 Colocación de grout.

Los ductos para tendones postensados son llenados con grout después de la operación de tensado. El ducto debe estar libre de agua que se haya podido acumular durante el proceso de curado y que pueda provocar algún problema de corrosión. La acumulación de agua puede indicar que los drenes no estén funcionando apropiadamente, por lo que deben ser revisados y limpiados si fuera necesario. Los tendones deben de ser tensados dentro de los siguientes 10 días posteriores a su colocación. Si se prevé un retraso a esta actividad, se debe de aplicar un inhibidor de corrosión al tendón antes de introducirlo al ducto. El grout es colocado por un extremo mediante bombeo, mientras que el otro extremo posee un tubo de ventilación que permite al aire atrapado escapar durante las operaciones de inyección del grout. Las ventilaciones no deben de cerrarse hasta que se observe un flujo constante de grout siendo expulsado por la ventilación. Una vez que se han cerrado las ventilaciones, la operación de bombeo debe continuarse hasta que se alcance una presión constante de 700 kPa (7.14 kg/cm²) durante 10 segundos.

6.5.7 Sellado de anclajes

Es críticamente importante, particularmente en construcción a base de monotorones sin adherir, que las piezas de anclaje colocadas a cada extremo sean protegidas permanentemente contra la corrosión, deben ser selladas con grasa o, si el producto no está en un medio ambiente particularmente corrosivo, se puede aplicar una pintura o sellador para cubrir la superficie del anclaje. Estos anclajes y tendones deben de cubrirse con grout o un material similar para mantener la resistencia al fuego de todo el ensamble. El tipo de trabajo y material a utilizar debe especificarse claramente en los planos de taller.

7 Control de calidad

Para tratar el tema de control de calidad, en este trabajo revisaremos los procedimientos de inspección y control. Desde el punto de vista de *Administración de Proyectos*, la “Realización del control de calidad” junto con la “Planificación de la calidad” y la “Ejecución del aseguramiento de calidad” forma parte de la *Gestión de la Calidad del Proyecto*. Por lo anterior, podemos observar que el tema es mucho más amplio y que puede abarcar más aspectos como: la determinación de responsabilidades, de objetivos y de políticas de calidad, de actividades de mejora continua, entre otras. El incumplimiento de los requisitos de calidad del proyecto o del producto puede tener consecuencias negativas graves para los involucrados en el proyecto mismo.

Siempre deberá existir un compromiso por parte de los responsables de la ejecución de los trabajos por obtener un producto que cumpla o mejor aún, supere los criterios de aceptación. Es un hecho que, entre menos exista este compromiso, se deberá reforzar con una mayor supervisión o inspección para alcanzar los criterios de aceptación establecidos, pero a la vez se crea un ambiente de trabajo más desgastante y menos agradable con los efectos indeseables que esto conlleva.

7.1 Inspección

Las inspecciones del área de calidad son una parte fundamental en la producción de elementos prefabricados de concreto. Estas inspecciones o supervisión deben cubrir todos los aspectos de la producción incluyendo los métodos y los materiales.

Los inspectores de calidad no debieran ser responsables por algún aspecto de la producción y deben reportar directamente con la gerencia de la planta o el departamento de ingeniería, pero en ningún caso con el área de producción. Por su parte, las inspecciones deben realizarse de forma tal que no retrasen o demoren las operaciones de producción, aunque eso puede requerir un gran esfuerzo por las partes involucradas.

Como ya se mencionó, las inspecciones de calidad deben de abarcar todas etapas de los ciclos de producción manteniendo los respectivos registros o documentos de tales actividades. El alcance de las inspecciones varía de acuerdo al tipo de producto.

Un programa (basado en los criterios del PCI) de inspección para el control de calidad en una planta, debería incluir, pero no limitarse a:

Materiales:

- Revisión de certificados de calidad para asegurar el cumplimiento de las especificaciones establecidas.
- Pruebas a los materiales para asegurar el cumplimiento de las especificaciones establecidas.
- Archivo de los registros de las pruebas como verificación de la calidad de los materiales utilizados.

Pretensado:

- Monitoreo de las operaciones de tensado.
- Implementar acciones correctivas cuando los torones son tensados fuera de tolerancia.
- Archivo de los registros de las operaciones y anotaciones de las acciones correctivas que fueron tomadas cuando el tensado resulto fuera de tolerancia.

Inspección previa al colado:

- Ejecución de inspecciones previas al colado de todos los arreglos o configuraciones de trabajo existentes.
- Seguimiento a los problemas encontrados durante la inspección previa al colado para asegurarse de que sean corregidos previamente a la colocación del concreto.
- Documentar cada inspección previa para cada producto.

Dosificación, mezclado y manejo del concreto:

- Monitoreo de los procedimientos de dosificación y mezclado periódicamente.
- Ajuste de agua en la mezcla por humedad libre de los agregados.
- Inspección de los equipos involucrados para asegurarse que ellos están operando adecuadamente, incluyendo la ausencia de material perjudicial que pudiera contaminar el concreto fresco.

Colocación del concreto:

- Monitoreo regular de la colocación del concreto (revisión de segregación y consolidación deficiente).
- Revisión del acabado y curado de concreto.

Pruebas al concreto fresco:

- Elaboración de pruebas al concreto fresco para asegurar que cumple las especificaciones establecidas.
- Elaboración de especímenes de prueba de concreto (cilindros) y curarlos de acuerdo a los requerimientos.
- Archivo de los registros de las pruebas al concreto y anotaciones de las acciones que fueron tomadas cuando los resultados no cumplieron los requerimientos.

Destensado:

- Monitoreo periódico de las operaciones de destensado.
- Revisión de los procedimientos de manejo y almacenamiento para asegurar que los elementos no están siendo dañados.

Inspección posterior al colado:

- Ejecución de inspecciones posteriores al colado, incluyendo la revisión de dimensiones, contraflechas, acabados, oquedades, elementos ahogados, entre otros.
- Documentar cada inspección posterior ampliamente para cada producto.
- Marcaje apropiado de cada pieza producida.
- Corrección de cualquier problema encontrado durante la inspección posterior al colado.
- Documentar todas las acciones correctivas.

Inspección final (elementos arquitectónicos):

- Ejecución de una inspección final, previa al envío.
- Revisión del acabado completamente para asegurar que cumple con las muestras aprobadas previamente.
- Inspeccionar visualmente en busca de daños causados por el manejo y almacenamiento inapropiado.

Identificación del producto:

- Instauración de un sistema preciso de identificación de tal forma que cada elemento terminado pueda ser rastreado y ligado a sus registros de producción.
- Marcaje de elementos, de forma tal, que permita asociarse a su ubicación de fabricación sobre la mesa de colado en específico.

Equipo:

- Mantenimiento del equipo en buenas condiciones de trabajo (calibración de gatos de tensado, básculas de pesaje de la dosificadora, revisión de los barriletes de anclaje, entre otros).
- Mantenimiento de otros equipos basados en el volumen de trabajo preferentemente a periodos de tiempo, lo que resulte menor.

Mantenimiento de registros de calidad:

- Implementación de un sistema de archivos para el total de las operaciones enlistadas previamente.

7.1.1 Inspección previa al colado

Debido a que la inspección previa al colado es una de las operaciones que aportan los mayores beneficios en relación al costo, le dedicaremos este apartado y estableceremos algunas consideraciones al respecto.

La inspección previa al colado se constituye como la primera línea de defensa en contra de productos defectuosos, que pudieran representar reparaciones costosas o aún el rechazo total del producto o elemento.

Es importante establecer un tiempo adecuado (programar) para realizar esta inspección dando suficiente holgura al inspector o supervisor para ejecutar esta actividad sin interferir con producción. El inspector debe de tomar nota de los problemas encontrados y reportarlos a quien sea designado para tal fin, con el objeto de que sean corregidos de inmediato y antes de ejecutar el colado. Incluso, es posible notificar al ingeniero estructural responsable de ciertas condiciones que no permitan que un elemento sea colado de acuerdo a los planos de taller. Se puede llegar a requerir un nuevo plano de taller o una notificación por escrito de los cambios realizados y además se debe de mantener como respaldo. Cada inspección previa al colado debe atender los siguientes puntos:

7.1.1.1 Cimbras y moldes

Se debe verificar la condición, dimensiones y la limpieza de acuerdo a los procesos previamente establecidos y revisados en los apartados 2.3.

7.1.1.2 Acero de refuerzo

El acero de refuerzo debe ser inspeccionado completamente, y el inspector debe de verificar:

- El correcto tamaño y tipo de acero,
- La correcta posición de acuerdo a los planos de taller,
- La limpieza y ausencia de contaminantes en el acero,
- Los amarres para prevenir movimientos durante el colado, (ver apartado 6.1.1.1)
- Los alambres del amarre sean doblados hacia el interior del elemento, en dirección opuesta a las paredes de la cimbra más cercanas,
- Las conexiones entre varillas y las distancias de traslape así como su ubicación en un posible plano de falla.

7.1.1.3 Torón de presfuerzo

El torón de presfuerzo es el refuerzo principal en un elemento presforzado de concreto. Como hemos venido anotando, existen diversos factores que afectan el buen desempeño del presfuerzo. Los siguientes puntos se deben de verificar durante la inspección previa al colado:

- Tamaño, grado, cantidad y posición correcta del torón.
- Limpieza y condición de la superficie del torón.
- Engrase en la longitud y en los torones adecuados.

En camas de colado demasiado largas, aún en elementos tensados totalmente, los torones colgaran por debajo de su posición requerida, por lo que se deben de proveer soportes en toda la longitud.

7.1.1.4 Accesorios ahogados

Los accesorios, insertos y dispositivos de izaje deben obligatoriamente de localizarse en la posición adecuada. Estos artículos deben de inspeccionarse para toda la producción de acuerdo al apartado 7.2.

7.1.1.5 Accesorios soldados

Los accesorios soldados son utilizados para conectar elementos uno a otro o a una estructura existente. Todos los accesorios soldados deben de inspeccionarse previamente al colado para:

- Localización y tamaño de los accesorios.
- Colocación de anclajes.
- Inspección visual de todas las soldaduras en cuanto a localización, tamaño y condición.

Las placas soldadas que se usan para conexión deben de colocarse niveladas con la superficie del elemento de manera tal que se pueda realizar la conexión correctamente.

7.1.2 Inspección posterior al colado

Se constituye como la oportunidad final para confirmar que el producto cumple los requerimientos especificados. La inspección posterior debe de:

- Localizar cualquier error de forma tal que pueda ser corregido previamente al envío.
- Identificar correcciones que deben de realizarse en la producción futura para prevenir la recurrencia de ese error.
- Contemplar el sistema de marcaje del producto y las marcas de identificación para su trazabilidad.
- Incluir una inspección visual que comprenda a su vez: la apariencia general del elemento; aspectos como cavidades excesivas, apanalamiento, grietas, fisuras o desportilladuras; inclinación en los accesorios y placas; cualquier aspecto que afecte la calidad del producto.

Mientras más pronto se realice la inspección posterior se tendrá más tiempo de corregir problemas en producción, por lo que lo ideal es inspeccionar los elementos tan luego sean desmoldados. Dichos problemas deben de ser reportados al área de ingeniería para su evaluación. En caso de reparación, se debe volver a inspeccionar para asegurarse que finalmente se han cumplido apropiadamente los requerimientos.

7.1.2.1 Contraflecha

La contraflecha es la deflexión natural en sentido ascendente de un elemento presforzado de concreto sujeto a flexión, cuando los torones son colocados cerca de la parte inferior. La contraflecha inicial ocurre al momento de destensar. La contraflecha inicial puede verse afectada por:

- Resistencia del concreto (a menor resistencia mayor contraflecha)
- Tensión diferencial en los torones (a menor tensión menor contraflecha)
- Ubicación de los torones (la ubicación en una posición por arriba de la posición de diseño, resultará en una menor contraflecha, lo opuesto también es cierto)

La contraflecha inicial de un producto debe de:

- ser medida a horarios consistentes dentro de las 72 horas posteriores al destensado,
- ser medida en el 100% del total de las piezas de una configuración nueva o inusual,
- ser medida en el 25% de las piezas de los colados subsecuentes, y
- ser comparada con la contraflecha inicial calculada por ingeniería.

La contraflecha presentará variaciones dependiendo de la edad del producto, por lo que se recomienda que sea medida tan pronto sea posible después de desmoldar. En caso de presentarse una variación significativa con la calculada por el diseñador estructural se tiene un problema que generalmente está asociado a los procesos de producción (tensado, dosificación, colado, consolidación o curado).

La contraflecha final de un elemento se puede incrementar de 2 a 3 veces con respecto a la contraflecha inicial, lo que es conocido como crecimiento de la contraflecha. Algunos factores que pueden afectar la contraflecha final son la localización en el almacenamiento y la posición de los soportes o apoyos temporales. El diferencial entre contraflechas correspondientes a los mismos productos puede provocar problemas al momento de realizar el montaje. Los elementos que son expuestos a la luz solar tienden a presentar una contraflecha mayor a aquellos que no lo son, ya que la energía solar calienta la superficie del elemento, lo que permite una dilatación del concreto, mientras que la parte inferior permanece fría, provocando que la contraflecha se incremente.

7.1.2.2 Dimensiones del producto

Las dimensiones de cada elemento deben de ser revisadas después del descimbrado o desmolde. Los puntos que deben ser inspeccionados son:

- longitud, ancho y altura total,
- ubicación de accesorios metálicos ahogados y preparaciones de otros tipos,
- perpendicularidad de los extremos.

Existen tolerancias geométricas de fabricación establecidas en los manuales MNL-116 y MNL-117 del PCI, y en la Sección 5 de las *Especificaciones y tolerancias para materiales y construcciones de concreto*, elaboradas por el Comité ACI 117, las cuales revisaremos en el apartado 7.5. Cuando existen dimensiones fuera de tolerancia, el departamento de ingeniería determina si pueden ser reparadas; así como el procedimiento a seguir si es el caso. La causa del error debe de corregirse para los subsecuentes colados.

Los extremos descuadrados presentan un gran problema para el proceso de montaje. Principalmente los descuadres de los extremos de los elementos, especialmente en las trabes, se originan por una mala colocación de los tapones o cabezales, por lo que deben de ser revisados en la inspección previa; el escuadre del elemento debe verificarse en la inspección posterior. La forma más sencilla de verificar esta escuadra es mediante un nivel o niveleta y una escuadra de carpintero.

7.1.2.3 Manejo y almacenamiento

Estos procedimientos deben revisarse periódicamente y no se debe de pensar que el proceso termina al momento del desmolde. Los elementos prefabricados deben de apoyarse sobre un terreno firme y nivelado. Elementos compuestos tales como las losas doble tee, apoyadas sobre un terreno inestable, frecuentemente se exponen a torsión lo que puede causar agrietamiento y consecuentemente la reducción de la capacidad estructural. Un problema frecuente que se suele presentar con respecto a este punto, es que muchas veces al instalar una planta móvil de prefabricados, el suelo no resulta ser de la capacidad requerida para soportar las cargas que se impondrán debido a los elementos y al equipo, por lo que se requiere un mejoramiento que implica costos y tiempo y que muchas veces no es bien estipulado en los alcances del contrato lo que crea dificultades para las partes involucradas. Algunas soluciones son obviamente:

- 1) realizar una buena inspección al lugar y determinar la capacidad mínima de carga requerida para instalar la planta y así estipularlo en el presupuesto respectivo;
- 2) hacer coincidir la ubicación de la planta con un lugar donde el mejoramiento realizado al suelo sea utilizado posteriormente y los costos de mejorarlo se transfieran o repartan con el resto del proyecto, ó
- 3) finalmente cambiar la localización de la planta a otro lugar con mejores condiciones de capacidad de carga y económicamente viable con respecto, principalmente, a los costos del transporte.

Se debe de proveer los apoyos temporales de suficiente capacidad, en general en nuestro país, y de acuerdo al peso del elemento se utilizan polines (4" x 4") o durmientes (12" x 12") de madera de pino. En caso de que los elementos se estiben, los apoyos deben alinearse en un plano vertical, lo que limita a que los elementos sean de dimensiones similares. Elementos cortos no pueden apoyarse sobre elementos largos debido a que producirán esfuerzos para los que no han sido diseñados y pueden dañar al elemento; también el estibar puede inhibir el crecimiento de la contraflecha y propiciar problemas durante la etapa de montaje. Usualmente el ingeniero puede especificar el peso muerto máximo que un elemento puede soportar con o sin efecto para el crecimiento de la contraflecha.

Los paneles arquitectónicos deben almacenarse en posición vertical, sin colocar soportes sobre la cara principal del panel en caso de ser posible. En caso contrario, se deben de utilizar apoyos o soportes que no manchen el acabado. La madera o el plástico duro pueden almacenar humedad en el área de contacto, la cual producirá un curado diferente al resto del elemento, lo que a su vez oscurecerá la parte más húmeda. Los apoyos de metal pueden oxidarse y manchar el acabado, por lo que se recomienda cubrirlos para evitar tal efecto.

7.1.2.4 Acabados arquitectónicos del concreto

Los acabados principalmente en paneles o fachadas, deben de revisarse a fin de monitorear los siguientes puntos:

- coloración que debe ser consistente con las muestras aprobadas y los paneles previamente colados,
- distribución uniforme del agregado y profundidad del grabado y/o relieve que debe ser consistente con las muestras aprobadas y los paneles previamente colados,
- desportilladuras, grietas y superficies que requieren reparación, y
- evidencia de daños que ocurren durante el manejo o almacenamiento de patio.

7.2 Pruebas

La realización de pruebas es otro aspecto importante del proceso de control y aseguramiento de la calidad. Los materiales deben de ser examinados para confirmar el cumplimiento con los requerimientos establecidos pero debe de hacerse previamente a que la producción comience. Las pruebas realizadas durante la producción sirven para verificar el cumplimiento durante el desarrollo del proceso. Los registros de las pruebas deben de mantenerse resguardados para aclarar futuros cuestionamientos referentes a la calidad.

7.2.1 Pruebas de aceptación de los materiales

Los materiales para un proyecto deben de ser examinados o probados previamente para verificar el cumplimiento de las especificaciones. Muchos proveedores de materiales efectúan tales pruebas y generalmente son remitidas junto con el material y recibidas por el almacén a su llegada a la planta. En países como EUA las especificaciones deben de cumplir con los estándares de la ASTM, en México con las NOM y las NMX. Enlistaremos una serie de requerimientos de diversos materiales que se deben de cumplir:

7.2.1.1 Cemento

Debe cumplir la ASTM C 150 para EUA y la NOM C 414 en México, así como las enunciadas en el capítulo 4.

7.2.1.2 Acero de refuerzo

Todos los aceros de refuerzo tienen que cumplir con las normas mexicanas respectivas, pero hay algunos puntos que se deben de considerar en la inspección:

- Malla electrosoldada: el espaciamiento entre alambres debe estar en un rango de 6 mm de la separación nominal, las soldaduras deben de inspeccionarse y no se permiten más de 1% de soldaduras dañadas o rotas.

- Varillas de refuerzo: inspeccionadas visualmente para verificar corrosión y daños, se debe calcular el carbón equivalente si van a ser soldadas.
- Accesorios soldados: 1 de cada 50 unidades deben de inspeccionarse visualmente y 1 perno debe de ser probado mediante doblez. Si la pieza falla, el 10% del lote debe de ser probado. Si una pieza falla de la muestra del 10%, entonces deberá probarse la totalidad del lote, es decir, el 100%.
- Acero de presfuerzo: siempre se requieren las curvas de deformación vs carga, los torones deben de inspeccionarse visualmente para revisar contaminación, corrosión, daños, tamaño y etiquetado apropiado de los carretes.
- Insertos y accesorios diversos: se requieren de los certificados de calidad del acero, y se deben de inspeccionar para revisar corrosión y daños.

7.2.1.3 Aditivos y pigmentos

Deben de cumplir las normas respectivas mencionadas en el capítulo 4.

7.2.1.4 Agregados

Se presenta una lista de requerimientos y la frecuencia de pruebas en la producción de concreto para las dos categorías de prefabricados que se manejan por el PCI (comercial-puentes y arquitectónico):

7.2.1.4.1 Comercial y puentes

El PCI indica que se requieren las siguientes pruebas en caso de una nueva fuente de abastecimiento de agregados y cuando se presenten variaciones:

- Prueba de sanidad de agregados (ASTM C88)
- Prueba para material fino que pasa la malla #200 (ASTM C117)
- Prueba para peso específico y absorción (ASTM C127 y ASTM C128)
- Prueba para la resistencia a la degradación por abrasión (ASTM C131)
- Especificaciones para agregados de concreto (ASTM C33)
- Especificaciones para agregados ligeros (ASTM C 330)

Las siguientes pruebas son requeridas previamente al inicio de la producción y actualizadas anualmente o cuando se presenten variaciones, cualquiera que sea más frecuente:

- Prueba para impurezas orgánicas en agregado fino (ASTM C40)
- Sustancias deletéreas en agregados (ASTM C33)
- Prueba para detectar reactividad potencial de agregados (ASTM C227, ASTM C289 Y ASTM C586)

La granulometría de los agregados finos, gruesos y ligeros debe ser recibida por parte del proveedor con una regularidad mensual.

7.2.1.4.2 Arquitectónico

Las siguientes pruebas son requeridas previamente al inicio de la producción y actualizadas cada cinco años o cuando se presenten variaciones, cualquiera que sea más frecuente:

- Prueba para peso específico y absorción (ASTM C127 y ASTM C128)
- Análisis petrográfico (ASTM C295)

Las siguientes pruebas son requeridas previamente al inicio de la producción y actualizadas anualmente o cuando se presenten variaciones, cualquiera que sea más frecuente:

- Prueba para impurezas orgánicas en agregado fino (ASTM C40)
- Sustancias deletéreas en agregados (ASTM C33)
- Especificaciones para agregados ligeros, excepto granulometría y sanidad (ASTM C330)
- Prueba para materiales productores de manchas en agregados ligeros (ASTM C641)
- Prueba para detectar reactividad potencial de agregados (ASTM C1260); puede omitirse si el análisis petrográfico muestra que los agregados no son potencialmente reactivos.
- Especificaciones para agregados ligeros (ASTM C 330)

7.2.1.5 Agua

Se requieren pruebas de aceptación para el agua utilizada en el mezclado de concreto. Si el agua no fuera potable, se debe de realizar un análisis químico y actualizarlo anualmente.

7.2.1.6 Absorción

Todo el concreto utilizado en paneles prefabricados debe de ser probado para conocer la capacidad de absorción a los 28 días, previamente al inicio de la producción y verificados cada 6 meses en un periodo continuo de producción. Para ejecutar estas pruebas se deben de realizar cilindros de 10 por 20 cm o cubos de 10 cm y curados por 28 días. Posteriormente los especímenes deben de ser secados al horno por lo menos 24 horas hasta que estén completamente secos y dejarse enfriar para pesarlos. Este dato representaría el peso secado al horno. Después deben de sumergirse en agua por al menos 48 horas y secarse con toallas para volverse a pesar. El método de prueba es descrito más ampliamente en la ASTM C642.

La **absorción máxima para un concreto de peso normal** cuando se exprese **en peso** es del **6%** y cuando se exprese en volumen, del 14%.

$$\% \text{ de absorción en peso} = \frac{(\text{peso con superficie seca} - \text{peso secado al horno})(100)}{(\text{peso secado al horno})}$$

7.2.2 Pruebas en la etapa de producción

Las pruebas realizadas a los materiales son requeridas a todo lo largo del ciclo de producción. En caso de no cumplir con los requerimientos, los materiales deben de ser rechazados y se deben de reemplazar con materiales aceptables.

7.2.2.1 Granulometría de los agregados

La granulometría debe de ejecutarse para todos y cada uno de los agregados utilizados. Para agregados utilizados en producción comercial y de puentes, la granulometría debe ejecutarse en periodos semanales o una vez por cada 300 m³ de agregado fino y 600 m³ de agregado grueso utilizado, cualquiera que sea más frecuente.

Para agregados utilizados en producción de concreto arquitectónico, las pruebas de granulometría deben de ejecutarse cada dos semanas o una vez por cada 30 m³ de agregados usados en mezclas para fachadas, cada 150 m³ para agregados finos usados en mezclas de respaldo y cada 300 m³ para agregados gruesos usados en mezclas de respaldo, cualquiera que sea más frecuente.

Los agregados deben de probarse de acuerdo a la ASTM D75, la muestra debe prepararse y cuartearse como lo establece la ASTM C702 y la prueba debe realizarse como lo establece la ASTM C136 para cumplir los requisitos de la ASTM C33.

El módulo de finura del agregado fino (MF) debe calcularse y registrarse cada vez que se realice la prueba de granulometría. Como ya se ha dicho el MF es calculado por la suma del porcentaje acumulado retenido en cada criba del #100 a la de 3/8" y después dividido este número entre 100. ASTM C33 establece que el MF no debe variar más de 0.20 del valor base (promedio de 10 pruebas). Las variaciones mayores en el MF afectarán el revenimiento y la trabajabilidad del concreto mientras el contenido de agua permanezca igual.

7.2.2.2 Corrección o compensación por humedad

La humedad libre presente en los agregados finos debe determinarse al menos diariamente o en cualquier momento que exista un cambio obvio en el contenido de humedad. Los pesos de agregados y agua deben de ajustarse para compensar la humedad libre.

7.2.2.3 Muestreo de concreto fresco

Un muestreo de concreto debe obtenerse de acuerdo a la ASTM C172. La muestra debe ser representativa del concreto utilizado en el producto. Las muestras deben tomarse en dos o más intervalos tomados aproximadamente de la parte media de la carga. Las pruebas deben realizarse después de haber agregado toda el agua de mezclado para representar el concreto más débil.

7.2.2.4 Revenimiento del concreto fresco

La prueba para conocer el revenimiento del concreto fresco debe de realizarse de acuerdo a lo siguiente:

- ***Prefabricados comerciales y para puentes- de acuerdo al MNL 116:***

Al menos una vez al día para cada mezcla y cuando se presenten variaciones

- ***Prefabricados arquitectónicos- de acuerdo al MNL 117:***

Al inicio del colado de la producción diaria, cuando se elaboren los cilindros, cada dos o tres pruebas de contenido de aire y cuando se presenten variaciones significativas

El revenimiento debe determinarse siguiendo el método descrito en la ASTM C143. Recordar que la lectura debe realizarse con 0.5 cm de aproximación.

7.2.2.5 Extensibilidad del concreto autocompactable

La prueba para verificar el concreto autocompactable debe realizarse en vez de la prueba de revenimiento. Está debe incluir un índice de estabilidad visual (VSI).

7.2.2.6 Contenido de aire incluido en concreto fresco

Debe verificarse al menos una vez al día para cada diseño de mezcla que contenga en su diseño aire incluido. Debe de revisarse si el revenimiento varía en más de 2.5 cm o si la temperatura varía por más de 6°C. Los estándares aplicados deben sujetarse al ASTM C173 y ASTM C231.

El contenido de aire debe mantenerse dentro de un rango de $\pm 1.5\%$ del valor especificado.

7.2.2.7 Densidad y rendimiento del concreto fresco

La densidad del concreto fresco debe revisarse cada semana para cada mezcla utilizada como mínimo. El concreto ligero debe revisarse al menos diariamente. La prueba debe realizarse en base al ASTM C138.

Las variaciones en la densidad del concreto fresco usualmente indican cambios en el contenido de aire o en el peso de los agregados.

7.2.2.8 Temperatura del concreto y del ambiente

La temperatura del concreto y del aire debe revisarse cada vez que se muestree el concreto o más frecuentemente en caso de climas extremos o severos. La temperatura del concreto debe revisarse de acuerdo a la ASTM C1064. El concreto se debe de mantener dentro de una temperatura de 10 a 38°C con el uso de hielo o agua caliente en el mezclado del concreto. Las variaciones en la temperatura del concreto pueden afectar la trabajabilidad si el contenido de agua se mantiene igual.

7.2.2.9 Elaboración de cilindros, curado, cabeceo y prueba de compresión.

Los especímenes de concreto deben de elaborarse y curarse de acuerdo a la norma ASTM C31. Esta norma refiere el uso de cilindros de 15 x 30 cm, pero el uso de cilindros de 10 x 20 cm está permitido bajo las dos siguientes condiciones:

- El tamaño máximo del agregado es de 1"
- Se desarrolle una curva de correlación comparando los cilindros de 10 x 20 cm con los de 15 x 30 cm.

Se debe de determinar la curva de correlación para cada diseño de mezcla y para cilindros de diferentes edades, requiriendo un mínimo de 30 pruebas. Los resultados deben de estar entre un 95% de los límites de confianza para tener una curva aceptable.

Se requiere un mínimo de cilindros de acuerdo al tipo de prefabricado:

- ***Prefabricados comerciales y para puentes- de acuerdo al MNL 116:***

Al menos dos para la transferencia y dos para la edad de 28 días, por mezcla, por cada 55 m³ de concreto o fracción del mismo.

- ***Prefabricados arquitectónicos- de acuerdo al MNL 117:***

Al menos cuatro cilindros por día, por mezcla, por cada 30 m³ de concreto, cualquiera que sea más frecuente.

Los cilindros de prueba deben de elaborarse cerca del lugar donde van a ser curados. Los cilindros no deben de alterarse o moverse 30 minutos después de elaborarse hasta que estén lo suficientemente fraguados para poder manipularse. Si se mueven los cilindros, cuando aún esté muy fresco el concreto, se pueden producir fallas en el mismo que arrojarán datos de resistencia distintos a la realidad (menores).

Los cilindros deben de curarse bajo las mismas condiciones de los elementos prefabricados hasta que las piezas sean removidas de su cimbra. Los cilindros deben almacenarse:

- Sobre la mesa durante la noche,
- En una cámara de curado, si los registros demuestran que la temperatura, de los cilindros durante el ciclo de curado, es similar a la de los elementos prefabricados.

Una vez que los cilindros son desmoldados deben de mantenerse en condición húmeda a una temperatura de 23°C ± 1.5 °C.

Los cilindros deben cabecearse de acuerdo a la norma ASTM C617 o la C1231. Si se utiliza compuesto de azufre de fraguado rápido, los cilindros deben de probarse hasta que hayan pasado 30 minutos. La prueba de compresión debe de realizarse conforme a la ASTM C39, recordando que la resistencia del

concreto que representan, es el promedio de las resistencias de dos cilindros, con excepción de la resistencia de transferencia. Si uno de los cilindros está visiblemente dañado, no debe de probarse y solo el cilindro restante debe de usarse para determinar la resistencia.

La principal función de los cilindros es representar la resistencia del concreto en la mesa de colado; la resistencia a la transferencia se buscará que represente el concreto más débil en la mesa, por lo que si solo se toma una muestra para representar este concreto y tomar la decisión de hacer la transferencia, se debe de procurar tomar la muestra durante la segunda mitad, ya que eso representará el menor tiempo de curado y probablemente el concreto de menor resistencia.

7.2.2.10 Pruebas no destructivas

Se acepta el uso de pruebas no destructivas como herramientas para determinar la resistencia relativa del concreto, sin embargo, solo deben de ser usadas cuando los cilindros se hubieren dañado o agotado. Los resultados de estas pruebas variarán de acuerdo a las mezclas y a las diferentes edades de los especímenes.

7.2.2.11 Pruebas para soldadura de pernos

Si se realiza la soldadura de pernos en la planta, el inspector debe de revisar periódicamente la producción y el listado de pruebas. Si la producción se realiza fuera de la planta, se deben de entregar por parte del proveedor el listado de pruebas y realizar periódicamente pruebas a los accesorios.

7.3 Registros

7.3.1 Mantenimiento de registros

El departamento de control de cada planta debe desarrollar un sistema de registros apropiado. Los registros sirven para verificar el uso apropiado de materiales y procedimientos de producción. **Los registros** se deben de mantener **al menos cinco años** o aún más si así se especifica.

Los registros son herramientas útiles para la gerencia de producción, ya que se pueden verificar los procedimientos que produjeron errores y requirieran ser modificados, así como modificar el uso de ciertos materiales o diseños especificados para un producto. También estas son razones del por qué todos los errores encontrados en la inspección previa y posterior al colado deben de documentarse.

7.3.2 Reportes de calidad de los proveedores

Los reportes de calidad y/o certificados deben de provenir de los proveedores y deben de cumplir los requerimientos especificados. Los siguientes periodos de tiempo se establecen para recibir los certificados o reportes de calidad:

Material	Frecuencia
Torones de presfuerzo	Cada embarque
Cemento	Cada embarque
Agregados	Mensual
Aditivos	Cada entrega
Acero de refuerzo	Cada embarque
Accesorios e insertos	Cada embarque

7.3.3 Registros de tensado

Los registros de tensado deben de realizarse para cada operación de tensado y deben de documentar con precisión toda información pertinente:

- fecha,
- la cama y la identificación del elemento,
- el tamaño, tipo, ubicación y número de carrete del torón,
- el número o dato que identifique el gato utilizado,
- la fuerza inicial,
- la fuerza final real y la calculada para cada torón,
- la elongación real y la calculada para el número requerido de torones,
- cualquier problema que se haya presentado durante la operación del tensado, y
- la acción que se tomó cuando los torones se encontraron fuera de tolerancia.

7.3.4 Registros de calibración para el equipo

El equipo usado en el proceso de producción debe de ser calibrado a intervalos regulares ya sea por una entidad certificada o por personal de planta debidamente calificado. La información que se registre en cualquier caso será:

- el equipo que fue examinado,
- la fecha de la calibración,
- cualquier reparación realizada al equipo, y
- el rango en el que el equipo fue probado,
- nombre y firma de quien realizó la calibración.

7.3.5 Registro de concreto

Los registros de concreto verifican la calidad del concreto usado en la producción y deben de ser elaborados por cada día de producción. Los registros deben de incluir:

- la fecha, la hora y el número de trabajo,
- la proporción de la mezcla, ajustada por los contenidos de humedad,
- la cantidad de concreto,
- la identificación de la mesa y el producto que fue colado,
- la temperatura del aire y del concreto así como las condiciones climáticas a la hora del colado,
- el revenimiento, contenido de aire, densidad y numero de cilindros elaborados,
- la duración del periodo de curado y la relación tiempo – temperatura si se usó curado acelerado,
- la resistencia al momento de la transferencia o de los cilindros elaborados para tal fin,
- la resistencia a los 28 días de los cilindros, y
- la acción tomada cuando los cilindros de prueba arrojen un número menor que la resistencia requerida.

7.3.6 Reportes de la Inspección

Las inspecciones previas y posteriores al colado, deben de documentarse completamente para cada elemento producido en la planta. Estos reportes deben de incluir:

- la fecha, el número de trabajo, número de mesa y la identificación de los elementos,
- los puntos corregidos en la inspección previa,
- cualquier problema encontrado en el producto terminado,
- las acciones tomadas para corregir lo necesario en el producto terminado, y
- la contraflecha del elemento terminado.

7.4 Instalaciones del laboratorio

Como se revisó en el capítulo 2 se requieren instalaciones especiales para estructurar eficientemente una planta de prefabricados, entre esas instalaciones requeridas se encuentra el laboratorio, el cual debe estar equipado y manejado adecuadamente para desempeñar sus funciones. También es posible que un laboratorio ajeno a la planta preste sus servicios para la elaboración de las pruebas requeridas.

7.4.1 Equipo de Pruebas y Control de Calidad

Las plantas en sus laboratorios o los que contraten deben al menos contar con:

- una máquina para realizar pruebas de compresión a los cilindros,
- cono de revenimiento, medidor de aire, cubo para densidad y moldes para cilindro,
- cribas para granulometría de agregado fino y grueso,
- un báscula de plancha con capacidad de lectura dentro del 0.3% de la carga de prueba,
- un horno para secar agregados y muestras de concreto para revisar absorción,
- cuarto de curado para los cilindros o tanques de agua,
- placas de acero y neopreno para cilindros o compuestos de azufre y moldes.

Se deben de proveer además de todo tipo de material y equipo de seguridad en todo momento, así como los dispositivos necesarios para que el laboratorio funcione adecuadamente, por ejemplo: extintores, campanas de extracción de humos como los producidos por el azufre, y protección contra los escombros producidos durante las pruebas de compresión de los cilindros, entre otros.

7.5 Tolerancias de fabricación

Como se había mencionado anteriormente, existen muchas publicaciones que hacen referencia a tolerancias geométricas de prefabricados, entendiendo como tolerancia a la variación permisible y especificada de los requerimientos exactos contractuales del elemento terminado. Las tolerancias se dividen, en nuestro campo, en tres tipos principales:

- ✓ **Tolerancia del elemento**
- ✓ **Tolerancia de montaje**
- ✓ **Tolerancia de interface**

El personal de producción y el departamento de control y aseguramiento de calidad de la planta son los responsables de que la tolerancia del elemento este dentro de los límites establecidos, mientras que el personal de montaje es el responsable de los otros dos tipos de tolerancia restantes.

Las tolerancias son necesarias en todo proceso de manufactura y están determinadas por economía, operatividad, funcionalidad y apariencia o estética.

El arquitecto o el ingeniero deben de tener en consideración las tolerancias dimensionales que pueden esperarse que sucedan en la elaboración de elementos prefabricados de concreto. También ellos deben de especificar las tolerancias para su producción y su montaje. Para la mayoría de los proyectos, pero especialmente para paneles de concreto prefabricado arquitectónico, las desviaciones de las dimensiones de diseño deben de ubicarse obligatoriamente no solo dentro de las tolerancias especificadas, sino que también deben de tender a compensarse una a otra, esto significa que no deben de ser acumulativas. Usualmente los manuales del PCI u otros institutos y publicaciones indican tolerancias mínimas que pueden diferir de las especificadas por las dos figuras profesionales que hemos mencionado. Usualmente estas diferencias están definidas en base a los requisitos y características específicas de cada proyecto en particular. También debe de considerarse que entre más estrechas sean

las tolerancias permisibles de los elementos, se esperará en consecuencia, que el costo de los elementos prefabricados se incremente. Es por esto que, operativamente hablando, para elaborar un presupuesto de elementos prefabricados adecuadamente, se deben de conocer de antemano las tolerancias permisibles esperadas por el cliente.

En México aún no se tiene la cultura de especificar con anticipación este tipo de puntos importantes, previamente incluso a su licitación, lo que permite tener un amplio margen de criterios, puntos de vista, referencias, expectativas, entre otros; trayendo como consecuencia la existencia de muchos problemas entre supervisión - producción, cliente – productor, aspectos de pagos, flujos, productos rechazados, aspectos de calidad y estética, etc. Obviamente la solución a muchos de estos problemas está en establecer con claridad desde un inicio los aspectos técnicos que hemos considerado en este trabajo y que juegan un papel importante, un ejemplo claro, es lo que tratamos en este apartado: tolerancias.

Es una práctica común en otros países que las tolerancias se muestren en cada plano de taller, o exista un plano de tolerancias o un documento que lo especifique y que pueda ser usado como referencia para el personal de producción y control de calidad.

Una tolerancia puede ser expresada matemáticamente como una variación aditiva o sustractiva de una dimensión especificada. Estas dimensiones incluyen, pero no están limitadas a:

- longitud,
- ancho,
- altura,
- cuadratura,
- espacios entre costados y espesores,
- uniformidad de superficie,
- contraflecha,
- esviaje,
- aberturas y espacios,
- partes expuestas,
- refuerzo con acero,
- presfuerzo.

Muchos factores afectan las tolerancias y la estabilidad dimensional de los elementos prefabricados, los siguientes factores deben de considerarse por el ingeniero de diseño, personal de producción y control de calidad durante la manufactura y el almacenamiento.

Existen muchas recomendaciones del PCI, referentes a tolerancias y su relación con procesos u elementos en la producción:

Moldes: Obviamente, los elementos prefabricados no deben de colarse en moldes que estén fuera de tolerancia. En este punto conviene mencionar que los límites de tolerancia para los moldes y

configuraciones donde se colarán los elementos prefabricados, deberán de ser iguales o menores que las tolerancias del producto final. Como regla general, es importante considerar que si las tolerancias del molde son meticulosamente cuidadas, difícilmente se tendrán problemas de tolerancias en los productos finales, como recomendación se sugiere manejar las tolerancias del molde entre la mitad y las 2/3 partes de las tolerancias finales del elemento dependiendo de su rigidez, material, tiempo de vida útil o proyección de usos, cuidados y mantenimiento, entre otros factores.

Presfuerzo: Las fuerzas de presfuerzo pueden causar acortamiento del elemento, cambio en la contraflecha, o rotación en los extremos. En el caso de tolerancias muy extremas, se deben de especificar los efectos del presfuerzo sobre las dimensiones del elemento y deben obligatoriamente de ser especificadas estas dimensiones y la forma de medirlas.

Contracción por secado, contracción por flujo plástico y temperatura: Los tres puntos anteriores tienen efecto sobre las dimensiones y por lo tanto sobre las tolerancias. Aunque la mayoría de la contracción por secado tiene lugar en forma temprana en el elemento, su efecto puede ser muy significativo en elementos muy largos. A su vez, si algunos elementos están fabricados con diferentes mezclas y con distintos comportamientos de contracción entonces puede presentarse combamiento, alabeo, agrietamiento o contraflecha.

El concreto bajo cargas tiende a presentar contracción por flujo plástico (creep) lo que puede tener como consecuencia que existan cambios de geometría y tolerancias dimensionales de un elemento a lo largo del tiempo. Esto es particularmente importante de considerar cuando existen cargas de presfuerzo excéntricas.

La resistencia del concreto tiene consecuencias sobre la contraflecha de algunos elementos, por ejemplo: las trabes “TT” tendrán menor contraflecha si son coladas en viernes y desmoldadas en lunes que otras coladas en lunes y desmoldadas en martes, debido al tiempo adicional de curado del fin de semana. Esta diferencia de tiempo también afecta de manera visible el color del concreto.

Los elementos demasiado largos pueden tener variaciones de longitud por diferencias de temperatura. Incluso el elemento puede presentar arqueado o contraflecha debido a los efectos de temperaturas diferentes en cada lado.

7.5.1 Tolerancias en el elemento

Las dimensiones que difieren del tamaño propio del elemento también son relevantes especialmente para el control. Las consideraciones de tolerancia de los siguientes puntos se exponen para un conocimiento más amplio del tema:

- ✓ Espacios y aberturas

La tolerancia de una ventana o una abertura sobre unidades adyacentes es más precisa que lo necesario en la instalación de tuberías de concreto por ejemplo. Los espacios de ensamblaje que requieren mayor precisión deben de ser entre un 50 y un 75% más estrictos que las tolerancias del elemento mismo.

- ✓ Inclinación o alineación horizontal

La alineación horizontal puede afectarse como resultado del molde y las tolerancias en el ancho del elemento.

- ✓ Posición de los torones de presfuerzo,
- ✓ Ubicación de los dispositivos de manejo o izaje,
- ✓ Contraflecha y contraflecha diferencial,
- ✓ Escuadra de los extremos,
- ✓ Posición de placas para soldadura posterior,
- ✓ Nivelación e inclinación de placas para soldadura,
- ✓ Ménsulas o conexiones en columnas y en paneles de muros,
- ✓ Colocación y doblaje de acero de refuerzo,
- ✓ Puntos de deflexión del torón,
- ✓ Ondulaciones, alabeos y planicidad.

A continuación se presentan unas tolerancias consideradas (ajustadas al SI) como estándares por la Asociación de Productores de Concreto Presforzado de California:

Tolerancias

Dimensiones de la sección transversal:

Menores a 60 cm	± 0.6 cm
De 60 a 90 cm	± 1.0 cm
Mayores a 90 cm	± 1.3 cm

Longitud:

Menores a 7.6 m	± 1.3 cm
De 7.6 a 15.0 m	± 1.8 cm
Mayores a 15.0 m	± 2.5 cm

Cuadratura o escuadra de los extremos:

	<i>Vertical</i>	<i>Horizontal</i>
Menor a 30 cm	3 mm / cm	1.5 mm / cm
Mayor a 30 cm	5 mm + 1.5 mm / cm	1.5 mm + 1.5 mm / cm
	Máximo ± 18 mm	Máximo ± 13 mm

Desviación de la línea horizontal:

0.5 cm por cada 3.0 m X longitud total

Fuerza de presfuerzo:

Desviación en la localización respecto	
al centro de gravedad especificado	$\pm 3 \%$
Fuerza individual del tendón o elongación	$\pm 5 \%$
Presfuerzo total, fuerza o elongación	$\pm 5 \%$

Recubrimiento sobre acero de refuerzo:

± 0.6 cm

7.6 Agrietamiento

El agrietamiento es un problema frecuente en casi cualquier construcción con concreto. Muchas de las grietas son prevenibles y la mayoría de ellas son reparables.

El Comité sobre Criterio de Ejecución del Control de Calidad del PCI elaboró dos reportes que se pueden localizar en el PCI Jornal, con fechas de enero – febrero del 83 y otro con fecha de mayo – junio del 85. Estos reportes son excelentes guías para identificar, prevenir y corregir grietas. La información de los reportes puede ser de gran utilidad para la gerencia de producción y la supervisión de control de calidad, así como para el diseñador estructural. En la figura 7.1 se reproduce un ejemplo de estos reportes donde se observan claramente el tipo de grietas en un elemento en especial, la causa, la prevención, el efecto y la reparación más probable.

El ingeniero de diseño estructural o el ingeniero de la planta deben estar siempre al pendiente de cualquier agrietamiento que se presente en los elementos, con la finalidad de asegurarse de que no se vea afectado el uso que se le pretenda dar.

Usualmente los epóxicos son las sustancias preferidas para realizar las reparaciones de grietas pero el procedimiento debe de establecerse y probarse antes de ejecutarlo en forma masiva.

8.3.3.4 Vertical Crack at Bottom of Stem

Description — These cracks are usually predominant and more closely spaced in areas of greatest positive moment.

CAUSE	PREVENTION	EFFECT	REPAIR
A. Improper production 1. Indentations in form 2. Binding in forms 3. Joint offsets in form B. Improper storage or handling of members designed to be cantilevered C. Improper prestress 1. Strand location 2. Harping 3. Tensioning 4. Design 5. Losses underestimated D. Bond failure at end of member 1. Foreign matter on strands 2. Insufficient vibration E. Incomplete design	A. Improve production methods 1. Keep forms in good repair. 2. Keep forms clean and properly oiled. 3. Fabricate forms with even joints. B. Lift and support cantilever members as close to bearing points as possible. C. Verify that the correct prestressing force is being applied. 1. Check strands for correct location. 2. Check hold-down point for proper location and depth. 3. Compare measured strand elongation versus computed elongation. 4. Check design calculations for possible error. 5. Recompute losses. D. Prevent bond failures 1. Keep strands clean. 2. Vibrate properly. E. Consider erection stresses due to dynamic loads. Can be 25 to 50 percent of dead load.	If no bond failure has occurred at ends, the flexural strength is not affected. If strand slippage has occurred, check deflections based on a cracked section and reduced prestress. Member is not serviceable unless its capacity is verified by test or calculations. A reduced service load may be considered in some cases.	If the crack or cracks are due to either Cause A or B, then epoxy injection can restore the member to an uncracked section. If they are due to Causes C or D, then epoxy injection will have little or no effect.

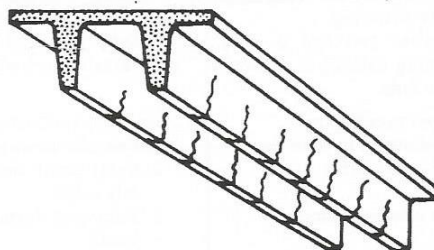


Fig. 7.1. Ejemplo de agrietamiento en una viga doble T. Fuente: Quality Control Technician/Inspector Level III, Training Manual PCI, TM 103

7.6.1 Medición de grietas

Algunas especificaciones se refieren a los anchos de las grietas como referencia. Por ejemplo: “las grietas mayores a 0.007 in deberán ser selladas con inyección de epóxicos”, o en casos extremos, “elementos con grietas mayores a 0.012 in deberán ser rechazados”. En tales casos se debe hacer una medición de la grieta.

El método más común para realizar la medición es mediante el uso de un fisuómetro, el cual consiste en una tarjeta plástica con líneas marcadas de anchos conocidos y que se mueven sobre la grieta para hacer coincidir los anchos. Ver la figura 7.2.

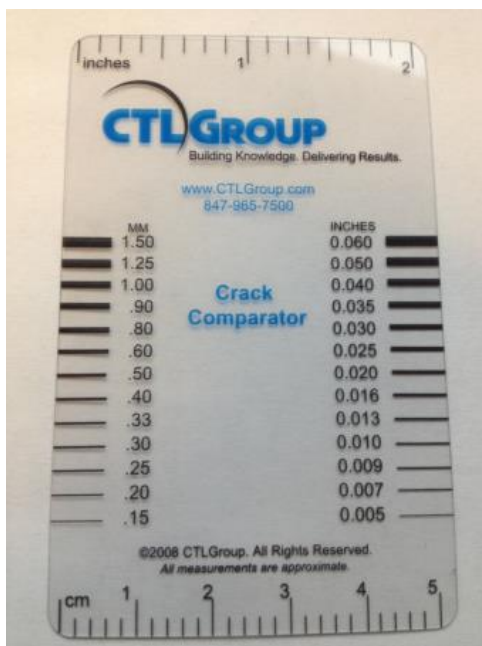


Fig. 7.2. Fisurómetro

8 Soldadura

Las estructuras de concreto prefabricado son construidas con conexiones elemento – elemento o elemento – edificio. Una gran cantidad de insertos y piezas ahogadas en el concreto están formadas con componentes que se van a soldar posteriormente entre sí. Es por esto que el refuerzo, el concreto y la soldadura deben de ser de la más alta calidad posible.

En las plantas se debe de definir una especificación del procedimiento de soldadura, y todas las soldaduras deben de calificarse de acuerdo al *American Welding Society (AWS) D1.1 ó D1.4*. Todo soldador debe ser calificado de acuerdo a la especificación y toda soldadura debe de ejecutarse tal y como se indica a detalle en los planos de taller respectivos.

Se debe de cumplir un requerimiento mínimo de precalentamiento. La soldadura durante clima frío se debe de ejecutar en un recinto cerrado. La soldadura efectuada por debajo de los 0 °C requiere el uso de procedimientos de precalentamiento. Ninguna soldadura se debe de efectuar en temperaturas ambientes menores a -18 °C o con lluvia o con nieve. Las velocidades del viento mayores a 8 km/hr pueden presentar problemas.

8.1 Soldadura de acero estructural

Las placas de acero, los ángulos, las secciones en canal y otros perfiles utilizados en los accesorios se les llama acero estructural, mientras que a las varillas corrugadas se les llama acero de refuerzo. Los estándares del AWS para soldadura de acero estructural son la *AWS D1.1 Reglamento de soldadura estructural – acero* y para soldadura de acero de refuerzo es la *AWS D1.4 Reglamento de soldadura estructural – acero de refuerzo*.

La soldadura en acero estructural ordinario que cumple con la norma ASTM A36 no requiere precalentamiento a menos que el acero tenga un espesor mayor a $\frac{3}{4}$ ". Esto aplica a soldadura de arco y no a soldadura en espárragos. El área de precalentamiento del acero A36 debe obligatoriamente de extenderse al menos 3" en todas las direcciones de la soldadura. En algunos casos la temperatura de precalentamiento puede modificarse como se detalla en el apéndice XI del AWS D1.1.

8.2 Soldadura de acero de refuerzo

Las normas de la ASTM A615, A616 y A617 que se refieren al acero de refuerzo no incluyen la soldabilidad como una de las propiedades requeridas. Las varillas de refuerzo pueden ser soldadas si se

siguen procedimientos de precalentamiento. Sin embargo la ASTM A706 para acero de refuerzo si incluye la soldabilidad como propiedad requerida.

Aún si los accesorios con acero de refuerzo son unidos mediante puntos provisionales se deben obligatoriamente de seguir todos los procedimientos para soldadura estructural.

Cuando las varillas de acero de refuerzo se doblan, se vuelven muy sensibles al calor producido por la soldadura. Este calor puede causar cristalización y pérdida de ductilidad en el área del doblé. Las varillas de refuerzo no deben de soldarse a menos de dos diámetros de la barra del punto de tangencia de un doblé en frío. La experiencia del PCI indica que una distancia al punto de tangencia de 5 cm es mejor que los dos diámetros que comúnmente se usan en las plantas de prefabricados de los EUA. La figura 8.1 muestra un esquema de la distancia referida.

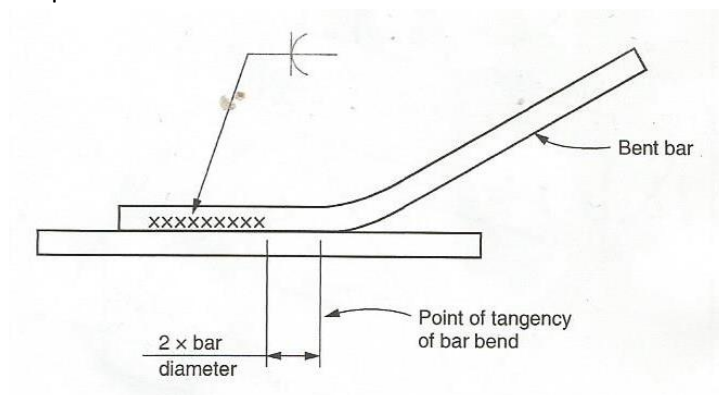


Fig. 8.1. Soldadura con respecto al doblé en varillas corrugadas

8.2.1 Carbón Equivalente (CE) en varillas de refuerzo

La soldadura en varillas de acero de refuerzo puede ser un problema, pero aun así es requerido muchas veces en trabajos de prefabricación, generalmente para la fabricación de accesorios metálicos que se ahogan en el concreto. La soldabilidad de las varillas que contempla la ASTM A615 es considerablemente menos confiable que aquella soldadura en acero estructural ordinario (ASTM A36), ya que una gran cantidad de ciertos elementos químicos se permiten en el acero de refuerzo. Si la soldabilidad es necesaria, se disponen de varillas que cumplen la ASTM A706, donde su composición química se controla para proporcionar la característica de soldabilidad similar al acero A36 tal como se observa en la gráfica de la figura 8.2. La zona I comprende a los aceros de soldabilidad óptima, los que son aceros con contenidos de carbono sumamente bajos. La zona II abarca aceros de buena a regular soldabilidad, como por ejemplo el acero ASTM A36, el cual es muy empleado para la construcción de estructuras de acero en nuestro país, y el acero ASTM A706. La zona III comprende a los aceros con alto riesgo de falla en el caso de ser soldados.

Existen algunos requerimientos para soldar acero de refuerzo que se describen en el PCI MNL-116 y en el PCI MNL-117, los cuales resumimos a continuación:

- ✓ Los procedimientos de soldadura para acero de refuerzo deben de ser escritos por ingenieros calificados o personal de control de calidad. La soldadura de varillas de refuerzo debe ejecutarse considerando la soldabilidad del acero y los procedimientos adecuados, ya sea que sean ejecutados en la misma planta o por terceras personas.

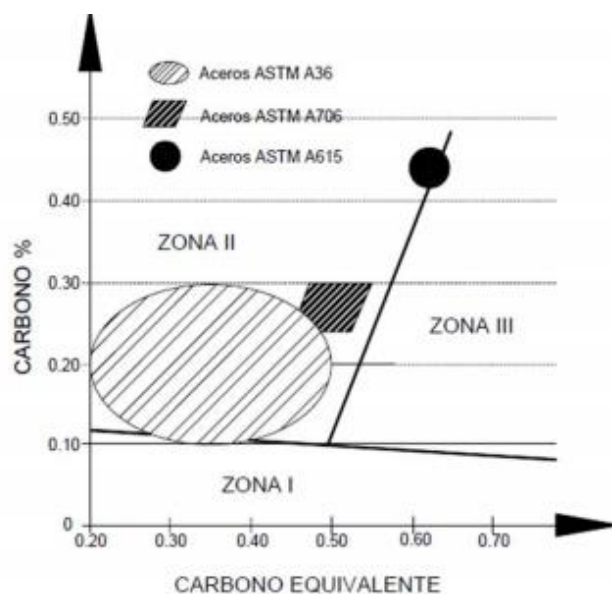


Fig. 8.2. Soldabilidad relacionada con la cantidad de carbono en aceros que cumplen la ASTM¹⁰

- ✓ Los procedimientos de soldadura deben de estar de acuerdo a la AWS D1.4 utilizando procesos SWAW, GMAW o FCAW.
- ✓ Se debe determinar el carbón equivalente y en consecuencia los requerimientos de precalentamiento.
- ✓ En caso de desconocer la composición química, se puede aplicar lo siguiente:
 1. Para varillas del #6 o menores, utilizar un precalentamiento de 150°C.
 2. Para varillas del #7 o mayores, utilizar un precalentamiento mínimo de 200°C.
 3. Para todos los tamaños de varillas que cumplan la ASTM A706, utilizar la tabla 8.1.

¹⁰ Revista de Ingeniería Sísmica No. 75 69-94 (2006) "SE DEBE EVITAR LA SOLDADURA DE BARRAS DE REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO EN ZONAS SISMICAS DE MEXICO"
Mario E. Rodríguez (1) , Javier Rodríguez Asabay (2)

El término de carbón equivalente (CE) es un término usado para medir composiciones químicas extrañas en las varillas de acero de refuerzo. A excepción de las varillas A706, la fórmula para calcular el CE se puede encontrar en la sección 1.3.4.1 de la AWS D1.4-92, *Reglamento de Soldadura Estructural-Acero de refuerzo*:

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6}$$

donde:

C = Carbón

Mn = Manganeso

Nota: esta fórmula varía de acuerdo a la que se encuentra en la *NMX-H-121-1988 Procedimiento De Soldadura Estructural Acero de Refuerzo*.

Ejemplo del cálculo del carbón equivalente:

La figura 8.3 muestra un reporte de calidad de un embarque de varilla. Calcular el valor de carbón equivalente.

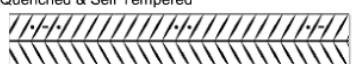
RAK STEEL MILL TEST CERTIFICATE																			
Customer Name / Address		: SAMPLE TEST CERTIFICATE,																	
Product Description		: High Yield Deformed Steel Bars 12 mtr Straight Length																	
Specification		: BS 4449-2005, Gr-B 500 B																	
Manufacturing Process		: Quenched & Self Tempered																	
Bar Mark Identification		: 																	
														Certificate No		: RSL / QC / 1667			
														Date Of Issue		: 4-Jun-09			
														Delivery Order No.		: 0000			
Size (mm)	Heat No	Chemical Composition (%)												Mechanical Properties					
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	N	Mo	V	CE	Cross Section (mm ²)	Unit Weight (Kg/m)	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Ts / Ys Ratio	Total Elongn. (%)
12.0	A0803	0.18	0.60	0.18	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.009	0.005	0.001	0.29	109.40	0.86	547	616	1.13	9.70
														110.70	0.87	537	612	1.14	9.70
														109.60	0.86	578	654	1.13	9.60
														109.70	0.86	529	610	1.15	9.60
														110.70	0.87	526	616	1.17	9.70
Rebend Test : Pass We hereby certify that the material described herein conforms to the applicable specification by the process mentioned above and tested in accordance with the requirements of the specification. _____ QC Engineer																			
   RAK Steel L.L.C, PO Box 6578, Ras Al Khaimah, United Arab Emirates Tel: +971-7-258 5459 Fax: +971-7-258 5465 e-mail: rebars@raksteel.com																			

Fig. 8.3. Ejemplo de certificado de acero de refuerzo

De la información del certificado mostrado en la figura 8.3, tenemos que:

$$CE = 0.18 + \frac{0.60}{6}$$

$$CE = 0.28 \%$$

Nota: este último valor difiere del reportado en el certificado de calidad (0.29 %) y se debe a que existen diversos criterios para conformar la formula, por lo que se recomienda revisar las especificaciones del contrato y las últimas versiones del reglamento, norma o código a utilizar.

8.2.1.1 Aplicación del Carbón Equivalente (CE) en varillas de refuerzo

La aplicación del carbón equivalente tiene que ver con que aceros con alto carbón equivalente se vuelven frágiles en el área cercana donde se aplica la soldadura. El problema se potencializa si la varilla es soldada muy cerca (menor a dos diámetros) de un doblez. Otros factores afectan esta fragilidad tales como el clima frío, la velocidad de enfriamiento después de la aplicación de la soldadura entre otros.

La temperatura al tiempo de soldar se controla mediante precalentamiento de la barra antes de aplicar la soldadura. La tabla 8.1 tomada de la *NMX-H-121-1988 Procedimiento De Soldadura Estructural Acero de Refuerzo*, muestra temperaturas requeridas de precalentamiento. Observe que los valores de precalentamiento se vuelven más restrictivos en la medida que el CE se eleva, de modo tal que se requiere un precalentamiento de 260 °C para un CE de 75%. La temperatura es posible alcanzarla, pero la soldadura se volverá costosa debido al requerimiento adicional de material, mano de obra y control que se involucra.

Las temperaturas de precalentamiento se alcanzan más a menudo por calentamiento mediante flama de gas, pero existen otros métodos, como hornos, que están disponibles en el mercado.

En la tabla 8.1 se pueden resaltar los siguientes datos, por ejemplo: las varillas muy grandes del #14 y #18 (rara vez utilizadas en prefabricados) aún con bajo CE requieren precalentamiento, El precalentamiento de varillas de #6 no se requiere hasta que su CE sea de 56% o mayor. Algunos prefabricadores han reportado en el PCI que se ha presentado fragilidad en las soldaduras aun cuando aparentemente se han seguido los procedimientos de precalentamiento. Esto indica que es mejor adquirir varillas con bajos CE cuando se requiere soldar varillas de refuerzo, incluso existen reportes de investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que recomiendan que no se utilicen soldaduras de varillas de acero de refuerzo¹¹ en zonas sísmicas de la República Mexicana y que se recomienda también la producción de acero que cumpla la ASTM A706 para utilizarlo en estructuras en dichas zonas.

¹¹ Revista de Ingeniería Sísmica No. 75 69-94 (2006) "SE DEBE EVITAR LA SOLDADURA DE BARRAS DE REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO EN ZONAS SISMICAS DE MEXICO"
Mario E. Rodríguez (1) , Javier Rodríguez Asabay (2)

8.2.2 Inspección visual de soldaduras

Todas las soldaduras deben ser visualmente inspeccionadas y deben de aceptarse si el criterio de los perfiles de la figura 8.4 se cumplen. Es sin duda una de las Pruebas No Destructivas (NDT) más ampliamente utilizada, gracias a ella, es posible obtener información inmediata de la condición superficial de los materiales y soldaduras que estén siendo inspeccionados.

Límite de carbono equivalente (d), en %	Número de la varilla	Soldadura por arco con electrodo metálico recubierto, con electrodos de bajo hidrógeno; soldadura por arco con alambre continuo protegido con gas; o soldadura de arco con electrodo tubular continuo.
0.40 max	Hasta 11	No requiere (e)
	Mayores de 11	10°C
De 0.41 hasta 0.45	Hasta 11	No requiere (e)
	Mayores de 11	38°C
De 0.46 hasta 0.55	Hasta 6	No requiere (e)
	De 7 hasta 11	10°C
	Mayores de 11	93°C
De 0.56 hasta 0.65	Hasta 6	38°C
	De 7 hasta 11	93°C
	Mayores de 11	149°C
De 0.66 hasta 0.75	Hasta 6	149°C
	De 7 y mayores	204°C
Mayores de 0.75	Todos	260°C

Tabla 8.1. Temperatura mínima de precalentamiento (de NMX-H-121-1988)

Notas:

- a) Cuando el acero de refuerzo va a soldarse a un material estructural principal, los requisitos de precalentamiento de este también deben considerarse (tabla 5.2 del código indicado en A 3). Los requisitos de precalentamiento mínimos para aplicarlos en este caso, deben ser los requisitos mayores de las dos tablas. De cualquier forma debe ejercerse una precaución extrema en el caso de soldar acero de refuerzo a aceros templados y revenidos, y dichas medidas deben considerarse para cumplir los requisitos de precalentamiento para ambos. Si es posible, no debe usarse soldadura para unir los dos metales base.
- b) No debe soldarse cuando la temperatura ambiente es de -18°C . Cuando la temperatura del metal base es menor a la indicada para el proceso de soldadura que se está usando, así como el diámetro y límite de carbono equivalente de la varilla que se está soldando debe precalentarse (excepto que se indique otra cosa) de tal forma que la sección transversal de la varilla sea como mínimo 150 mm, a cada lado de la junta y la temperatura debe ser igual o mayor a la mínima especificada. Deben ser suficientes las temperaturas de precalentamiento y de interpasos para prevenir formación de grietas.
- c) Después que se termina de soldar, deben dejarse enfriar las varillas a temperatura ambiente. No se permite el enfriamiento acelerado.
- d) Cuando no es posible obtener la composición química, debe suponerse un contenido de carbono equivalente, mayor de 0.75% (1.2.4).
- e) Cuando la temperatura del metal base es de 5°C o menor precalentarlo, como mínimo, a 21°C y mantener esta temperatura mientras se suelda.

Tabla 8.1 (cont.) Temperatura mínima de precalentamiento (NMX-H-121-1988)

Es la forma más fácil y menos costosa, realizada correctamente, de revisar una soldadura y además es el método más eficaz de inspección de soldadura para muchas aplicaciones.

Algunos de los puntos que deben verificarse, en la inspección visual de soldaduras, para ser aceptadas son:

- Ausencia de imperfecciones geométricas, tal como lo muestra la figura 8.4.
- Ausencia de grietas en la soldadura o zona del metal base afectada por el calor.
- Soldaduras sin traslapes.
- Cuando se trate de soldadura de varilla de refuerzo; se puede presentar un socavado de $1/32''$ máximo, excepto en la corrugación de la varilla donde se permite $1/16''$.
- Cuando se trate de soldadura de varilla de refuerzo; la porosidad no debería tener una suma de diámetros la cual exceda $3/8''$ en cualquier pulgada, o $9/16''$ en cualquier tramo de 6".

- Los límites para pruebas radiográficas se dan también en el AWS D1.4. y deben de referenciarse, si es que se necesitan, en los documentos del contrato.
- Las soldaduras pueden ser corregidas por re-soldadura o por remoción de acuerdo a procedimientos especificados.

8.3 Soldadura de vástagos, pernos o espárragos.

La guía para la soldadura de vástagos está incluida en el capítulo 7 del AWS D1.1; los accesorios elaborados a base de vástagos con cabeza o varillas de refuerzo corrugadas deben de estar de acuerdo con los planos de taller para el tamaño y la localización de las anclas a base de vástagos. También deben de cumplir con la AWS para las cuestiones de detalles y calidad de la soldadura.

La soldadura de vástagos o espárragos (stud welding) es un término general para unir un vástago o parte similar a una pieza de trabajo (figura 8.5), usualmente una solera o placa o algún otro perfil. En la industria del prefabricado en otros países es utilizada ampliamente para ensamblar piezas soldables en otras; llamadas accesorios. Estas son partes de acero que van embebidas en el concreto y son más tarde soldadas en el campo o que unen las secciones prefabricadas a la estructura o una a otra. Los vástagos sirven para anclar los accesorios al concreto. Los accesorios son primeramente unas conexiones y su resistencia es crítica para la integridad o desempeño de la estructura.

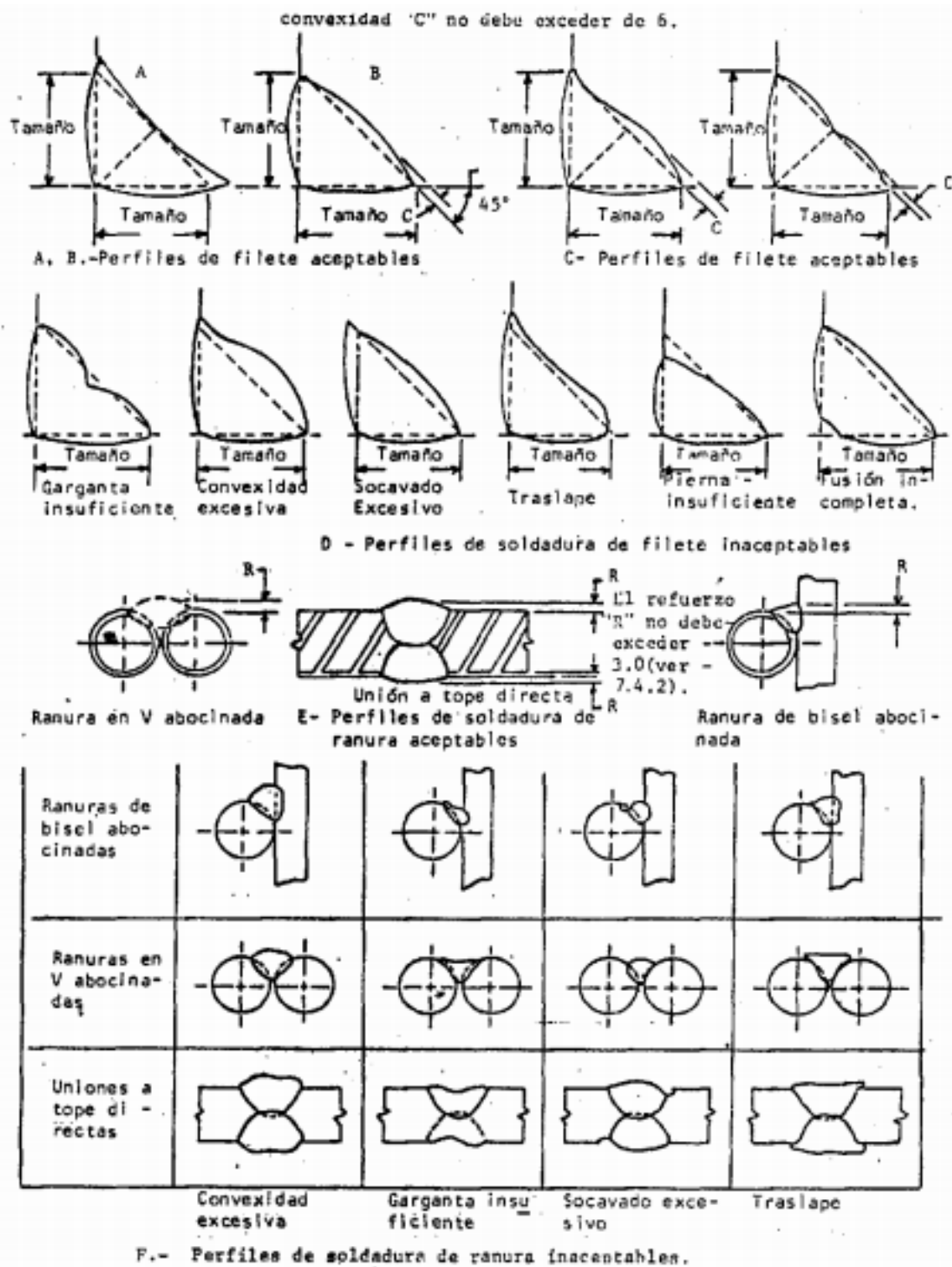
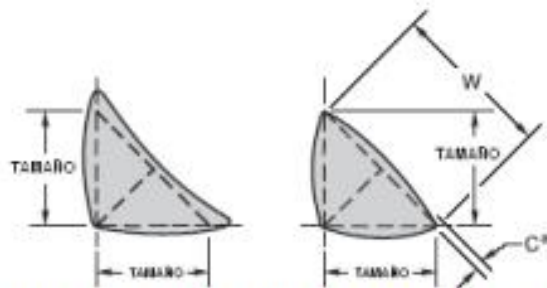
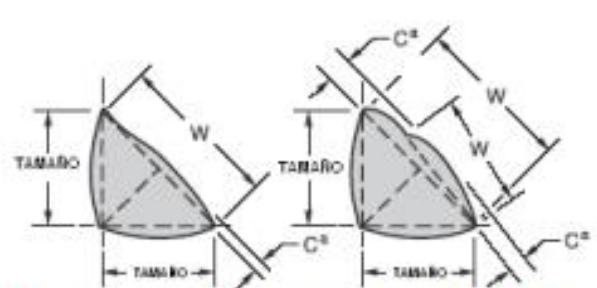


Fig. 8.4. Aceptable o inaceptables perfiles de soldadura (de NMX-H-121-1988)



(A) PERFILES DESEABLES DE SOLDADURA DE FILETE

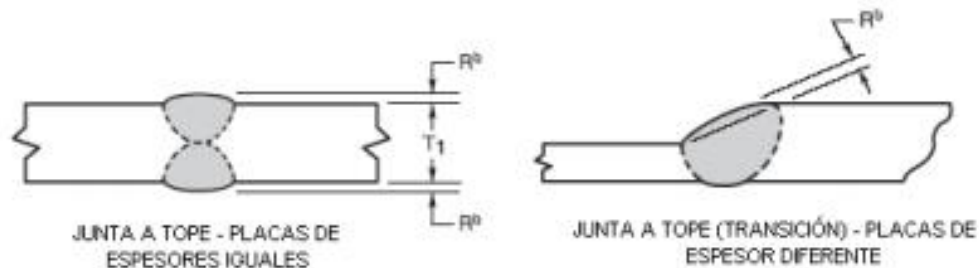
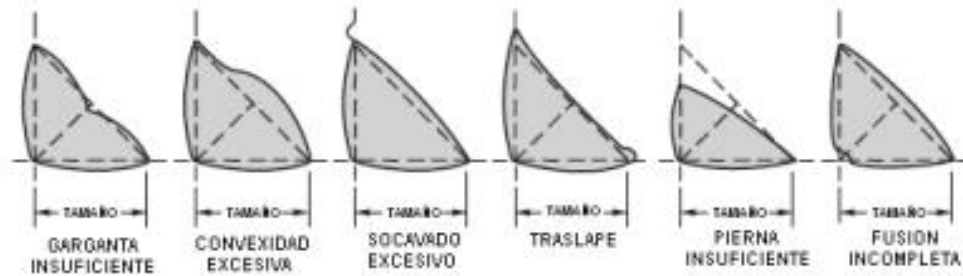


(B) PERFILES ACEPTABLES DE SOLDADURA DE FILETE

^a La Convexidad, "C" de una soldadura ó de una superficie de cordón con dimensión W no debe exceder el valor de la siguiente tabla:

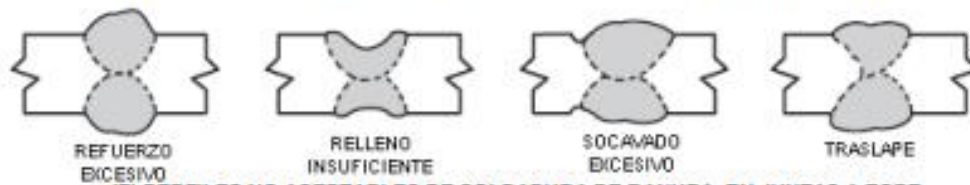
ANCHO DE LA CARA DE SOLDADURA O SUPERFICIE INDIVIDUAL DEL CORDON, W	CONVEXIDAD MAXIMA, C
$W \leq 5/16$ in	1/16 in
$W > 5/16$ in hasta $W < 1$ in	1/8 in
$W \geq 1$ in	3/16 in

(C) PERFILES NO ACEPTABLES DE SOLDADURA DE FILETE



^b EL Refuerzo R no debe exceder 1/8 in

(D) PERFILES ACEPTABLES DE SOLDADURA DE RANURA, EN JUNTAS A TOPE



(E) PERFILES NO ACEPTABLES DE SOLDADURA DE RANURA, EN JUNTAS A TOPE

La soldadura de vástagos puede realizarse por dos o más procesos. El proceso de soldadura de vástagos por medio de arco es el único método práctico para soldar anclas estructuralmente y el único

que es común en la industria del concreto prefabricado en EUA. En México como hemos comentado se utilizan varillas de acero de refuerzo, pero su resistencia y comportamiento estructural no está recomendado y debe evitarse y además ya existen compañías dedicadas a esa actividad en nuestro territorio.

El equipo consiste en una pistola perneadora, una unidad de control y una fuente de corriente directa para soldar.



Fig. 8.5. Accesorio a base de soldadura de vástagos

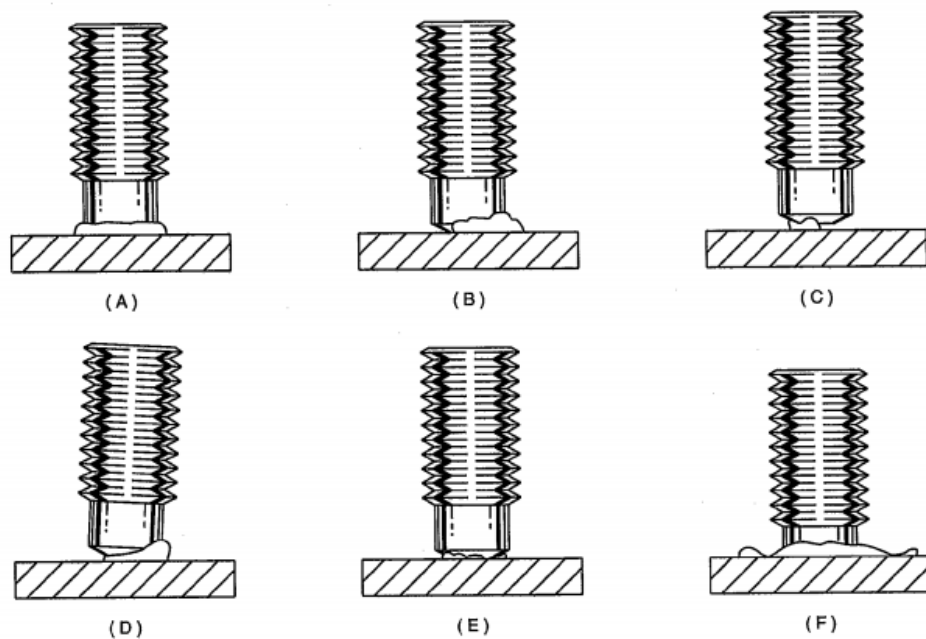
8.3.1 Control de calidad e inspección para soldadura de vástagos

La primera responsabilidad para la prueba y la inspección de este tipo de soldadura recae fuertemente en el operador del equipo para soldadura de vástagos. Es muy importante que la gerencia o dirección de la planta prepare al operador para que entienda la importancia de su trabajo y su implicación en la fabricación de accesorios.

Existen procedimientos para realizar las pruebas a la producción, y entre los puntos a revisar son:

- Inspeccionar que se haya formado apropiadamente la fundición, tal como lo muestra la figura 8.6
- Revisar la reducción de longitud del vástago.
- Realizar una prueba de doblez a 30° con martillo o con tubo.

Dependiendo de los resultados se prosigue la producción o se hacen revisiones para corregir pero se deben de mantener los registros de los resultados, realización de ajustes, etc.



- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| (A) Soldadura satisfactoria | (D) Alineamiento deficiente |
| (B) La inserción es demasiado corta | (E) Aplicación insuficiente de calor |
| (C) Soldadura colgada | (F) Aplicación de excesiva de calor |

Fig. 8.6. Soldaduras de arco en vástagos satisfactorias e insatisfactorias

9 Introducción al montaje de elementos prefabricados

9.1 Consideraciones generales

En las obras de estructuras prefabricadas, el montaje representa entre el 10 y 30% del costo total de la obra.

La probabilidad de éxito en un proyecto de construcción comienza mucho antes de que cualquier actividad se inicie en el sitio de la obra. La etapa de planeación implica anticipar tantos factores como sean posibles que puedan afectar el desarrollo de los trabajos. Existen diversos puntos que el montador debe considerar durante esta etapa:

1. Determinación del acceso al sitio, dirección y secuencia de montaje.
2. Identificación de peligros.
3. Determinación de limitaciones de peso y tamaño.
4. Secuenciación de montaje.
5. Selección del equipo.
6. Desarrollo de un plan de seguridad en montaje.
7. Layout del sitio y su verificación.
8. Requerimientos especiales de manejo.
9. Mecanismos especiales de izaje.

El gerente de construcción, quien es generalmente el responsable de los trabajos y su programación, debe conducir una reunión tan pronto como sea posible después de la asignación del contrato para tratar todos los temas arriba mencionados.

La secuencia del montaje (Figura 9.1) debe ser establecida inicialmente y considerada para el análisis y cinemáticas de montaje.

La selección óptima de la grúa deberá ser determinada por un proceso sistemático involucrando los siguientes aspectos:

1. Previo al montaje, una inspección al sitio de los trabajos y reuniones deben confirmar que las rutas de acceso y espacio para el ensamble de grúas están disponibles.
2. La capacidad máxima de la pasteca y arreglos de cables debe determinarse considerando todos los pesos de todos los implementos involucrados, como: grilletes, balancines, etc.
3. Todo tipo de obstrucciones por arriba y por debajo del área de tránsito.
4. Ángulos y radios de trabajo máximos para determinar la capacidad segura de levante.



Fig. 9.1 Montaje de columnas obedeciendo cierta secuencia preestablecida.

9.2 *Equipo y accesorios*

Sin duda la maquinaria que hace posible la realidad del sistema prefabricado de construcción son las grúas, que han experimentado grandes avances en cuanto a seguridad, capacidad y confiabilidad conforme avanza el tiempo. Existen muchas maquinas que cumplen esta función (tabla 9.1) tales como grúas pórtico, sobre orugas, sobre neumáticos, entre otras, pero por su amplio uso y disponibilidad hablaremos solo de grúas sobre neumáticos y sobre orugas.

9.2.1 **Grúas**

Los equipos de montaje, por ser especializados y generalmente de gran capacidad, tienen costos elevados, por lo que resulta indispensable una buena planeación de todas las actividades, para evitar costos adicionales por retrabajos y/o por mala calidad.

La capacidad de las grúas se basa en condiciones ideales:

- Nivel de piso firme.
- Viento calmo.
- No llevar la carga lateralmente ni balanceándose.

- Buena visibilidad.
- Las grúas y sus accesorios deben de estar en óptimas condiciones de uso.
- Ausencia de cargas dinámicas.

IDENTIFICACIÓN DE GRÚAS POR SU TIPO

Aparatos para izar:	Incluye grúas, grúas correderas, grúas portátiles de piso, aparatos para apilar y demás aparatos para izar, incluyendo los ascensores para carga y montacargas
Grúa	Se asigna a un aparato para izar, para levantar y bajar cargas verticalmente y para moverlas horizontalmente mientras se mantienen suspendidas
Grúa móvil:	Grúa que transita sobre uno o varios rieles.
Grúa corredera:	Grúa móvil en la cual el puente está soportado en cada extremo por juegos de ruedas que se mueven sobre rieles elevadas.
Grúa de pórtico:	Grúa en la cual el puente está montado en sus extremos sobre torres, que a su vez están soportadas por ruedas con pestañas que corren en vías.
Grúa monorriel (telfer):	Grúa móvil en la cual la unidad izadora y la cabina, si la hay, están suspendidas sobre un juego de ruedas que corren sobre la pestaña de un solo riel elevado. Comprende una grúa montada sobre un carro autopropulsor
Grúa pescante:	Grúa fija o móvil en la cual el cable de suspensión está soportado por un miembro proyectante, horizontal o inclinado, conocido como pescante, y la posición del gancho con relación a la estructura que soporta la grúa, está determinada por la longitud e inclinación del pescante o en ciertos casos por la posición de un carro que corre sobre él, cuando aquél es horizontal.
Grúa portátil de piso:	Comprende un aparato para izar, montado sobre ruedas y que no maniobre sobre vías.

Tabla 9.1 Identificación de diferentes tipos de grúas

Los equipos de montaje para elementos prefabricados de concreto los podemos dividir en dos grupos:

Los de pequeña capacidad, como las grúas hidráulicas todo terreno (figura 9.2), utilizadas para los elementos de pesos relativamente bajos; como losas cortas, traveses pequeños y muros.



Fig. 9.2 Grúa hidráulica todo terreno montando muros prefabricados

Los de mediana o gran capacidad: como las grúas torre, que si bien son muy versátiles por su gran alcance, no tienen la capacidad suficiente para montar elementos medianos lejos del centro de operación de la grúa.

Las grúas se dividen en estructurales (figura 9.3) y telescópicas o hidráulicas (figura 9.4).



Fig. 9.3 Grúa estructural



Fig. 9.4 Grúa hidráulica

La principal diferencia en el funcionamiento de los dos tipos de grúas, radica en lo siguiente:

- ✓ Las grúas estructurales son capaces de transitar tramos cortos con carga suspendida, mientras que las telescópicas no.
- ✓ Las grúas telescópicas tienen gran facilidad de desplazamiento, por lo que son utilizadas en montajes que involucran puntos alejados entre sí, tales como puentes sobre carreteras, tramos elevados, etc., mientras que las estructurales son usadas en lugares donde se tienen distancias muy cortas de desplazamientos, tales como plantas de prefabricados, estadios, puentes grandes, entre otras.

9.2.2 Accesorios

Estrobo.- Un estrobo (figura 9.5) es un tramo relativamente corto de un material flexible y resistente, con sus extremos en forma de ojales debidamente preparados para sujetar una carga y vincularla con el equipo de izaje que ha de levantarla, de modo de constituir una versátil herramienta para el levantamiento de cargas.

Los ojales pueden estar unidos de otro tipo de accesorios y combinarse de múltiples formas, generando distintas configuraciones o modelos de estrobos. En un sentido más amplio, los estrobos pueden llevar en sus extremos otras terminaciones distintas del ojal, tales como terminales de vaciado, de prensado etc. También muchas veces un estrobo se usa para transmitir esfuerzos de tracción distintos del izaje de cargas, por ejemplo en elementos de máquinas, remolques, etc.

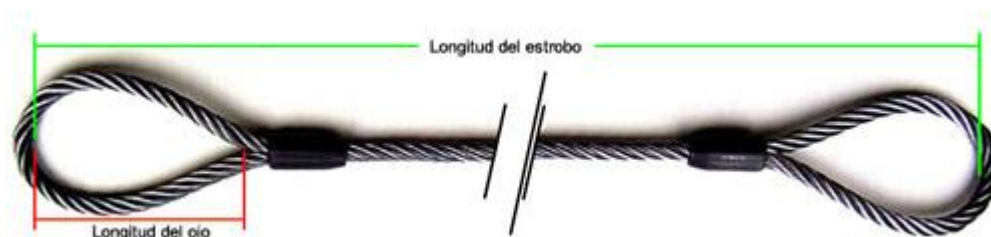


Fig. 9.5 Estrobo con ojales (observe el encasquillado en la unión)

Perno de izaje.- Perno de acero que atraviesa un prefabricado donde se requiere que la sujeción sea articulada (figura 9.6), se utiliza para montajes de elementos que se transportan horizontalmente y que requieren que se monten verticalmente, principalmente en columnas. Para su utilización es muy importante definir las dimensiones mediante una revisión estructural y colocar ductos en las piezas prefabricadas con las tolerancias adecuadas, que pueden ser de 13 a 25 mm, cuidando durante el proceso de colado y consolidación que no se presenten deformaciones en el ducto que afecten la colocación del perno una vez que el concreto haya endurecido.

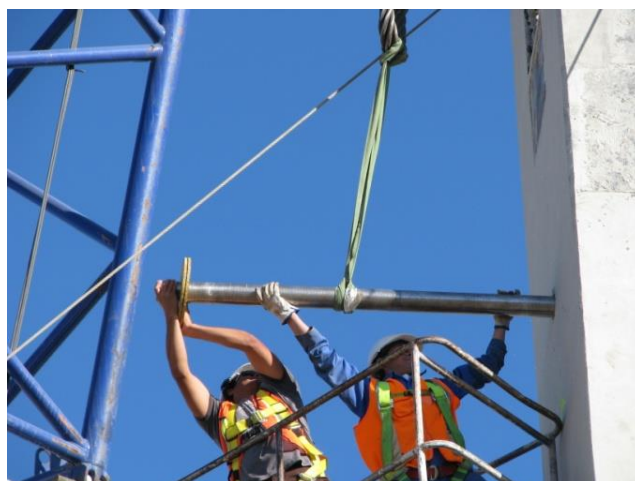


Fig. 9.6 Perno de acero para montaje de columnas

Balancín.- Elemento generalmente metálico colocado horizontalmente (figura 9.7 a y b), del que se sujetan estrobos u otros elementos de izaje y que permite tomar una pieza en varios puntos de forma tal que la pieza reduzca su longitud de flexión y su carga axial. También permite hacer montajes entre varias grúas reduciendo el peso que levanta cada una, aunque estas prácticas se realizan en montajes muy complejos y que tienen que ser estudiados más a fondo.



Fig. 9.7 a Balancín metálico.



Fig. 9.7b Balancín metálico de gran capacidad

Diferencial: Mecanismo metálico accionado de forma manual para jalar la carga hasta el punto deseado (figura 9.8), puede ser de cadena o de palanca. Generalmente se utiliza para tensar elementos verticales, realizar ajustes pequeños de grandes elementos o para agregar una componente horizontal de los vectores de fuerza a la maniobra de montaje.



Fig. 9.8 Diferencial

Grilletes.- Anillo de acero (figura 9.9) que sujeta estrobos, eslingas, cadenas, entre otros componentes con las orejas de los elementos a levantar. Existen muchas geometrías, tamaños, capacidades, usos, formas de conexión, entre otras características que tienen que ser consideradas al momento de seleccionarse, para más referencia, revisión de capacidades, dimensiones puede utilizarse la siguiente página: <http://www.thecrosbygroup.com/html/default.htm#/es/home>



Fig. 9.9 Grilletes marca Crosby

Barreta.- Barra de acero que sirve como palanca para alinear la pieza a montar (figura 9.10). Su utilización es conveniente para dar pequeños ajustes a piezas incluso demasiado pesadas sin apoyo completo, para evitar introducir las manos en espacios pequeños y también se recomienda su utilización en pares opuestos para realizar trabajos en menos tiempo.

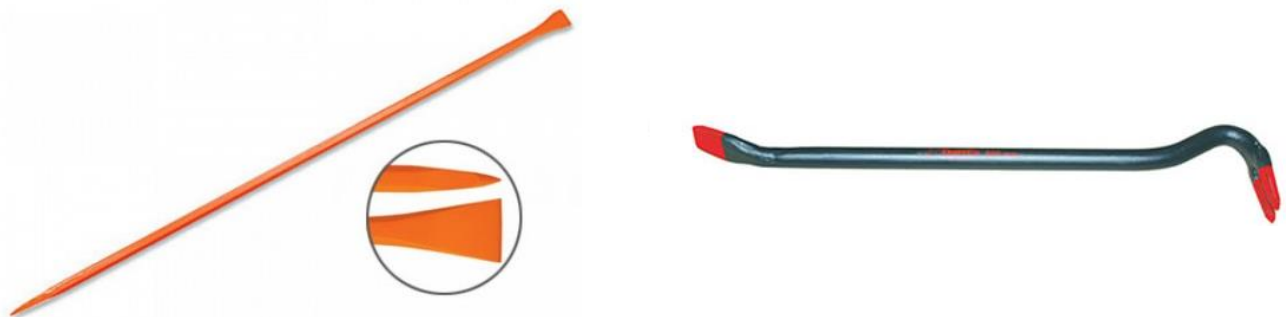


Fig. 9.10 Barreta o barra de metal.

Polipasto.- Mecanismo que sirve para levantar cargas verticalmente (figura 9.11) y repartirlas en distintos puntos de izaje o donde se requiere dar tensiones uniformes para evitar daños al producto

prefabricado. Es muy importante tener equipos adicionales y darles el mantenimiento adecuado ya que suelen dar problemas con el uso prolongado por la fricción a que se somete el mecanismo interior.



Fig. 9.11 Polipasto

9.3 Precauciones y seguridad

9.3.1 General

El montador deberá desarrollar un programa escrito de seguridad, el cual definirá el compromiso de la compañía para lograr un sitio seguro de trabajo y proveerá la estructura para lograr una cultura de cero accidentes.

El montador deberá entender y cumplir con las leyes, normas y reglamentos respectivos y aplicables a la salud y a la seguridad, y proveerá de una fuerza calificada de trabajo debidamente entrenada para realizar el trabajo.

Aunque no es el tema principal de este curso, es importante señalar que el PCI “Erection Safety for Precast and Prestressed Concrete, MNL 132 – 95” contiene valiosa información que puede ser usada para elaborar programas y como guía de formatos para inspección de aparejos, grúas, etc. Todas las instrucciones de manejo del elemento dadas por parte del prefabricador deben de ser seguidas para evitar daños.

Todo tipo de empleado debe permanecer alejado de los elementos prefabricados mientras ellos están siendo manipulados y descargados. (pág. 16; Erector’s Manual, PCI.)

Es importante seguir las recomendaciones del fabricante de los aparejos o herramientas usadas en montaje.

9.3.2 Recomendaciones para el uso adecuado de estrobos



Fig. 9.12 Estrobo en proceso de encasquillarse

- ✓ Inspeccione el estrobo antes de cada uso,
- ✓ Evitar sobrecargas y sacudidas del estrobo,
- ✓ Protegerlo al apoyar contra filos cortantes,
- ✓ Nunca intentar reacomodarlo estando con carga soportada,
- ✓ Apoyar firmemente en el fondo de la garganta del gancho de levante para evitar sacudidas violentas,
- ✓ No exponer estrobos con alma de fibra a temperaturas mayores de 100°C,
- ✓ Destruir aquellos estrobos que presenten riesgos de operación,
- ✓ Evitar acortar la longitud de un estrobo por medio de nudos o cualquier otro método,
- ✓ Mantener constantemente lubricado todo el estrobo,
- ✓ Limpiar constantemente el estrobo para eliminar cualquier agente extraño que pueda dañar la estructura del cable.
- ✓ Utilizar solamente estrobos encasquillados para evitar cargas sueltas y peligrosas (figura 9.12)

9.4 Procedimientos

9.4.1 General

Transporte y Descarga.- Previo al inicio de los trabajos de montaje, el sitio de los trabajos debe ser inspeccionado para determinar la accesibilidad del equipo de montaje y del transporte de los elementos prefabricados.

El personal de transporte y montaje deberán obtener pesos y dimensiones de los elementos proporcionados por el prefabricador.

Una inspección visual previa a la descarga de los elementos deberá realizarse con el objeto de revisar identificación, agrietamientos y fisuras, contra flechas, desportillamientos, ralladuras, etiquetas de rechazo, ganchos de izaje y accesorios de izaje.

Se deben de atender y seguir todas las instrucciones de manejo del elemento dadas por parte del prefabricador para evitar daños, así como la sujeción provisional que deberá de colocarse según las instrucciones del diseñador estructural (figura 9.16).

Todo tipo de empleado debe permanecer alejado de los elementos prefabricados mientras ellos están siendo manipulados y descargados. (pág. 16; Erector's Manual, PCI.)

Es importante que el almacenamiento de los prefabricados se haga en planos verticales y tengan la altura adecuada para evitar daños a los accesorios de izaje (ganchos).

Aparejos.- Un equipo de montaje que emplee personal que “estrobe” y realice maniobras deberá desarrollar programas de entrenamiento, incluyendo su evaluación, para asegurarse de que el personal es competente para ejecutar dichas operaciones. Cosas tales como realizar las maniobras con “manos cerradas” en vez de “abiertas” pueden acarrear accidentes generalmente graves.

Las tablas de capacidad de eslingas y estrobos incluyen un factor de seguridad usualmente de 5, pero las capacidades nominales indicadas no deben ser excedidas bajo ninguna circunstancia.

Para el montaje de unidades prefabricadas, el ángulo de la eslinga nunca debe ser menor a 45° respecto a la horizontal, a menos que sea indicado explícitamente por el ingeniero estructural responsable.

9.4.2 Tolerancias de montaje

La tolerancia está definida como una variación permisible específica de una dimensión o cantidad especificada, y puede ser expresada como una variación aditiva o sustractiva de una dimensión específica.

El montador y el prefabricador son responsables de conocer las tolerancias específicas en sus procesos respectivos.

El arquitecto/ingeniero debe ser responsable de coordinar las tolerancias para el trabajo con prefabricados y otras actividades involucradas en el proyecto.

En todos los casos las tolerancias deben de ser realistas, razonables y dentro de límites generalmente aceptadas.

Las tolerancias están divididas en tres grandes categorías:

- Tolerancias de producto
- Tolerancias de montaje (figura 9.13)
- Tolerancias de interface

Las tolerancias deben ser establecidas por las siguientes razones:

- Estructurales
- Factibilidad (producción – construcción)
- Efectos visuales
- Economía
- Legales
- Contractuales

Es importante decir que el no cumplir las tolerancias no implica el rechazo de las piezas prefabricadas o montadas y pudieran ser aceptables si cumplen uno de los siguientes criterios:

1. Si la tolerancia excedente no afecta la integridad estructural, desempeño arquitectónico de la unidad u otros aspectos
2. La unidad o elemento prefabricado puede ponerse dentro de tolerancia por medios estructurales y arquitectónicos aceptados.
3. El conjunto total de piezas montadas puede ser modificado razonablemente para cumplir todos los requerimientos arquitectónicos y estructurales.

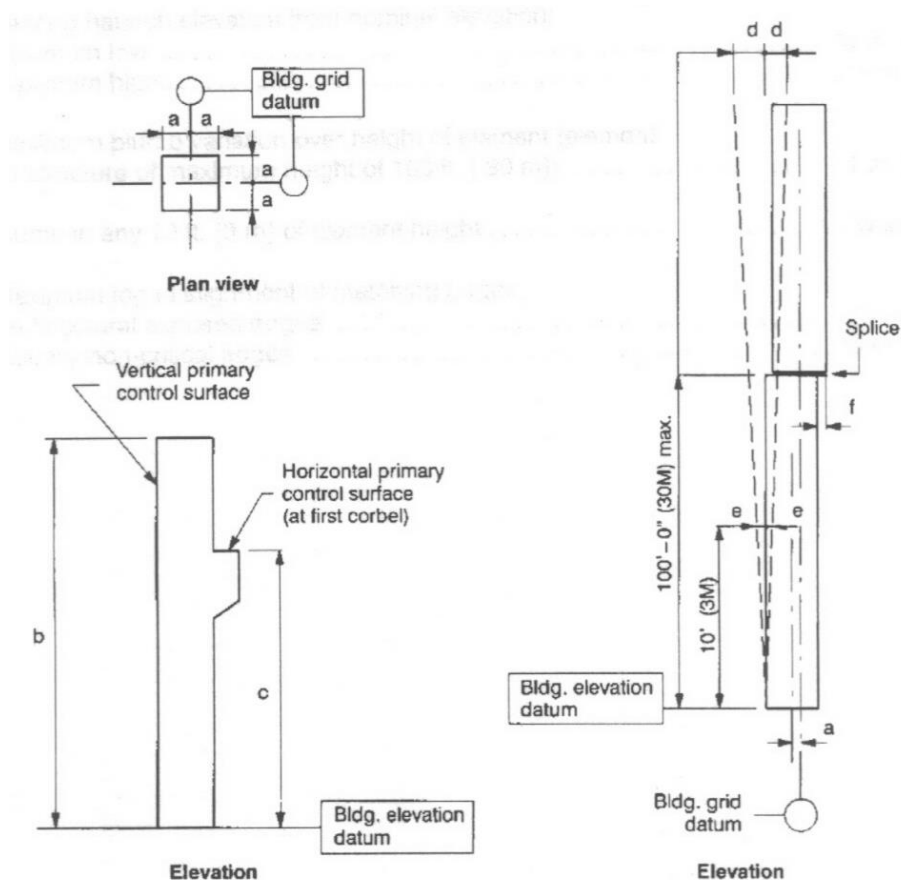


Fig. 9.13 Tolerancias de montaje en columna según el PCI

9.4.3 Responsabilidades en el montaje

9.4.3.1 Coordinador de izajes o superintendente de construcción

Es responsable de la elaboración del Plan de Maniobras para Izaje bajo condiciones críticas y de la capacitación del personal de Maniobras.

9.4.3.2 Jefe de área

- Antes de realizar una maniobra de izaje bajo condiciones críticas, participa con el coordinador de izajes en la elaboración del Plan de maniobras para izaje bajo condiciones críticas, el plan procede hasta que esté autorizado.
- Antes de la ejecución de algún izaje bajo condiciones críticas debe ser notificado el Jefe de Seguridad del proyecto.
- El Plan de maniobras de izaje en condiciones críticas consiste cuando un menos en un conjunto de dibujos, estrategias y cálculos, necesarios para probar que una determinada

maniobra de izaje, a realizar bajo condiciones críticas, será segura para la vida de los trabajadores y los bienes del Proyecto.

9.4.3.3 Jefe de seguridad

- Es de su incumbencia indicar las medidas de seguridad que deben implementarse antes, durante y después de cualquier izaje en condiciones críticas.
- Se entienden como maniobras de izaje en condiciones críticas las siguientes actividades descritas en el apartado 9.4.4.

9.4.3.4 Operador de grúa de izaje

- Examinar las condiciones mecánicas y operativas de la grúa, al inicio del trabajo.
- Analizar cada Plan de Maniobras, para tener la certeza de su ejecución bajo condiciones de seguridad.
- Verificar la tabla de capacidades de la grúa para asegurar que la maniobra se ejecute con un factor de carga inferior al 88%.
- Proteger el área de giro del contrapeso, colocando las barreras necesarias
- Suspende la maniobra en caso de riesgo.
- Reportar de inmediato las anomalías que observe en la máquina durante la operación, que puedan ser síntoma de falla o desperfecto.
- Mantener al día la Bitácora de la grúa.
- Conocer y cumplir el manual de operación de la grúa.
- Identificarse con el trabajador (manioquista) que le dará señales.

9.4.4 Izaje en condiciones críticas

- Cuando el peso de la carga exceda del 90% de la capacidad establecida para la configuración de la grúa.
- Cuando se requieran dos o más grúas para hacer el izaje, con una capacidad del 88% de cada una.
- Cuando la pieza por izar sea tan voluminosa, que requiera de un estudio especial para los movimientos de la grúa.
- Cuando se deban realizar maniobras cerca de líneas de alta tensión
- Cuando se deban realizar maniobras sobre líneas vivas de hidrocarburos.
- Cuando se deban realizar maniobras en espacios reducidos o sobre vialidades, caminos o propiedades de terceros.

9.4.5 Descripción del procedimiento

9.4.5.1 Operación

- a) Solo está permitido el accionar la grúa el personal calificado, que conozca y domine el procedimiento específico de operación de la máquina.
- b) El operador de grúa debe estar familiarizado con los siguientes temas o conceptos (tabla 9.2):

Terminología de las partes de la máquina	Tipos de estrobos y métodos de amarre de cargas diversas
Señales manuales de maniobras	Métodos de estimación de dimensiones y peso de cargas diversas
Señales con luces y claxon	Principios de operación de los controles, partes principales y funciones de la máquina y sus accesorios
Pérdida de capacidad de la máquina por desnivel	Distancias permisibles de operación cerca de líneas de alta tensión (ver apartado 9.4.5.3)
Lectura e interpretación de las Gráficas de Cargas	Procedimiento de seguridad a seguir en caso de tocar una línea de alta tensión
Conocimiento de tipos y capacidad de cables de maniobras	Requerimientos completos del mantenimiento y lubricación requerida de la máquina

Tabla 9.2 Conocimientos que debe tener el operador de la grúa

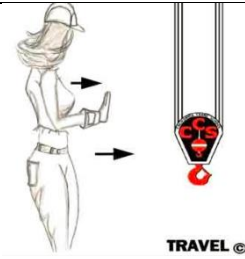
- c) Antes de ejecutar maniobras, tanto el Operador como el Maniobrista, deben examinar los aparejos de izaje y sus accesorios tales como: estrobos, ganchos, anillos, argollas, casquillos, grapas, y eslingas y demás componentes de la máquina, para determinar su buen estado.
- d) Todas las grúas deben contar con los siguientes elementos (tabla 9.3):

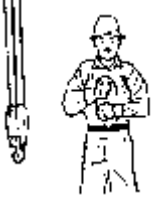
Manual del Operador en español	Cinturón de seguridad
Extintor	Indicador del ángulo de la pluma
Claxon y alarma de reversa	Gráfica de capacidades de la grúa
Faro para maniobras	Certificado de inspección anual

Tabla 9.3 Elementos con que se debe de contar en una grúa

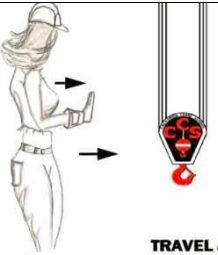
- e) Tanto el Operador como los maniobristas, deben conocer el Código de Señales (tabla 9.4).
- f) Antes del inicio de la operación, el área de desplazamiento de la pluma extendida debe ser confinada.
- g) Deben colocarse barreras de obstrucción, letreros preventivos y restrictivos para impedir que pasen personas o vehículos bajo el radio de acción de la pluma de la grúa.
- h) Solo los maniobristas con dominio de las señales puede realizar esa función.
- i) Al estar en funciones, solo un maniobrista emitirá señales al operador.
- j) La persona que esté dando las señales, debe impedir cualquier obstrucción y colocarse en el ángulo en que esté siempre visible para el operador.
- k) Ninguna persona puede estar cerca del maniobrista que esté enviando las señales, para evitar confusiones visuales del operador de la grúa.

Tabla 9.4 CODIGO DE SEÑALES (Imágenes: California Crane School)

 GIRAR: Brazo extendido apuntando con el dedo en la dirección del aguilón	 PARADA: Brazo extendido, palma hacia abajo, mantener la postura rígidamente
 PARADA DE EMERGENCIA: Brazo extendido, palma hacia abajo, moviendo la mano rápidamente de derecha a izquierda	 DESPLAZAMIENTO: Brazo extendido hacia delante, mano abierta y algo elevada, hacer movimiento de empuje en la dirección del desplazamiento

 DOG EVERYTHING AGARRAR TODO: Ceñir ambas manos delante del cuerpo.	 EXTEND BOOM ALARGAR EL AGUILÓN: Ambos puños delante del cuerpo, con los pulgares apuntando hacia afuera
 DESPLAZAMIENTO UNA ORUGA: Bloquear la oruga del lado indicado por el puño levantado. El desplazamiento de la otra oruga se indica por el movimiento del otro puño	 DESPLAZAMIENTO DE AMBAS ORUGAS: Con ambos puños delante del cuerpo, haciendo un movimiento circular uno alrededor del otro, indicando la dirección del movimiento, hacia delante o hacia atrás.
 RETRACT BOOM ACORTAR EL AGUILÓN: Ambos puños delante del cuerpo, con los pulgares apuntando hacia adentro.	 HOIST SUBIR: Con el brazo vertical y el dedo índice apuntando hacia arriba, mover la mano en un pequeño círculo horizontal.

 LOWER BAJAR: Con el brazo extendido hacia abajo y el dedo índice apuntando hacia abajo, mover la mano en un pequeño círculo horizontal.	 USE MAIN HOIST UTILIZAR EL ELEVADOR PRINCIPAL: Levantar la mano por encima de la cabeza
 USE WHIP LINE UTILIZAR EL APAREJO: Golpear ligeramente el codo con una mano: hacer entonces las señales normales.	 RAISE BOOM LEVANTAR EL AGUILÓN: Brazo extendido, dedos cerrados, pulgar apuntando hacia arriba.
 LOWER BOOM BAJAR EL AGUILÓN: Brazo extendido, dedos cerrados, pulgar apuntando hacia abajo.	 MOVE SLOWLY MOVER LENTAMENTE: Con una mano se da la señal del movimiento, la otra se coloca quieta delante.

 ELEVAR EL AGUILÓN Y BAJAR LA CARGA: Con el brazo y el pulgar apuntando hacia arriba, cerrar y abrir la mano alternativamente durante el tiempo que se desee que baje la carga.	 BAJAR EL AGUILÓN Y SUBIR LA CARGA: Con el brazo y el pulgar apuntando hacia arriba, cerrar y abrir la mano alternativamente durante el tiempo que se desee que suba la carga.
 DESPLAZAMIENTO DEL TROLE: Con la palma de la mano apuntando hacia arriba, los dedos cerrados y el pulgar apuntando en la dirección de desplazamiento, sacudir la mano horizontalmente	 DESPLAZAMIENTO DEL PUENTE: Brazo extendido hacia delante, mano abierta y algo elevada, hacer movimiento de empuje en la dirección del desplazamiento

Actualmente y con el uso de nuevas tecnologías, se ha venido adoptando el uso de “comunicación a manos libres”. Algunos aparatos cumplen incluso disposiciones de OSHA, ya que en ocasiones (figura 9.14) pueden ser una forma de comunicación mucho más efectiva y segura. Por ejemplo: en grúas torre, OSHA recomienda el uso de radio comunicación ya que incluso se mejora la productividad por parte del operador de la grúa. Otra situación donde es conveniente este tipo de comunicación es en montajes nocturnos ya que es muy difícil que el maniobrista se ubique siempre en lugares muy bien iluminados o bien que las fuentes de iluminación no estén siempre en alguna posición que imposibilite al operador ver claramente las señales manuales.

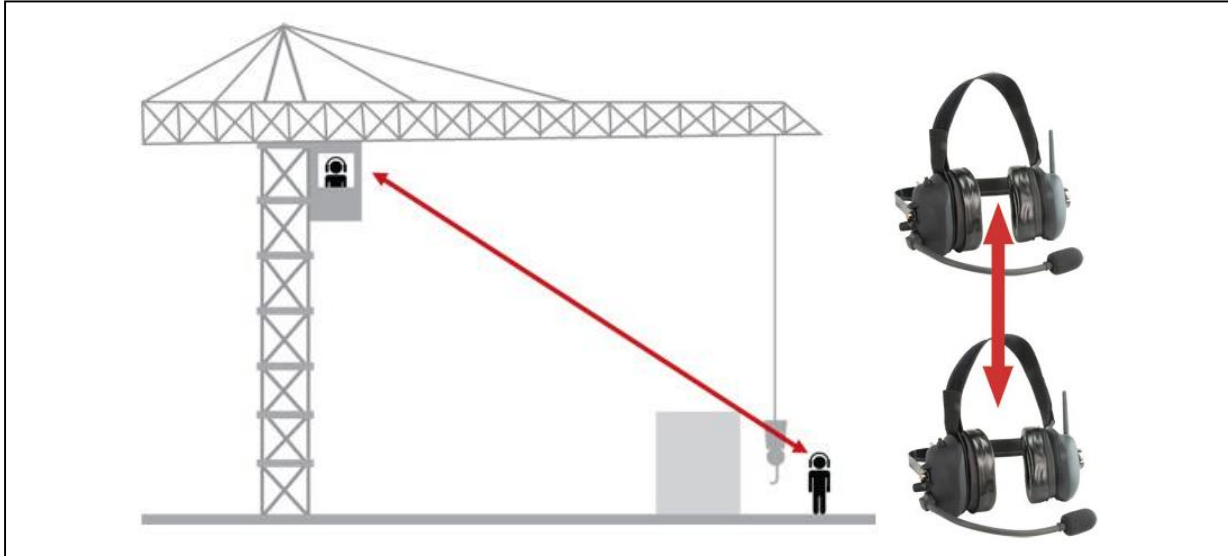


Fig. 9.14 Situación donde es más eficiente el uso de radiocomunicación

9.4.5.2 ELEMENTOS Y DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

Todas las grúas deben contar con los siguientes elementos de seguridad en sus mecanismos de funcionamiento:

- Dispositivos que establecen la operación y funcionamiento de los mismos.
- Frenos automáticos de seguridad que operen en el momento que se rebase la carga nominal.
- Dispositivos que emitan señales sonoras y luminosas, instaladas a fácil alcance del operador para prevenir a las personas que puedan estar en peligro debido al movimiento del aparato de carga.
- Las manijas de los mandos deberán accionarse en la medida de lo posible, en la dirección del movimiento resultante de la carga o en el sentido de las agujas del reloj para el izado y en el sentido contrario para el descenso.
- Los pedales de los equipos para izar deben estar provistos de una superficie antirresbalante para evitar corrimientos involuntarios.
- Los cables de control de los equipos para izar, maniobrados desde el piso, deben estar provistos de separadores por los cuales pasen estos para evitar que se enreden.
- Los controles de los equipos para izar deben estar marcados para señalar en qué dirección se mueve la carga.

9.4.5.3 Operación cerca de líneas electrificadas

Según el Departamento del Trabajo de los Estados Unidos Americanos, a través de la Administración de Seguridad y Salud Laboral (OSHA, por sus siglas en inglés) por medio de su 29 Código de Regulaciones Federales parte 1926, “Grúas y grúas torre en la Construcción”, indica que el equipo que hace contacto con líneas electrificadas es una de las causas primarias de muerte en los lugares de construcción, para prevenir tales contactos, se establece una distancia mínima (tabla 9.5) de los equipos a las líneas electrificadas (figura 9.15).

Cabe señalar que siempre será más recomendable la des-energización y aterrizado de las líneas cuando así sea posible.

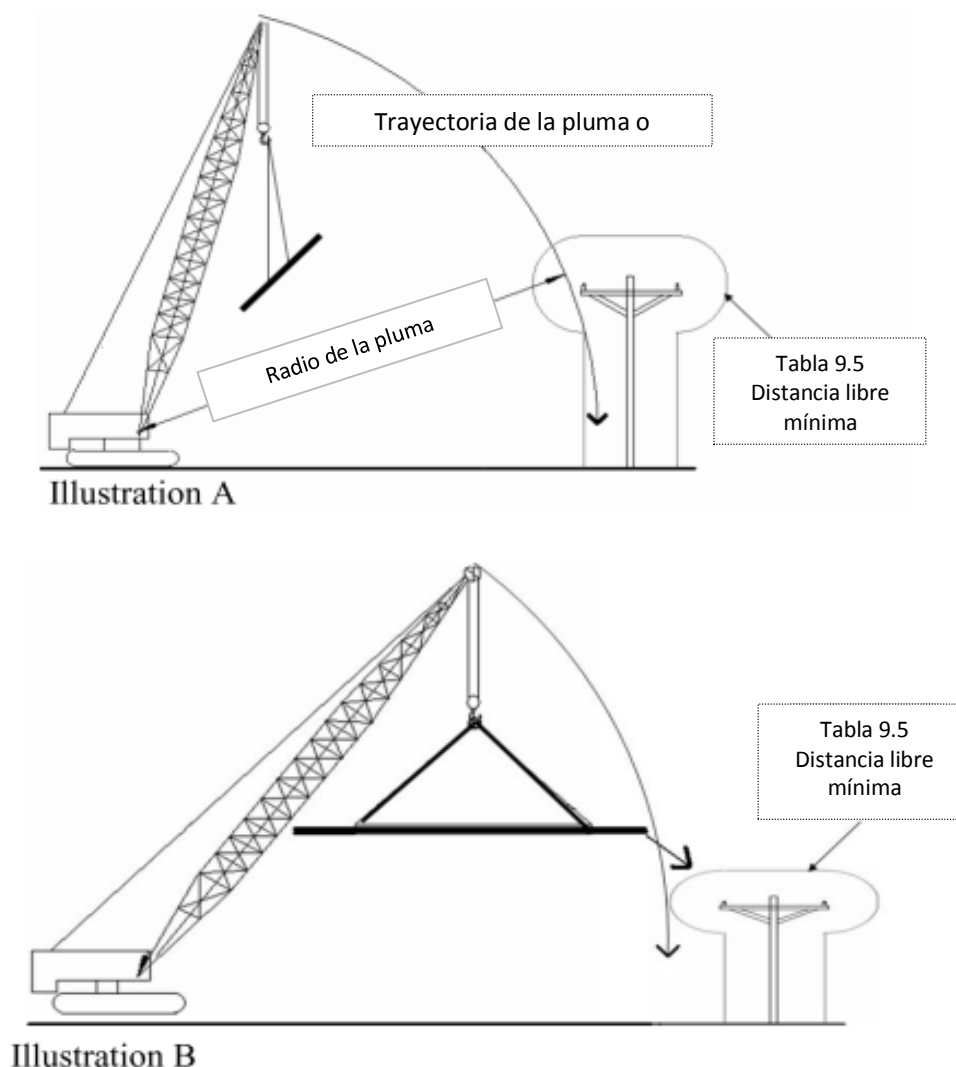


Fig. 9.15 Esquema de distancias entre grúas y líneas electrificadas

Voltaje (nominal, kV, corriente alterna)	Distancia libre mínima (m)
Hasta 50	3.0
$> 50 \leq 200$	4.6
$> 200 \leq 350$	6.1
$> 350 \leq 500$	7.6
$> 500 \leq 750$	10.7
$> 750 \leq 1000$	13.7
> 1000	(la que establezca el propietario/operador de la línea o un ingeniero profesional y acreditado, quien será una persona calificada con respecto a transmisión y distribución de energía eléctrica)

Tabla 9.5 Distancia libre mínima entre grúas (equipo) y líneas eléctricas



Fig. 9.16 Sujeción lateral provisional de traveses

CONCLUSIÓN

Como se mencionó en la introducción de este trabajo se busca dar soluciones prácticas a problemas que comúnmente enfrenta un prefabricador de elementos de concreto en un ambiente real de trabajo, enfocándose a cuestiones básicas tales como materiales, pero incluyendo también cuestiones finas que un profesional de la industria debe conocer como la contracción por flujo plástico (creep), entre otros.

Debido a que mucha de la tecnología utilizada en el presfuerzo ha sido desarrollada en el extranjero, mucha terminología utilizada en el medio del prefabricado no tiene una traducción directa o exacta por lo que se mencionan las palabras originales en inglés para su referencia y para que se facilite la búsqueda en otras fuentes de información si así se desea.

Es muy difícil transmitir el énfasis que se requiere para ciertos aspectos del proceso de prefabricación y presfuerzo, pero es importante mantener en mente que estos procesos pueden volverse peligrosos si no se revisan y cuidan los detalles que están involucrados y es por eso que se requiere que el personal que interviene este sensibilizado con hechos como el cuidado del torón, aplicación de calor, transferencia de presfuerzo, uso de calderas, la seguridad en la zona de aplicación de presfuerzo, el mantenimiento de los barriletes y cuñas, etc.

Una vez que se ha realizado una planeación detallada del proceso y se han elaborado unos planos de taller de la mejor calidad, también es importante mencionar que ya que se trata de un proceso repetitivo, los mejores resultados de producción se logran cuando se realiza una supervisión rigurosa y estricta (preferentemente interna) desde el primer elemento prefabricado, y es además una excelente oportunidad para mejorar el proceso y autoevaluarse, de tal manera que se eviten los defectos en los colados subsecuentes.

Es de mucha relevancia estar conscientes de que el proceso del prefabricado es parte de un sistema más complejo que es la obra o el proyecto en general. No debemos perder de vista y olvidarnos que tenemos que prefabricar siempre considerando también las necesidades del transportista, del montador, de las instalaciones y de todos los demás involucrados. Tomando en cuenta lo anterior, será posible realizar trabajos con menos contratiempos y con la mejor calidad que en conjunto sea posible.

La divulgación del material y conocimientos del Precast / Prestressed Concrete Institute (PCI) y del American Concrete Institute (ACI) contribuye a la difusión y aprovechamiento del conocimiento especializado en estos temas y a su vez unifica criterios que facilitan la convivencia profesional, estandariza puntos de vista y sienta las bases para un mejor desarrollo de esta interesante especialidad de la construcción.

APENDICE D

Uso y mantenimiento de barriletes, traducción de: Strand Chuck Use and Maintenance Procedures, MNL 116, PCI

Los barriletes, utilizados para anclar torones de presfuerzo, son piezas de precisión que forman parte del equipo, y que están diseñados para sostener miles de kilogramos de fuerza. Es crítico que se efectúen periódicamente inspecciones y mantenimiento preventivo para asegurar un adecuado desempeño y comportamiento. Los siguientes renglones enlistan procedimientos generales para mantenimiento y uso de barriletes:

A. Lineamientos para personal de tensado:

1. Los barriletes deben mantenerse limpios siempre. Cuando no estén colocados sobre el torón nunca deben de arrojarse sobre el suelo. Todos los barriletes una vez utilizados deben de ser regresados al cuarto o mesa de limpieza.
2. Para asegurar un torón, siempre utilice un barrilete que este denominado para el mismo tamaño del torón que se va a usar.
3. Inspeccione visualmente cada barril antes de colocarlo sobre el torón. La inspección visual consistirá en echarle un vistazo a través del centro del barril para asegurarse que las tres cuñas están alineadas y el barrilete este limpio.
4. Para liberar un barrilete de un torón, sujete el barrilete y empuje el barril hacia adelante para liberar las cuñas. Un método alternativo sería utilizar un accesorio para remover el barrilete.
5. Si no se puede liberar un barrilete utilizando los métodos anteriores, corte el torón (sin carga) a aproximadamente medio metro hacia cada lado del barrilete. Lleve el conjunto barrilete -torón al cuarto o espacio destinado a la limpieza de los barriletes para una remoción apropiada. El barril nunca debe ser golpeado con algún objeto para liberar el torón.
6. Si el barrilete se separa del torón fácilmente, coloque las cuñas nuevamente dentro del barril.
7. Todos los barriletes y cuñas deben de ser limpiados, inspeccionados y lubricados previos a cada uso.

B. Lineamientos para mantenimiento de barriletes y personal de inspección:

1. Para remover un barrilete que ha sido traído de la mesa de tensado con un trozo de torón (punto # 5 anterior), utilice un accesorio de remoción (figura D.1), un tornillo de banco y un martillo deslizante (figura D.2).

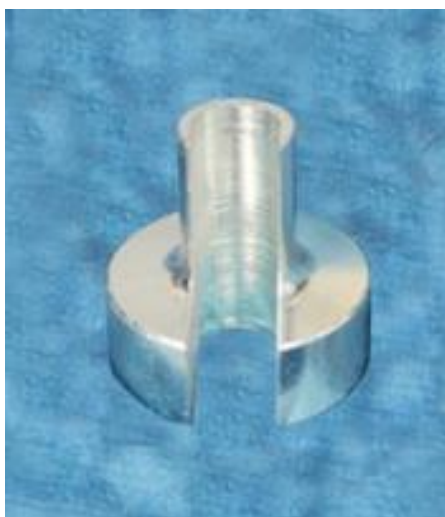


Fig. D.1. Accesorio de remoción



Fig. D.2. Martillo deslizante

- a. Coloque el accesorio de remoción sobre el torón y coloque el extremo angosto dentro del extremo del barril.
- b. Coloque el torón (con el accesorio de remoción colocado) hacia arriba en el tornillo de banco de manera tal que la herramienta descansa horizontal sobre el tornillo. Deje lo suficientemente sueltas las mordazas del tornillo de manera que el torón pueda moverse entre ellas.
- c. Utilice el martillo deslizante para golpear el extremo abierto del barrilete. En caso de ser necesario, se puede usar otro martillo para golpear el martillo deslizante. No golpee el barril con cualquier objeto duro.
- d. El golpear el extremo abierto con un martillo deslizante forzará el barrilete contra la herramienta de remoción, empujando las cuñas hacia atrás dentro del barril y dejándolo

suelto. El barrilete entonces podrá ser retirado ya sea presionando el accesorio de remoción dentro del barril, deslizando el barrilete hasta afuera del torón o desensamblando el barrilete.

2. Para inspeccionar y lubricar los barriletes, utilice el siguiente procedimiento:

- a. Separe todos los barriletes por tamaño. Inspeccione todo el lote del mismo tamaño de barriletes antes de inspeccionar otros tamaños diferentes en la mesa de trabajo.
- b. Desensamble todos los barriletes removiendo las cuñas y la anilleta de plástico.
- c. Utilice el equipo apropiado de seguridad, incluyendo: protección ocular (gafas) y guantes mientras se limpien los barriletes.
- d. El cuerpo del barrilete debe ser limpiado con un cepillo de alambre cónico.
- e. Antes de remover la anilleta u o-ring, las cuñas pueden ser limpiadas con una carda de nylon cónica. Las cardas de alambre metálico pueden dañar las cuñas y nunca podrán ser usadas nuevamente.
- f. Después de limpiar las cuñas, retire las anillets e inspeccione en busca de signos de ralladuras, rebabas y marcas de incisión (figura D.3). Examine las anillets en busca de signos de corte o daño. Inspeccione los barriles en busca de signos de falla, deformaciones, fatiga, daño o corrosión excesiva. Se deben desechar todas las partes dañadas para asegurarse que no vayan a ser reutilizadas.
- g. Limpie y lubrique los barriles y deje aproximadamente 5 minutos para escurrir el exceso. Lubrique el exterior del ensamble de las mordazas.
- h. Ensamble los barriletes y almacénelos en un estante que este diseñado para mantener los barriletes limpios y protegidos.
- i. Repita el proceso para cada tamaño distinto de barrilete.

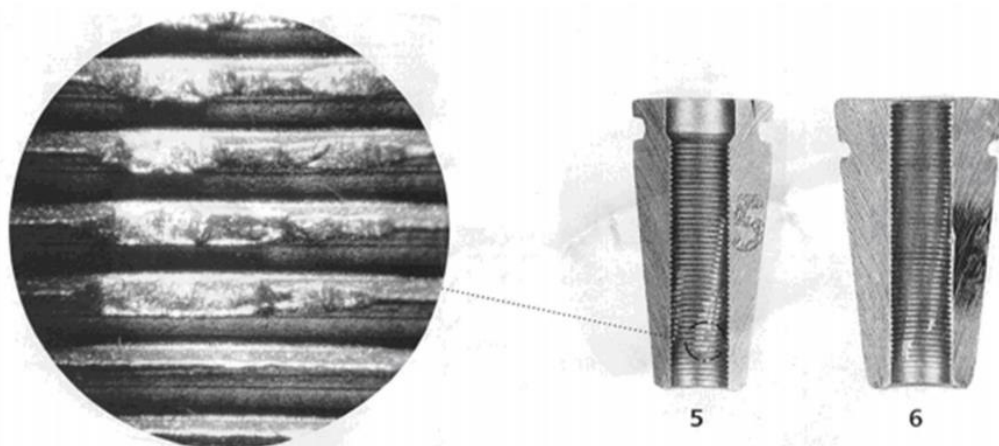


Fig. D.3. Cuñas donde los dientes se han dañado, el torón presenta un deslizamiento ocasionando una ranura diagonal a través de los dientes. Estas cuñas deben de reemplazarse y desecharse.

BIBLIOGRAFÍA

ACI 117-01, *Especificaciones y Tolerancias para Materiales y Construcciones de Concreto*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2001

ACI 224, *Cracking in Prestressed Concrete Structures*, ACI SP 113. Halversen Grant T/Burns Net H. Editors. 1989

ACI 304-00, *Guía Práctica para la Medición, Mezclado, Transporte y Colocación de Concreto*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2000

ACI 305, *Guía para la Colocación de Concreto en Clima Caluroso*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2010

ACI 306, *Guía para la Colocación de Concreto en Clima Frío*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2010

ACI 308, *Curado de Concreto*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2001

ACI 309R-05, *Compactación del Concreto*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2005

ACI 318-08, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2008

ACI 347-04, *Guía para el diseño, construcción y materiales de cimbras para concreto*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2004

ACI 364, *Rehabilitation, Renovation and Preservation*, Gajanan Sabnis Editor, 1986

ACI, *Seminar Course Manual Sem – 21 (89)*; Repairs of Concrete Structures - Assessments, methods and risks. ACI. 1989.

Gerwick. Ben C. Jr., *Construction of Prestressed Concrete Structures*, Wiley Inter-Science, 2d. Edition. USA. 1993.

Hernández Montes Enrique, Gil Martín Luisa María. *Hormigón armado y pretensado Concreto reforzado y preesforzado*. Granada. 2007

Levitt M. *Precast Concrete Materials, Manufacture, Properties and Usage*. Applied Science Publishers. 1982

Libby James R. *Modern Prestressed Concrete, Design, Principles and Construction Methods*. Van Nostrand Reinhold Company. 1971

Orozco Zepeda Felipe de Jesús. *Temas fundamentales de concreto preesforzado*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2006

PCA, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association.

Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level I & II Training Manual, TM-101*, Chicago

Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Quality Control Technician/Inspector Level III Training Manual, TM-103*, Chicago

Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Structural QC Manual*

Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), *Tolerance Manual*

Whittle Robin. *Failures in Concrete Structures, Case Studies in Reinforced and Prestressed Concrete*, CRC Press Taylor and Francis Group, 2013