

# **NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

## **ÍNDICE**

## **NOTACIÓN**

## **DEFINICIONES**

### **1. CONSIDERACIONES GENERALES**

- 1.1 Alcance
- 1.2 Unidades
- 1.3 Criterios de diseño
  - 1.3.1 Estados límite de falla
  - 1.3.2 Estados límite de servicio
  - 1.3.3 Diseño por durabilidad

### **2. MATERIALES**

- 2.1 Concreto
  - 2.1.1 Materiales componentes para concretos clase 1 y 2
  - 2.1.2 Resistencia a compresión
  - 2.1.3 Resistencia a tensión
  - 2.1.4 Módulo de elasticidad
  - 2.1.5 Contracción por secado
  - 2.1.6 Flujo plástico
- 2.2 Acero

### **3. CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO**

- 3.1 Estructuración
  - 3.1.1 Sistema estructural resistente a fuerzas gravitacionales y sísmicas
  - 3.1.2 Restricciones y limitaciones para SERFGS que deban resistir acciones sísmicas
- 3.2 Análisis
  - 3.2.1 Aspectos generales
    - 3.2.1.1 Análisis lineal
    - 3.2.1.2 Análisis no lineal
  - 3.2.2 Efectos de esbeltez
    - 3.2.2.1 Conceptos generales
    - 3.2.2.2 Método de amplificación de momentos flexionantes
    - 3.2.2.3 Análisis de segundo orden
- 3.3 Análisis de losas
  - 3.3.1 Método de análisis
  - 3.3.2 Momentos flexionantes debidos a cargas uniformemente distribuidas
  - 3.3.3 Distribución de momentos flexionantes entre tableros adyacentes
  - 3.3.4 Cargas lineales
  - 3.3.5 Cargas concentradas
- 3.4 Análisis de losas planas
  - 3.4.1 Consideraciones generales
  - 3.4.2 Análisis aproximado por carga vertical
    - 3.4.2.1 Estructuras sin capiteles ni ábacos
    - 3.4.2.2 Estructuras con capiteles y ábacos
  - 3.4.3 Análisis aproximado ante fuerzas laterales
    - 3.4.3.1 Estructuras sin capiteles ni ábacos
    - 3.4.3.2 Estructuras con capiteles y ábacos
  - 3.4.4 Transmisión de momento entre losa y columnas
- 3.5 Hipótesis para la obtención de resistencias de diseño a flexión, carga axial y flexocompresión
- 3.6 Modelado de las articulaciones plásticas

- 3.6.1 A partir de diagramas momento curvatura
- 3.6.2 A partir de diagramas experimentales momento rotación
- 3.7 Factores de resistencia
- 3.8 Dimensiones de diseño
- 3.9 Revestimientos

#### **4. REQUISITOS DE DURABILIDAD**

- 4.1 Disposiciones generales
  - 4.1.1 Requisitos básicos
  - 4.1.2 Requisito complementario
  - 4.1.3 Tipos de cemento
- 4.2 Clasificación de exposición
- 4.3 Requisitos para concretos con clasificaciones de exposición A1 y A2
- 4.4 Requisitos para concretos con clasificaciones de exposición B1, B2 y C
- 4.5 Requisitos para concretos con clasificación de exposición D
- 4.6 Requisitos para concretos expuestos a sulfatos
- 4.7 Requisitos adicionales para resistencia a la abrasión
- 4.8 Restricciones sobre el contenido de químicos contra la corrosión
  - 4.8.1 Restricciones sobre el ion cloruro para protección contra la corrosión
  - 4.8.2 Restricciones en el contenido de sulfato
  - 4.8.3 Restricciones sobre otras sales
- 4.9 Requisitos para el recubrimiento del acero de refuerzo
  - 4.9.1 Disposición general
  - 4.9.2 Recubrimiento necesario en cuanto a la colocación del concreto
  - 4.9.3 Recubrimiento para protección contra la corrosión
- 4.10 Reacción álcali-agregado

#### **5. ESTADOS LÍMITE DE FALLA**

- 5.1 Flexión
  - 5.1.1 Requisitos generales
    - 5.1.1.1 Falla balanceada en secciones rectangulares
    - 5.1.1.2 Ancho efectivo en secciones L y T
  - 5.1.2 Dimensionamiento
  - 5.1.3 Resistencia a flexión
  - 5.1.4 Refuerzo a flexión
    - 5.1.4.1 Refuerzo mínimo
    - 5.1.4.2 Refuerzo máximo
    - 5.1.4.3 Detallado
- 5.2 Flexocompresión
  - 5.2.1 Requisitos generales
  - 5.2.2 Dimensionamiento
    - 5.2.2.1 Excentricidad mínima
  - 5.2.3 Resistencia a compresión y flexión en dos direcciones
  - 5.2.4 Refuerzo a flexocompresión
    - 5.2.4.1 Detallado
- 5.3 Fuerza cortante
  - 5.3.1 Requisitos generales
  - 5.3.2 Dimensionamiento
  - 5.3.3 Resistencia a fuerza cortante
    - 5.3.3.1 Fuerza cortante que toma el concreto
      - 5.3.3.1a Elementos sin presfuerzo
      - 5.3.3.1b Elementos anchos
      - 5.3.3.1c Elementos sujetos a flexión y carga axial
      - 5.3.3.1d Elementos presforzados
    - 5.3.3.2 Método detallado para cálculo de la fuerza cortante que toma el concreto
      - 5.3.3.2a Alcance

- 5.3.3.2b Elementos sin presfuerzo sometidos únicamente a cortante y flexión
- 5.3.3.2c Elementos sometidos a compresión axial
- 5.3.3.2d Elementos sujetos a tensión axial significativa
- 5.3.3.2e Elementos de sección circular
- 5.3.3.3 Resistencia a fuerza cortante por fricción
- 5.3.3.3a Requisitos generales
- 5.3.3.3b Requisitos de diseño
- 5.3.3.3c Tensiones normales al plano crítico
- 5.3.4 Limitación para la fuerza cortante de diseño
- 5.3.5 Refuerzo para fuerza cortante
- 5.3.5.1 Refuerzo en vigas y columnas sin presfuerzo
- 5.3.5.2 Refuerzo mínimo para vigas sin presfuerzo
- 5.3.5.3 Refuerzo en vigas y columnas con presfuerzo
- 5.3.5.4 Refuerzo mínimo para vigas con presfuerzo
- 5.3.5.5 Detallado
- 5.3.5.5a Estribos de suspensión
- 5.3.5.5b Vigas con tenciones perpendiculares a su eje
- 5.3.5.5c Interrupción y traslape del refuerzo longitudinal
- 5.3.5.5d Refuerzo longitudinal en trabes
- 5.3.6 Fuerza cortante en losas y zapatas
- 5.3.6.1 Resistencia a fuerza cortante en losas y zapatas
- 5.3.6.2 Sección crítica
- 5.3.6.3 Esfuerzo cortante de diseño
- 5.3.6.4 Resistencia de diseño del concreto
- 5.3.6.5 Refuerzo necesario para resistir la fuerza cortante
- 5.4 Torsión
- 5.4.1 Requisitos generales
- 5.4.1.1 Cálculo del momento torsionante de diseño
- 5.4.1.1a Cuando afecta directamente al equilibrio
- 5.4.1.1b Cuando no afecta directamente al equilibrio
- 5.4.1.1c Cuando pasa de una condición isostática a hiperestática
- 5.4.2 Casos en que puede despreciarse la torsión
- 5.4.3 Resistencia a torsión
- 5.4.4 Refuerzo por torsión
- 5.4.4.1 Refuerzo mínimo
- 5.4.4.2 Detallado del refuerzo
- 5.5 Aplastamiento
- 5.5.1 Requisitos generales
- 5.5.2 Dimensionamiento
- 5.5.3 Resistencia al aplastamiento

## **6. LONGITUD DE DESARROLLO, ANCLAJE Y REQUISITOS COMPLEMENTARIOS**

- 6.1 Anclaje
- 6.1.1 Requisito general
- 6.1.2 Longitud de desarrollo de barras a tensión
- 6.1.2.1 Barras rectas
- 6.1.2.2 Barras con dobleces
- 6.1.3 Longitud de desarrollo de barras a compresión
- 6.1.4 Anclaje del refuerzo transversal
- 6.1.5 Anclaje de malla de alambre soldado
- 6.1.6 Requisitos adicionales
- 6.1.6.1 Vigas y muros
- 6.1.6.2 Columnas
- 6.2 Revestimientos
- 6.3 Tamaño máximo de agregados
- 6.4 Paquete de barras

- 6.5 Doblez del refuerzo
- 6.6 Uniones del refuerzo
  - 6.6.1 Uniones de barras sujetas a tensión
    - 6.6.1.1 Requisitos generales
    - 6.6.1.2 Traslapes
    - 6.6.1.3 Anclajes mecánicos
    - 6.6.1.4 Uniones soldadas o mecánicas
    - 6.6.1.5 Uniones soldadas para marcos de ductilidad media y alta
    - 6.6.1.6 Uniones con dispositivos mecánicos para marcos de ductilidad media y alta
  - 6.6.2 Uniones de barras sujetas a compresión
  - 6.6.3 Uniones de malla de alambre soldado
- 6.7 Refuerzo por cambios volumétricos
- 6.8 Separación entre barras de refuerzo
- 6.9 Inclusiones

## **7. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DUCTILIDAD BAJA**

- 7.1 Requisitos especiales
  - 7.1.1 Características mecánicas de los materiales
    - 7.1.1.1 Concreto
    - 7.1.1.2 Acero de refuerzo
  - 7.1.2 Elementos prefabricados
- 7.2 Vigas
  - 7.2.1 Requisitos generales
  - 7.2.2 Refuerzo mínimo a flexión
  - 7.2.3 Refuerzo máximo a flexión
  - 7.2.4 Refuerzo por tensión diagonal
  - 7.2.5 Pandeo lateral
  - 7.2.6 Refuerzo complementario en las paredes de las vigas
  - 7.2.7 Vigas de sección compuesta
    - 7.2.7.1 Conceptos generales
    - 7.2.7.2 Efectos de la fuerza cortante horizontal
    - 7.2.7.3 Efectos de la fuerza cortante vertical
- 7.3 Columnas
  - 7.3.1 Geometría
  - 7.3.2 Resistencia mínima a flexión de columnas
  - 7.3.3 Refuerzo longitudinal mínimo y máximo
  - 7.3.4 Requisitos para refuerzo transversal
    - 7.3.4.1 Criterio general
    - 7.3.4.2 Separación
    - 7.3.4.3 Detallado
    - 7.3.4.4 Columnas zunchadas
- 7.4 Muros
  - 7.4.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas
    - 7.4.1.1 Ancho efectivo ante cargas concentradas
    - 7.4.1.2 Refuerzo mínimo
  - 7.4.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano
    - 7.4.2.1 Alcances y requisitos generales
    - 7.4.2.2 Momentos flexionantes de diseño
    - 7.4.2.3 Flexión y flexocompresión
    - 7.4.2.4 Fuerza cortante
    - 7.4.2.5 Muros acoplados
- 7.5 Losas apoyadas en su perímetro
  - 7.5.1 Peralte mínimo
  - 7.5.2 Revisión de la resistencia a fuerza cortante
  - 7.5.3 Losas que trabajan en una dirección
  - 7.5.4 Losas encasetonadas

- 7.5.5 Sistemas de piso prefabricados
- 7.6 Losas planas
  - 7.6.1 Requisitos generales
  - 7.6.2 Transmisión de momento entre losa y columnas
  - 7.6.3 Dimensionamiento del refuerzo para flexión
  - 7.6.4 Disposiciones complementarias sobre el refuerzo
  - 7.6.5 Secciones críticas para momento
  - 7.6.6 Distribución de los momentos en las franjas
  - 7.6.7 Efecto de la fuerza cortante
  - 7.6.8 Peraltes mínimos
  - 7.6.9 Dimensiones de los ábacos
  - 7.6.10 Aberturas
- 7.7 Conexiones
  - 7.7.1 Detalles del refuerzo en intersecciones de columnas con vigas o losas
  - 7.7.2 Resistencia del concreto en las intersecciones
  - 7.7.3 Anclaje del refuerzo longitudinal que termina en un nudo
  - 7.7.4 Conexiones prefabricadas
- 7.8 Diafragmas y elementos a compresión
  - 7.8.1 Alcance
  - 7.8.2 Firmes colados sobre elementos prefabricados
  - 7.8.3 Espesor mínimo del firme
  - 7.8.4 Diseño
  - 7.8.5 Refuerzo
  - 7.8.6 Elementos de refuerzo
- 7.9 Elementos estructurales en cimentaciones
  - 7.9.1 Alcance
  - 7.9.2 Análisis y diseño
  - 7.9.3 Zapatas
    - 7.9.3.1 Espesor mínimo de zapatas de concreto reforzado
    - 7.9.3.2 Diseño por flexión
    - 7.9.3.3 Diseño por cortante
    - 7.9.3.4 Anclaje
    - 7.9.3.5 Diseño por aplastamiento
    - 7.9.3.6 Cortante por penetración
  - 7.9.4 Contratraveses y traveses de liga
    - 7.9.4.1 Dimensiones mínimas
    - 7.9.4.2 Uniones con otros elementos
  - 7.9.5 Losas de cimentación
  - 7.9.6 Pilas y pilotes
    - 7.9.6.1 Pilas y pilotes en tensión
    - 7.9.6.2 Refuerzo longitudinal en pilas y pilotes
    - 7.9.6.3 Refuerzo transversal en pilas y pilotes
    - 7.9.6.4 Elementos clasificados como columnas
    - 7.9.6.5 Conexión con otros elementos estructurales

## **8. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DUCTILIDAD MEDIA**

- 8.1 Requisitos especiales
  - 8.1.1 Características mecánicas de los materiales
    - 8.1.1.1 Concreto
    - 8.1.1.2 Acero de refuerzo
- 8.2 Vigas
  - 8.2.1 Requisitos geométricos
  - 8.2.2 Refuerzo longitudinal
  - 8.2.3 Refuerzo transversal para confinamiento
  - 8.2.4 Requisitos para fuerza cortante
    - 8.2.4.1 Fuerza cortante de diseño

- 8.2.4.2. Refuerzo transversal para fuerza cortante
- 8.3 Columnas
  - 8.3.1 Geometría
  - 8.3.2 Resistencia mínima a flexión de columnas
    - 8.3.2.1 Procedimiento general
  - 8.3.3 Refuerzo longitudinal mínimo y máximo
  - 8.3.4 Requisitos para fuerza cortante
    - 8.3.4.1 Criterio y fuerza de diseño
    - 8.3.4.2 Contribución del concreto a la resistencia
    - 8.3.4.3 Refuerzo transversal por cortante
- 8.4 Muros
  - 8.4.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas
  - 8.4.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano
    - 8.4.2.1 Alcances y requisitos generales
    - 8.4.2.2 Momentos flexionantes de diseño
    - 8.4.2.3 Flexión y flexocompresión
    - 8.4.2.4 Elementos de refuerzo en los extremos de muros
    - 8.4.2.5 Fuerza cortante
    - 8.4.2.6 Muros acoplados
- 8.5 Losas apoyadas en su perímetro
- 8.6 Losas planas
- 8.7 Conexiones
  - 8.7.1 Detalles del refuerzo en intersecciones de columnas con vigas o losas
  - 8.7.2 Resistencia del concreto en intersecciones
  - 8.7.3 Anclaje del refuerzo longitudinal que termina en un nudo
- 8.8 Diafragmas y elementos a compresión
  - 8.8.1 Alcance
  - 8.8.2 Firmes colados sobre elementos prefabricados
  - 8.8.3 Espesor mínimo del firme
  - 8.8.4 Diseño
  - 8.8.5 Refuerzo
  - 8.8.6 Elementos de refuerzo en los extremos
- 8.9 Elementos en cimentaciones

## **9. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DUCTILIDAD ALTA**

- 9.1 Requerimientos especiales
- 9.2 Vigas
  - 9.2.1 Requisitos geométricos
  - 9.2.2 Refuerzo longitudinal
  - 9.2.3 Refuerzo transversal para confinamiento
  - 9.2.4 Requisitos para fuerza cortante
- 9.3 Columnas
  - 9.3.1 Requisitos geométricos
  - 9.3.2 Resistencia mínima a flexión de columnas
  - 9.3.3 Refuerzo longitudinal
  - 9.3.4 Requisitos para fuerza cortante
    - 9.3.4.1 Criterio y fuerza de diseño
    - 9.3.4.2 Contribución del concreto a la resistencia
    - 9.3.4.3 Refuerzo transversal por cortante
- 9.4 Muros
  - 9.4.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas
  - 9.4.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano
    - 9.4.2.1 Alcances y requisitos generales
    - 9.4.2.2 Momentos flexionantes de diseño
    - 9.4.2.3 Flexocompresión
    - 9.4.2.4 Elementos de refuerzo en los extremos de muro

- 9.4.2.5 Fuerza cortante
- 9.5 Losas apoyadas en su perímetro
- 9.6 Losas planas
- 9.7 Conexiones viga-columna
  - 9.7.1 Requisitos generales
  - 9.7.2 Refuerzo transversal horizontal
  - 9.7.3 Refuerzo transversal vertical
  - 9.7.4 Resistencia a fuerza cortante
  - 9.7.5 Anclaje del refuerzo longitudinal
    - 9.7.5.1 Barras que terminan en el nudo
    - 9.7.5.2 Barras continuas a través del nudo
  - 9.7.6 Resistencia del concreto en las intersecciones
- 9.8 Conexiones viga-columna con articulaciones alejadas de la cara de la columna
  - 9.8.1 Requisitos generales
  - 9.8.2 Refuerzo longitudinal de las vigas
  - 9.8.3 Resistencia mínima a flexión de columnas
  - 9.8.4 Uniones viga-columna
- 9.9 Diafragmas y elementos a compresión
  - 9.9.1 Alcance
  - 9.9.2 Firmes colados sobre elementos prefabricados
  - 9.9.3 Espesor mínimo del firme
  - 9.9.4 Diseño
  - 9.9.5 Refuerzo
  - 9.9.6 Elementos de refuerzo en los extremos
  - 9.9.7 Elementos de cimentaciones

## **10. CASOS EN LOS QUE NO APLICA LA TEORÍA GENERAL DE FLEXIÓN (ELEMENTOS CON DISCONTINUIDADES)**

- 10.1 Ménsulas
  - 10.1.1 Requisitos generales
  - 10.1.2 Dimensionamiento del refuerzo
  - 10.1.3 Detallado del refuerzo
  - 10.1.4 Área de apoyo
- 10.2 Vigas con apoyos no monolíticos
  - 10.2.1 Vigas con extremos completos
    - 10.2.1.1 Refuerzo del extremo completo
  - 10.2.2 Vigas con extremos recortados
    - 10.2.2.1 Requisitos geométricos
    - 10.2.2.2 Refuerzo del extremo recortado
    - 10.2.2.3 Anclaje del refuerzo del extremo recortado
    - 10.2.2.4 Detallado
- 10.3 Vigas de gran peralte
  - 10.3.1 Resistencia a flexión de vigas de gran peralte
  - 10.3.2 Disposición del refuerzo por flexión
  - 10.3.3 Fuerza cortante en vigas de gran peralte
    - 10.3.3.1 Sección crítica
    - 10.3.3.2 Fuerza cortante que toma el concreto
    - 10.3.3.3 Fuerza cortante que toma el refuerzo transversal
    - 10.3.3.4 Refuerzo mínimo
    - 10.3.3.5 Limitaciones para  $V_u$
  - 10.3.4 Disposición del refuerzo por fuerza cortante
  - 10.3.5 Revisión de las zonas a compresión
  - 10.3.6 Dimensionamiento de los apoyos
  - 10.3.7 Vigas de gran peralte que unen muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano (vigas de acoplamiento)

## **11. ELEMENTOS PRESFORZADOS**

- 11.1 Introducción
- 11.1.1 Definición de elementos de acero para presfuerzo
- 11.2 Requerimientos de resistencia y servicio para miembros a flexión presforzados
- 11.3 Estados límite de falla
- 11.3.1 Flexión y flexocompresión
- 11.3.1.1 Esfuerzo en el acero de presfuerzo en elementos a flexión
- 11.3.1.2 Refuerzo mínimo en elementos a flexión
- 11.3.1.3 Refuerzo máximo en elementos a flexión
- 11.3.1.4 Secciones T sujetas a flexión
- 11.3.1.5 Refuerzo transversal en miembros a flexocompresión
- 11.3.2 Fuerza cortante
- 11.3.3 Pandeo debido al presfuerzo
- 11.3.4 Torsión
- 11.4 Estados límite de servicio
- 11.4.1 Esfuerzos permisibles en el concreto
- 11.4.1.1 Esfuerzos permisibles en el concreto en transferencia
- 11.4.1.2 Esfuerzos permisibles en el concreto bajo cargas de servicio
- 11.4.1.3 Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo
- 11.4.1.4 Deflexiones
- 11.4.2 Elementos parcialmente presforzados
- 11.4.2.1 Esfuerzos permisibles en el concreto
- 11.4.2.2 Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo
- 11.4.2.3 Deflexiones
- 11.4.2.4 Agrietamiento
- 11.5 Pérdidas de presfuerzo
- 11.5.1 Pérdidas de presfuerzo en elementos pretensados
- 11.5.2 Pérdidas de presfuerzo en elementos postensados
- 11.5.3 Criterios de valuación de las pérdidas de presfuerzo
- 11.5.4 Indicaciones en planos
- 11.6 Requisitos complementarios
- 11.6.1 Zonas de anclaje
- 11.6.1.1 Geometría
- 11.6.1.2 Refuerzo
- 11.6.1.3 Esfuerzos permisibles de aplastamiento en el concreto de elementos postensados para edificios
- 11.6.2 Longitud de desarrollo y de transferencia del acero de presfuerzo
- 11.6.3 Anclajes y acopladores para postensado
- 11.6.4 Revisión de los extremos con continuidad
- 11.6.5 Recubrimiento en elementos de concreto presforzado
- 11.6.5.1 Elementos que no están en contacto con el terreno
- 11.6.5.2 Elementos de concreto presforzado en contacto con el terreno
- 11.6.5.3 Elementos de concreto presforzado expuestos a agentes agresivos
- 11.6.5.4 Barras de acero ordinario en elementos de concreto presforzado
- 11.6.6 Separación entre elementos de acero para presfuerzo
- 11.6.6.1 Separación libre horizontal entre alambres y entre torones
- 11.6.6.2 Separación libre horizontal entre ductos y postensado
- 11.6.6.3 Separación libre vertical entre alambres y entre torones
- 11.6.6.4 Separación libre vertical entre ductos de postensado
- 11.6.6.5 Separación libre vertical y horizontal entre barras de acero ordinario en elementos de concreto presforzado
- 11.6.7 Protección contra corrosión
- 11.6.8 Resistencia al fuego
- 11.6.9 Ductos para postensado
- 11.6.10 Lechada para tendones de presfuerzo
- 11.7 Losas postensadas con tendones no adheridos
- 11.7.1 Requisitos generales
- 11.7.1.1 Definiciones
- 11.7.1.2 Losas planas apoyadas en columnas

- 11.7.1.3 Losas apoyadas en vigas
- 11.7.1.4 Factores de reducción
- 11.7.2 Estados límite de falla
  - 11.7.2.1 Flexión
  - 11.7.2.2 Fuerza cortante
- 11.7.3 Sistemas de losas postensadas-columnas bajo sismo
- 11.7.4 Estados límite de servicio
  - 11.7.4.1 Esfuerzos permisibles en el concreto
  - 11.7.4.2 Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo
  - 11.7.4.3 Deflexiones
  - 11.7.4.4 Agrietamiento
  - 11.7.4.5 Corrosión
  - 11.7.4.6 Resistencia al fuego
- 11.7.5 Zonas de anclaje

## **12. CONCRETOS ESPECIALES**

- 12.1 Definición
- 12.2 Concreto de alta resistencia
  - 12.2.1 Empleo de concretos de alta resistencia
    - 12.2.1.1 Disposiciones generales
    - 12.2.1.2 Limitaciones al empleo de concretos de alta resistencia
  - 12.2.2 Propiedades mecánicas
    - 12.2.2.1 Módulo de elasticidad
    - 12.2.2.2 Resistencia a tensión
  - 12.2.3 Contracción por secado
  - 12.2.4 Flujo plástico
- 12.3 Concreto autocompactante
  - 12.3.1 Alcance
  - 12.3.2 Diseño estructural
  - 12.3.3 Propiedades de los materiales
    - 12.3.3.1 Cemento
    - 12.3.3.2 Agregados
    - 12.3.3.3 Aditivos
  - 12.3.4 Propiedades del concreto autocompactante
  - 12.3.5 Composición
  - 12.3.6 Consistencia
  - 12.3.7 Propiedades mecánicas
    - 12.3.7.1 Resistencia a compresión
    - 12.3.7.2 Módulo de elasticidad
    - 12.3.7.3 Resistencia a fuerza cortante
  - 12.3.8 Contracción por secado
  - 12.3.9 Flujo plástico
- 12.4 Concreto ligero
  - 12.4.1 Requisitos generales
  - 12.4.2 Requisitos complementarios
- 12.5 Concretos reforzados con fibras
  - 12.5.1 Alcance
  - 12.5.2 Propiedades de los materiales
    - 12.5.2.1 Fibras
    - 12.5.2.2 Concreto
  - 12.5.3 Criterios de diseño
  - 12.5.4 Propiedades mecánicas
    - 12.5.4.1 Resistencia a compresión
    - 12.5.4.2 Resistencia a tensión
    - 12.5.4.3 Resistencia a flexión
    - 12.5.4.4 Tenacidad en flexión

- 12.5.4.5 Desempeño bajo cargas dinámicas
- 12.5.5 Contracción por secado y flujo plástico
- 12.5.6 Resistencia a congelación-deshielo
- 12.5.7 Resistencia a abrasión/cavitación/erosión
- 12.6 Concreto lanzado
  - 12.6.1 Proceso de lanzado
    - 12.6.1.1 Proceso de mezcla seca
    - 12.6.1.2 Proceso de mezcla húmeda
  - 12.6.2 Comparación de los procesos
    - 12.6.2.1 Concreto lanzado con agregado grueso
  - 12.6.3 Propiedades
    - 12.6.3.1 Resistencia a compresión
    - 12.6.3.2 Propiedades a flexión
    - 12.6.3.3 Resistencia a la adherencia
    - 12.6.3.4 Contracción por secado
    - 12.6.3.5 Absorción y volumen de vacíos permeables
    - 12.6.3.6 Otras propiedades
- 12.7 Concretos reciclados
  - 12.7.1 Requisitos generales
  - 12.7.2 Requisitos para el agregado grueso reciclado
  - 12.7.3 Durabilidad
  - 12.7.4 Diseño estructural

### **13. CONCRETO SIMPLE**

- 13.1 Limitaciones
- 13.2 Juntas
- 13.3 Métodos de diseño
- 13.4 Esfuerzos de diseño

### **14. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO**

- 14.1 Esfuerzos bajo condiciones de servicio
- 14.2 Deflexiones
  - 14.2.1 Deflexiones en elementos no presforzados que trabajan en una dirección
    - 14.2.1.1 Deflexiones inmediatas
    - 14.2.1.2 Deflexiones diferidas
- 14.3 Agrietamiento en elementos no presforzados que trabajan en una dirección
- 14.4 Vibración
  - 14.4.1 Criterio general
  - 14.4.2 Percepción humana
- 14.5 Resistencia al fuego

### **15. CONSTRUCCIÓN**

- 15.1 Cimbra
  - 15.1.1 Disposiciones generales
  - 15.1.2 Descimbrado
- 15.2 Acero
  - 15.2.1 Disposiciones generales
  - 15.2.2 Control de obra
  - 15.2.3 Requisitos y control de calidad de unas uniones soldadas
    - 15.2.3.1 Requisitos
    - 15.2.3.2 Control de calidad
  - 15.2.4 Requisitos y control de calidad de uniones con dispositivos mecánicos
    - 15.2.4.1 Requisitos
    - 15.2.4.2 Control de calidad
  - 15.2.5 Extensiones futuras
- 15.3 Concreto

- 15.3.1 Materiales componentes
- 15.3.2 Elaboración del concreto
- 15.3.3 Requisitos y control del concreto fresco
- 15.3.4 Requisitos y control del concreto endurecido
  - 15.3.4.1 Resistencia media de diseño de la mezcla
  - 15.3.4.2 Resistencia a compresión
  - 15.3.4.3 Módulo de elasticidad
- 15.3.5 Transporte
- 15.3.6 Colocación y compactación
- 15.3.7 Temperatura
- 15.3.8 Morteros aplicados neumáticamente
- 15.3.9 Curado
- 15.3.10 Juntas de colado
- 15.3.11 Tuberías y ductos incluidos en el concreto
- 15.4 Requisitos para concreto presforzado
  - 15.4.1 Practicas de construcción
  - 15.4.2 Lechada para tendones adheridos
  - 15.4.3 Tendones de presfuerzo
  - 15.4.4 Aplicación y medición de la fuerza de presfuerzo
- 15.5 Requisitos para estructuras prefabricadas
- 15.6 Tolerancias
  - 15.6.1 Tolerancias en elementos colados en sitio
  - 15.6.2 Tolerancias en elementos prefabricados

## **16. EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN**

- 16.1 Definiciones
- 16.2 Alcance
- 16.3 Evaluación
  - 16.3.1 Necesidad de evaluación
  - 16.3.2 Proceso de evaluación
  - 16.3.3 Investigación y documentación de la edificación y de las acciones que la dañaron
  - 16.3.4 Determinación de las propiedades de los materiales
  - 16.3.5 Clasificación del daño en los elementos de la edificación
    - 16.3.5.1 Modo de comportamiento
    - 16.3.5.2 Magnitud del daño
  - 16.3.6 Evaluación del impacto de elementos dañados en el comportamiento de la edificación
    - 16.3.6.1 Impacto del daño
    - 16.3.6.2 Edificación sin daño estructural
    - 16.3.6.3 Capacidad remanente
    - 16.3.6.4 Cálculo de la capacidad estructural
    - 16.3.6.5 Consideraciones para evaluar la seguridad estructural
- 16.4 Determinación de la necesidad de rehabilitar
  - 16.4.1 Daño ligero
  - 16.4.2 Daño mayor
- 16.5 Rehabilitación
  - 16.5.1 Apuntalamiento, rehabilitación temporal y demolición
    - 16.5.1.1 Control del acceso
    - 16.5.1.2 Rehabilitación temporal
    - 16.5.1.3 Seguridad durante la rehabilitación
    - 16.5.1.4 Conexión entre los elementos existentes y materiales o elementos nuevos
  - 16.5.2 Generalidades
    - 16.5.2.1 Muros de rigidez
    - 16.5.2.2 Muros de relleno
    - 16.5.2.3 Marcos y contraventeos
- 16.6 Reparación
  - 16.6.1 Alcance

- 16.6.2 Reemplazo de concreto
- 16.6.3 Reparación de grietas mediante inyección de resina epóxica
- 16.6.4 Reparación de daños por corrosión
- 16.7 Pruebas al concreto
  - 16.7.1 Pruebas con esclerómetro
  - 16.7.2 Pruebas con ultrasonido
  - 16.7.3 Pruebas de resistencia por medio de corazones de concreto
  - 16.7.4 Análisis petrográfico
  - 16.7.5 Pruebas de carga
- 16.8 Reforzamiento
  - 16.8.1 Generalidades
  - 16.8.2 Encamisado de elementos de concreto
  - 16.8.3 Reforzamiento de muros de concreto

## **APÉNDICE A. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR FACTORES DE REDUCCIÓN Y LAS CANTIDADES MÁXIMAS DE ACERO A FLEXIÓN Y FLEXOCOMPRESIÓN**

### **APÉNDICE B. MÉTODO DE PUNTALES Y TENSORES**

- B.1 Notación
- B.2 Introducción
- B.3 Definiciones
- B.4 Procedimiento de diseño del modelo puntal – tensor
- B.5 Resistencia de los puntales
- B.6 Resistencia de los tensores
- B.7 Resistencia de las zonas nodales

### **APÉNDICE C. ARCOS Y CASCARONES**

- C.1 Análisis
- C.2 Simplificaciones en el análisis de cascarones y losas plegadas
- C.3 Dimensionamiento

## **APÉNDICE D. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA QUE TOMAN EN CUENTA EL GRADO DE CONFINAMIENTO DEL CONCRETO Y EL DETERIORO ACUMULADO**

- D.1 Diagramas momento-curvatura
    - D.1.1 Modelo elastoplástico del acero de refuerzo con endurecimiento curvo
    - D.1.2 Modelo elastoplástico para concreto confinado
    - D.1.3 Relación esfuerzo-deformación para cargas cíclicas a bajos rangos de deformación
      - D.1.3.1 Descarga en compresión
      - D.1.3.2 Descarga en tensión
      - D.1.3.3 Ramas de recargas
    - D.1.4 Efecto de la velocidad de la deformación en la curva esfuerzo-deformación
  - D.2 Diagramas momento rotación
  - D.3 Deterioro
- Referencias Apéndice D

## **NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

### **NOTACIÓN**

- A      área de concreto a tensión dividida entre el número de barras; también, área de la sección definida por el plano crítico de cortante por fricción; también, área de la sección transversal comprendida entre la cara a tensión por flexión de la losa postensada y el centro de gravedad de la sección completa, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)
- A<sub>1</sub>    área de contacto en la revisión por aplastamiento, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)
- A<sub>2</sub>    área de la figura de mayor tamaño, semejante al área de contacto y concéntrica con ella, que puede inscribirse en la superficie que recibe la carga, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)

$A_c$	área transversal del núcleo, hasta la orilla exterior del refuerzo transversal, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{cm}$	área bruta de la sección de concreto comprendida por el espesor del muro y la longitud de la sección en la dirección de la fuerza cortante de diseño, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{cp}$	área de la sección transversal del elemento, incluida dentro del perímetro del elemento de concreto, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{cr}$	área de la sección crítica para transmitir cortante entre columnas y losas o zapatas, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_f$	área del acero de refuerzo principal necesario para resistir el momento flexionante en ménsulas, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_g$	área bruta de la sección transversal, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_h$	área de los estribos complementarios horizontales en ménsulas, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_n$	área del acero de refuerzo principal necesario para resistir la fuerza de tensión horizontal $P_{hu}$ en ménsulas, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_o$	área bruta encerrada por el flujo de cortante en elementos a torsión, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{oh}$	área comprendida por el perímetro $p_h$ , mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_s$	área de refuerzo longitudinal en tensión en acero de elementos a flexión; también, área total del refuerzo longitudinal en columnas; o también, área de las barras principales en ménsulas, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_s'$	área de acero de refuerzo longitudinal en compresión en elementos a flexión, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{s,min}$	área mínima de refuerzo longitudinal de secciones rectangulares, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{sd}$	área total del acero de refuerzo longitudinal de cada elemento diagonal en vigas diafragma que unen muros sujetos a fuerzas horizontales en un plano, también llamadas vigas de acoplamiento, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{sh}$	área del acero de refuerzo transversal por confinamiento en elementos a flexocompresión, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{sm}$	área del acero de refuerzo de integridad estructural en losas planas postensadas, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{sp}$	área del acero de refuerzo que interviene en el cálculo de la resistencia a flexión de vigas T e I sin acero de compresión; también, área del acero de prefuerzo en la zona de tensión, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{st}$	área del acero de refuerzo longitudinal requerido por torsión, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_t$	área transversal de una rama de estribo que resiste torsión, colocado a una separación $s$ , mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{tr}$	área total de las secciones rectas de todo el refuerzo transversal comprendido en la separación $s$ , y que cruza el plano potencial de agrietamiento entre las barras que se anclan, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_v$	área de todas las ramas de refuerzo por tensión diagonal comprendido en una distancia $s$ ; también, en vigas diafragma, área de acero de refuerzo vertical comprendida en una distancia $s$ , mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{vf}$	área del acero de refuerzo por cortante por fricción, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{vh}$	área de acero de refuerzo horizontal comprendida en una distancia $s_h$ en vigas diafragma, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{vm}$	área de acero de refuerzo paralelo a la fuerza cortante de diseño comprendida en una distancia $s_m$ en muros y segmentos de muro, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A_{vn}$	área de acero de refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño comprendida en una distancia $s_n$ en muros y segmentos de muro, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$A$	profundidad del bloque de esfuerzos a compresión en el concreto; también, en ménsulas, distancia de la carga al paño donde arranca la ménsula, mm (cm)
$a_1, a_2$	respectivamente, claros corto y largo de un tablero de una losa, o lados corto y largo de una zapata, m
$a_s$	área transversal de una barra, mm <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )
$a_{s1}$	área transversal del refuerzo por cambios volumétricos, por unidad de ancho de la pieza, mm <sup>2</sup> /mm (cm <sup>2</sup> /cm)
$B_e$	ancho de losa usado para calcular la rigidez a flexión de vigas equivalentes, mm (cm)
$B_t$	ancho total de la losa entre las líneas medias de los tableros adyacentes al eje de columnas considerado, mm (cm)
$B$	ancho de una sección rectangular, o ancho del patín a compresión en vigas T, I o L, o ancho de una viga ficticia para resistir fuerza cortante en losas o zapatas, mm (cm)
$b'$	ancho del alma de una sección T, I o L, mm (cm)
$b_c$	dimensión del núcleo de un elemento a flexocompresión, normal al refuerzo de área $A_{sh}$ , mm (cm)
$b_e$	ancho efectivo para resistir fuerza cortante de la unión viga-columna, mm (cm)
$b_o$	perímetro de la sección crítica por tensión diagonal alrededor de cargas concentradas a reacciones en losas y zapatas, mm (cm)
$b_v$	ancho del área de contacto en vigas de sección compuesta, mm (cm)
$b_w$	ancho, ancho promedio del alma o diámetro de la sección circular
$C_f$	coeficiente de deformación axial diferida final
$C_m$	factor definido en el inciso 3.2.2.2 y que toma en cuenta la forma del diagrama de momentos flexionantes
$C$	separación o recubrimiento; también, profundidad del eje neutro medida desde la fibra extrema en compresión; o también, en muros, la mayor profundidad del eje neutro calculada para la carga axial de diseño y el momento resistente (igual al momento último resistente con factor de resistencia unitario) y consistente con el desplazamiento lateral de diseño, $\delta_u$ , mm (cm)

$c_1$	dimensión horizontal del capitel en su unión con el ábaco, paralela a la dirección de análisis; también, dimensión paralela al momento transmitido en losas planas, mm (cm)
$c_2$	dimensión horizontal del capitel en su unión con el ábaco, normal a la dirección de análisis; también, dimensión normal al momento transmitido en losas planas, mm (cm)
$D$	diámetro de una columna, mm (cm)
$D_p$	diámetro de un pilote en la base de la zapata, mm (cm)
$D$	peralte efectivo en la dirección de flexión; es decir, distancia entre el centroide del acero de tensión y la fibra extrema de compresión, mm (cm)
$d'$	distancia entre el centroide del acero de compresión y la fibra extrema a compresión, mm (cm)
$d_b$	diámetro nominal de una barra, mm (cm)
$d_c$	recubrimiento de concreto medido desde la fibra extrema en tensión al centro de la barra más próxima a ella, mm (cm)
$d_p$	distancia de la fibra extrema en compresión al centroide de los tendones de presfuerzo, mm (cm)
$d_s$	distancia entre la fibra extrema en compresión y el centroide del acero de refuerzo longitudinal ordinario a tensión, mm (cm)
$E_c$	módulo de la elasticidad del concreto de peso normal, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$E_L$	módulo de elasticidad del concreto ligero, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$E_s$	módulo de elasticidad del acero, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$E$	base de los logaritmos naturales
$e_x$	excentricidad en la dirección X de la fuerza normal en elementos a flexocompresión, mm (cm)
$e_y$	excentricidad en la dirección Y de la fuerza normal en elementos a flexocompresión, mm (cm)
$F_{ab}$	factor de amplificación de momentos flexionantes en elementos a flexocompresión con extremos restringidos lateralmente
$F_{as}$	factor de amplificación de momentos flexionantes en elementos a flexocompresión con extremos no restringidos lateralmente
$F_R$	factor de resistencia
$f_b$	esfuerzo de aplastamiento permisible, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_c'$	resistencia especificada del concreto a compresión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_c''$	magnitud del bloque equivalente de esfuerzos del concreto a compresión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$\bar{f}_c$	resistencia media a compresión del concreto, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_c$	resistencia nominal del concreto a compresión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{ci}'$	resistencia a compresión del concreto a la edad en que ocurre la transferencia, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{cp}$	esfuerzo de compresión efectivo debido al presfuerzo, después de todas las pérdidas, en el centroide de la sección transversal o en la unión del alma y el patín, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_d$	esfuerzo a tensión producido por carga muerta en la fibra extrema de la sección
$\bar{f}_f$	resistencia media a tensión por flexión del concreto o módulo de rotura, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_f$	resistencia nominal del concreto a flexión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{pc}$	esfuerzo de compresión en el concreto, después de que han ocurrido todas las pérdidas de presfuerzo, en el centro de la sección transversal que resiste las cargas aplicadas externamente o en la unión del alma y el patín cuando el centro está localizado dentro del patín. En un elemento compuesto, $f_{pc}$ es el esfuerzo de compresión resultante en el centro de la sección compuesta, o en la unión del alma y el patín cuando el centro se encuentra dentro del patín, debido tanto al presfuerzo como a los momentos resistidos por el elemento prefabricado actuando individualmente
$f_{pe}$	esfuerzo de compresión en el concreto, debido sólo a las fuerzas efectivas del presfuerzo, una vez ocurridas las pérdidas de presfuerzo
$f_s$	esfuerzo en el acero en condiciones de servicio, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{se}$	esfuerzo en el acero de presfuerzo en condiciones de servicio después de pérdidas, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{sp}$	esfuerzo en el acero de presfuerzo cuando se alcanza la resistencia a flexión del elemento, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{sr}$	esfuerzo resistente del acero de presfuerzo, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$\bar{f}_t$	resistencia media del concreto a tensión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_t$	resistencia nominal del concreto a tensión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_y$	esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{yh}$	esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo transversal o, en vigas diafragma, del acero de refuerzo horizontal, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{yp}$	esfuerzo convencional de fluencia del acero de presfuerzo, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$f_{yt}$	esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo transversal necesario para resistir torsión, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )

$f_{yv}$	esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo transversal necesario para resistir fuerza cortante, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
$H$	longitud libre de un miembro a flexocompresión, o altura del segmento o tablero del muro en consideración, en ambos casos perpendicular a la dirección de la fuerza cortante, mm (cm)
$H'$	longitud efectiva de pandeo de un miembro a flexocompresión, mm (cm)
$H_{cr}$	altura crítica de un muro, mm (cm)
$H_m$	altura total de un muro, mm (cm)
$H_s$	altura del segmento de un muro, mm (cm)
$H$	peralte total de un elemento, o dimensión transversal de un miembro paralela a la flexión o a la fuerza cortante; también, altura de entrepiso eje a eje, mm (cm)
$h_i$	altura del entrepiso $i$ , medida entre ejes
$h_1$	distancia entre el eje neutro y el centroide del refuerzo principal de tensión, mm (cm)
$h_2$	distancia entre el eje neutro y la fibra más esforzada a tensión, mm (cm)
$h_s, h_p$	peralte de viga secundaria y principal, respectivamente, mm (cm)
$I_1, I_2, I_3$	momentos de inercia para calcular deflexiones inmediatas, mm <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )
$I_{ag}$	momento de inercia de la sección transformada agrietada, mm <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )
$I_e$	momento de inercia efectivo, mm <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )
$I_g$	momento de inercia centroidal de la sección bruta de concreto de un miembro, mm <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )
$I_p$	índice de presfuerzo
$J_c$	parámetro para el cálculo del esfuerzo cortante actuante debido a transferencia de momento entre columnas y losas o zapatas, mm <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )
$K$	coeficiente de fricción por desviación accidental por metro de tendón, 1/m
$K_{tr}$	índice de refuerzo transversal, mm (cm)
$K$	factor de longitud efectiva de pandeo de un miembro a flexocompresión; también, coeficiente para determinar el peralte mínimo en losas planas
$L$	claro de un elemento; también, longitud de un muro o de un tablero de muro en la dirección de la fuerza cortante de diseño; o también, en concreto presforzado, longitud del tendón desde el extremo donde se une al gato hasta el punto $x$ , mm (cm)
$L_d$	longitud de desarrollo, mm (cm)
$L_{db}$	longitud básica de desarrollo, mm (cm)
$L_m$	longitud horizontal del muro, mm (cm)
$L_s$	longitud de un segmento de un muro mm (cm)
$l_1, l_2$	claros centro a centro en cada dirección principal para determinar el refuerzo de integridad estructural en losas planas postensadas, m
$M$	momento flexionante que actúa en una sección, N-mm (kg-cm)
$M_1$	menor momento flexionante en un extremo de un miembro a flexocompresión; también, en marcos dúctiles con articulaciones alejadas de las columnas, demanda de momento flexionante en la cara de la columna (sección 1) debida a la formación de la articulación plástica en la sección 2, N-mm (kg-cm)
$M_2$	mayor momento flexionante en un extremo de un miembro a flexocompresión; también, en marcos dúctiles con articulaciones plásticas alejadas de la columna, momentos flexionantes resistentes asociados a la formación de la articulación plástica en la sección 2, N-mm (kg-cm)
$M_{1b}, M_{2b}$	momentos flexionantes multiplicados por el factor de carga, en los extremos respectivos donde actúan $M_1$ y $M_2$ , producidos por las cargas que no causan un desplazamiento lateral apreciable, calculado con un análisis elástico de primer orden, N-mm (kg-cm)
$M_{1s}, M_{2s}$	momentos flexionantes multiplicados por el factor de carga, en los extremos respectivos donde actúan $M_1$ y $M_2$ , producidos por las cargas que causan un desplazamiento lateral apreciable, calculado con un análisis elástico de primer orden, N-mm (kg-cm)
$M_{a1}, M_{a2}$	en marcos dúctiles con articulaciones plásticas alejadas de la columna, momentos flexionantes de diseño en las secciones 1 y 2, respectivamente, obtenidos del análisis, N-mm (kg-cm)
$M_{ag}$	momento de agrietamiento, N-mm (kg-cm)
$M_c$	momento flexionante amplificado resultado de la revisión por esbeltez, N-mm (kg-cm)
$M_{CRe}$	momento de agrietamiento de la sección debido a cargas externas, N-mm (kg-cm)
$M_e$	momento flexionante resistente de la columna al paño del nudo de marcos dúctiles, calculado con factor de resistencia igual a uno, N-mm (kg-cm)
$M_g$	momento flexionante resistente de la viga al paño del nudo de marcos dúctiles, calculado con factor de resistencia igual a uno y esfuerzo de fluencia igual a $1.25 f_y$ , N-mm (kg-cm)

$M_m$   
 $M_{m\acute{a}x}$  momento flexionante máximo correspondiente al nivel de carga para el cual se estima la deflexión, N-mm (kg-cm)  
 $M_R$  momento flexionante resistente de diseño, N-mm (kg-cm)  
 $M_{Rp}$  momento flexionante resistente suministrado por el acero presforzado, N-mm (kg-cm)  
 $M_{Rr}$  momento flexionante resistente suministrado por el acero ordinario, N-mm (kg-cm)  
 $M_{Rx}$  momento flexionante resistente de diseño alrededor del eje X, N-mm (kg-cm)  
 $M_{Ry}$  momento flexionante resistente de diseño alrededor del eje Y, N-mm (kg-cm)  
 $M_u$  momento flexionante de diseño, N-mm (kg-cm)  
 $M_{ux}$  momento flexionante de diseño alrededor del eje X, N-mm (kg-cm)  
 $M_{uy}$  momento flexionante de diseño alrededor del eje Y, N-mm (kg-cm)  
 $M$  relación entre claros corto y largo de un tablero de una losa, o lados corto y largo de una zapata:

$$m = \frac{a_1}{a_2}$$

$N_c$  fuerza a tensión en el concreto debida a cargas muerta y viva de servicio, N (kg)  
 $N_u$  fuerza de diseño de compresión normal al plano crítico en la revisión por fuerza cortante por fricción, N (kg)  
 $N$  número de barras sobre el plano potencial de agrietamiento  
 $P$  carga axial que actúa en una sección; también, carga concentrada en losas, N (kg)  
 $P_0$  valor de la fuerza que es necesario aplicar en el gato para producir una tensión determinada  $P_x$  en el tendón postensado, N (kg)  
 $P_c$  carga axial crítica, N (kg)  
 $P_{hu}$  fuerza de tensión horizontal de diseño en ménsulas, N (kg)  
 $P_R$  carga normal resistente de diseño, N (kg)  
 $P_{R0}$  carga axial resistente de diseño, N (kg)  
 $P_{Rx}$  carga normal resistente de diseño aplicada con una excentricidad  $e_x$ , N (kg)  
 $P_{Ry}$  carga normal resistente de diseño aplicada con una excentricidad  $e_y$ , N (kg)  
 $P_u$  fuerza axial de diseño, N (kg)  
 $P_{vu}$  fuerza vertical de diseño en ménsulas, N (kg)  
 $P_x$  tensión en el tendón postensado en el punto  $x$ , N (kg)  
 $P$  cuantía del acero de refuerzo longitudinal a tensión:

$$p = \frac{A_s}{bd} \text{ en vigas;}$$

$$p = \frac{A_s}{td} \text{ en muros; y}$$

$$p = \frac{A_s}{A_g} \text{ en columnas.}$$

$p'$  cuantía del acero de refuerzo longitudinal a compresión en elementos a flexión:

$$p' = \frac{A_s'}{bd}$$

$p_{cp}$  perímetro exterior de la sección transversal de concreto del elemento, mm (cm)  
 $p_h$  perímetro, medido en el eje, del estribo de refuerzo por torsión, mm (cm)  
 $p_m$  cuantía del refuerzo paralelo a la dirección de la fuerza cortante de diseño distribuido en el área bruta de la sección transversal normal a dicho refuerzo  
 $p_n$  cuantía de refuerzo perpendicular a la dirección de la fuerza cortante de diseño distribuido en el área bruta de la sección transversal normal a dicho refuerzo  
 $p_p$  cuantía de acero de presfuerzo:

$$p_p = \frac{A_{sp}}{bd_p}$$

$p_s$  cuantía volumétrica de refuerzo helicoidal o de estribos circulares en columnas  
 $p_{sp}$  cuantía de acero de refuerzo longitudinal que interviene en el cálculo de la resistencia a flexión de vigas T e I sin acero a compresión:

$$p_{sp} = \frac{A_{sp}}{bd}$$

$Q$  factor de comportamiento sísmico

$Q$  índice de refuerzo a tensión:

$$q = \frac{P f_y}{f_c''}$$

$q'$  índice de refuerzo a compresión:

$$q' = \frac{P' f_y}{f_c''}$$

$R_b$  distancia del centro de la carga al borde más próximo a ella, mm (cm)

$R$  radio de giro de una sección; también, radio del círculo de igual área a la de aplicación de la carga concentrada, mm (cm)

$S_{Lh}$  separación libre horizontal entre tendones y ductos, mm (cm)

$S_{Lv}$  separación libre vertical entre tendones y ductos, mm (cm)

$S$  separación del refuerzo transversal, mm (cm)

$s_h$  separación del acero de refuerzo horizontal en vigas diafragma, mm (cm)

$s_m$  separación del refuerzo paralelo a la fuerza cortante de diseño, mm (cm)

$s_n$  separación del refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño, mm (cm)

$T$  momento torsionante que actúa en una sección, N-mm (kg-cm)

$T_{RO}$  momento torsionante resistente de diseño de un miembro sin refuerzo por torsión, N-mm (kg-cm)

$T_u$  momento torsionante de diseño, N-mm (kg-cm)

$T_{uh}$  momento torsionante de diseño en la condición hiperestática, N-mm (kg-cm)

$T_{ui}$  momento torsionante de diseño en la condición isostática, N-mm (kg-cm)

$T$  espesor del patín en secciones I o L, o espesor de muros, mm (cm)

$U$  cuando se considere la acción de carga muerta y carga viva,  $u$  será la relación entre la carga axial de diseño producida por carga muerta y carga viva sostenida, y la carga axial de diseño total producida por carga muerta y carga viva. Cuando se considere la acción de carga muerta, viva y accidental,  $u$  será la relación entre la máxima fuerza cortante de piso sostenida factorizada y la máxima fuerza cortante factorizada en el mismo piso asociada a la misma combinación de cargas. En ningún caso se tomará  $u$  mayor que 1

$V$  fuerza cortante que actúa en una sección, N (kg)

$V_{cR}$  fuerza cortante de diseño que toma el concreto, N (kg)

$V_i$  fuerza cortante del entrepiso  $i$ , N (kg)

$V_R$  fuerza cortante de diseño por fricción, N (kg)

$V_{sR}$  fuerza cortante de diseño que toma el acero de refuerzo transversal, N (kg)

$V_u$  fuerza cortante de diseño, N (kg)

$V_{ci}$  resistencia nominal a cortante resistida por el concreto cuando se desarrollan grietas inclinadas por la combinación de momento y cortante, N (kg)

$V_{cw}$  resistencia nominal a cortante resistida por el concreto cuando se desarrollan grietas inclinadas por esfuerzos principales de tensión altos (agrietamiento en elementos con almas delgadas), N (kg)

$V_d$  fuerza cortante sin factorizar en la sección debida a carga muerta, N (kg)

$V_p$  componente vertical de la fuerza efectiva de presfuerzo en la sección, N (kg)

$v_{cR}$  esfuerzo cortante máximo de diseño del concreto, MPa (kg/cm<sup>2</sup>)

$V_R$  resistencia a fuerza cortante, N (kg)

$v_h$  esfuerzo cortante horizontal entre los elementos que forman una viga compuesta, MPa (kg/cm<sup>2</sup>)

$v_u$  esfuerzo cortante de diseño, MPa (kg/cm<sup>2</sup>)

$W_u$  suma de las cargas de diseño muertas y vivas, multiplicadas por el factor de carga correspondiente, acumuladas desde el extremo superior del edificio hasta el entrepiso considerado, N (kg)

$W$  carga uniformemente distribuida, kN/m<sup>2</sup> (kg/m<sup>2</sup>)

$w_u$  carga de diseño de la losa postensada, kN/m<sup>2</sup> (kg/m<sup>2</sup>)

$X$  punto en el cual se valúan la tensión y pérdidas por postensado; también, dimensión en la dirección en que se considera la tolerancia, mm (cm)

$x_1$  dimensión mínima del miembro medida perpendicularmente al refuerzo por cambios volumétricos, mm (cm)

$Y$  longitud de ménsulas restando la tolerancia de separación, mm (cm)

$Z$	brazo del par interno en vigas diafragma y muros, mm (cm)
$\alpha$	fracción del momento flexionante que se transmite por excentricidad de la fuerza cortante en losas planas o zapatas
$\beta_1$	factor definido en el inciso 3.5.e que especifica la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos a compresión, como una fracción de la profundidad del eje neutro, $c$
$\gamma$	relación del lado corto al lado largo del área donde actúa la carga o reacción
$\Delta_i$	desplazamiento de entrepiso producido por la fuerza cortante de entrepiso $V_i$ , mm (cm)
$\delta_f$	deformación axial final, mm (cm)
$\delta_i$	deformación axial inmediata, mm (cm)
$\varepsilon_{cf}$	contracción por secado final
$\varepsilon_{sp}$	deformación unitaria del acero de presfuerzo cuando se alcanza el momento flexionante resistente de la sección
$\varepsilon_{yp}$	deformación unitaria convencional de fluencia del acero de presfuerzo
$\eta$	cambio angular total en el perfil del tendón desde el extremo donde actúa el gato hasta el punto $x$ , radianes
$\theta$	ángulo que el acero de refuerzo transversal por tensión diagonal forma con el eje de la pieza; también, ángulo con respecto al eje de la viga diafragma que forma el elemento de refuerzo diagonal, grados
$\lambda$	índice de estabilidad
$\mu$	coeficiente de fricción para diseño de cortante por fricción; también, coeficiente de fricción por curvatura en concreto presforzado
$\phi$	ángulo, con respecto al eje de la pieza, que forman las diagonales de compresión que se desarrollan en el concreto para resistir tensión según la teoría de la analogía de la armadura espacial, grados
$\Psi_A, \Psi_B$	cociente de $\Sigma(I/L)$ de las columnas, entre $\Sigma(I/L)$ de los miembros de flexión que llegan al extremo A o B de una columna, en el plano considerado

## DEFINICIONES

A continuación se definen los términos de uso general en estas Normas. Las definiciones especializadas aparecen en los capítulos correspondientes.

**Ábaco** - Proyección debajo de la losa usada para reducir la cantidad de refuerzo negativo sobre una columna o el espesor mínimo requerido para una losa, y para aumentar la resistencia a cortante de la losa.

**Acero de presfuerzo** - Elemento de acero de alta resistencia como alambre, barra, torón, o un paquete (tendón) de estos elementos, utilizado para aplicar fuerzas de presfuerzo al concreto.

**Acero extremo en tensión** - Refuerzo (presforzado o no presforzado) más alejado de la fibra extrema en compresión.

**Adiciones** - Materiales de naturaleza inorgánica que destacan por sus características puzolánicas o hidráulicas, finamente molidos.

**Aditivo** - Material distinto del agua, de los agregados o del cemento hidráulico, utilizado como componente del concreto y que se añade a éste antes o durante su mezclado a fin de modificar sus propiedades.

**Agregado** - Material granular como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulicos.

**Agregado ligero** - Agregado que cumple con los requisitos de la ASTM C330 y con una densidad cuando está suelto y seco de 1120 kg/m<sup>3</sup> o menos, determinado según la ASTM C29.

**Base de la estructura** - Nivel al cual se supone que los movimientos horizontales del suelo producidos por un sismo se imparten a la edificación. Este nivel no necesariamente coincide con el nivel del terreno.

**Capitel** - Pieza piramidal, poligonal o cónica que remata la parte superior de una columna.

**Carga de servicio** - La carga especificada por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal del cual esta NTC forma parte (sin factores de carga).

**Carga factorizada** - La carga multiplicada por los factores de carga apropiados, que se utiliza para diseñar los elementos utilizando el método de diseño por resistencia de estas Normas.

**Carga muerta** - Cargas muertas soportadas por un elemento, según se definen en las NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

**Carga viva** - Carga viva especificada en las NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

**Categoría de diseño sísmico** - Clasificación asignada a una estructura basada en su tipo de ocupación y en la severidad de los movimientos sísmicos del terreno para diseño en el lugar, como se define en el Reglamento y en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

**Columna** - Elemento con una relación entre altura y menor dimensión lateral mayor de 3 usado principalmente para resistir carga axial de compresión. Para un elemento de sección variable, la menor dimensión lateral es el promedio de las dimensiones superior e inferior del lado menor.

**Concreto** - Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos.

**Concreto ligero** - Concreto de peso ligero que contiene agregado fino y grueso de peso ligero, y que cumple con lo especificado en ASTM C330. Concreto con agregado liviano que tiene una densidad de equilibrio, tal como la define ASTM C567, entre 1440 y 1840 kg/m<sup>3</sup>.

**Concreto de peso normal** - Concreto que contiene agregados que cumplen con lo especificado en NMX-C-111-ONNCCE.

**Concreto estructural** - Todo concreto utilizado con propósitos estructurales incluyendo concreto simple y reforzado.

**Concreto prefabricado** - Concreto estructural construido en un lugar diferente al de su ubicación final en la estructura.

**Concreto presforzado** - Concreto estructural al que se le han introducido esfuerzos internos con el fin de reducir los esfuerzos potenciales de tensión en el concreto causados por las cargas.

**Concreto reforzado** - Concreto estructural reforzado con no menos de la cantidad mínima especificada de acero de refuerzo no presforzado.

**Concreto simple** - Concreto estructural sin refuerzo o con menos refuerzo que el mínimo especificado para concreto reforzado.

**Contraflecha** - Ligera curvatura convexa que se realiza en una viga o armadura para compensar cualquier flecha prevista cuando soporte un peso.

**Deformación unitaria neta de tensión** - Deformación unitaria de tensión cuando se alcanza la resistencia nominal, excluidas las deflexiones unitarias debidas al presfuerzo efectivo, flujo plástico, contracción y temperatura.

**Dispositivo de anclaje** - En postensado, el dispositivo usado para transferir la fuerza de postensado desde el acero de presfuerzo al concreto.

**Dispositivo básico de anclaje para un torón** - Dispositivo de anclaje usado con cualquier torón individual o barra individual de 16 mm o menos de diámetro, que satisfaga los requisitos para elementos de anclaje fabricados industrialmente, del ACI 423.6 "*Specification for Unbonded Single Strand Tendons*".

**Dispositivo básico de anclaje para varios torones** - Dispositivo de anclaje usado para varios torones, barras o alambres, o con barras mayores a 16 mm de diámetro, que satisface los requisitos para los esfuerzos de aplastamiento y la rigidez mínima de platina de la especificación para puentes de AASHTO, División I, Artículos 9.21.7.2.2 al 9.21.7.2.4.

**Dispositivo especial de anclaje** - Dispositivo de anclaje que satisface 18.15.1 y los ensayos de aceptación normalizados de AASHTO “*Standard Specifications for Highway Bridges*”, División II, Artículo 10.3.2.3.

**Ducto de postensado** - Ducto (liso o corrugado) para colocar el acero de presfuerzo que se requiere para aplicar el postensado.

**Elementos compuestos de concreto sujetos a flexión** - Elementos prefabricados de concreto o elementos construidos en obra sometidos a flexión, fabricados en etapas separadas, pero interconectados de tal manera que todos los elementos responden a las cargas como una unidad.

**Envoltura para tendones de presfuerzo no adheridos** - Material que encapsula el acero de presfuerzo para impedir la adherencia del acero de presfuerzo al concreto que lo rodea, para proporcionar protección contra la corrosión y para contener la envoltura inhibidora de la corrosión.

**Esfuerzo** - Fuerza por unidad de área.

**Estribo** - Refuerzo empleado para resistir esfuerzos de cortante y de torsión en un elemento estructural; por lo general barras, alambres o malla (de alambre liso o corrugado) electrosoldado ya sea sin dobleces o doblados en forma de L, de U o en formas rectangulares, y colocados perpendicularmente o en ángulo con respecto al refuerzo longitudinal. El término estribo se aplica normalmente al refuerzo transversal de elementos sometidos tanto a flexión como a compresión.

**Fricción por curvatura** - Fricción que resulta de los dobleces o la curvatura del trazado especificado de los tendones de presfuerzo.

**Fricción por desviación involuntaria** - En concreto presforzado, la fricción provocada por una desviación no intencional del ducto de presfuerzo de su perfil especificado.

**Fuerza del gato de tensionamiento** - En concreto presforzado, la fuerza que temporalmente ejerce el dispositivo que se utiliza para tensionar el acero de presfuerzo.

**Fuste** - Parte de una columna comprimida entre la base y el capitel.

**Grapas** - Barra o alambre doblados que abraza el refuerzo longitudinal. Es aceptable una barra o alambre continuo doblado en forma de círculo, rectángulo, u otra forma poligonal sin esquinas reentrantes

**Junta de contracción** - Muesca moldeada, aserrada o labrada en una estructura de concreto para crear un plano de debilidad y regular la ubicación del agrietamiento resultante de las variaciones dimensionales de diferentes partes de la estructura.

**Junta de expansión** - Separación entre partes adyacentes de una estructura de concreto, usualmente un plano vertical, en una ubicación definida en el diseño de tal modo que interfiera al mínimo con el comportamiento de la estructura, y al mismo tiempo permita movimientos relativos en tres direcciones y evite la formación de fisuras en otro lugar del concreto y a través de la cual se interrumpe parte o todo el refuerzo adherido.

**Límite de la deformación unitaria controlada por compresión** - Deformación unitaria neta en tensión bajo condiciones de deformación unitaria balanceada.

**Longitud de anclaje** - Longitud del refuerzo embebido en el concreto que se extiende más allá de una sección crítica.

**Longitud de desarrollo** - Longitud embebida del refuerzo, incluyendo torones de presfuerzo, en el concreto que se requiere para poder desarrollar la resistencia de diseño del refuerzo en una sección crítica.

**Longitud de transferencia** - Longitud embebida del torón de presfuerzo en el concreto que se requiere para transferir el presfuerzo efectivo al concreto.

**Materiales cementantes** - Materiales que tienen propiedades cementantes por sí mismos al ser utilizados en el concreto, tales como el cemento portland, los cementos hidráulicos mezclados y los cementos expansivos, o dichos materiales combinados con cenizas volantes, otras puzolanas crudas o calcinadas, microsílíce, y escoria granulada de alto horno o ambos.

**Módulo de elasticidad** - Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tensión o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material.

**Muro** - Elemento, generalmente vertical, empleado para encerrar o separar espacios.

**Muro estructural** - Muros diseñados para resistir combinaciones de cortantes, momentos y fuerzas axiales inducidas por movimientos sísmicos. Un muro de cortante es un muro estructural. Los muros estructurales se pueden clasificar en:

**Muro estructural de ductilidad alta** - Un muro construido en sitio que cumple con los requisitos del capítulo 9 de ésta NTC, además de los requisitos para los muros estructurales de concreto reforzado de ductilidad básica.

**Muro estructural prefabricado de ductilidad alta** - Muro prefabricado que cumple con los requisitos del capítulo 9 de ésta NTC, además de satisfacer los requisitos del muro estructural de concreto reforzado de ductilidad básica.

**Muro estructural prefabricado de ductilidad media** - Muro que cumple con todos los requisitos aplicables del capítulo 8 de ésta NTC, además de satisfacer los requisitos del muro estructural de concreto reforzado de ductilidad básica.

**Muro estructural de concreto reforzado de ductilidad baja** - Muro que cumple con los requisitos del capítulo 7 de ésta NTC.

**Muro estructural de concreto simple de ductilidad baja** - Muro que cumple con los requisitos del capítulo 7 de ésta NTC.

**Marco resistente a momento** - Marco en el cual los elementos y los nudos resisten las fuerzas a través de flexión, cortante y fuerza axial. Los marcos resistentes a momento se clasifican en:

**Marco resistente a momento de ductilidad alta** - Marco construido en sitio que cumple con los requisitos del capítulo 9 de ésta NTC, o un marco prefabricado que cumple con los requisitos del capítulo 11. Además, debe cumplir los requisitos para marcos resistentes a momento de ductilidad básica.

**Marco resistente a momentos de ductilidad media** - Marco construido en sitio que cumple con los requisitos del capítulo 8 de ésta NTC, además de los requisitos para marcos resistentes a momento de ductilidad básica.

**Marco resistente a momentos de ductilidad baja** - Marco prefabricado o construido en sitio que cumple con los requisitos del capítulo 7 de ésta NTC.

**Pedestal** - Elemento vertical en compresión que tiene una relación entre la altura sin apoyo y el promedio de la menor dimensión lateral no mayor a 3.

**Peralte efectivo de la sección** - La distancia medida desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal sometido a tensión.

**Postensado** - Método en el cual el acero de presfuerzo se tensiona después de que el concreto ha endurecido.

**Presfuerzo efectivo** - Esfuerzo en el acero de presfuerzo después de que han ocurrido todas las pérdidas.

**Pretensado** - Método en el cual el acero de presfuerzo se tensiona antes de la colocación del concreto.

**Puntales** - Elementos de apoyo verticales o inclinados diseñados para soportar el peso de la cimbra, del concreto y de las cargas de construcción sobre ellos.

**Puntales de reapuntamiento** - Puntales colocados ajustadamente bajo una losa de concreto u otro elemento estructural después que la cimbra y puntales originales han sido retirados de un área significativa, permitiendo así que la nueva losa o elemento estructural se deforme y soporte su propio peso y las cargas de construcción existentes antes de la instalación de los puntales de reapuntamiento.

**Refuerzo** - Material que cumple con lo especificado en el capítulo 2, excluyendo el acero de presfuerzo, a menos que se incluya en forma explícita.

**Refuerzo corrugado** - Barras de refuerzo corrugado, mallas de barras, alambre corrugado, refuerzo electrosoldado de alambre, que cumplan con las normas correspondientes.

**Refuerzo electrosoldado de alambre (mallas, castillos)** - Elementos de refuerzo compuestos por alambres lisos o corrugados, que cumplen con ASTM A 82 o A 496, respectivamente, fabricados en forma de hojas de acuerdo con ASTM A 185 o A 497, respectivamente.

**Refuerzo helicoidal** - Refuerzo continuo enrollado en forma de hélice cilíndrica.

**Refuerzo liso** - Refuerzo que no cumple con la definición de refuerzo corrugado.

**Esfuerzo de fluencia** - Esfuerzo de fluencia mínima especificada, o punto de fluencia del refuerzo. El esfuerzo de fluencia o el punto de fluencia deben determinarse en tensión, de acuerdo con las normas NMX-C-289 ONNCCE.

**Resistencia a la tensión indirecta (prueba brasileña)** - Resistencia a la tensión del concreto determinada de acuerdo con ASTM C 496.

**Resistencia de diseño** - Resistencia nominal multiplicada por un factor de reducción de resistencia  $F_R$ .

**Resistencia especificada a la compresión del concreto ( $f_c'$ )** - Resistencia a la compresión del concreto empleada en el diseño y evaluada de acuerdo con las consideraciones de la NMX-C-083 ONNCCE, expresada en MPa ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). Cuando la cantidad  $f_c'$  esté bajo un signo de raíz, se quiere indicar sólo la raíz cuadrada del valor numérico, por lo que el resultado está en MPa ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

**Resistencia nominal** - Resistencia de un elemento o una sección transversal calculada con las disposiciones e hipótesis del método de diseño por resistencia de este Reglamento, antes de aplicar cualquier factor de reducción de resistencia.

**Resistencia requerida** - Resistencia que un elemento o una sección transversal debe tener para resistir las cargas factorizadas o los momentos y fuerzas internas correspondientes combinadas según lo estipulado en estas Normas.

**Sección controlada por compresión** - Sección transversal en la cual la deformación unitaria neta por tensión en el acero extremo en tensión, a la resistencia nominal, es menor o igual al límite de deformación unitaria controlado por compresión.

**Sección controlada por tensión** - Sección transversal en la cual la deformación unitaria neta de tensión en el acero extremo en tensión, en el estado de resistencia nominal, es mayor o igual que 0.005.

**Tendón** - En aplicaciones de presfuerzo, el tendón es el acero presforzado.

**Tendón de presfuerzo adherido** - Tendón en el que el acero de presforzado está adherido al concreto ya sea directamente o con mortero de inyección.

**Tendón de presfuerzo no adherido** - Tendón en el que se impide que el acero de presfuerzo se adhiera al concreto y quedando libre para moverse con respecto al concreto. La fuerza de presfuerzo se transmite en forma permanente al concreto solamente en los extremos del tendón a través de los anclajes.

**Transferencia** - Operación de transferir los esfuerzos del acero de presfuerzo desde los gatos o del banco de tensionado al elemento de concreto.

**Zona de anclaje** - En elementos postensados, la porción del elemento a través de la cual la fuerza de presfuerzo concentrada se transfiere al concreto y es distribuida uniformemente en toda la sección. Su extensión es igual a la longitud de la mayor dimensión de su sección transversal. En elementos de anclaje localizados lejos del extremo de un elemento, la zona de anclaje incluye la zona perturbada adelante y atrás del dispositivo de anclaje.

**Zona de tensión precomprimida** - Porción de un elemento presforzado donde ocurriría tensión producida por flexión si la fuerza de presfuerzo no estuviera presente, calculada usando las propiedades de la sección bruta, bajo carga muerta y viva no factorizadas.

## 1. CONSIDERACIONES GENERALES

### 1.1 Alcance

En estas Normas se presentan disposiciones para diseñar estructuras de concreto, incluido el concreto simple, reforzado y presforzado. Se dan requisitos complementarios para concreto ligero y concretos especiales. Se incluyen estructuras coladas en el lugar y prefabricadas.

Estas disposiciones deben considerarse como un complemento de los principios básicos de diseño establecidos en el Título Sexto del Reglamento, en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones y en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

### 1.2 Unidades

En las expresiones que aparecen en estas Normas deben utilizarse las unidades siguientes, que corresponden al sistema internacional (SI):

Fuerza	N (newton)
Longitud	mm (milímetro)
Momento	N-mm
Esfuerzo	MPa (megapascal)

Siempre que es posible, las expresiones están escritas en forma adimensional; de lo contrario, junto a las expresiones en sistema internacional, se escriben, entre paréntesis, las expresiones equivalentes en el sistema gravitacional usual, empleando las unidades siguientes:

Fuerza	kgf (kilogramo fuerza)
Longitud	cm (centímetro)
Momento	kgf-cm
Esfuerzo	kgf/cm <sup>2</sup>

(En estas Normas, el kilogramo fuerza se representa con kg)

Cada sistema debe utilizarse con independencia del otro, sin hacer combinaciones entre los dos.

Las unidades que aquí se mencionan son las comunes de los dos sistemas. Sin embargo, no se pretende prohibir otras unidades empleadas correctamente, que en ocasiones pueden ser más convenientes; por ejemplo, en el sistema gravitacional usual puede ser preferible expresar las longitudes en metros (m), las fuerzas en toneladas (t) y los momentos en t-m.

### 1.3 Criterios de diseño

Las fuerzas y momentos internos producidos por las acciones a que están sujetas las estructuras se determinarán de acuerdo con los criterios prescritos tanto en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo como en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones y en la sección 3.2 de estas Normas.

El dimensionamiento y el detallado se harán de acuerdo con los criterios relativos a los estados límite de falla y de servicio, así como de durabilidad, establecidos en el Título Sexto del Reglamento y en estas Normas, o por algún procedimiento optativo que cumpla con los requisitos del artículo 159 del mencionado Título Sexto.

#### 1.3.1 Estados límite de falla

Según el criterio de estados límite de falla, las estructuras deben dimensionarse de modo que la resistencia de diseño de toda sección con respecto a cada fuerza o momento interno que en ella actúe, sea igual o mayor que el valor de diseño de dicha fuerza o momento internos. Las resistencias de diseño deben incluir el correspondiente factor de resistencia,  $F_R$ , prescrito en la sección 3.6. Las fuerzas y momentos internos de diseño se obtienen multiplicando por el correspondiente factor de carga los valores de dichas fuerzas y momentos internos calculados bajo las acciones especificadas en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

### **1.3.2 Estados límite de servicio**

Sea que se aplique el criterio de estados límite de falla o algún criterio optativo, deben revisarse los estados límite de servicio, es decir, se comprobará que las respuestas de la estructura (deformación, agrietamiento, etc.) queden limitadas a valores tales que el funcionamiento en condiciones de servicio sea satisfactorio.

### **1.3.3 Diseño por durabilidad**

Las estructuras deberán diseñarse para una vida útil de al menos 50 años, de acuerdo con los requisitos establecidos en el capítulo 4.

## **2. MATERIALES**

Las Normas Mexicanas (NMX) citadas se refieren a las que estén vigentes cuando se aplique el presente documento.

### **2.1 Concreto**

El concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales puede ser de dos clases: clase 1, con peso volumétrico en estado fresco superior a  $22 \text{ kN/m}^3$  ( $2.2 \text{ t/m}^3$ ) y clase 2 con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 19 y  $22 \text{ kN/m}^3$  ( $1.9$  y  $2.2 \text{ t/m}^3$ ).

Para las obras clasificadas como del grupo A o B1, según se definen en el artículo 139 del Reglamento, se usará concreto de clase 1, así como en los que se especifique en estas normas.

El concreto clase 2 se podrá usar en estructuras menores, de claros no mayores de 5 m y alturas de no más de dos niveles.

Los requisitos adicionales para concretos de alta resistencia con resistencia especificada a la compresión,  $f_c'$ , igual o mayor que 40 MPa ( $400 \text{ kg/cm}^2$ ) se encuentran en el Capítulo 12.

#### **2.1.1 Materiales componentes para concretos clases 1 y 2**

En la fabricación de los concretos, se empleará cualquier tipo de cemento que sea congruente con la finalidad y características de la estructura, clase resistente 30 ó 40, que cumpla con los requisitos especificados en la norma NMX-C-414-ONNCCE, así como con los especificados en la tabla 4.6.1.

Los agregados pétreos deberán cumplir con los requisitos de la norma NMX-C-111-ONNCCE con las modificaciones y adiciones establecidas en el inciso 15.3.1. El tamaño máximo del agregado se especifica en la sección 6.3.

El concreto clase 1 se fabricará con agregados gruesos con peso específico superior a 2.6 (caliza, basalto, etc.) y el concreto clase 2 con agregados gruesos con peso específico superior a 2.3, como andesita. Para ambos se podrá emplear arena andesítica u otra de mejores características.

El agua de mezclado deberá ser limpia y cumplir con los requisitos de la norma NMX-C-122-ONNCCE. Si contiene sustancias en solución o en suspensión que la enturbien o le produzcan olor o sabor fuera de lo común, no deberá emplearse.

Podrán usarse aditivos a solicitud expresa del usuario o a propuesta del productor, en ambos casos con la autorización del Corresponsable en Seguridad Estructural, o del Director Responsable de Obra cuando no se requiera de Corresponsable. Los aditivos deberán cumplir con los requisitos de la norma NMX-C-255-ONNCCE.

### 2.1.2 Resistencia a compresión

Los concretos clase 1 tendrán una resistencia especificada,  $f_c'$ , igual o mayor que 25 MPa (250 kg/cm<sup>2</sup>). La resistencia especificada de los concretos clase 2 no será menor que 20 MPa (200 kg/cm<sup>2</sup>). En ambas clases deberá comprobarse que el nivel de resistencia del concreto estructural de toda construcción cumpla con la resistencia especificada. Se admitirá que un concreto cumple con la resistencia especificada si satisface los requisitos prescritos en el inciso 15.3.4.2. El Corresponsable en Seguridad Estructural o el Director Responsable de Obra, cuando el trabajo no requiera de Corresponsable, podrá autorizar el uso de resistencias,  $f_c'$ , distintas de las antes mencionadas, sin que, excepto lo señalado en el párrafo siguiente, sean inferiores a 20 MPa (200 kg/cm<sup>2</sup>).

En muros de concreto reforzado de vivienda de hasta dos niveles, se admitirá el uso de concreto clase 2 con resistencia especificada de 15 MPa (150 kg/cm<sup>2</sup>) si se garantizan los recubrimientos mínimos requeridos en 4.9.3.

Todo concreto estructural debe mezclarse por medios mecánicos y dosificarse por peso.

Se hace hincapié en que el proporcionamiento de un concreto debe hacerse para una resistencia media,  $\bar{f}_c$ , mayor que la especificada,  $f_c'$ , y que dicha resistencia media es función del grado de control que se tenga al fabricar el concreto, ver 15.3.4.1.

### 2.1.3 Resistencia a tensión

Se considera como resistencia media a tensión,  $\bar{f}_t$ , de un concreto el promedio de los esfuerzos resistentes obtenidos a partir de no menos de cinco ensayos en cilindros de 150×300 mm cargados diametralmente, ensayados de acuerdo con la norma NMX-C-163-ONNCCCE. A falta de información experimental,  $\bar{f}_t$ , se puede estimar igual a:

a) concreto clase 1

$$0.47\sqrt{f_c'}, \text{ en MPa } (1.5\sqrt{f_c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

b) concreto clase 2

$$0.38\sqrt{f_c'}, \text{ en MPa } (1.2\sqrt{f_c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

La resistencia media a tensión por flexión o módulo de rotura,  $\bar{f}_f$ , se puede suponer igual a:

a) concreto clase 1

$$0.63\sqrt{f_c'}, \text{ en MPa } (2\sqrt{f_c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

b) concreto clase 2

$$0.44\sqrt{f_c'}, \text{ en MPa } (1.4\sqrt{f_c'}, \text{ en kg/cm}^2)$$

Para diseñar, se usarán valores nominales,  $f_t$  y  $f_f$ , iguales a  $0.8 \bar{f}_t$  y  $0.8 \bar{f}_f$ , respectivamente.

En las expresiones anteriores que no sean homogéneas los esfuerzos deben estar en MPa (en kg/cm<sup>2</sup> para las expresiones en paréntesis); los resultados se obtienen en estas unidades.

### 2.1.4 Módulo de elasticidad

Para concretos clase 1, el módulo de elasticidad,  $E_c$ , se supondrá igual a

$$4\,400\sqrt{f_c'}, \text{ en MPa } (14\,000\sqrt{f_c'}, \text{ en kg/cm}^2) \text{ para concretos con agregado grueso calizo, y}$$

$3\,500\sqrt{f'_c}$ , en MPa ( $11\,000\sqrt{f'_c}$ , en kg/cm<sup>2</sup>) para concretos con agregado grueso basáltico.

Para concretos clase 2 se supondrán igual a

$2\,500\sqrt{f'_c}$ , en MPa ( $8\,000\sqrt{f'_c}$ , en kg/cm<sup>2</sup>)

Pueden usarse otros valores de  $E_c$  que estén suficientemente respaldados por resultados de laboratorio. En problemas de revisión estructural de construcciones existentes, puede aplicarse el módulo de elasticidad determinado en corazones de concreto extraídos de la estructura, que formen una muestra representativa de ella. En todos los casos a que se refiere esta sección,  $E_c$  se determinará según la norma NMX-C-128-ONNCCE. Los corazones se extraerán de acuerdo con la norma NMX-C-169-ONNCCE.

### **2.1.5 Contracción por secado**

Para concretos clase 1, la contracción por secado final,  $\varepsilon_{cf}$ , se supondrá igual a 0.001 y para concreto clase 2 se tomará igual a 0.002.

### **2.1.6 Flujo plástico**

Para concreto clase 1, el coeficiente de flujo plástico se supondrá igual a 2.0 y para concreto clase 2 se supondrá igual a 4.0. Las deflexiones diferidas se deberán calcular como se indica en la sección 14.2.

## **2.2 Acero**

Como refuerzo ordinario para concreto pueden usarse barras de acero y/o malla de alambre soldado. Las barras serán corrugadas, con la salvedad que se indica adelante, y deben cumplir con las normas NMX-C-407-ONNCCE o NMX-B-457 CANACERO; se tomarán en cuenta las restricciones al uso de algunos de estos aceros incluidas en las presentes Normas. La malla cumplirá con la norma NMX-B-290-CANACERO. Se permite el uso de barra lisa de 6.4 mm de diámetro (número 2) para estribos donde así se indique en el texto de estas Normas, conectores de elementos compuestos y como refuerzo para fuerza cortante por fricción (inciso 5.3.3). El acero de presfuerzo cumplirá con las normas NMX-B-292 o NMX-B-293.

Para elementos secundarios y losas apoyadas en su perímetro, se permite el uso de barras que cumplan con las normas NMX-B-18, NMX-B-32 y NMX-B-72.

El módulo de elasticidad del acero de refuerzo ordinario,  $E_s$ , se supondrá igual a  $2 \times 10^5$  MPa ( $2 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>) y el de torones de presfuerzo se supondrá de  $1.9 \times 10^5$  MPa ( $1.9 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>).

En el cálculo de resistencias se usarán los esfuerzos de fluencia mínimos,  $f_y$ , establecidos en las normas citadas.

## **3. CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO**

### **3.1 Estructuración**

#### **3.1.1 Sistema estructural resistente a fuerzas gravitacionales y sísmicas**

El Sistema Estructural Resistente a Fuerzas Gravitacionales y Sísmicas (SERFGS) está constituido por todos los elementos estructurales que transmiten las fuerzas de la parte superior de la estructura a la cimentación. El Corresponsable en Seguridad Estructural (CSE) deberá establecer o verificar que esté establecido claramente en la memoria de cálculo cuál es el SERFGS de la obra y cuál es la trayectoria de fuerzas y acciones correspondiente. Todos los elementos estructurales que forman parte del SERFGS deberán cumplir las especificaciones sobre estados límite de resistencia y servicio de estas Normas. Las uniones o conexiones entre elementos estructurales deberán permitir que las fuerzas puedan transmitirse a través de ellas.

Las irregularidades de los SERFGS se tomarán en cuenta de acuerdo con lo dispuesto en el capítulo 5 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

### 3.1.2 Restricciones y limitaciones para SERFGS que deban resistir acciones sísmicas

El sistema básico estructural o SERFGS deben conformarse con alguno de los tipos indicados en la tabla 4.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo o una combinación de sistemas en las direcciones de análisis.

## 3.2 Análisis

### 3.2.1 Aspectos generales

Las estructuras de concreto se analizarán con los métodos prescritos en los capítulos 2, 6 y 7 de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo, según sea el caso.

#### 3.2.1.1 Análisis lineal

Cuando se apliquen métodos de análisis lineal, en el cálculo de las rigideces de los miembros estructurales se tomará en cuenta el efecto del agrietamiento. Se admitirá que se cumple con este requisito si las rigideces de los elementos se calculan con el módulo de elasticidad del concreto,  $E_c$ , y con los momentos de inercia de la tabla 3.2.1.

**Tabla 3.2.1 Momentos de inercia para cálculo de rigideces**

Elemento	Momento de inercia
Vigas y muros agrietados <sup>1</sup>	0.5I <sub>g</sub>
Columnas agrietadas	0.7I <sub>g</sub>
Columnas y muros no agrietados	I <sub>g</sub>

<sup>1</sup> En vigas T se deberán incluir los anchos de patín especificados en el inciso 5.1.1.2.

En estructuras constituidas por losas planas y columnas, las rigideces se calcularán con las hipótesis de los incisos 3.4.2 y 3.4.3. Los momentos de inercia obtenidos con estas hipótesis se modificarán con los factores aplicables a vigas y columnas de la tabla 3.2.1 para tomar en cuenta el efecto del agrietamiento. En estructuras continuas se admite redistribuir los momentos flexionantes obtenidos del análisis elástico, satisfaciendo las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos en vigas, nudos y entrepisos, pero sin que ningún momento se reduzca, en valor absoluto, más de 20 por ciento en vigas y losas apoyadas en vigas o muros, ni que se reduzca más de 10 por ciento en columnas y en losas planas.

#### 3.2.1.2 Análisis no lineal

Los métodos de análisis no lineal para estructuras de concreto son, en general, del tipo denominado de plasticidad concentrada. En estos métodos los miembros estructurales, diseñados para que los daños que puedan ocurrir sean predominantemente por flexión, se modelan con una barra que en su parte central tiene un comportamiento elástico y en sus extremos tiene zonas de comportamiento inelástico llamadas articulaciones plásticas, figura 3.2.1. La zona central puede considerarse de comportamiento lineal con una rigidez a flexión efectiva como la usada en los métodos de análisis lineal, ver párrafo anterior, o bien, como se establece en la ecuación D.2.1 del Apéndice D. Las zonas de los extremos, a partir de que se presente el fenómeno de plastificación, pueden considerarse como resortes elásticos con una rigidez mucho menor, la cual puede determinarse como se indica en los incisos 3.6.1 y 3.6.2. Las articulaciones plásticas se diseñarán de acuerdo con lo prescrito en las secciones 8.1 y 9.1.

En los momentos de diseño y en las deformaciones laterales de las estructuras deben incluirse los efectos de esbeltez valuados de acuerdo con el inciso 3.2.2.



columna en la dirección en que se considera la flexión. En aquéllas que soporten losas planas,  $H$  será la distancia libre entre el piso y la sección en que la columna se une al capitel, al ábaco o a la losa, según el caso.

c) Longitud efectiva,  $H'$ , de un miembro a flexocompresión

La longitud efectiva de miembros cuyos extremos estén restringidos lateralmente puede determinarse con el nomograma de la figura 3.2.1. Si se usa dicho nomograma, la longitud efectiva se podrá obtener como:

$$H' = kH \quad (3.2.2)$$

o, de forma aproximada usando:

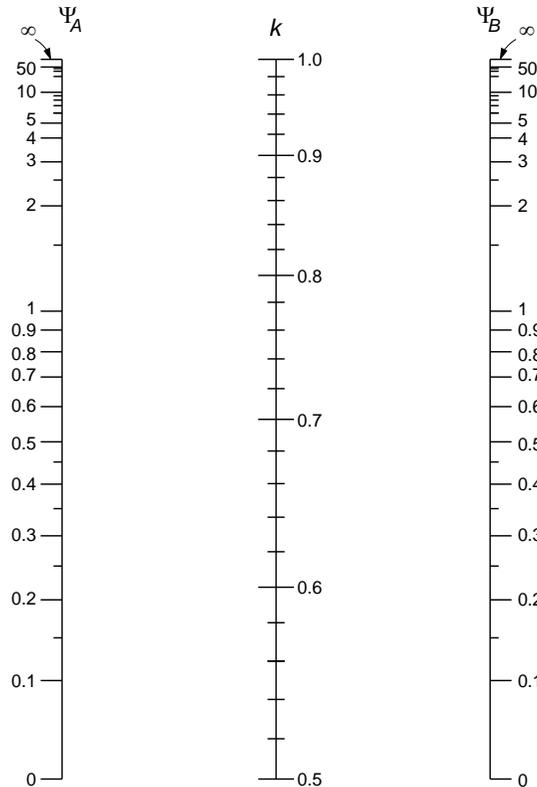
$$k = 1.35 - \sqrt{1.35 ( 1.35 - k_A - k_B ) + 1/2( k_A^2 + k_B^2 )} \quad (3.2.3)$$

donde el factor de restricción lateral de los extremos A y B de la columna está dado por:

$$k_{A,B} = \frac{0.4 + \Psi_{A,B}}{0.8 + \Psi_{A,B}} \quad (3.2.4)$$

y donde  $\Psi_A$  y  $\Psi_B$  se calcularán usando los momentos de inercia correspondientes a la flexión en el plano considerado mediante:

$$\Psi_{A,B} = \frac{\Sigma (I/L)_{columnas}}{\Sigma (I/L)_{miembros\ de\ flexión}} \quad (3.2.5)$$



**Figura 3.2.1** Nomograma para determinar longitudes efectivas,  $H'$ , en miembros a flexocompresión con extremos restringidos lateralmente

### 3.2.2.2 Método de amplificación de momentos flexionantes

a) Miembros en los que pueden despreciarse los efectos de esbeltez

En miembros con extremos restringidos lateralmente, los efectos de esbeltez pueden despreciarse cuando se cumpla:

$$\frac{H'}{r} < 34 - 12 \frac{M_1}{M_2} \quad (3.2.6)$$

En la expresión anterior,  $M_1$  es el menor y  $M_2$  el mayor de los momentos flexionantes en los extremos del miembro; el cociente  $M_1/M_2$  es positivo cuando el miembro se flexiona en curvatura sencilla y negativo cuando lo hace en curvatura doble; si  $M_1 = M_2 = 0$ , el cociente  $M_1/M_2$  se tomará igual a 1.0.

b) Miembros en los que no pueden despreciarse los efectos de esbeltez

En miembros con extremos restringidos en los que se cumpla:

$$\frac{H'}{r} > 100 \quad (3.2.7)$$

se deberá efectuar un análisis de segundo orden de acuerdo con lo prescrito en el inciso 3.2.2.3.

En miembros con extremos no restringidos lateralmente, los efectos de esbeltez no podrán despreciarse.

c) Momentos de diseño

Los miembros sujetos a flexocompresión en los que, de acuerdo con el inciso 3.2.2.2a, no pueden despreciarse los efectos de esbeltez, se dimensionarán para la carga axial de diseño,  $P_u$ , obtenida de un análisis elástico de primer orden y un momento amplificado,  $M_c$ , obtenido en forma aproximada y, según el caso, de acuerdo con lo estipulado en el inciso 3.2.2.2d o en 3.2.2.2e.

d) Miembros con extremos restringidos lateralmente

Los miembros se diseñarán con un momento amplificado,  $M_c$ , que se calculará con la expresión

$$M_c = F_{ab} M_2 \quad (3.2.8)$$

donde:

$$F_{ab} = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{0.75 P_c}} \geq 1.0 \quad (3.2.9)$$

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \geq 0.4 \quad (3.2.10)$$

$$P_c = \frac{\pi^2 E I}{(H')^2} \quad (3.2.11)$$

$$EI = 0.4 \frac{E_c I_g}{1 + u} \quad (3.2.12)$$

$u$  cuando se considere la acción de carga muerta y carga viva,  $u$  será la relación entre la carga axial de diseño factorizada, producida por carga muerta y carga viva sostenida, y la carga axial de diseño factorizada total producida por carga muerta y carga viva total máxima. Cuando se considere la acción de carga muerta, viva y accidental,  $u$  será la relación

entre la máxima fuerza cortante de piso factorizada producida por carga muerta, carga viva sostenida instantánea y accidental, la máxima fuerza cortante factorizada en el mismo entrepiso asociada a la misma combinación de cargas. En ningún caso se tomará  $u$  mayor que 1.

El momento  $M_2$ , que es el mayor de los momentos en los extremos del miembro, se tomará con su valor absoluto y debe estar multiplicado por el factor de carga. No se tomará menor que el que resulte de aplicar la excentricidad mínima prescrita en el inciso 5.2.2.1.

e) Miembros con extremos no restringidos lateralmente

Los momentos en los extremos del miembro se calcularán con las ecuaciones:

$$M_1 = M_{1b} + F_{as} M_{1s} \quad (3.2.13)$$

$$M_2 = M_{2b} + F_{as} M_{2s} \quad (3.2.14)$$

donde:

- $M_{1b}$  momento flexionante multiplicado por el factor de carga, en el extremo donde actúa  $M_1$ , producido por las cargas que no causan un desplazamiento lateral apreciable, calculado con un análisis elástico de primer orden;
- $M_{1s}$  momento flexionante multiplicado por el factor de carga, en el extremo donde actúa  $M_1$ , producido por las cargas que causan un desplazamiento lateral apreciable, calculado con un análisis elástico de primer orden;
- $M_{2b}$  momento flexionante multiplicado por el factor de carga, en el extremo donde actúa  $M_2$ , producido por las cargas que no causan un desplazamiento lateral apreciable, calculado con un análisis elástico de primer orden;
- $M_{2s}$  momento flexionante multiplicado por el factor de carga, en el extremo donde actúa  $M_2$ , producido por las cargas que causan un desplazamiento lateral apreciable, calculado con un análisis elástico de primer orden; y

$$F_{as} = \frac{I}{I - \lambda} \geq I \quad (3.2.15)$$

donde  $\lambda$  está dado por la ecuación:

$$\lambda = \frac{W_u Q \Delta_i}{h V_i} \quad (3.2.16)$$

Si  $F_{as}$  calculado con la ecuación 3.2.15 excede de 1.5, se deberá hacer un análisis de segundo orden de acuerdo con el inciso 3.2.2.3.

En estructuras cuyas columnas no tienen restringidos lateralmente sus extremos, las vigas y otros elementos en flexión se dimensionarán para que resistan los momentos amplificados de los extremos de las columnas. Cuando la torsión de un entrepiso sea significativa se deberá hacer un análisis de segundo orden.

f) Si un miembro sujeto a flexocompresión con extremos no restringidos tiene una relación

$$\frac{H}{r} \geq \frac{35}{\sqrt{\frac{P_u}{f_c' A_g}}} \quad (3.2.17)$$

se diseñará para la carga  $P_u$  y un momento flexionante amplificado  $M_c$  calculado según se especifica en el inciso 3.2.2.2d, pero calculando  $M_1$  y  $M_2$  como se especifica en el inciso 3.2.2.2e y con el valor de  $u$  correspondiente a la combinación de carga considerada.

### 3.2.2.3 Análisis de segundo orden

Los análisis de segundo orden consisten en obtener las fuerzas y momentos internos tomando en cuenta los efectos de las deformaciones sobre dichas fuerzas y momentos, la influencia de la carga axial en las rigideces, el comportamiento no lineal y agrietamiento de los materiales, duración de las cargas, cambios volumétricos por flujo plástico, así como la interacción con la cimentación.

### 3.3 Análisis de losas

#### 3.3.1 Método de análisis

Además de los métodos semiempíricos de análisis propuestos a continuación para distintos casos particulares, puede utilizarse cualquier otro procedimiento reconocido. Es admisible aplicar la teoría de líneas de fluencia, o cualquier otra teoría basada en el análisis al límite, siempre que el comportamiento bajo condiciones de servicio resulte adecuado en cuanto a deflexión, agrietamiento y vibraciones.

Si aparte de soportar cargas normales a su plano la losa tiene que transmitir fuerzas contenidas en su plano a marcos, muros u otros elementos rigidizantes, dichas fuerzas deben tomarse en cuenta en el diseño de la losa.

#### 3.3.2 Momentos flexionantes debidos a cargas uniformemente distribuidas

Los momentos flexionantes en losas perimetralmente apoyadas se calcularán con los coeficientes de la tabla 3.3.1 si se satisfacen las siguientes limitaciones:

- a) Los tableros son aproximadamente rectangulares;
- b) La distribución de las cargas es aproximadamente uniforme en cada tablero;
- c) Los momentos flexionantes negativos en el apoyo común de dos tableros adyacentes difieren entre sí en una cantidad no mayor que 50 por ciento del menor de ellos; y
- d) La relación entre carga viva y muerta no es mayor de 2.5 para losas monolíticas con sus apoyos, ni mayor de 1.5 en otros casos. Para valores intermedios de la relación,  $m$ , entre el claro corto,  $a_1$ , y el claro largo,  $a_2$ , se interpolará linealmente.

**Tabla 3.3.1 Coeficientes de momentos flexionantes para tableros rectangulares, franjas centrales<sup>1</sup>**

Tablero	Momento	Claro	Relación de lados corto a largo, $m = a_1/a_2$													
			0		0.5		0.6		0.7		0.8		0.9		1.0	
			I <sup>2</sup>	II <sup>3</sup>	I	II										
<b>Interior</b> Todos los bordes continuos	Negativo en bordes interiores	corto	998	1018	553	565	489	498	432	438	381	387	333	338	288	292
		largo	516	544	409	431	391	412	371	388	347	361	320	330	288	292
	Positivo	corto	630	668	312	322	268	276	228	236	192	199	158	164	126	130
		largo	175	181	139	144	134	139	130	135	128	133	127	131	126	130
<b>De borde</b> Un lado corto discontinuo	Negativo en bordes interiores	corto	998	1018	568	594	506	533	451	478	403	431	357	388	315	346
		largo	516	544	409	431	391	412	372	392	350	369	326	341	297	311
	Negativo en bordes discontinuos	largo	326	0	258	0	248	0	236	0	222	0	206	0	190	0
		Positivo	corto	630	668	329	356	292	306	240	261	202	219	167	181	133
		largo	179	187	142	149	137	143	133	140	131	137	129	136	129	135

<b>De borde</b> Un lado largo discontinuo	Negativo en bordes interiores	en corto largo	1060 587	1143 687	583 465	624 545	514 442	548 513	453 411	481 470	397 379	420 426	346 347	364 384	297 315	311 346
	Negativo en bordes discontinuos	en corto	651	0	362	0	321	0	283	0	250	0	219	0	190	0
	Positivo	corto largo	751 185	912 200	334 147	366 158	285 142	312 153	241 138	263 149	202 135	218 146	164 134	175 145	129 133	135 144
<b>De esquina</b> Dos lados adyacentes discontinuos	Negativo en bordes interiores	en corto largo	1060 600	1143 713	598 475	653 564	530 455	582 541	471 429	520 506	419 394	464 457	371 360	412 410	324 324	364 364
	Negativo en borde discontinuo	en corto largo	651 326	0 0	362 258	0 0	321 248	0 0	277 236	0 0	250 222	0 0	219 206	0 0	190 190	0 0
	Positivo	corto largo	751 191	912 212	358 152	416 168	306 146	354 163	259 142	298 158	216 140	247 156	176 138	199 154	137 137	153 153
<b>Extremo</b> Tres bordes discontinuos un lado largo continuo	Negativo en borde continuo	en corto	1060	1143	970	1070	890	1010	810	940	730	870	650	790	570	710
	Negativo en bordes discontinuos	en corto largo	651 220	0 0	370 220	0 0	340 220	0 0	310 220	0 0	280 220	0 0	250 220	0 0	220 220	0 0
	Positivo	corto largo	751 185	912 200	730 430	800 520	670 430	760 520	610 430	710 520	550 430	650 520	490 430	600 520	430 430	540 520
<b>Extremo</b> Tres bordes discontinuos un lado corto continuo	Negativo en borde continuo	en largo	570	710	570	710	570	710	570	710	570	710	570	710	570	710
	Negativo en borde discontinuo	en corto largo	570 330	0 0	480 220	0 0	420 220	0 0	370 220	0 0	310 220	0 0	270 220	0 0	220 220	0 0
	Positivo	corto largo	1100 200	1670 250	960 430	1060 540	840 430	950 540	730 430	850 540	620 430	740 540	540 430	660 540	430 430	520 540
<b>Aislado</b> Cuatro lados discontinuos	Negativo en bordes discontinuos	en corto largo	570 330	0 0	550 330	0 0	530 330	0 0	470 330	0 0	430 330	0 0	380 330	0 0	330 330	0 0
	Positivo	corto largo	1100 200	1670 250	830 500	1380 830	800 500	1330 830	720 500	1190 830	640 500	1070 830	570 500	950 830	500 500	830 830

<sup>1</sup> Para las franjas extremas (ver sección 7.5.1.2) los coeficientes se multiplicarán por 0.60.

<sup>2</sup> Caso I. Losa colada monolíticamente con sus apoyos.

<sup>3</sup> Caso II. Losa no colada monolíticamente con sus apoyos.

Los coeficientes multiplicados por  $10^{-4} w a_1^2$ , dan momentos flexionantes por unidad de ancho; si  $w$  está en kN/m<sup>2</sup> (en kg/m<sup>2</sup>) y  $a_1$  en m, el momento tiene unidades de kN-m/m (kg-m/m).

Para el caso I,  $a_1$  y  $a_2$  pueden tomarse como los claros libres entre paños de vigas.

Para el caso II,  $a_1$  y  $a_2$  se tomarán como los claros entre ejes, pero sin exceder del claro libre más dos veces el espesor de la losa.

### 3.3.3 Distribución de momentos flexionantes entre tableros adyacentes

Cuando los momentos obtenidos en el borde común de dos tableros adyacentes sean distintos, se distribuirán dos tercios del momento de desequilibrio entre los dos tableros si éstos son monolíticos con sus apoyos, o la totalidad de dicho momento si no lo son. Para la distribución se supondrá que la rigidez del tablero es proporcional a  $d^3/a_1$ .

### 3.3.4 Cargas lineales

Los efectos de cargas lineales debidas a muros que apoyan sobre una losa pueden tomarse en cuenta con cargas uniformemente repartidas equivalentes.

En particular, al dimensionar una losa perimetralmente apoyada, la carga uniforme equivalente en un tablero que soporta un muro paralelo a uno de sus lados, se obtiene dividiendo el peso del muro entre el área del tablero y multiplicando el resultado por el factor correspondiente de la tabla 3.3.2. La carga equivalente así obtenida se sumará a la propiamente uniforme que actúa en ese tablero.

**Tabla 3.3.2 Factor para considerar las cargas lineales como cargas uniformes equivalentes**

Relación de lados $m = a_1/a_2$	0.5	0.8	1.0
Muro paralelo al lado corto	1.3	1.5	1.6
Muro paralelo al lado largo	1.8	1.7	1.6

Estos factores pueden usarse en relaciones de carga lineal a carga total no mayores de 0.5. Se interpolará linealmente entre los valores tabulados.

### 3.3.5 Cargas concentradas

Cuando un tablero de una losa perimetralmente apoyada deba soportar una carga concentrada,  $P$ , aplicada en la zona definida por la intersección de las franjas centrales, la suma de los momentos resistentes, por unidad de ancho, positivo y negativo se incrementará en cada dirección paralela a los bordes, en la cantidad:

$$\frac{P}{2\pi} \left( 1 - \frac{2r}{3R_b} \right) \quad (3.3.1)$$

en todo punto del tablero, siendo  $r$  el radio del círculo de igual área a la de la aplicación de la carga y  $R_b$  la distancia del centro de la carga al borde más próximo a ella.

El criterio anterior también se aplicará a losas que trabajan en una dirección, con relación ancho a claro no menor que  $\pi/2$ , cuando la distancia de la carga a un borde libre,  $R_b$ , no es menor que la mitad del claro. No es necesario incrementar los momentos resistentes en un ancho de losa mayor que  $1.5L$  centrado con respecto a la carga, donde  $L$  es el claro libre de la losa.

## 3.4 Análisis de losas planas

### 3.4.1 Consideraciones generales

Las fuerzas y momentos internos pueden obtenerse dividiendo la estructura en marcos ortogonales y analizándolos con métodos reconocidos suponiendo comportamiento elástico. Cada marco estará formado por una fila de columnas y franjas de losa limitadas por las líneas medias de los tableros adyacentes al eje de columnas considerado.

Para valuar momentos de inercia de losas y columnas puede usarse la sección de concreto no agrietada sin considerar el refuerzo. Se tendrá en cuenta la variación del momento de inercia a lo largo de vigas equivalentes en losas aligeradas y de columnas con capiteles o ábacos. También se tendrán en cuenta los efectos de vigas y aberturas.

Al analizar los marcos equivalentes por carga vertical, en cada dirección deben usarse las cargas totales que actúan en las losas.

Se considerarán franjas de columnas y franjas centrales. Una franja de columna va a lo largo de un eje de columnas y su ancho a cada lado del eje es igual a la cuarta parte del claro menor, entre ejes, del tablero correspondiente. Una franja central es la limitada por dos franjas de columna.

### **3.4.2 Análisis aproximado por carga vertical**

#### **3.4.2.1 Estructuras sin capiteles ni ábacos**

El análisis bajo cargas verticales uniformes de estructuras que cumplan con los requisitos que siguen, formadas por losas planas y columnas sin capiteles ni ábacos, puede efectuarse asignando a las columnas la mitad de sus rigideces angulares y usando el ancho completo de la losa para valorar su rigidez. Los requisitos que deben satisfacerse son:

- a) La estructura da lugar a marcos sensiblemente simétricos;
- b) Todos los entrepisos tienen el mismo número de crujiás;
- c) El mayor claro en toda la estructura no excede al menor en más de un quinto de este último, ya sea que el menor sea paralelo o perpendicular al mayor;
- d) El espesor de la losa es aproximadamente igual a 5 por ciento del claro mayor del mayor tablero; y
- e) La carga viva por metro cuadrado es aproximadamente la misma en los distintos tableros de un piso.

#### **3.4.2.2 Estructuras con capiteles y ábacos**

El análisis bajo cargas verticales uniformes de estructuras destinadas a resistir sismo por sí solas (es decir, sin la ayuda de muros ni contravientos) que cumplan con los requisitos de los párrafos que siguen, formadas por losas planas y columnas con capiteles y ábacos, puede efectuarse dividiendo la estructura en marcos planos ortogonales limitados por las líneas medias de los tableros adyacentes al eje de columnas considerado, y asignando a las columnas la totalidad del momento de inercia de la sección del fuste, y a las losas, su ancho completo.

Si se aplica el método de distribución de momentos de Cross, deben calcularse las rigideces angulares y factores de transporte de los miembros suponiendo que en las columnas la rigidez a flexión es infinita desde el arranque del capitel hasta la superficie de arriba de la losa, y en las vigas equivalentes, desde el eje de columna hasta el borde del capitel. Si se usa un programa de análisis de computadora que tome en cuenta las dimensiones de los nudos, bastará asignar como dimensión vertical del nudo la distancia desde el arranque del capitel hasta la cara superior de la losa, y como dimensión horizontal a cada lado del eje de columna, la distancia entre dicho eje y el borde del capitel.

Deben cumplirse los requisitos señalados en el inciso 3.4.2.1, de los cuales en el 3.4.2.1d se usará 3.5 por ciento en lugar de 5 por ciento. Además se cumplirán los siguientes:

- a) La estructura no excede de cuatro niveles;
- b) Si la estructura tiene tres o cuatro niveles, los momentos en las columnas de orilla del penúltimo entrepiso se incrementarán 25 por ciento sobre lo que suministre el análisis.
- c) Las columnas, ábacos y capiteles son rectangulares, sin que la dimensión mayor exceda a la menor en más de 20 por ciento de ésta. Las columnas y capiteles pueden ser también circulares, con ábacos cuadrados;
- d) Las columnas de orilla deben tener capiteles y ábacos completos, iguales a los interiores, y el borde de la losa debe coincidir con el del ábaco; y
- e) Las dimensiones de los ábacos deben cumplir con los requisitos que al respecto se establecen en el inciso 7.6.9.

### 3.4.3 Análisis aproximado ante fuerzas laterales

#### 3.4.3.1 Estructuras sin capiteles ni ábacos

Al formar los marcos equivalentes, se admitirá que el ancho equivalente de las vigas, centrado con respecto al eje de columnas, está dado por:

$$B_e = C_2 + 3h \quad (3.4.1)$$

donde:

$C_2$  dimensión transversal de la columna normal a la dirección de análisis; y  
 $h$  espesor de la losa.

#### 3.4.3.2 Estructuras con capiteles y ábacos

El análisis ante fuerzas horizontales de estructuras que deban resistir sismo por sí solas (esto es, sin la ayuda de muros o contravientos), que cumplan con los requisitos de los párrafos que siguen, formadas por losas planas y columnas con capiteles y ábacos, puede efectuarse dividiendo la estructura en marcos planos ortogonales equivalentes tributarios a los ejes de columnas. Las rigideces a flexión de las vigas equivalentes se valorarán con un ancho de losa, centrado con respecto al eje de columnas, calculado mediante:

$$B_e = 0.19B_t - 0.12C_2 \quad (3.4.2)$$

donde:

$B_t$  ancho total entre líneas medias de los tableros adyacentes al eje de columnas considerado; y  
 $C_2$  dimensión horizontal del capitel en su unión con el ábaco, normal a la dirección de análisis.

En los análisis se supondrá que el momento de inercia de las vigas equivalentes es infinito desde el centro de la columna hasta el borde del capitel, y en las columnas desde la sección inferior del capitel hasta la superficie de arriba de la losa. Para esto, si se utiliza un programa que tome en cuenta las dimensiones de los nudos, bastará tomar como dimensión vertical del nudo la distancia desde el arranque del capitel hasta la cara superior de la losa y como dimensión horizontal a cada lado del eje de columna, la distancia entre dicho eje y el borde del capitel.

Se deben cumplir los requisitos de los incisos 3.4.2.1a, 3.4.2.1b, 3.4.2.1c y 3.4.2.1e, y los requisitos de los incisos 3.4.2.2c, 3.4.2.2d y 3.4.2.2e. Además, se cumplirán los siguientes:

- a) La estructura no excede de cinco niveles;
- b) El espesor de la losa es aproximadamente igual a 3.5 por ciento del claro mayor del mayor tablero.

#### 3.4.4 Transmisión de momento entre losa y columnas

Cuando por excentricidad de la carga vertical o por la acción de fuerzas laterales haya transmisión de momento entre losa y columna, se supondrá que una fracción del momento dada por:

$$1 - \alpha = \frac{I}{1 + 0.67\sqrt{(c_1 + d) / (c_2 + d)}} \quad (3.4.3)$$

se transmite por flexión en un ancho igual a  $C_2 + 3h$ , centrado con el eje de columnas; el refuerzo de la losa necesario para este momento debe colocarse en el ancho mencionado respetando siempre la cuantía máxima de refuerzo. El resto del

momento, esto es, la fracción  $\alpha$ , se admitirá que se transmite por esfuerzos cortantes y torsiones según se prescribe en el inciso 5.3.6.

### 3.5 Hipótesis para la obtención de resistencias de diseño a flexión, carga axial y flexocompresión

La determinación de resistencias de secciones de cualquier forma sujetas a flexión, carga axial o una combinación de ambas, se efectuará a partir de las condiciones de equilibrio y de las siguientes hipótesis:

- a) La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal de un elemento es plana;
- b) Existe adherencia entre el concreto y el acero de tal manera que la deformación unitaria del acero es igual a la del concreto adyacente;
- c) El concreto no resiste esfuerzos de tensión;
- d) La deformación unitaria del concreto en compresión cuando se alcanza la resistencia de la sección es 0.003; y
- e) La distribución de esfuerzos de compresión en el concreto, cuando se alcanza la resistencia de la sección, es uniforme con un valor  $f_c''$  igual a  $0.85f_c'$  hasta una profundidad de la zona de compresión igual a  $\beta_1 c$ .

donde:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0.85 ; & \text{si } f_c' \leq 28 \text{ MPa (280 kg/cm}^2\text{)} \\ \beta_1 &= 1.05 - \frac{f_c'}{140} \geq 0.65; & \text{si } f_c' > 28 \text{ MPa} \\ \left( \beta_1 &= 1.05 - \frac{f_c'}{1400} \geq 0.65; & \text{si } f_c' > 280 \text{ kg/cm}^2 \right) \end{aligned} \quad (3.5.1)$$

$c$  profundidad del eje neutro medida desde la fibra extrema en compresión.

El diagrama esfuerzo-deformación unitaria del acero de refuerzo ordinario, aunque no tenga fluencia definida, puede idealizarse por medio de una recta que pase por el origen, con pendiente igual a  $E_s$  y una recta horizontal que pase por la ordenada correspondiente al esfuerzo de fluencia del acero,  $f_y$ . En aceros que no presenten fluencia bien definida, la recta horizontal pasará por el esfuerzo convencional de fluencia. El esfuerzo convencional de fluencia se define por la intersección del diagrama esfuerzo-deformación unitaria con una recta paralela al tramo elástico, cuya abscisa al origen es 0.002, o como lo indique la norma respectiva de las mencionadas en la sección 2.2. Pueden utilizarse otras idealizaciones razonables, o bien la gráfica del acero empleado obtenida experimentalmente. En cálculos de elementos de concreto presforzado deben usarse los diagramas esfuerzo-deformación unitaria del acero utilizado, obtenidos experimentalmente.

La resistencia determinada con estas hipótesis, multiplicada por el factor  $F_R$  correspondiente, da la resistencia de diseño.

### 3.6 Modelado de las articulaciones plásticas

En este inciso se presentan dos métodos para modelar las zonas de articulaciones plásticas de la figura 3.2.1 en miembros de concreto reforzado.

#### 3.6.1 A partir de diagramas momento curvatura

La obtención de diagramas momento-curvatura ( $M-\phi$ ) de secciones de cualquier forma sujetas a flexión, carga axial o una combinación de ambas, se efectuará a partir de las condiciones de equilibrio y de las siguientes hipótesis:

- a) La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal de un elemento es plana;

- b) Existe adherencia entre el concreto y el acero de tal manera que la deformación unitaria del acero es igual a la del concreto adyacente;
- c) El concreto no resiste esfuerzos de tensión;
- d) Los esfuerzos de compresión del concreto en la sección transversal del elemento pueden determinarse a partir de las deformaciones unitarias obtenidas con la hipótesis a) y con diagramas esfuerzo-deformación unitaria ( $f_c-\epsilon_c$ ) que tomen en cuenta el grado de confinamiento del concreto. Estos diagramas deben representar el comportamiento a compresión del concreto hasta la falla. En el Apéndice D se presenta un modelo de caracterización del concreto que toma en cuenta estos requisitos.
- e) El esfuerzo máximo en el diagrama ( $f_c-\epsilon_c$ ) en el primer ciclo de carga será la resistencia media  $\bar{f}_c$  (ver inciso 15.3.4.1).
- f) Los esfuerzos de compresión y de tensión en el acero de refuerzo en la sección transversal del elemento pueden determinarse a partir de las deformaciones unitarias obtenidas con la hipótesis a) y con diagramas esfuerzo-deformación unitaria ( $f_s-\epsilon_s$ ) que representen adecuadamente la resistencia y deformación unitaria de fluencia esperadas así como el endurecimiento por deformación del acero. En el Apéndice D también se presentan curvas esfuerzo-deformación del acero que toman en cuenta estos requisitos.
- g) Los diagramas ( $M-\phi$ ) obtenidos con las hipótesis anteriores pueden aproximarse con diagramas bilineales o trilineales. Se considerará como curvatura máxima que puede resistir el elemento la menor de las tres siguientes: la que corresponda en la rama descendente del diagrama a un momento del 85 por ciento del momento máximo alcanzado; la que corresponda a la primera fractura del acero de refuerzo; la que corresponda al pandeo de las barras de refuerzo que trabajen a compresión.

El diagrama momento curvatura obtenido con las hipótesis anteriores permite obtener la curvatura,  $\phi$ , correspondiente a cualquier valor del momento en las secciones transversales ubicadas en los extremos del modelo de la figura 3.2.1. Multiplicando la curvatura ( $\phi - \phi_y$ ), donde  $\phi_y$  es la curvatura de fluencia, por una longitud de articulación plástica se obtiene la rotación plástica del resorte para ese momento. De esta manera puede obtenerse un diagrama momento rotación de los resortes para usar en el análisis no lineal. Si no se dispone de datos experimentales, se recomienda usar longitudes de articulación plástica entre 0.5 y 0.75 veces el peralte del elemento estructural.

Debe tomarse en cuenta que este método no permite considerar explícitamente fenómenos como el deslizamiento de las barras de acero por ruptura de la adherencia en la interfaz viga-columna, ni las deformaciones dentro del nudo, ni la formación de grietas en la intersección de vigas y columnas. Por lo tanto debe usarse de manera conservadora cuando las estructuras quedan sujetas a desplazamientos y giros grandes.

### 3.6.2 A partir de diagramas experimentales momento rotación

En este método se idealizan los diagramas momento rotación como se indica en la figura 3.6.1 y se estiman los valores del momento de fluencia,  $M_y$ , del momento máximo,  $M_{max}$  y del momento de ruptura,  $M_r$ , así como de las rotaciones permisibles entre estos momentos,  $\theta_p$  y  $\theta_{pc}$ , a partir de resultados analíticos y experimentales propuestos por varios autores. En el Apéndice D se presentan recomendaciones avaladas por la experiencia. Los valores recomendados se reducen para tomar en cuenta los fenómenos de ruptura de la adherencia y deformaciones de los nudos, así como la degradación por cargas cíclicas.

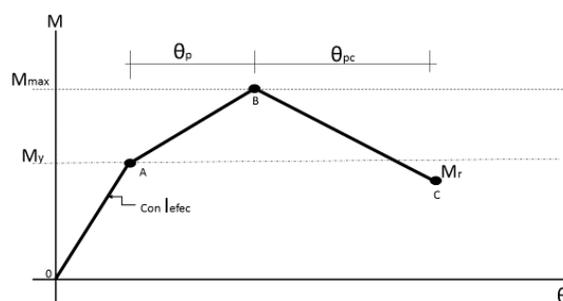


Figura 3.6.1 Diagrama momento-rotación idealizado

### 3.7 Factores de resistencia

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, las resistencias deben afectarse por un factor de reducción,  $F_R$ . Con las excepciones indicadas en el texto de estas Normas, los factores de resistencia tendrán los valores siguientes:

- a)  $F_R = 0.9$  para flexión.
- b)  $F_R = 0.75$  para cortante y torsión.
- c)  $F_R = 0.65$  para transmisión de flexión y cortante en losas o zapatas.
- d) Para flexocompresión:
  - $F_R = 0.75$  cuando el elemento falle en tensión;
  - $F_R = 0.75$  cuando el núcleo esté confinado con refuerzo transversal circular que cumpla con los requisitos del inciso 6.1.4, o con estribos que cumplan con los requisitos de los incisos 7.3.4, 8.3.4 o 9.3.4, según el valor de  $Q$  usado.
  - $F_R = 0.65$  si el núcleo no está confinado y la falla es en compresión.
- e) Para aplastamiento:
  - $F_R = 0.65$

Para calcular los factores de reducción  $F_R$  de elementos a flexión o flexocompresión se permite usar las disposiciones del apéndice A.

Las resistencias reducidas (resistencias de diseño) son las que, al dimensionar, se comparan con las fuerzas internas de diseño que se obtienen multiplicando las debidas a las cargas especificadas en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, por los factores de carga ahí prescritos.

### 3.8 Dimensiones de diseño

Para calcular resistencias se harán reducciones de 20 mm en las siguientes dimensiones:

- a) Espesor de muros;
- b) Diámetro de columnas circulares;
- c) Ambas dimensiones transversales de columnas rectangulares;
- d) Peralte efectivo correspondiente al refuerzo de lecho superior de elementos horizontales o inclinados, incluyendo cascarones y arcos; y
- e) Ancho de vigas y arcos.

Estas reducciones no son necesarias en dimensiones mayores de 200 mm, ni en elementos donde se tomen precauciones que garanticen que las dimensiones resistentes no serán menores que las de cálculo y que dichas precauciones se consignen en los planos estructurales.

### 3.9 Revestimientos

Los revestimientos no se tomarán en cuenta como parte de la sección resistente de ningún elemento, a menos que se suministre una liga con él, la cual esté diseñada para transmitir todos los esfuerzos que puedan presentarse y que dichos revestimientos no estén expuestos a desgaste o deterioro.

## 4. REQUISITOS DE DURABILIDAD

## **4.1 Disposiciones generales**

### **4.1.1 Requisitos básicos**

La durabilidad será tomada en cuenta en el diseño, mediante la determinación de la clasificación de exposición de acuerdo con la sección 4.2 y, para esa clasificación, cumpliendo con los siguientes requisitos:

- a) Calidad y curado del concreto, de acuerdo con las secciones 4.3 a 4.6;
- b) Restricciones en los contenidos químicos, de acuerdo con la sección 4.8;
- c) Recubrimiento, de acuerdo con la sección 4.9; y
- d) Precauciones en la reacción álcali–agregado, de acuerdo con la sección 4.10.

### **4.1.2 Requisito complementario**

Además de los requisitos especificados en el inciso 4.1.1, el concreto sujeto a la abrasión originada por tránsito (por ejemplo, pavimentos y pisos) satisfará los requisitos de la sección 4.7.

### **4.1.3 Tipos de cemento**

Los requisitos que se prescriben en las secciones 4.3, 4.4 y 4.9 parten de suponer el empleo de concreto con cemento portland ordinario. Pueden usarse otros tipos de cemento portland (por ejemplo, resistente a los sulfatos, baja reactividad álcali–agregado) o cementos mezclados, (por ejemplo, cemento portland puzolánico, cemento portland con escoria granulada de alto horno). Éstos deberán ser evaluados para establecer los niveles de desempeño equivalentes a los obtenidos con concretos de cemento portland ordinario.

Pueden usarse otros sistemas que consistan en la protección o impregnación de la capa superficial. Estos sistemas serán evaluados para establecer niveles de desempeño equivalente a los concretos de cemento portland ordinario, al determinar la influencia de la durabilidad del recubrimiento para alcanzar los 50 años de vida de diseño.

Cuando se requiera una expectativa de vida útil diferente de 50 años, las previsiones anteriores se pueden modificar. La modificación se hará con base en la equivalencia del criterio de desempeño establecido anteriormente, junto con el sobrentendido de que los concretos de cemento portland ordinario pueden proporcionar un nivel satisfactorio de protección al refuerzo contra la corrosión por 50 años.

## **4.2 Clasificación de exposición**

La clasificación de la exposición para una superficie de un miembro reforzado o presforzado se determinará a partir de la tabla 4.2.1. Esta tabla no necesita aplicarse a miembros de concreto simple, si tales miembros no incluyen metales que dependan del concreto para su protección contra los efectos del medio ambiente.

Para determinar la calidad del concreto requerida de acuerdo con las secciones 4.3 a 4.6 y 4.8, la clasificación de exposición para el miembro será la que corresponda a la superficie que tenga la condición de exposición más desfavorable.

Para determinar los requisitos de recubrimiento para protección del refuerzo contra la corrosión de acuerdo con el inciso 4.9.3, la clasificación de la exposición se tomará como la que corresponda a la superficie a partir de la cual se mide el recubrimiento.

## **4.3 Requisitos para concretos con clasificaciones de exposición A1 y A2**

Miembros sujetos a clasificaciones de exposición A1 o A2 serán curados en forma continua bajo temperatura y presión del ambiente por al menos tres días a partir del colado.

El concreto en los miembros tendrán una resistencia a compresión especificada,  $f_c'$ , no menor de 20 MPa (200 kg/cm<sup>2</sup>).

#### 4.4 Requisitos para concretos con clasificaciones de exposición B1, B2 y C

Miembros sujetos a clasificaciones de exposición B1, B2 o C serán curados en forma continua bajo condiciones de temperatura y presión del ambiente, por al menos siete días a partir del colado.

El concreto en el miembro tendrá una resistencia a compresión especificada,  $f_c'$ , no menor de:

- a) 20 MPa (200 kg/cm<sup>2</sup>) para clasificación B1;
- b) 25 MPa (250 kg/cm<sup>2</sup>) para clasificación B2; y
- c) 50 MPa (500 kg/cm<sup>2</sup>) para clasificación C.

Adicionalmente, en los concretos para la clasificación C se requiere emplear un contenido de cemento portland no menor que 3 500 N/m<sup>3</sup> (350 kg/m<sup>3</sup>) y una relación agua/cemento que no exceda 0.40.

#### 4.5 Requisitos para concretos con clasificación de exposición D

El concreto en los miembros sujetos a una clasificación de exposición D se especificará para asegurar su durabilidad bajo la exposición ambiente particular que se tenga y para la vida útil de diseño escogida.

#### 4.6 Requisitos para concretos expuestos a sulfatos

Los concretos que estarán expuestos a soluciones o a suelos que contienen concentraciones peligrosas de sulfatos serán hechos con cementos resistentes a sulfatos y cumplirán con las relaciones agua–materiales cementantes máximas y las resistencias a compresión mínimas presentadas en la tabla 4.6.1.

#### 4.7 Requisitos adicionales para resistencia a la abrasión

En adición a los otros requisitos de durabilidad de esta sección, el concreto para miembros sujetos a la abrasión proveniente del tránsito, tendrá una resistencia a la compresión especificada no menor que el valor aplicable dado en la tabla 4.7.1.

En superficies expuestas a tránsito intenso, no se tomará como parte de la sección resistente el espesor que pueda desgastarse. A éste se asignará una dimensión no menor de 15 mm, salvo que la superficie expuesta se endurezca con algún tratamiento.

#### 4.8 Restricciones sobre el contenido de químicos contra la corrosión

##### 4.8.1 Restricciones sobre el ion cloruro para protección contra la corrosión

El contenido total del ion cloruro en el concreto, calculado o determinado, basado en las mediciones del contenido de cloruros provenientes de los agregados, del agua de mezclado y de aditivos no excederá los valores dado en la tabla 4.8.1.

Cuando se hacen pruebas para determinar el contenido de iones de cloruro solubles en agua, los procedimientos de ensayos se harán de acuerdo con ASTM C 1218.

**Tabla 4.2.1 Clasificaciones de exposición**

Superficies y ambiente de exposición	Clasificación de exposición
a) Superficie de miembros en contacto con el terreno:	
1) Protegida por una membrana impermeable	A1
2) En suelos no agresivos	A2
3) En suelos agresivos <sup>1</sup>	D
b) Superficies de miembros en ambientes interiores:	
1) Encerrado totalmente dentro de un edificio, excepto por breve periodo de exposición al ambiente durante la construcción <sup>2</sup>	A1

Superficies y ambiente de exposición		Clasificación de exposición
2)	En edificios o sus partes donde los miembros pueden estar sujetos a humedecimiento y secado repetido <sup>2</sup>	B1
c) Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores <sup>3</sup> que son:		
1)	No agresivos	A2
2)	Ligeramente agresivos	B1
3)	Agresivos	B2
d) Superficies de miembros en agua <sup>4</sup> :		
1)	En contacto con agua dulce (dura)	B1
	En agua dulce a presión (dura)	B2
	En agua dulce corriente (dura)	B2
2)	En contacto con agua dulce (suave)	B2
	En agua dulce a presión (suave)	D
	En agua dulce corriente (suave)	D
3)	En agua con más de 20 000 ppm de cloruros:	
	- Sumergida permanentemente	B2
	- En zonas con humedecimiento y secado	C
e) Superficies de miembros en otros ambientes:		
	En cualquier ambiente de exposición no descritos en los incisos de (a) a (d)	D

<sup>1</sup> Se deben considerar agresivos los suelos permeables con pH < 4.0 o con agua freática que contiene más de un gramo (1 g) de iones de sulfato por litro. Suelos ricos en sales con pH entre 4 y 5 deben considerarse como clasificación de exposición C;

<sup>2</sup> Cuando se emplee en aplicaciones industriales, se deben considerar los efectos sobre el concreto de los procesos de manufactura que allí se realicen; en tales casos se puede requerir una reclasificación de la exposición a D;

<sup>3</sup> La frontera entre los diferentes ambientes exteriores depende de muchos factores los cuales incluyen distancia desde la fuente agresiva, vientos dominantes y sus intensidades;

<sup>4</sup> Para establecer las características de dureza del agua se requiere analizarla (ASTM E 1116)

**Tabla 4.6.1 Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contengan sulfatos**

Exposición a sulfatos	Sulfatos solubles en agua (SO <sub>4</sub> ) presentes en suelos, porcentaje por peso	Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) en agua, ppm	Tipos de cemento <sup>1</sup>	Máxima relación agua–materiales cementantes, por peso, concretos con agregados de peso normal <sup>2</sup>	f <sub>c</sub> ' mínima, concreto con agregado de peso normal y ligero, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
Despreciable	0.00 ≤ SO <sub>4</sub> < 0.10	0 ≤ SO <sub>4</sub> < 150	—	—	—
Moderada <sup>3</sup>	0.10 ≤ SO <sub>4</sub> < 0.20	150 ≤ SO <sub>4</sub> < 1500	CPP, CPEG, CPC	0.50	30 (300)
Severa	0.20 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 2.00	1500 ≤ SO <sub>4</sub> < 10 000	RS	0.45	35 (350)
Muy severa	SO <sub>4</sub> > 2.00	SO <sub>4</sub> > 10000	RS más puzolana <sup>4</sup>	0.45	35 (350)

<sup>1</sup> CPP cemento portland puzolánico (clinker de cemento portland con C<sub>3</sub>A < 8 %);  
CPEG cemento portland con escoria granulada de alto horno (clinker de cemento portland con C<sub>3</sub>A < 8 %);  
CPC cemento portland compuesto (clinker de cemento portland con C<sub>3</sub>A < 8 %);  
RS cemento portland resistente a los sulfatos (C<sub>3</sub>A < 5 %);

<sup>2</sup> Se puede requerir relaciones agua-materiales cementantes más bajas o resistencias más altas para reducción de la permeabilidad o para protección del acero contra la corrosión;

<sup>3</sup> Correspondería a agua de mar;

<sup>4</sup> Puzolana que haya mostrado mediante ensaye o experiencias previas que mejora la resistencia a los sulfatos cuando se emplea en concreto fabricado con cemento portland resistente a los sulfatos.

No se adicionarán al concreto cloruros o aditivos químicos que los contengan en forma importante en elementos de concreto reforzado para clasificaciones de exposición B1, B2, o C, y en ningún elemento de concreto presforzado o curado a vapor.

#### 4.8.2 Restricción en el contenido de sulfato

El contenido de sulfato en el concreto al momento del colado, expresado como el porcentaje del peso de  $SO_3$  soluble en ácido con relación al peso de cemento, no será mayor que 5 por ciento.

#### 4.8.3 Restricciones sobre otras sales

No se incorporarán al concreto otras sales a menos que se pueda mostrar que no afectan adversamente la durabilidad.

### 4.9 Requisitos para el recubrimiento del acero de refuerzo

#### 4.9.1 Disposición general

El recubrimiento libre del acero de refuerzo será el mayor de los valores determinados de los incisos 4.9.2 y 4.9.3, a menos que se requieran recubrimientos mayores por resistencia al fuego.

**Tabla 4.7.1 Requisitos de resistencia a compresión para abrasión<sup>1</sup>**

Miembro y/o tipo de tránsito	Resistencia a compresión especificada <sup>2</sup> , $f_c'$ , MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
Pisos comerciales e industriales sujetos a: Tránsito vehicular	25 (250)
Pavimentos o pisos sujetos a:	
a) Tránsito de poca frecuencia con llantas neumáticas (vehículos de hasta 30 kN [3 t])	25 (250)
b) Tránsito con frecuencia media con llantas neumáticas (vehículos de más de 30 kN [3 t])	30 (300)
c) Tránsito con llantas no neumáticas	40 (400)
d) Tránsito con llantas de acero	Por determinarse, pero no menor que 40 (400)

<sup>1</sup> En forma alternativa, se pueden usar tratamientos superficiales para incrementar la resistencia a la abrasión;

<sup>2</sup>  $f_c'$  se refiere a la resistencia del concreto empleado en la zona de desgaste.

**Tabla 4.8.1 Valores máximos de contenido de ion cloruro en el concreto al momento del colado**

Tipo de miembro	Máximo contenido de iones de cloruro (CL <sup>-</sup> ) solubles en agua en el concreto, porcentaje en peso del cemento
Concreto presforzado	0.06
Concreto reforzado expuesto a cloruros en condiciones de servicio húmedas	0.15
Concreto reforzado expuesto a cloruros en condiciones de servicio secas o protegidas de la humedad	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30

#### 4.9.2 Recubrimiento necesario en cuanto a la colocación del concreto

El recubrimiento y el detallado del acero serán tales que el concreto pueda ser colocado y compactado adecuadamente de acuerdo con el inciso 15.3.6.

El recubrimiento libre de toda barra de refuerzo no será menor que su diámetro, ni menor que lo señalado a continuación:

En columnas y trabes, 20 mm, en losas, 15 mm, y en cascarones, 10 mm. Si las barras forman paquetes, el recubrimiento libre, además, no será menor que 1.5 veces el diámetro de la barra más gruesa del paquete.

#### 4.9.3 Recubrimiento para protección contra la corrosión

Cuando el concreto es colado en cimbras y compactado de acuerdo con el inciso 15.3.6, el recubrimiento en vigas, trabes y contr trabes no será menor que el valor dado en la tabla 4.9.1, de acuerdo con la clasificación de exposición y la resistencia especificada del concreto. En losas, muros y elementos prefabricados el recubrimiento no será menor de 0.75 veces los indicados en la tabla 4.9.1, según corresponda, y no menor de 0.5 veces los mismos valores para el caso de cascarones.

Cuando el concreto es colado sobre o contra el terreno y compactado de acuerdo con el inciso 15.3.6, y no se conozcan las condiciones de agresividad del terreno, el mínimo recubrimiento para la superficie en contacto con el terreno será 75 mm, o 50 mm si se emplea plantilla o membrana impermeable entre el terreno y el concreto por colar.

#### 4.10 Reacción álcali–agregado

Se deben tomar precauciones para minimizar el riesgo de daño estructural debido a la reacción álcali–agregado.

**Tabla 4.9.1 Recubrimiento libre mínimo requerido**

Clasificación de exposición	Resistencia a compresión especificada, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )							
	15 (150) <sup>(1)</sup>	20 (200)	25 (250)	30 (300)	40 (400)	50 (500)	60 (600)	70 (700)
	Recubrimiento mínimo requerido (mm)							
A1	30	25	25	20	20	20	15	15
A2	50	40	35	30	25	25	20	20
B1	65	50	40	35	30	30	25	25
B2	—	—	50	45	40	35	30	30
C	—	—	—	—	—	70 <sup>(2)</sup>	65 <sup>(2)</sup>	60 <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Ver inciso 2.1.2

<sup>2</sup> Además se requiere emplear un contenido de cemento portland no menor que 3 500 N/m<sup>3</sup> (350 kg/m<sup>3</sup>) y una relación agua/cemento que no exceda 0.40.

### 5. ESTADOS LÍMITE DE FALLA

#### 5.1 Flexión

##### 5.1.1 Requisitos generales

##### 5.1.1.1 Falla balanceada en secciones rectangulares

Las secciones rectangulares sin acero de compresión tienen falla balanceada cuando su área de acero es:

$$A_s = \frac{f_c''}{f_y} \frac{600 \beta_1}{f_y + 600} bd \quad (5.1.1)$$

$$\left( A_s = \frac{f_c''}{f_y} \frac{6000 \beta_1}{f_y + 6000} bd \right)$$

donde  $f_c''$  tiene el valor especificado en el inciso 3.5e,  $b$  y  $d$  son el ancho y el peralte efectivo de la sección, reducidos de acuerdo con la sección 3.7.

En otras secciones, para determinar el área de acero que corresponde a la falla balanceada, se aplicarán las condiciones de equilibrio y las hipótesis de la sección 3.5.

#### 5.1.1.2 Ancho efectivo en secciones L y T

El ancho del patín que se considere trabajando a compresión en secciones L y T a cada lado del alma será el menor de los tres valores siguientes:

- La octava parte del claro menos la mitad del ancho del alma;
- La mitad de la distancia al paño del alma del miembro más cercano; y
- Ocho veces el espesor del patín.

Se comprobará que el área del refuerzo transversal que se suministre en el patín, incluyendo el del lecho inferior, no sea menor que  $1/f_y$  veces el área transversal del patín, si  $f_y$  está en MPa ( $10/f_y$ , si  $f_y$  está en kg/cm<sup>2</sup>). La longitud de este refuerzo debe comprender el ancho efectivo del patín y, a cada lado de los paños del alma, debe anclarse de acuerdo con la sección 6.1.

#### 5.1.2 Dimensionamiento

Los elementos estructurales sujetos a flexión se dimensionarán de tal manera que su resistencia a flexión, calculada de acuerdo con el inciso 5.1.3, sea por lo menos igual a los momentos flexionantes de diseño calculados con cargas factorizadas.

#### 5.1.3 Resistencia a flexión

Las condiciones de equilibrio y las hipótesis generales de la sección 3.5 conducen a las siguientes expresiones para resistencia a flexión,  $M_R$ . En dichas expresiones  $F_R$  se tomará igual a 0.9.

- Secciones rectangulares sin acero de compresión

$$M_R = F_R b d^2 \epsilon_c'' q (1 - 0.5q) \quad (5.1.2)$$

o bien

$$M_R = F_R A_s f_y d (1 - 0.5q) \quad (5.1.3)$$

donde:

$$q = \frac{p f_y}{f_c''} \quad (5.1.4)$$

$$p = \frac{A_s}{bd} \quad (5.1.5)$$

$M_R$  resistencia de diseño a flexión  
 $b$  ancho de la sección (sección 3.7);  
 $d$  peralte efectivo (sección 3.7);  
 $f_c''$  esfuerzo uniforme de compresión (inciso 3.5e); y  
 $A_s$  área del refuerzo de tensión.

- Secciones rectangulares con acero de compresión

$$M_R = F_R \left[ (A_s - A_s') f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \right] \quad (5.1.6)$$

donde:

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{f_c'' b} \quad (5.1.7)$$

$a$  profundidad del bloque equivalente de esfuerzos;  
 $A_s$  área del acero a tensión;  
 $A_s'$  área del acero a compresión; y  
 $d'$  distancia entre el centroide del acero a compresión y la fibra extrema a compresión.

La ecuación 5.1.6 es válida sólo si el acero a compresión fluye cuando se alcanza la resistencia de la sección. Esto se cumple si:

$$p - p' \geq \frac{600 \beta_1}{600 - f_y} \frac{f_c''}{f_y} \frac{d'}{d} \quad (5.1.8)$$

$$\left( p - p' \geq \frac{6000 \beta_1}{6000 - f_y} \frac{f_c''}{f_y} \frac{d'}{d} \right)$$

donde:

$$p' = \frac{A_s'}{bd} \quad (5.1.9)$$

o, en términos de las áreas de refuerzo:

$$A_s - A_s' \geq \frac{600 \beta_1}{600 - f_y} \frac{f_c''}{f_y} b d' \quad (5.1.10)$$

$$\left( A_s - A_s' \geq \frac{6000 \beta_1}{6000 - f_y} \frac{f_c''}{f_y} b d' \right)$$

Cuando no se cumpla esta condición,  $M_R$  se determinará con un análisis de la sección basado en el equilibrio y las hipótesis de la sección 3.5; o bien se calculará aproximadamente con las ecuaciones 5.1.2 ó 5.1.3 despreciando el acero de compresión. En todos los casos habrá que revisar que el acero de tensión no exceda la cuantía máxima prescrita en el inciso 5.1.4.2. El acero de compresión debe restringirse contra el pandeo con estribos que cumplan los requisitos del inciso 7.3.4.

c) Secciones T e I sin acero de compresión

Si la profundidad del bloque de esfuerzos,  $a$ , calculada con la ecuación 5.1.11 no es mayor que el espesor del patín,  $t$ , el momento resistente se puede calcular con las ecuaciones 5.1.2 ó 5.1.3 usando el ancho del patín a compresión como  $b$ . Si  $a$  resulta mayor que  $t$ , el momento resistente puede calcularse con la expresión 5.1.12.

$$a = \frac{A_s f_y}{f_c'' b} \quad (5.1.11)$$

$$M_R = F_R \left[ A_{sp} f_y \left( d - \frac{t}{2} \right) + (A_s - A_{sp}) f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \right] \quad (5.1.12)$$

donde:

$$A_{sp} = \frac{f_c'' (b - b') t}{f_y} \quad (5.1.13)$$

$$a = \frac{(A_s - A_{sp}) f_y}{f_c'' b'} \quad (5.1.14)$$

$b$  ancho del patín; y  
 $b'$  ancho del alma.

La ecuación 5.1.12 es válida si el acero fluye cuando se alcanza la resistencia. Esto se cumple si

$$p - p_{sp} \leq \frac{600 \beta_1 f_c''}{600 + f_y f_y} \quad (5.1.15)$$

$$\left( p - p_{sp} \leq \frac{6000 \beta_1 f_c''}{6000 + f_y f_y} \right)$$

donde:

$$p = \frac{A_s}{b' d}$$

$$p_{sp} = \frac{A_{sp}}{b' d} \quad (5.1.16)$$

o, en términos de las áreas de refuerzo:

$$A_s - A_{sp} \leq \frac{600 \beta_1 f_c''}{600 + f_y f_y} b' d \quad (5.1.17)$$

$$\left( A_s - A_{sp} \leq \frac{6000 \beta_1 f_c''}{6000 + f_y f_y} b' d \right)$$

d) Flexión biaxial

La resistencia de vigas rectangulares sujetas a flexión biaxial se podrá valorar con la ecuación 5.2.2.

#### 5.1.4 Refuerzo a flexión

##### 5.1.4.1 Refuerzo mínimo

El refuerzo mínimo de tensión en secciones de concreto reforzado, excepto en losas perimetralmente apoyadas, será el requerido para que el momento resistente de la sección sea por lo menos 1.5 veces el momento de agrietamiento de la sección gruesa. Para valorar el refuerzo mínimo, el momento de agrietamiento se obtendrá con el módulo de rotura no reducido,  $\overline{f_f}$  definido en el inciso 2.1.3.

El área mínima de refuerzo de secciones rectangulares de concreto reforzado de peso normal, puede calcularse con la siguiente expresión aproximada

$$A_{s,mín} = \frac{0.22 \sqrt{f_c'}}{f_y} b d \quad (5.1.18)$$

$$\left( A_{s,mín} = \frac{0.7 \sqrt{f_c'}}{f_y} b d \right)$$

donde  $b$  y  $d$  son el ancho y el peralte efectivo, no reducidos, de la sección, respectivamente.

Sin embargo, no es necesario que el refuerzo mínimo sea mayor que 1.33 veces el requerido por el análisis.

En elementos a flexión que formen parte de sistemas que deban resistir fuerzas sísmicas, el área mínima de acero no deberá ser menor que la especificada en los incisos 7.2.2, 8.2.2 y 9.2.2 de acuerdo con el valor del factor  $Q$  usado en el análisis de la estructura.

#### 5.1.4.2 Refuerzo máximo

El área máxima de acero de tensión en secciones de concreto reforzado que no deban resistir fuerzas sísmicas será el 90 por ciento de la que corresponde a la falla balanceada de la sección considerada. La falla balanceada ocurre cuando el acero llega a su esfuerzo de fluencia y simultáneamente el concreto alcanza su deformación máxima de 0.003 en compresión. Este criterio es general y se aplica a secciones de cualquier forma sin acero de compresión o con él.

En elementos a flexión que formen parte de sistemas que deban resistir fuerzas sísmicas, el área máxima de acero no deberá ser mayor que la especificada en los incisos 7.2.3, 8.2.2 y 9.2.2 de acuerdo con el valor del factor  $Q$  usado en el análisis de la estructura.

#### 5.1.4.3 Detallado

Para el detallado de elementos a flexión se deberá cumplir con las especificaciones aplicables del capítulo 6.

## 5.2 Flexocompresión

### 5.2.1 Requisitos generales

Toda sección sujeta a compresión axial y flexión en una dirección se dimensionará para la combinación más desfavorable de dichas acciones incluyendo los efectos de esbeltez. El dimensionamiento puede hacerse a partir de las hipótesis generales de la sección 3.5, o bien con diagramas de interacción construidos de acuerdo con ellas. El factor de resistencia,  $F_R$ , especificado en 3.6d se aplicará tanto a la resistencia a carga axial como a la resistencia a flexión.

### 5.2.2 Dimensionamiento

#### 5.2.2.1 Excentricidad mínima

La excentricidad de diseño no será menor que  $0.05 h$  o que 20 mm, donde  $h$  es la dimensión de la sección en la dirección en que se considera la flexión.

### 5.2.3 Resistencia a compresión y flexión en dos direcciones

Son aplicables las hipótesis de la sección 3.5. Para secciones cuadradas o rectangulares también puede usarse la expresión siguiente:

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{P_{Rx}} + \frac{1}{P_{Ry}} - \frac{1}{P_{R0}}} \quad (5.2.1)$$

donde:

- $P_R$  carga normal resistente de diseño, aplicada con las excentricidades  $e_x$  y  $e_y$ ;
- $P_{R0}$  carga axial resistente de diseño, suponiendo  $e_x = e_y = 0$ ;
- $P_{Rx}$  carga normal resistente de diseño, aplicada con una excentricidad  $e_x$  en un plano de simetría; y
- $P_{Ry}$  carga normal resistente de diseño, aplicada con una excentricidad  $e_y$  en el otro plano de simetría.

La ecuación 5.2.1 es válida para  $P_R/P_{R0} \geq 0.1$ . Los valores de  $e_x$  y  $e_y$  deben incluir los efectos de esbeltez y no serán menores que la excentricidad prescrita en el inciso 5.2.2.1.

Para valores de  $P_R/P_{R0}$  menores que 0.1, se usará la ecuación siguiente:

$$\frac{M_{ux}}{M_{Rx}} + \frac{M_{uy}}{M_{Ry}} \leq 1.0 \quad (5.2.2)$$

donde:

- $M_{ux}$  y  $M_{uy}$  momentos de diseño alrededor de los ejes X y Y; y
- $M_{Rx}$  y  $M_{Ry}$  momentos resistentes de diseño alrededor de los mismos ejes.

## 5.2.4 Refuerzo a flexocompresión

### 5.2.4.1 Detallado

Para el detallado de elementos sujetos a flexocompresión se deberá cumplir con las especificaciones aplicables del capítulo 6 y de los incisos 7.3.3, 8.3.3 y 9.3.3 de acuerdo con el valor del factor  $Q$  usado en el análisis de la estructura.

## 5.3 Fuerza cortante

### 5.3.1 Requisitos generales

Cuando una reacción comprima directamente la cara del miembro que se considera, las secciones situadas a menos de una distancia  $d$  del paño de apoyo pueden dimensionarse para la misma fuerza cortante de diseño que actúa a la distancia  $d$ . En elementos presforzados, las secciones situadas a menos de  $h/2$  del paño del apoyo pueden dimensionarse con la fuerza cortante de diseño que actúa a  $h/2$ .

Cuando una carga concentrada actúa a no más de  $0.5d$  del paño de un apoyo, el tramo de viga comprendido entre la carga y el paño del apoyo, además de cumplir con los requisitos de los incisos 5.3.2 y 5.3.3, se revisará con el criterio de cortante por fricción del inciso 5.3.3.3.

El refuerzo para flexión debe cumplir con los requisitos de la sección 6.1, es decir, debe estar adecuadamente anclado a ambos lados de los puntos en que cruce a toda posible grieta inclinada causada por la fuerza cortante. Para lograr este anclaje en zapatas de sección constante basta suministrar en los extremos de las barras dobleces a 90 grados seguidos de tramos rectos de longitud no menor que 12 diámetros de la barra.

### 5.3.2 Dimensionamiento

Para secciones L, T o I, se usará el ancho del alma,  $b'$ , en lugar de  $b$  en todas las ecuaciones del inciso 5.3.3.1. Si el patín está a compresión, al producto  $b'd$  pueden sumarse las cantidades  $t^2$  en vigas T e I, y  $t^2/2$  en vigas L, siendo  $t$  el espesor del patín.

Si el espesor del patín es mayor de 600 mm, o la relación  $M/Vd$  excede de 2.0, la resistencia a fuerza cortante se valorará con el criterio que se aplica a vigas sin presfuerzo (sección 5.3.3.1a). El refuerzo para flexión debe estar anclado como se indica en el tercer párrafo del inciso 5.3.1.

### 5.3.3 Resistencia a fuerza cortante

La resistencia a fuerza cortante de un elemento sujeto a flexión o a flexocompresión será la suma de la fuerza cortante que toma el concreto,  $V_{CR}$ , de la fuerza cortante que toma el acero de refuerzo para cortante,  $V_{SR}$ , y, en su caso, de la componente vertical de la fuerza de presfuerzo,  $V_p$ .

#### 5.3.3.1 Fuerza cortante que toma el concreto

##### 5.3.3.1a Elementos sin presfuerzo

En vigas con relación claro a peralte total,  $L/h$ , no menor que 5, la fuerza cortante que toma el concreto,  $V_{CR}$ , se calculará con el criterio siguiente:

Si  $p < 0.015$

$$V_{CR} = F_R(0.2 + 20p)0.3\sqrt{f'_c}bd \quad (5.3.1)$$

$$\left( V_{CR} = F_R(0.2 + 20p)\sqrt{f'_c}bd \right)$$

Si  $p \geq 0.015$

$$V_{CR} = F_R 0.16\sqrt{f'_c}bd \quad (5.3.2)$$

$$\left( V_{CR} = F_R 0.5\sqrt{f'_c}bd \right)$$

Si  $L/h$  es menor que 4 y las cargas y reacciones comprimen directamente las caras superior e inferior de la viga,  $V_{CR}$  será el valor obtenido con la ecuación 5.3.3

$$V_{CR} = F_R \left( 3.5 - 2.5 \frac{M}{Vd} \right) 0.16\sqrt{f'_c}bd \quad (5.3.3)$$

$$\left( V_{CR} = F_R \left( 3.5 - 2.5 \frac{M}{Vd} \right) 0.5\sqrt{f'_c}bd \right)$$

donde:  $\left( 3.5 - 2.5 \frac{M}{Vd} \right) > 1.0$

En el factor anterior,  $M$  y  $V$  son el momento flexionante y la fuerza cortante que actúan en la sección, respectivamente. Si las cargas y reacciones no comprimen directamente las caras superior e inferior de la viga, se aplicará la ecuación 5.3.2 sin modificar el resultado. Para relaciones  $L/h$  comprendidas entre 4 y 5,  $V_{CR}$  se hará variar linealmente entre los valores dados por las ecuaciones 5.3.1 ó 5.3.2 y la ecuación 5.3.3, según sea el caso.

En todo caso  $V_{CR}$  deberá cumplir con:

$$V_{cR} \leq F_R 0.47 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.4)$$

$$\left( V_{cR} \leq F_R 1.5 \sqrt{f'_c} b d \right)$$

### 5.3.3.1b Elementos anchos

En elementos anchos como losas, zapatas y muros en los que el ancho,  $b$ , no sea menor que cuatro veces el peralte efectivo,  $d$ , el espesor no sea mayor de 600 mm y la relación  $M/Vd$  no exceda de 2.0, la fuerza resistente,  $V_{cR}$  debe calcularse mediante la ecuación 5.3.2 independientemente de la cuantía de refuerzo.

### 5.3.3.1c Elementos sujetos a flexión y carga axial

#### a) Flexocompresión

En miembros a flexocompresión en los que el valor absoluto de la fuerza axial de diseño,  $P_u$ , cumpla con

$$P_u < F_R (0.7f'_c A_g + 200A_s) \quad (5.3.5)$$

$$\left( P_u < F_R (0.7f'_c A_g + 2000A_s) \right)$$

la fuerza cortante que toma el concreto,  $V_{cR}$ , se obtendrá como sigue:

Si  $p < 0.015$

$$V_{cR} = F_R (0.2 + 20p) \left( 1 + 0.07 \frac{P_u}{A_g} \right) 0.3 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.6)$$

$$\left( V_{cR} = F_R (0.2 + 20p) \left( 1 + 0.007 \frac{P_u}{A_g} \right) \sqrt{f'_c} b d \right)$$

Si  $p \geq 0.015$

$$V_{cR} = F_R \left( 1 + 0.07 \frac{P_u}{A_g} \right) 0.16 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.7)$$

$$\left( V_{cR} = F_R \left( 1 + 0.007 \frac{P_u}{A_g} \right) 0.5 \sqrt{f'_c} b d \right)$$

usando  $A_s$  en  $\text{mm}^2$ ,  $f'_c$  en MPa y  $P_u$  en N (o en  $\text{cm}^2$ ,  $\text{kg}/\text{cm}^2$  y  $\text{kg}$ , respectivamente, en la ecuación en paréntesis).

Para valuar la cuantía  $p$  se usará el área de las barras de la capa más próxima a la cara de tensión o a la de compresión mínima en secciones rectangulares, y  $0.33A_s$  en secciones circulares, donde  $A_s$  es el área total de acero en la sección. Para estas últimas,  $b d$  se sustituirá por  $A_g$ , donde  $A_g$  es el área bruta de la sección transversal.

Por otro lado, en miembros a flexocompresión en los que el valor absoluto de la fuerza axial de diseño,  $P_u$ , cumpla con

$$P_u \geq F_R (0.7f'_c A_g + 200A_s) \quad (5.3.8)$$

$$\left( P_u \geq F_R (0.7f'_c A_g + 2000A_s) \right)$$

$V_{cR}$  se hará variar linealmente en función de  $P_u$ , hasta cero para

$$P_u = F_R (A_g f''_c + A_s f_y) \quad (5.3.9)$$

b) Flexotensión

En miembros sujetos a flexotensión,  $V_{cR}$ , se obtendrá mediante las ecuaciones 5.3.10 o 5.3.11 según corresponda.

Si  $p < 0.015$

$$V_{cR} = F_R (0.2 + 20p) \left( 1 - 0.3 \frac{P_u}{A_g} \right) 0.3 \sqrt{f'_c} bd \quad (5.3.10)$$

$$\left( V_{cR} = F_R (0.2 + 20p) \left( 1 - 0.03 \frac{P_u}{A_g} \right) \sqrt{f'_c} bd \right)$$

Si  $p \geq 0.015$

$$V_{cR} = F_R \left( 1 - 0.3 \frac{P_u}{A_g} \right) 0.16 \sqrt{f'_c} bd \quad (5.3.11)$$

$$\left( V_{cR} = F_R \left( 1 - 0.03 \frac{P_u}{A_g} \right) 0.5 \sqrt{f'_c} bd \right)$$

Para valuar la cuantía  $p$  y tratar secciones circulares, se aplicará lo especificado para miembros a flexocompresión.

### 5.3.3.1d Elementos presforzados

En secciones con presfuerzo (Capítulo 11), donde los tendones estén adheridos y no estén situadas en la zona de transferencia, la fuerza  $V_{cR}$  se calculará con la ecuación 5.3.12, o se tomará igual al menor de los valores  $V_{ci}$  y  $V_{cw}$  calculados con las ecuaciones 5.3.15 y 5.3.18, respectivamente. La ecuación 5.3.12 sólo se podrá usar si la fuerza de presfuerzo es por lo menos el 40 por ciento de fuerza total de tensión en el elemento.

$$V_{cR} = F_R \left( 0.05 \sqrt{f'_c} + 5 \frac{V d_p}{M} \right) bd \quad (5.3.12)$$

$$\left( V_{cR} = F_R \left( 0.15 \sqrt{f'_c} + 50 \frac{V d_p}{M} \right) bd \right)$$

donde:  $\frac{V d_p}{M} \leq 1$

En la ecuación 5.3.12,  $M$  y  $V$  son el momento flexionante y la fuerza cortante que actúan en la sección transversal, y  $d_p$  es la distancia de la fibra extrema en compresión al centroide de los tendones de presfuerzo. El peralte efectivo,  $d$ , es la distancia de la fibra extrema en compresión al centroide de los tendones de presfuerzo situados en la zona de tensión, sin que tenga que tomarse menor que 0.8 veces el peralte total.

Sin embargo, se permite que:

$$V_{cR} = F_R 0.16 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.13)$$

$$\left( V_{cR} = F_R 0.5 \sqrt{f'_c} b d \right)$$

Además, siempre se deberá cumplir con:

$$V_{cR} < F_R 0.4 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.14)$$

$$\left( V_{cR} < F_R 1.4 \sqrt{f'_c} b d \right)$$

En forma alternativa, se permitirá calcular  $V_{cR}$  como el menor de  $V_{ci}$  y  $V_{cw}$  obtenidos como se indica a continuación:

$$V_{ci} = F_R (0.05 \sqrt{f'_c} b_w d_p + V_d + \frac{V_i M_{CRe}}{M_{max}}) \quad (5.3.15)$$

$$\left( V_{ci} = F_R (0.16 \sqrt{f'_c} b_w d_p + V_d + \frac{V_i M_{CRe}}{M_{max}}) \right)$$

donde:

$$d_p \geq 0.8h$$

$$M_{CRe} = \frac{I}{y_t} (0.5 \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \quad (5.3.16)$$

$$\left( M_{CRe} = \frac{I}{y_t} (1.6 \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \right)$$

Los valores de  $M_{max}$  y  $V_{ci}$  en la ecuación 5.3.15 se deben calcular con la combinación de carga que cause el máximo momento factorizado en la sección. En cualquier caso, se debe cumplir:

$$V_{ci} \geq F_R 0.14 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5.3.17)$$

$$\left( V_{ci} \geq F_R 0.45 \sqrt{f'_c} b_w d \right)$$

Por su parte,  $V_{cw}$  se debe calcular con:

$$V_{cw} = F_R [(0.29\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p] \quad (5.3.18)$$

$$\left( V_{cw} = F_R [(0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p] \right)$$

Alternativamente,  $V_{cw}$  puede calcularse como la fuerza cortante correspondiente a carga muerta más viva que resulta en un esfuerzo principal de tensión de  $0.33\sqrt{f'_c}$  ( $1.1\sqrt{f'_c}$ ) (si se usa  $\text{kg/cm}^2$ ) en el centroide del miembro, o en la intersección de los patines y el alma cuando el centroide se encuentra en dichos patines. En miembros de sección compuesta, el esfuerzo a tensión principal se debe calcular utilizando la sección que resiste la carga viva.

La contribución de los patines en vigas T, I y L se valorarán con el criterio que se prescribe en el inciso 5.3.2 para vigas sin presfuerzo.

### 5.3.3.2 Método detallado para cálculo de la fuerza cortante que toma el concreto

#### 5.3.3.2a Alcance

Este inciso presenta un método detallado alternativo al expuesto en 5.3.3.1 para el cálculo de la fuerza cortante que toma el concreto en elementos sin presfuerzo.

#### 5.3.3.2b Elementos sin presfuerzo sometidos únicamente a cortante y flexión

$$V_{cR} = F_R \left( 0.16\sqrt{f'_c} + 17p \frac{V_u d}{M_u} \right) bd \quad (5.3.19)$$

$$\left( V_{cR} = F_R \left( 0.5\sqrt{f'_c} + 176p \frac{V_u d}{M_u} \right) bd \right)$$

donde:

$$\frac{V_u d}{M_u} \leq 1$$

Se considerará el momento flexionante,  $M_u$ , que ocurre simultáneamente con la fuerza cortante,  $V_u$ , en la sección analizada. En cualquier caso se debe cumplir con:

$$V_{cR} \leq 0.29\sqrt{f'_c} bd \quad (5.3.20)$$

$$\left( V_{cR} \leq 0.93\sqrt{f'_c} bd \right)$$

#### 5.3.3.2c Elementos sometidos a compresión axial

Se permitirá utilizar la ecuación 5.3.19, pero se substituirá  $M_u$  por  $M_m$  de tal manera que:

$$M_m = M_u - N_u \left( \frac{4h - d}{8} \right) \quad (5.3.21)$$

En elementos sometidos a compresión axial la relación  $V_u d / M_m$  no se limitará a 1.0. Sin embargo,  $V_{cR}$  debe cumplir con:

$$V_{cR} = F_R 0.29 \sqrt{f'_c} b d \sqrt{1 + \frac{0.29 N_u}{A_g}} \quad (5.3.22)$$

$$\left( V_{cR} = F_R 0.93 \sqrt{f'_c} b d \sqrt{1 + \frac{N_u}{35 A_g}} \right)$$

Cuando  $M_m$  calculado con la ecuación 5.3.21 resulte negativo, se debe utilizar la ecuación 5.3.22.

#### 5.3.3.2d Elementos sujetos a tensión axial significativa

$$V_{cR} = F_R 0.17 \left( 1 + \frac{0.29 N_u}{A_g} \right) \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.23)$$

$$\left( V_{cR} = F_R 0.5 \left( 1 + \frac{N_u}{35 A_g} \right) \sqrt{f'_c} b d \right)$$

$N_u$  es negativa para tensión y  $V_{cR}$  no deberá tomarse menor a cero.

#### 5.3.3.2e Elementos de sección circular

El área que se utilice para calcular  $V_{cR}$  debe ser el producto del diámetro,  $D$ , y el peralte efectivo,  $d$ . Se permite tomar  $d$  como 0.8 veces el diámetro de la sección de concreto.

#### 5.3.3.3 Resistencia a fuerza cortante por fricción

##### 5.3.3.3a Requisitos generales

Estas disposiciones se aplican en secciones donde rige el cortante directo y no la tensión diagonal (en ménsulas cortas, por ejemplo, y en detalles de conexiones de estructuras prefabricadas). En tales casos, si se necesita refuerzo, éste deberá ser perpendicular al plano crítico por cortante directo. Dicho refuerzo debe estar bien distribuido en la sección definida por el plano crítico y debe estar anclado a ambos lados de modo que pueda alcanzar su esfuerzo de fluencia en el plano mencionado.

##### 5.3.3.3b Resistencia de diseño

La resistencia a fuerza cortante,  $V_R$ , se tomará como el menor de los valores calculados con las ecuaciones 5.3.24 a 5.3.26:

$$V_R = F_R \mu ( A_{vf} f_y + N_u ) \quad (5.3.24)$$

$$V_R = F_R [ 1.4A + 0.8 ( A_{vf} f_y + N_u ) ] \quad (5.3.25)$$

$$\left( V_R = F_R [ 1.4A + 0.8 ( A_{vf} f_y + N_u ) ] \right)$$

$$V_R = F_R 0.25 f'_c A \quad (5.3.26)$$

donde:

- $A_{vf}$  área del refuerzo por cortante por fricción;
- $A$  área de la sección definida por el plano crítico;
- $N_u$  fuerza de diseño de compresión normal al plano crítico; y
- $\mu$  coeficiente de fricción que se tomará igual a:
  - 1.4 en concreto colado monolíticamente;
  - 1.0 para concreto colado contra concreto endurecido; o
  - 0.7 entre concreto y acero laminado.

Los valores anteriores de  $\mu$  se aplicarán si el concreto endurecido contra el que se coloca concreto fresco está limpio y libre de lechada, y tiene rugosidades con amplitud total del orden de 5 mm o más, así como si el acero está limpio y sin pintura.

En las expresiones anteriores,  $f_y$  no se supondrá mayor de 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>).

### 5.3.3.3c Tensiones normales al plano crítico

Cuando haya tensiones normales al plano crítico, sea por tensión directa o por flexión,  $A_{vf}$  no incluirá el área de acero necesaria por estos conceptos.

### 5.3.4 Limitación para la fuerza cortante de diseño

En ningún caso se permitirá que la fuerza cortante de diseño,  $V_u$  sea superior a los siguientes valores:

a) En vigas

$$V_u < F_R 0.8 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.27)$$

$$\left( V_u < F_R 2.5 \sqrt{f'_c} b d \right)$$

b) En columnas, y en elementos de ductilidad media y alta donde  $V_{cR}$  se suponga igual a cero

$$V_u < F_R 0.6 \sqrt{f'_c} b d \quad (5.3.28)$$

$$\left( V_u < F_R 2 \sqrt{f'_c} b d \right)$$

### 5.3.5 Refuerzo para fuerza cortante

#### 5.3.5.1 Refuerzo en vigas y columnas sin presfuerzo

Este refuerzo debe estar formado por estribos cerrados perpendiculares u oblicuos al eje de la pieza, barras dobladas o una combinación de estos elementos. También puede usarse malla de alambre soldado, uniéndola según el inciso 6.6.3. Los estribos deben rematarse como se indica en el inciso 6.1.4.

Para estribos de columnas, vigas principales y arcos, no se usará acero de  $f_y$  mayor que 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>). Para diseño, el esfuerzo de fluencia de la malla no se tomará mayor que 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>).

No se tendrán en cuenta estribos que formen un ángulo con el eje de la pieza menor de 45 grados, ni barras dobladas en que dicho ángulo sea menor de 30 grados.

La separación del refuerzo transversal dependerá de la relación entre  $V_u$  y  $V_{cR}$  como sigue

a) Cuando  $V_u$  sea mayor que  $V_{cR}$ , la separación,  $s$ , del refuerzo se determinará con:

$$s = \frac{F_R A_v f_y d (\sin \theta + \cos \theta)}{V_{sR}} \quad (5.3.29)$$

donde:

$A_v$  área transversal del refuerzo para fuerza cortante comprendido en una distancia  $s$ ;

$\theta$  ángulo que dicho refuerzo forma con el eje de la pieza; y  
 $V_{sR}$  fuerza cortante de diseño que toma el acero transversal calculada como:

$$V_{sR} = V_u - V_{cR} \quad (5.3.30)$$

Para secciones circulares se sustituirá el peralte efectivo,  $d$ , por el diámetro de la sección,  $D$ .

El refuerzo para fuerza cortante nunca será menor que el calculado según el inciso 5.3.5.2. La separación,  $s$ , no debe ser menor de 60 mm.

b) Si  $V_u$  es mayor que  $V_{cR}$  pero menor o igual que el valor calculado con la ecuación 5.3.4, la separación de estribos perpendiculares al eje del elemento no deberá ser mayor que  $0.5d$ .

c) Si  $V_u$  es mayor que el valor calculado con la ecuación 5.3.4, la separación de estribos perpendiculares al eje del elemento no deberá ser mayor que  $0.25d$ .

Cuando el refuerzo conste de un solo estribo o grupo de barras paralelas dobladas en una misma sección, su área se calculará con

$$A_v = \frac{V_{sR}}{F_R f_y \text{sen}\theta} \quad (5.3.31)$$

En este caso, no se admitirá que  $V_u$  sea mayor que el valor calculado con la ecuación 5.3.4.

#### 5.3.5.2 Refuerzo mínimo para vigas sin presfuerzo

En vigas sin presfuerzo debe suministrarse un refuerzo mínimo por tensión diagonal cuando la fuerza cortante de diseño,  $V_u$ , sea menor que  $V_{cR}$ . El área de refuerzo mínimo para vigas será la calculada con la siguiente expresión:

$$A_{v,mín} = 0.10 \sqrt{f_c} \frac{bs}{f_y} \quad (5.3.32)$$

$$\left( A_{v,mín} = 0.30 \sqrt{f_c} \frac{bs}{f_y} \right)$$

Este refuerzo estará formado por estribos verticales de diámetro no menor de 7.9 mm (número 2.5), cuya separación no excederá de medio peralte efectivo,  $d/2$ .

#### 5.3.5.3 Refuerzo en vigas y columnas con presfuerzo

Este refuerzo estará formado por estribos perpendiculares al eje de la pieza, con esfuerzo especificado de fluencia,  $f_y$ , no mayor que 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>), o por malla de alambre soldado cuyo esfuerzo especificado de fluencia,  $f_y$ , no se tomará mayor que 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>).

Cuando la fuerza cortante de diseño,  $V_u$ , sea mayor que  $V_{cR}$ , se requiere refuerzo para fuerza cortante. Su contribución a la resistencia se determinará con la ecuación 5.3.29 con las limitaciones siguientes:

a) Vigas y columnas con presfuerzo total

1) La separación de estribos no debe ser menor de 60 mm.

2) Si  $V_u$  es mayor que  $V_{cR}$  pero menor o igual que el valor determinado con la ecuación 5.3.4, la separación no deberá ser mayor que  $0.75h$ , donde  $h$  es el peralte total de la pieza.

3) Si  $V_u$  es mayor que el valor determinado con la ecuación 5.3.4, la separación de los estribos no deberá ser mayor que  $0.37h$ .

4) En ningún caso se admitirá que  $V_u$  sea mayor que el valor determinado con la ecuación 5.3.27.

b) Vigas y columnas con presfuerzo parcial

En vigas y columnas con presfuerzo parcial se aplicará lo dispuesto en el inciso 5.3.4 para elementos sin presfuerzo.

#### 5.3.5.4 Refuerzo mínimo para vigas con presfuerzo

El refuerzo mínimo para fuerza cortante prescrito en el inciso 5.3.5.2 se usará, asimismo, en vigas parcial o totalmente presforzadas. En vigas totalmente presforzadas la separación de los estribos que forman el refuerzo mínimo será de  $0.75h$ .

#### 5.3.5.5 Detallado

Para el detallado de elementos sujetos a fuerza cortante se deberá cumplir con las especificaciones aplicables del capítulo 6.

##### 5.3.5.5a Estribos de suspensión

Cuando una carga concentrada se transmite al miembro a través de vigas secundarias que llegan a sus caras laterales, se tomará en cuenta su efecto sobre la tensión diagonal del miembro principal cerca de la unión.

Para el efecto, se deberá colocar refuerzo transversal (estribos de suspensión) en la zona de intersección de las vigas, sobre la viga principal (figura 5.3.1). Este refuerzo deberá resistir una fuerza cortante calculada mediante

$$V_{sR} = V_u \frac{h_s}{h_p} \quad (5.3.33)$$

donde  $V_u$  es la suma de las fuerzas cortantes de diseño de las vigas secundarias y  $h_s$  y  $h_p$  son los peraltes de las vigas secundaria y principal, respectivamente. Este refuerzo será adicional al necesario por fuerza cortante en la viga principal, y se colocará en ella en la longitud indicada en la figura 5.3.1.

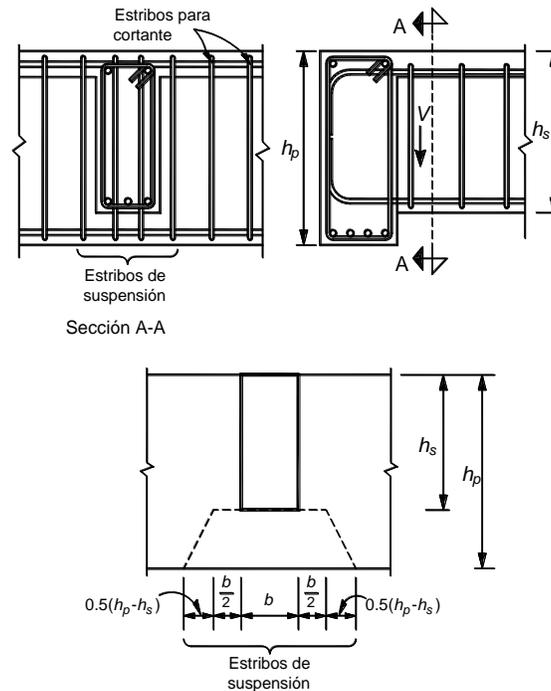
El lecho inferior del refuerzo longitudinal de la viga secundaria deberá colocarse sobre el correspondiente de la viga principal, y deberá anclarse en ella considerando como sección crítica el paño de los estribos adicionales (figura 5.3.1).

##### 5.3.5.5b Vigas con tensiones perpendiculares a su eje

Si una carga se transmite a una viga de modo que produzca tensiones perpendiculares a su eje, como sucede en vigas que reciben cargas de losa en su parte inferior, se suministrarán estribos adicionales en la viga calculados para que transmitan la carga a la viga.

##### 5.3.5.5c Interrupción y traslape del refuerzo longitudinal

En tramos comprendidos a un peralte efectivo de las secciones donde, en zonas de tensión, se interrumpa más que 33 por ciento, o traslape más que 50 por ciento del refuerzo longitudinal, la fuerza cortante máxima que puede tomar el concreto se considerará de  $0.7V_{cR}$ .



**Figura 5.3.1 Transmisión de fuerzas y conexión entre vigas secundarias y principales**

#### 5.3.5.5d Refuerzo longitudinal en trabes

Deberá proporcionarse acero longitudinal adicional en las paredes verticales del elemento, que estará constituido, como mínimo, por barras de 7.9 mm de diámetro (número 2.5) colocadas con una separación máxima de 350 mm.

#### 5.3.6 Fuerza cortante en losas y zapatas

##### 5.3.6.1 Resistencia a fuerza cortante en losas y zapatas

La resistencia de losas y zapatas a fuerza cortante en la vecindad de cargas o reacciones concentradas será la menor de las correspondientes a las dos condiciones que siguen:

a) La losa o zapata actúa como una viga ancha en tal forma que las grietas diagonales potenciales se extenderían en un plano que abarca todo el ancho. Este caso se trata de acuerdo con las disposiciones de los incisos 5.3.3.1a, 5.3.3.1b y 5.3.5.1. En losas planas, para esta revisión se supondrá que el 75 por ciento de la fuerza cortante actúa en la franja de columnas y el 25 por ciento en las centrales (inciso 3.4.1).

b) Existe una acción en dos direcciones de manera que el agrietamiento diagonal potencial se presentaría sobre la superficie de un cono o pirámide truncados en torno a la carga o reacción concentrada. En este caso se procederá como se indica en los incisos 5.3.6.2 a 5.3.6.6.

##### 5.3.6.2 Sección crítica

La sección crítica se supondrá perpendicular al plano de la losa o zapata y se localizará de acuerdo con lo siguiente:

a) Si el área donde actúa la reacción o la carga concentrada no tiene entrantes, la sección crítica formará una figura semejante a la definida por la periferia del área cargada, a una distancia de ésta igual a  $d/2$ , donde  $d$  es el peralte efectivo de la losa.

b) Si el área cargada tiene entrantes, en ellas la sección crítica se hará pasar de modo que su perímetro sea mínimo y que en ningún punto su distancia a la periferia del área cargada sea menor que  $d/2$ . Por lo demás, se aplicará lo dicho en el inciso 5.3.6.2.a.

c) En losas planas aligeradas también se revisará como sección crítica la situada a  $d/2$  de la periferia de la zona maciza alrededor de las columnas.

d) Cuando en una losa o zapata haya aberturas que disten de una carga o reacción concentradas menos de diez veces el espesor del elemento, o cuando la abertura se localice en una franja de columna, como se define en el inciso 3.4.1, no se considerará efectiva la parte de la sección crítica comprendida entre las rectas tangentes a la abertura y concurrentes en el centroide del área cargada.

### 5.3.6.3 Esfuerzo cortante de diseño

a) Si no hay transmisión de momento entre la losa o zapata y la columna, o si el momento por transmitir,  $M_u$ , no excede de  $0.2V_u d$ , el esfuerzo cortante de diseño,  $v_u$ , se calculará con la expresión siguiente:

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d} \quad (5.3.34)$$

donde  $b_o$  es el perímetro de la sección crítica y  $V_u$  la fuerza cortante de diseño en dicha sección.

b) Cuando haya transferencia de momento, se supondrá que una fracción del momento dada por

$$\alpha = 1 - \frac{I}{1 + 0.67\sqrt{(c_1 + d)/(c_2 + d)}} \quad (5.3.35)$$

se transmite por excentricidad de la fuerza cortante total, con respecto al centroide de la sección crítica definida antes. El esfuerzo cortante máximo de diseño,  $v_u$ , se obtendrá tomando en cuenta el efecto de la carga axial y del momento, suponiendo que los esfuerzos cortantes varían linealmente (figura 5.3.2). En columnas rectangulares  $c_1$  es la dimensión paralela al momento transmitido y  $c_2$  es la dimensión perpendicular a  $c_1$ . En columnas circulares  $c_1 = c_2 = 0.9D$ . El resto del momento, es decir la fracción  $1 - \alpha$ , debe transmitirse por flexión en un ancho igual a  $c_2 + 3h$ , de acuerdo con el inciso 3.4.4.

### 5.3.6.4 Resistencia de diseño del concreto

El esfuerzo cortante máximo de diseño obtenido con los criterios anteriores no debe exceder de

$$0.3F_R(0.5 + \gamma)\sqrt{f_c'}; \text{ ni de } 0.3F_R\sqrt{f_c'} \quad (5.3.36)$$

$$\left( F_R(0.5 + \gamma)\sqrt{f_c'} \quad ; \quad \text{ni de } F_R\sqrt{f_c'} \right)$$

a menos que se suministre refuerzo como se indica en los incisos 5.3.6.5 y 5.3.6.6.

En la expresión anterior,  $\gamma$  es la relación del lado corto al lado largo del área donde actúa la carga o reacción.

Al considerar la combinación de acciones permanentes, variables y sismo, en la ecuación 5.3.36 y en los incisos 5.3.6.5 y 5.3.6.6 el factor de resistencia  $F_R$  se tomará igual a 0.65 en lugar de 0.75.

En losas planas y zapatas presforzadas en dos direcciones, que cumplan lo estipulado en el inciso 5.3.6.5, el esfuerzo cortante máximo de diseño no deberá exceder de

$$F_R [0.3(0.5 + \gamma)\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc}] \quad (5.3.37)$$

$$\left( F_R [(0.5 + \gamma)\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc}] \right)$$

donde  $f_{pc}$  es el valor promedio de  $f_{pc}$  en las dos direcciones ortogonales.

### 5.3.6.5 Refuerzo necesario para resistir la fuerza cortante

#### a) Consideraciones generales

Para calcular el refuerzo necesario se considerarán dos vigas ficticias perpendiculares entre sí, que se cruzan sobre la columna. El ancho,  $b$ , de cada viga será igual al peralte efectivo de la losa,  $d$ , más la dimensión horizontal de la cara de columna a la cual llega si ésta es rectangular y su peralte será igual al de la losa. Si la columna es circular se puede tratar como cuadrada de lado igual a  $(0.8D - 0.2d)$ , donde  $D$  es el diámetro de la columna. En cada una de estas vigas se suministrarán estribos verticales cerrados con una barra longitudinal en cada esquina y cuya separación será 0.85 veces la calculada con la ecuación 5.3.29, sin que sea mayor que  $d/3$ ; la separación transversal entre ramas verticales de los estribos no debe exceder de 200 mm.

La separación determinada para cada viga en la sección crítica se mantendrá en una longitud no menor que un cuarto del claro entre ejes de columnas en el caso de losas planas, o hasta el borde en zapatas, a menos que mediante un análisis se demuestre que puede interrumpirse antes.

#### b) Resistencia de diseño

Al aplicar la ecuación 5.3.29 se supondrá

$$V_u = v_u b d \quad (5.3.38)$$

y

$$V_{cR} = 0.13F_R b d \sqrt{f'_c} \quad (5.3.39)$$

$$\left( V_{cR} = 0.4F_R b d \sqrt{f'_c} \right)$$

donde  $v_u$  es el esfuerzo cortante máximo de diseño que actúa en la sección crítica en cada viga ficticia, calculado de acuerdo con el inciso 5.3.6.3.

En ningún caso se admitirá que  $v_u$  sea mayor que:

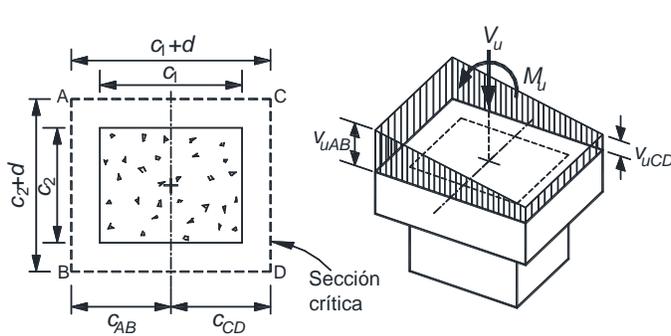
$$0.4F_R \sqrt{f'_c} \quad (5.3.40)$$

$$\left( 1.3F_R \sqrt{f'_c} \right)$$

### 5.3.6.6 Refuerzo mínimo

En losas planas debe suministrarse un refuerzo mínimo que sea como el descrito en el inciso 5.3.6.5, usando estribos de 7.9 mm o más de diámetro, espaciados a no más de  $d/3$ . Este refuerzo se mantendrá hasta no menos de un cuarto del claro

correspondiente. Si la losa es aligerada, el refuerzo mínimo se colocará en las nervaduras de ejes de columnas y en las adyacentes a ellas.



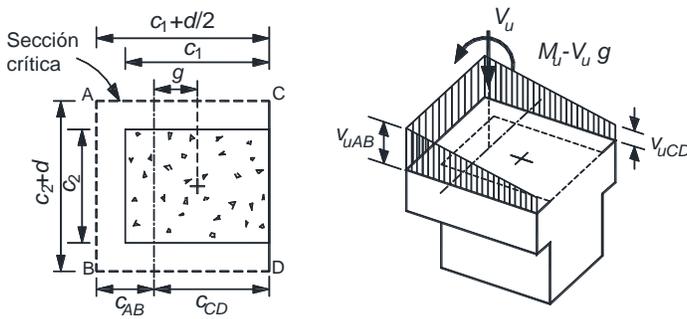
$$v_{uAB} = \frac{V_u}{A_{cr}} + \frac{\alpha M_u c_{AB}}{J_c}$$

$$v_{uCD} = \frac{V_u}{A_{cr}} - \frac{\alpha M_u c_{CD}}{J_c}$$

$$A_{cr} = 2d(c_1 + c_2 + 2d)$$

$$J_c = \frac{d(c_1 + d)^3}{6} + \frac{(c_1 + d)d^3}{6} + \frac{d(c_2 + d)(c_1 + d)^2}{2}$$

a) columna interior



$$v_{uAB} = \frac{V_u}{A_{cr}} + \frac{\alpha (M_u - V_u g) c_{AB}}{J_c}$$

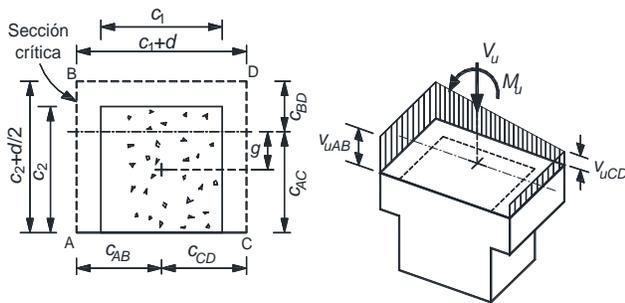
$$v_{uC} = v_{uD} = \frac{V_u}{A_{cr}} - \frac{\alpha (M_u - V_u g) c_{CD}}{J_c}$$

$$A_{cr} = d(2c_1 + c_2 + 2d)$$

$$c_{AB} = \frac{(c_1 + d/2)^2 d}{A_{cr}}; \quad g = (c_1 + d)/2 - c_{AB}$$

$$J_c = \frac{d(c_1 + d/2)^3}{6} + \frac{(c_1 + d/2)d^3}{6} + (c_2 + d)d c_{AB}^2 + 2(c_1 + d/2)d \left( \frac{c_1 + d/2}{2} - c_{AB} \right)^2$$

b) columna de borde con momento perpendicular al borde



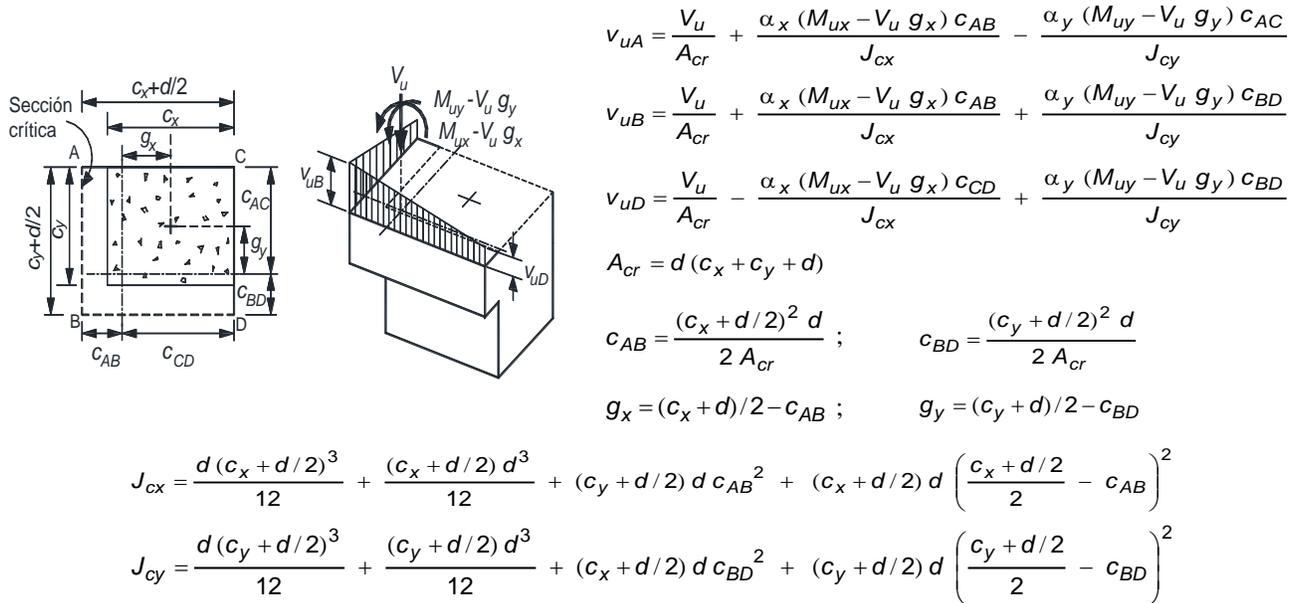
$$v_{uAB} = \frac{V_u}{A_{cr}} + \frac{\alpha M_u c_{AB}}{J_c}$$

$$v_{uCD} = \frac{V_u}{A_{cr}} - \frac{\alpha M_u c_{CD}}{J_c}$$

$$A_{cr} = d(c_1 + 2c_2 + 2d)$$

$$J_c = \frac{(c_1 + d)d^3}{12} + \frac{(c_1 + d)^3 d}{12} + 2(c_2 + d/2)d \left( \frac{c_1 + d}{2} \right)^2$$

c) columna de borde con momento paralelo al borde



d) columna de esquina

Figura 5.3.2 Transmisión de momento entre columna rectangular y losa o zapata

## 5.4 Torsión

### 5.4.1 Requisitos generales

Las disposiciones que siguen son aplicables a tramos sujetos a torsión cuya longitud no sea menor que el doble del peralte total del miembro. Las secciones situadas a menos de un peralte efectivo de la cara del apoyo pueden dimensionarse para la torsión que actúa a un peralte efectivo.

En este inciso se entenderá por un elemento con sección transversal hueca a aquél que tiene uno o más huecos longitudinales, de tal manera que el cociente entre  $A_g$  y  $A_{cp}$  es menor que 0.85. El área  $A_g$  en una sección hueca es sólo el área del concreto y no incluye el área de los huecos; su perímetro es el mismo que el de  $A_{cp}$ .  $A_{cp}$  es el área de la sección transversal incluida en el perímetro exterior del elemento de concreto,  $p_{cp}$ . En el cálculo de  $A_{cp}$  y  $p_{cp}$ , en elementos colados monolíticamente con la losa, se deberán incluir los tramos de losa indicados en la figura 5.4.1 excepto cuando el parámetro  $A_{cp}^2/p_{cp}$ , calculado para vigas con patines, sea menor que el calculado para la misma viga ignorando los patines.

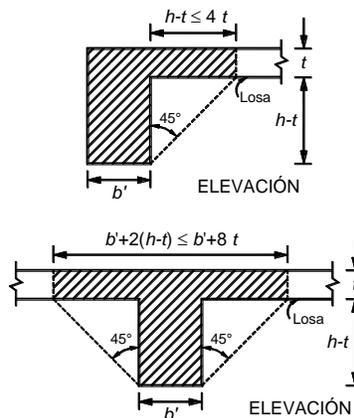


Figura 5.4.1 Ejemplos del tramo de losa que debe considerarse en el cálculo de  $A_{cp}$  y  $p_{cp}$

Si la sección se clasifica como hueca, se usará  $A_g$  en lugar de  $A_{cp}$  en las ecuaciones 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3, 5.4.5, 5.4.6 y 5.4.7.

#### 5.4.1.1 Cálculo del momento torsionante de diseño

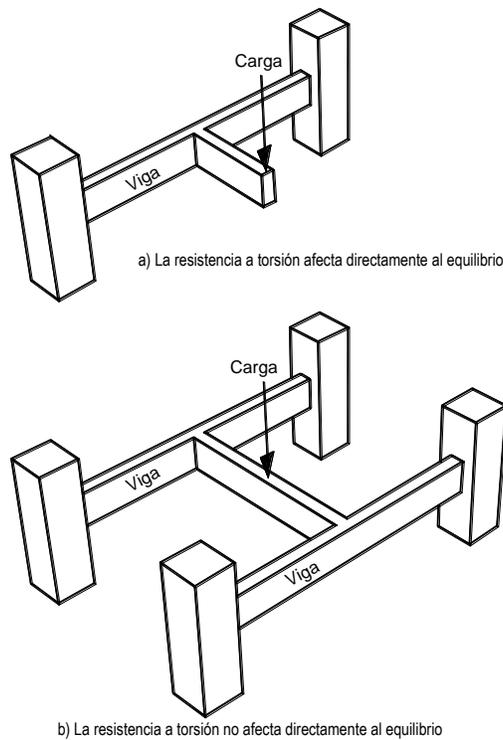
En el análisis, para calcular  $T_u$  se usará la sección no agrietada.

##### 5.4.1.1a Cuando afecta directamente al equilibrio

En estructuras en donde la resistencia a torsión se requiere para mantener el equilibrio (figura 5.4.2a),  $T_u$  será el momento torsionante que resulte del análisis, multiplicado por el factor de carga correspondiente.

##### 5.4.1.1b Cuando no afecta directamente al equilibrio

En estructuras en donde la resistencia a torsión no afecte directamente al equilibrio, es decir, en estructuras estáticamente indeterminadas donde puede ocurrir una reducción del momento torsionante en un miembro debido a la redistribución interna de fuerzas cuando el elemento se agrieta (figura 5.4.2 b), el momento torsionante de diseño,  $T_u$ , puede reducirse a los valores de las ecuaciones 5.4.1, 5.4.2. y 5.4.3 modificando las fuerzas cortantes y momentos flexionantes de manera que se conserve el equilibrio:



**Figura 5.4.2 Ejemplos de vigas en las que existe torsión**

a) Para elementos sin presfuerzo

$$T_u = F_R 0.3 \sqrt{f_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (5.4.1)$$

$$\left( T_u = F_R \sqrt{f_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$$

b) Para elementos con presfuerzo

$$T_u = F_R 0.3 \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{3f_{cp}}{\sqrt{f_c'}}} \quad (5.4.2)$$

$$\left( T_u = F_R \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{f_{cp}}{\sqrt{f_c'}}} \right)$$

c) Para miembros no presforzados sujetos a tensión o compresión axial

$$T_u = F_R 0.3 \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{3N_u}{A_g \sqrt{f_c'}}} \quad (5.4.3)$$

$$\left( T_u = F_R \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{N_u}{A_g \sqrt{f_c'}}} \right)$$

donde  $N_u$  es positiva en compresión.

#### 5.4.1.1c Cuando pasa de una condición isostática a hiperestática

Cuando en una estructura se presente una condición isostática y, posteriormente, la posibilidad de una redistribución interna de fuerzas (condición hiperestática), el momento de diseño final,  $T_u$ , será como sigue:

$$T_u = T_{ui} + T_{uh} \quad (5.4.4)$$

donde:

$T_{ui}$  momento torsionante de diseño (sin ninguna reducción), calculado considerando sólo las cargas que actúan en la condición isostática; y

$T_{uh}$  momento torsionante de diseño, causado por las cargas adicionales a las que originan  $T_{ui}$ , que se tiene en la condición hiperestática. Para el cálculo de  $T_{uh}$  se considerará lo especificado en el inciso 5.4.1.1.b.

#### 5.4.2 Casos en que puede despreciarse la torsión

Pueden despreciarse los efectos de torsión en un elemento si el momento torsionante de diseño,  $T_u$ , cumple con lo siguiente:

a) Para miembros sin presfuerzo

$$T_u < F_R 0.083 \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (5.4.5)$$

$$\left( T_u < F_R 0.27 \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$$

b) Para miembros no presforzados sujetos a tensión o compresión axial

$$T_u < F_R 0.083 \sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{3N_u}{A_g \sqrt{f_c'}}} \quad (5.4.6)$$

$$\left( T_u < F_R 0.27 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{N_u}{A_g \sqrt{f'_c}}} \right)$$

donde  $N_u$  es positiva en compresión.

b) Para miembros con presfuerzo

$$T_u < F_R 0.083 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{3f_{cp}}{\sqrt{f'_c}}} \quad (5.4.7)$$

$$\left( T_u < F_R 0.27 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{f_{cp}}{\sqrt{f'_c}}} \right)$$

donde  $f_{cp}$  es el esfuerzo de compresión efectivo debido al presfuerzo (después de que han ocurrido todas las pérdidas de presfuerzo), en el centroide de la sección transversal que resiste las fuerzas aplicadas externamente, o en la unión del alma y el patín, cuando el centroide queda dentro del patín.

En elementos de sección compuesta,  $f_{cp}$ , es el esfuerzo de compresión resultante en el centroide de la sección compuesta, o en la unión del alma y el patín, cuando el centroide queda dentro del patín, debido al presfuerzo y a los momentos que son únicamente resistidos por el elemento prefabricado.

Los elementos en que no pueda despreciarse la torsión, tendrán las dimensiones mínimas del inciso 5.4.3 y el refuerzo por torsión diseñado según el inciso 5.4.4.

### 5.4.3 Resistencia a torsión

Las dimensiones de la sección transversal del elemento sometido a torsión deben ser tales que se cumpla lo siguiente:

a) Para elementos de sección transversal maciza

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b'd}\right)^2 + \left(\frac{T_u p_h}{1.7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \frac{V_{cR}}{b'd} + F_R 0.67 \sqrt{f'_c} \quad (5.4.8)$$

$$\left( \sqrt{\left(\frac{V_u}{b'd}\right)^2 + \left(\frac{T_u p_h}{1.7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \frac{V_{cR}}{b'd} + F_R 2\sqrt{f'_c} \right)$$

b) Para elementos de sección transversal hueca

$$\frac{V_u}{b'd} + \frac{T_u p_h}{1.7 A_{oh}^2} \leq \frac{V_{cR}}{b'd} + F_R 0.67 \sqrt{f'_c} \quad (5.4.9)$$

$$\left( \frac{V_u}{b'd} + \frac{T_u p_h}{1.7 A_{oh}^2} \leq \frac{V_{cR}}{b'd} + F_R 2\sqrt{f'_c} \right)$$

donde:

$p_h$  perímetro, medido en el eje, del estribo de refuerzo por torsión más alejado; y  
 $A_{oh}$  área comprendida por  $p_h$ , (figura 5.4.3).

Si el espesor de la pared de una sección transversal hueca varía a lo largo del perímetro de dicha sección, la ecuación 5.4.9 deberá evaluarse en la condición más desfavorable, es decir, cuando el término del lado izquierdo sea mínimo.

Si el espesor de la pared es menor que  $A_{oh} / p_h$ , se deberá usar:

$$\frac{V_u}{b'd} + \frac{T_u}{1.7 A_{oh} t} \leq \frac{V_{cR}}{b'd} + F_R 0.67 \sqrt{f'_c} \quad (5.4.10)$$

$$\left( \frac{V_u}{b'd} + \frac{T_u}{1.7 A_{oh} t} \leq \frac{V_{cR}}{b'd} + F_R 2 \sqrt{f'_c} \right)$$

donde  $t$  es el espesor de la pared de la sección transversal hueca en el punto que se está revisando.

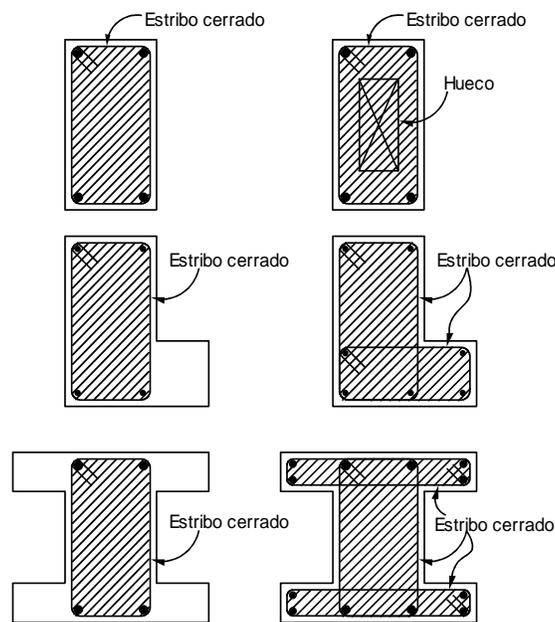


Figura 5.4.3 Definición del área  $A_{oh}$  (zonas sombreadas)

#### 5.4.4 Refuerzo por torsión

El refuerzo por torsión consistirá de refuerzo transversal y de refuerzo longitudinal.

a) Refuerzo transversal

El área de estribos cerrados que formarán el refuerzo transversal por torsión se calculará con la expresión siguiente:

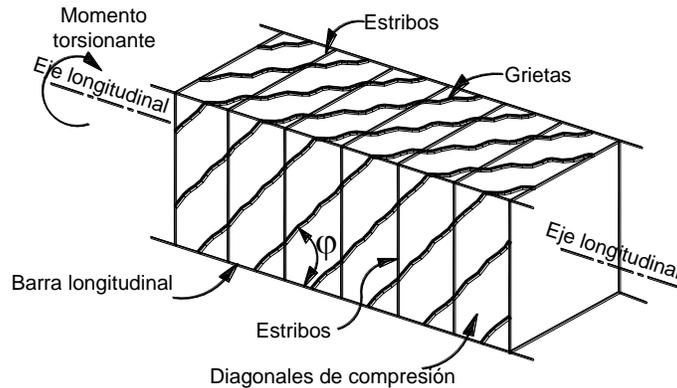
$$A_t = \frac{T_u s}{F_R 2 A_o f_{yv} \cot \phi} \quad (5.4.11)$$

donde:

- $A_t$  área transversal de una sola rama de estribo que resiste torsión, colocado a una separación  $s$ ;
- $A_o$  área bruta encerrada por el flujo de cortante e igual a  $0.85 A_{oh}$ ;
- $s$  separación de los estribos que resisten la torsión;

$f_{yv}$  esfuerzo especificado de fluencia de los estribos; el cual no excederá de 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>); y  
 $\varphi$  ángulo con respecto al eje de la pieza, que forman los puntales de compresión que se desarrollan en el concreto para resistir torsión según la teoría de la analogía de la armadura espacial (figura 5.4.4).

El ángulo  $\varphi$  no debe ser menor de 30 grados ni mayor de 60 grados. Se recomienda que  $\varphi = 45$  grados para elementos sin presfuerzo o parcialmente presforzados y  $\varphi = 37.5$  grados para elementos totalmente presforzados.



**Figura 5.4.4 Analogía de la armadura espacial para, torsión**

#### b) Refuerzo longitudinal

El área de barras longitudinales para torsión,  $A_{st}$ , adicionales a las de flexión, no será menor que la calculada con la siguiente expresión:

$$A_{st} = \frac{A_t}{s} p_h \frac{f_{yv}}{f_y} \cot^2 \varphi \quad (5.4.12)$$

donde:

$f_y$  esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo longitudinal para torsión; y  
 $\varphi$  debe tener el mismo valor que el utilizado en la ecuación 5.4.11].

#### 5.4.4.1 Refuerzo mínimo

##### a) Refuerzo transversal

En los elementos en que se requiera refuerzo por torsión, deberá proporcionarse un área de acero transversal mínima que se calculará con la siguiente expresión:

$$A_v + 2A_t = 0.10 \sqrt{f'_c} \frac{bs}{f_{yv}} \quad (5.4.13)$$

$$\left( A_v + 2A_t = 0.30 \sqrt{f'_c} \frac{bs}{f_{yv}} \right)$$

donde:

$A_v$  área transversal de dos ramas de un estribo cerrado, en mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>); y  
 $A_t$  área transversal de una sola rama de un estribo cerrado, en mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>).

En cualquier caso, el área de refuerzo transversal mínima deberá cumplir con

$$A_v + 2A_t \geq \frac{bs}{3f_{yv}} \quad (5.4.14)$$

$$\left( A_v + 2A_t \geq \frac{3.5bs}{f_{yv}} \right)$$

b) Refuerzo longitudinal

Debe proporcionarse un área de acero longitudinal mínima que está determinada por:

$$A_{st,min} = \frac{\sqrt{f'_c} A_{oh}}{2.4f_y} - \frac{A_t}{s} p_h \frac{f_{yv}}{f_y} \quad (5.4.15)$$

$$\left( A_{st,min} = \frac{1.3\sqrt{f'_c} A_{oh}}{f_y} - \frac{A_t}{s} p_h \frac{f_{yv}}{f_y} \right)$$

en donde:

$$\frac{A_t}{s} \geq \frac{b}{5.8f_{yv}} \quad (5.4.16)$$

$$\left( \frac{A_t}{s} \geq \frac{1.75 b}{f_{yv}} \right)$$

Cuando la ecuación 5.4.15 resulte en valores menores a cero, se proveerá refuerzo longitudinal de acuerdo con lo especificado en 5.4.4.2.b.

5.4.4.2 Detallado del refuerzo

Para el detallado de elementos sujetos a torsión se deberá cumplir con las especificaciones siguientes, así como las aplicables del capítulo 6.

a) Refuerzo transversal

Este refuerzo estará formado por estribos cerrados perpendiculares al eje del miembro, anclados por medio de ganchos que formen un ángulo de 135 grados, y por barras longitudinales o tendones. En miembros circulares los estribos serán circulares.

El refuerzo necesario para torsión se combinará con el requerido para otras fuerzas interiores, a condición de que el área suministrada no sea menor que la suma de las áreas individuales necesarias y que se cumplan los requisitos más restrictivos en cuanto a separación y distribución del refuerzo.

El refuerzo por torsión se suministrará cuando menos en una distancia igual a la suma del peralte total más el ancho ( $h + b$ ), más allá del punto teórico en que ya no se requiere.

En secciones huecas, la distancia entre el eje del refuerzo transversal por torsión y la cara interior de la pared de la sección hueca no será menor que

$$0.5 \frac{A_{oh}}{p_h}$$

La separación  $s$ , determinada con la ecuación 5.4.11, no será mayor que  $p_h / 8$ , ni que 300 mm.

#### b) Refuerzo longitudinal

El refuerzo longitudinal deberá tener la longitud de desarrollo más allá de la sección donde deja de ser necesario por torsión. El diámetro mínimo de las barras que forman el refuerzo longitudinal será de 12.7 mm (número 4).

En vigas presforzadas, el refuerzo longitudinal total (incluyendo el acero de presfuerzo) en una sección debe resistir el momento flexionante de diseño en dicha sección más una fuerza de tensión longitudinal concéntrica igual a  $A_{st}f_y$ , basada en la torsión de diseño que se tiene en la misma sección.

El refuerzo longitudinal debe distribuirse en el perímetro de los estribos cerrados con una separación máxima de 300 mm y se colocará una barra en cada esquina de los estribos. Las barras o tendones longitudinales deberán colocarse dentro de los estribos.

## 5.5 Aplastamiento

### 5.5.1 Requisitos generales

Cuando un elemento de concreto o una placa de acero u otro material se apoye en una superficie de concreto, ésta deberá revisarse por aplastamiento.

### 5.5.2 Dimensionamiento

Cuando la superficie que recibe la carga tiene un área mayor que el área de contacto, el esfuerzo de diseño puede incrementarse en la relación

$$\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 2$$

donde  $A_1$  es el área de contacto y  $A_2$  es el área de la figura de mayor tamaño, semejante al área de contacto y concéntrica con ella, que puede inscribirse en la superficie que recibe la carga.

Esta disposición no se aplica a los anclajes de tendones postensados (inciso 11.6.1.3).

### 5.5.3 Resistencia al aplastamiento

En apoyos de miembros estructurales y otras superficies sujetas a presiones de contacto o aplastamiento, el esfuerzo de diseño no se tomará mayor que  $F_R 0.85f_c'$ .

## 6. LONGITUD DE DESARROLLO, ANCLAJE Y REQUISITOS COMPLEMENTARIOS

### 6.1 Anclaje

#### 6.1.1 Requisito general

La fuerza de tensión o compresión que actúa en el acero de refuerzo en toda sección debe desarrollarse a cada lado de la sección considerada por medio de adherencia en una longitud suficiente de barra o de algún dispositivo mecánico.

### 6.1.2 Longitud de desarrollo de barras a tensión

#### 6.1.2.1 Barras rectas

La longitud de desarrollo,  $L_d$ , en la cual se considera que una barra a tensión se ancla de modo que desarrolle su esfuerzo de fluencia, se obtendrá multiplicando la longitud básica,  $L_{db}$  dada por la ecuación 6.1.1, por el factor o los factores indicados en la tabla 6.1.1. Las disposiciones de este inciso son aplicables a barras de diámetro no mayor que 38.1 mm (número 12).

$$L_{db} = \frac{1.15 a_s f_y}{(c + K_{tr}) \sqrt{f_c'}} \geq 0.36 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c'}} \quad (6.1.1)$$

$$\left( L_{db} = \frac{a_s f_y}{3(c + K_{tr}) \sqrt{f_c'}} \geq 0.11 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c'}} \right)$$

donde:

$a_s$  área transversal de la barra;

$d_b$  diámetro nominal de la barra;

$c$  separación o recubrimiento; úsese el menor de los valores siguientes:

1) distancia del centro de la barra a la superficie de concreto más próxima;

2) la mitad de la separación entre centros de barras.

$K_{tr}$  índice de refuerzo transversal; igual a  $\frac{A_{tr} f_{yv}}{10 s n}$ , si se usan MPa y mm,  $\left( \frac{A_{tr} f_{yv}}{100 s n}, \text{kg/cm}^2 \text{ y cm} \right)$ ;

$A_{tr}$  área total de las secciones rectas de todo el refuerzo transversal comprendido en la separación  $s$ , y que cruza el plano potencial de agrietamiento entre las barras que se anclan;

$f_{yv}$  esfuerzo especificado de fluencia del refuerzo transversal;

$s$  máxima separación centro a centro del refuerzo transversal, en una distancia igual a  $L_d$ ; y

$n$  número de barras longitudinales en el plano potencial de agrietamiento.

Por sencillez en el diseño, se permite suponer  $K_{tr} = 0$ , aunque haya refuerzo transversal.

En ningún caso  $L_d$  será menor que 300 mm.

La longitud de desarrollo,  $L_d$ , de cada barra que forme parte de un paquete de tres barras será igual a la que requeriría si estuviera aislada, multiplicada por 1.20. Cuando el paquete es de dos barras no se modifica  $L_d$ .

#### 6.1.2.2 Barras con dobleces

Este inciso se refiere a barras a tensión que terminan con dobleces a 90 ó 180 grados que cumplan con los requisitos de la sección 6.5, seguidos de tramos rectos de longitud no menor que  $12d_b$  para dobleces a 90 grados, ni menor que  $4d_b$  para dobleces a 180 grados. En estas barras se toma como longitud de desarrollo la longitud paralela a la barra, comprendida entre la sección crítica y el paño externo de la barra después del doblez (figura 6.1.1). La longitud de desarrollo se obtendrá multiplicando la longitud de desarrollo básica dada por la expresión:

$$0.24 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \quad (6.1.2)$$

$$\left( 0.076 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right)$$

por el factor o los factores de la tabla 6.1.2 que sean aplicables, pero sin que se tome menor que 150 mm ni que  $8d_b$ .

**Tabla 6.1.1 Factores que modifican la longitud básica de desarrollo<sup>1</sup>**

Condición del refuerzo	Factor
Barras de diámetro igual a 19.1 mm (número 6) o menor.	0.8
Barras horizontales o inclinadas colocadas de manera que bajo ellas se cuelel más de 300 mm de concreto.	1.3
En concreto ligero	1.3
Barras con $f_y$ mayor de 420 MPa (4 200 kg/cm <sup>2</sup> ).	$2 - \frac{420}{f_y}; \left( 2 - \frac{4200}{f_y} \right)$
Acero de flexión en exceso <sup>2</sup>	$\frac{A_{s, requerida}}{A_{s, proporcionada}}$
Barras lisas	2.0
Barras cubiertas con resina epóxica, o con lodo bentonítico:	
– Recubrimiento libre de concreto menor que $3d_b$ , o separación libre entre barras menor que $6d_b$	1.5
– Otras condiciones	1.2
Todos los otros casos	1.0

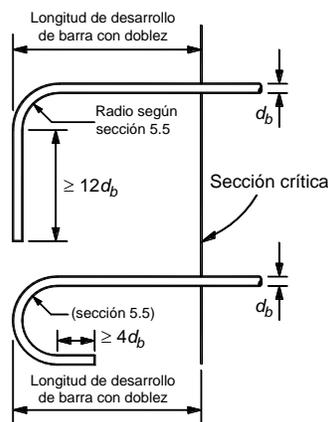
<sup>1</sup> Si se aplican varias condiciones, se multiplican los factores correspondientes;

<sup>2</sup> Excepto en zonas de articulaciones plásticas y marcos con ductilidad alta.

### 6.1.3 Longitud de desarrollo de barras a compresión

La longitud de desarrollo de una barra a compresión será cuando menos el 60 por ciento de la que requeriría a tensión y no se considerarán efectivas porciones dobladas. En ningún caso será menor de 200 mm.

Cuando no haya espacio suficiente para anclar barras con doblez, se puede usar anclajes mecánicos según lo dispuesto en el inciso 6.6.1.3.



**Figura 6.1.1 Longitud de desarrollo de barras con dobleces**

**Tabla 6.1.2 Factores que modifican la longitud básica de desarrollo de barras con dobleces<sup>1</sup>**

Condición del refuerzo	Factor
Barras de diámetro no mayor que 34.9 mm (número 11), con recubrimiento libre lateral (normal al plano del dobléz) no menor que 60 mm, y para barras con dobléz a 90 grados, con recubrimiento libre del tramo de barra recto después del dobléz no menor que 50 mm	0.7
Barras de diámetro no mayor que 34.9 mm (número 11), confinadas en toda la longitud de desarrollo con estribos verticales u horizontales separados entre sí no más de $3d_b^2$	0.8
En concreto ligero	1.3
Barras lisas	1.9
Barras cubiertas con resina epóxica, o con lodo bentonítico	1.2
Todos los otros casos	1.0

<sup>1</sup> Si se aplican varias condiciones, se multiplican los factores correspondientes;

<sup>2</sup> El primer estribo debe confinar la parte doblada de la barra, a una distancia menor a  $2d_b$  del borde externo del dobléz.

#### **6.1.4 Anclaje del refuerzo transversal**

El refuerzo en el alma debe llegar tan cerca de las caras de compresión y tensión como lo permitan los requisitos de recubrimiento y la proximidad de otro refuerzo.

Los estribos deben rematar en una esquina con dobleces de 135 grados, seguidos de tramos rectos de no menos de  $6d_b$  de largo, ni menos de 80 mm. En cada esquina del estribo debe quedar por lo menos una barra longitudinal. Los radios de dobléz cumplirán con los requisitos de la sección 6.5.

Las barras longitudinales que se doblen para actuar como refuerzo en el alma deben continuarse como refuerzo longitudinal cerca de la cara opuesta si esta zona está a tensión, o prolongarse una longitud  $L_d$  más allá de la media altura de la viga si dicha zona está a compresión.

#### **6.1.5 Anclaje de malla de alambre soldado**

Se supondrá que un alambre puede desarrollar su esfuerzo de fluencia en una sección si a cada lado de ésta se ahogan en el concreto cuando menos dos alambres perpendiculares al primero, distando el más próximo no menos de 50 mm de la sección considerada. Si sólo se ahoga un alambre perpendicular a no menos de 50 mm de la sección considerada, se supondrá que se desarrolla la mitad del esfuerzo de fluencia. La longitud de un alambre desde la sección crítica hasta su extremo no será menor que 200 mm.

#### **6.1.6 Requisitos adicionales**

##### **6.1.6.1 Vigas y muros**

En vigas y muros con cargas en su plano, la fuerza de tensión a la que se refiere el inciso 6.1.1, se valorará con el máximo momento flexionante de diseño que actúa en la zona comprendida a un peralte efectivo a cada lado de la sección.

Los requisitos del inciso 6.1.1 y del párrafo anterior se cumplen para el acero a tensión, si:

a) Las barras que dejan de ser necesarias por flexión se cortan o se doblan a una distancia no menor que un peralte efectivo más allá del punto teórico donde, de acuerdo con el diagrama de momentos, ya no se requieren.

b) En las secciones donde, según el diagrama de momentos flexionantes, teóricamente ya no se requiere el refuerzo que se corta o se dobla, la longitud que continúa de cada barra que no se corta ni se dobla es mayor o igual que  $L_d + d$ . Este requisito no es necesario en las secciones teóricas de corte más próximas a los extremos de vigas libremente apoyadas.

c) A cada lado de toda sección de momento máximo, la longitud de cada barra es mayor o igual que la longitud de desarrollo,  $L_d$ , que se define en el inciso 6.1.2.

d) Cada barra para momento positivo que llega a un extremo libremente apoyado, se prolonga más allá del centro del apoyo y termina en un dobléz de 90 ó 180 grados, seguido por un tramo recto de  $12d_b$  o  $4d_b$ , respectivamente. El dobléz debe cumplir con los requisitos de la sección 6.5. En caso de no contar con un espacio suficiente para alojar el dobléz, se empleará un anclaje mecánico equivalente al dobléz.

e) En los muros, en las secciones donde, según el diagrama de momentos flexionantes, teóricamente ya no se requiera refuerzo que se corta o dobla, la longitud que se continúa de cada barra que no se corta ni se dobla es mayor o igual que  $L_d + 3m$ .

Además de los anteriores, deben cumplirse los siguientes requisitos:

f) En extremos libremente apoyados se prolongará, sin doblar, hasta dentro del apoyo, cuando menos la tercera parte del refuerzo de tensión para momento positivo máximo. En extremos continuos se prolongará la cuarta parte.

g) Cuando la viga sea parte de un sistema destinado a resistir fuerzas laterales accidentales, el refuerzo positivo que se prolongue dentro del apoyo debe anclarse de modo que pueda alcanzar su esfuerzo de fluencia en la cara del apoyo. Al menos la tercera parte del refuerzo negativo que se tenga en la cara de un apoyo se prolongará más allá del punto de inflexión una longitud no menor que un peralte efectivo, ni que  $12d_b$ , ni que un dieciseisavo del claro libre.

#### 6.1.6.2 Columnas

En las intersecciones con vigas o losas las barras de las columnas serán continuas y en su caso cumplirán con las disposiciones del inciso 9.7.5.2.

Las barras longitudinales de columnas de planta baja se anclarán en la cimentación de manera que en la sección de la base de la columna puedan alcanzar un esfuerzo igual al de fluencia en tensión multiplicado por 1.25.

En columnas que deban resistir fuerzas laterales accidentales, se supondrá que se cumple el requisito del inciso 6.1.1, si la longitud de desarrollo de toda barra longitudinal no es mayor que dos tercios de la altura libre de la columna.

## 6.2 Revestimientos

De acuerdo con lo indicado en la sección 3.8.

## 6.3 Tamaño máximo de agregados

El tamaño nominal máximo de los agregados no debe ser mayor que:

a) Un quinto de la menor distancia horizontal entre caras de los moldes;

b) Un tercio del espesor de losas; ni

c) Dos tercios de la separación horizontal libre mínima entre barras, paquetes de barras, o tendones de presfuerzo.

Estos requisitos pueden omitirse cuando las condiciones del concreto fresco y los procedimientos de compactación que se apliquen permitan colocar el concreto sin que queden huecos.

## 6.4 Paquetes de barras

Las barras longitudinales pueden agruparse formando paquetes con un máximo de dos barras cada uno en columnas y de tres en vigas, con la salvedad expresada en el inciso 8.2.2.d. La sección donde se corte una barra de un paquete en el claro de una viga no distará de la sección de corte de otra barra menos de 40 veces el diámetro de la más gruesa de las dos. Los paquetes se usarán sólo cuando queden alojados en un ángulo de los estribos. Para determinar la separación mínima entre paquetes y determinar su recubrimiento, cada uno se tratará como una barra simple de igual área transversal que la del paquete. Para calcular la separación del refuerzo transversal, rige el diámetro de la barra más delgada del paquete. Los paquetes de barras deben amarrarse firmemente con alambre.

## 6.5 Dobles del refuerzo

El radio interior de un doblez no será menor que  $f_y/19\sqrt{f_c}$ , veces el diámetro de la barra doblada ( $f_y/60\sqrt{f_c}$ , si se usan  $\text{kg/cm}^2$ ), a menos que dicha barra quede doblada alrededor de otra de diámetro no menor que el de ella, o se confine adecuadamente el concreto, por ejemplo mediante refuerzo perpendicular al plano de la barra. Además, el radio de doblez no será menor que el que marca, para la prueba de doblado, la respectiva Norma Mexicana, de las indicadas en la sección 2.2.

En todo doblez o cambio de dirección del acero longitudinal debe colocarse refuerzo transversal capaz de equilibrar la resultante de las tensiones o compresiones desarrolladas en las barras, a menos que el concreto en sí sea capaz de ello.

## 6.6 Uniones del refuerzo

Las barras de refuerzo pueden unirse mediante traslapes o estableciendo continuidad por medio de soldadura o dispositivos mecánicos. Las especificaciones y detalles dimensionales de las uniones deben mostrarse en los planos. Toda unión soldada o con dispositivo mecánico debe ser capaz de transferir por lo menos 1.25 veces la fuerza de fluencia de tensión de las barras, sin necesidad de exceder la resistencia máxima de éstas. Para marcos de ductilidad media y alta, se respetarán los requisitos de los incisos 8.2.2, 9.2.2 y 9.3.3.

### 6.6.1 Uniones de barras sujetas a tensión

#### 6.6.1.1 Requisitos generales

En lo posible deben evitarse las uniones en secciones de máximo esfuerzo de tensión. Se procurará, asimismo, que en una cierta sección cuando mucho se unan barras alternadas.

#### 6.6.1.2 Traslapes

La longitud de un traslape no será menor que 1.33 veces la longitud de desarrollo,  $L_d$ , calculada según el inciso 6.1.2.1, ni menor que  $(0.1f_y - 6)$  veces el diámetro de la barra ( $f_y$  en MPa, o  $(0.01f_y - 6) d_b$ , si se usan  $\text{kg/cm}^2$ ).

Cuando se une por traslape más de la mitad de las barras en un tramo de 40 diámetros, o cuando las uniones se hacen en secciones de esfuerzo máximo, deben tomarse precauciones especiales, consistentes, por ejemplo, en aumentar la longitud de traslape o en utilizar hélices o estribos muy próximos en el tramo donde se efectúa la unión.

#### 6.6.1.3 Anclajes mecánicos

Los anclajes mecánicos deben ser capaces de desarrollar la resistencia del refuerzo por anclar, sin que se dañe el concreto. Pueden ser, por ejemplo, placas soldadas a las barras, o dispositivos manufacturados para este fin. Los anclajes mecánicos deben diseñarse y en su caso comprobarse por medio de ensayos. Bajo cargas estáticas, se puede admitir que la resistencia de una barra anclada es la suma de la contribución del anclaje mecánico más la adherencia en la longitud de barra comprendida entre el anclaje mecánico y la sección crítica..

#### 6.6.1.4 Uniones soldadas o mecánicas

Si se usan uniones soldadas o mecánicas deberá comprobarse experimentalmente su eficacia.

En una misma sección transversal no deben unirse con soldadura o dispositivos mecánicos más del 50 por ciento del refuerzo. Las secciones de unión distarán entre sí no menos de 20 diámetros. Sin embargo, cuando por motivos del procedimiento de construcción sea necesario unir más refuerzo del señalado, se admitirá hacerlo, con tal que se garantice una supervisión estricta en la ejecución de las uniones. Para marcos de ductilidad media y alta, se respetarán los requisitos de los incisos 6.6.1.5 y 6.6.1.6.

Para que el acero sea soldable, debe cumplir con el requisito de carbono equivalente establecido en la norma NMX-B-457-CANACERO.

Las uniones con soldadura se deberán realizar siguiendo las especificaciones y métodos expuesto en el “*Structural Welding Code Reinforcing Steel*”. AWS D1.4 y AWS D12.1.

La verificación de las soldaduras se realizará de acuerdo con lo establecido en 15.2.3.

La verificación de las uniones con dispositivos mecánicos se realizará de acuerdo con lo establecido en 15.2.4.

#### *6.6.1.5 Uniones soldadas para marcos de ductilidad media y alta*

a) Las uniones soldadas de barras deberán cumplir con lo expuesto en la introducción de la sección 6.6. No se deberán usar en una distancia igual a dos veces el peralte del elemento medido desde el paño de la columna o de la viga, o a partir de las secciones donde es probable que el refuerzo longitudinal alcance su esfuerzo de fluencia como resultado de desplazamientos laterales en el intervalo inelástico de comportamiento del marco.

b) No se permite soldar estribos, grapas, accesorios u otros elementos similares al refuerzo longitudinal requerido por diseño.

#### *6.6.1.6 Uniones con dispositivos mecánicos para marcos de ductilidad media y alta*

a) Se aceptarán dos tipos

1) El tipo 1 deberá cumplir los requisitos especificados en 6.6; y

2) El tipo 2, además de cumplir con los requisitos especificados en 6.6, deberá ser capaz de alcanzar la resistencia especificada a tensión de la barra por unir.

b) Los dispositivos mecánicos del tipo 1 no se deberán usar en una distancia igual a dos veces el peralte del elemento medida desde el paño de la columna o de la viga, o a partir de las secciones donde es probable que el refuerzo longitudinal alcance su esfuerzo de fluencia como resultado de desplazamientos laterales en el intervalo inelástico de comportamiento del marco.

c) Se podrán usar los dispositivos mecánicos tipo 2 en cualquier lugar.

#### **6.6.2 Uniones de barras sujetas a compresión**

Si la unión se hace por traslape, la longitud traslapada no será menor que la longitud de desarrollo para barras a compresión, calculada según el inciso 6.1.3, ni que  $(0.1f_y - 10)$  veces el diámetro de la barra,  $f_y$  en MPa, o  $((0.01f_y - 10) d_b$ , si se usan  $\text{kg/cm}^2$ ).

#### **6.6.3 Uniones de malla de alambre soldado**

En lo posible deben evitarse uniones por traslape en secciones donde el esfuerzo en los alambres bajo cargas de diseño sea mayor que  $0.5f_y$ . Cuando haya necesidad de usar traslapes en las secciones mencionadas, deben hacerse de modo que el traslape medido entre los alambres transversales extremos de las hojas que se unen no sea menor que la separación entre alambres transversales más 50 mm.

Las uniones por traslape en secciones donde el esfuerzo en los alambres sea menor o igual que  $0.5f_y$ , el traslape medido entre los alambres transversales extremos de las hojas que se unen no será menor que 50 mm.

## 6.7 Refuerzo por cambios volumétricos

En toda dirección en que la dimensión de un elemento estructural sea mayor que 1.5 m, el área de refuerzo que se suministre no será menor que

$$a_{sI} = \frac{660 x_I}{f_y (x_I + 1000)} \quad (6.7.1)$$

$$\left( a_{sI} = \frac{660 x_I}{f_y (x_I + 100)} \right)$$

donde:

- $a_{sI}$  área transversal del refuerzo colocado en la dirección que se considera, por unidad de ancho de la pieza,  $\text{mm}^2/\text{mm}$  ( $\text{cm}^2/\text{cm}$ ). El ancho mencionado se mide perpendicularmente a dicha dirección y a  $x_I$ ; y
- $x_I$  dimensión mínima del miembro medida perpendicularmente al refuerzo, mm (cm).

Si  $x_I$  no excede de 150 mm, el refuerzo puede colocarse en una sola capa. Si  $x_I$  es mayor que 150 mm, el refuerzo se colocará en dos capas próximas a las caras del elemento.

En elementos estructurales expuestos directamente a la intemperie o en contacto con el terreno, el refuerzo no será menor de  $1.5a_{sI}$ .

Por sencillez, en vez de emplear la fórmula anterior puede suministrarse un refuerzo mínimo con cuantía igual a 0.002 en elementos estructurales protegidos de la intemperie, y 0.003 en los expuestos a ella, o que estén en contacto con el terreno.

La separación del refuerzo por cambios volumétricos no excederá de 500 mm ni de  $3.5x_I$ .

Debe aumentarse la cantidad de acero a no menos de 1.5 veces la antes prescrita, o tomarse otras precauciones en casos de contracción pronunciada (por ejemplo en morteros neumáticos) de manera que se evite agrietamiento excesivo. También, cuando sea particularmente importante el buen aspecto de la superficie del concreto.

Puede prescindirse del refuerzo por cambios volumétricos en elementos donde desde el punto de vista de resistencia y aspecto se justifique.

## 6.8 Separación entre barras de refuerzo

La separación libre entre barras paralelas (excepto en columnas y entre capas de barras en vigas) no será menor que el diámetro nominal de la barra ni que 1.5 veces el tamaño máximo del agregado. Esto último con la salvedad indicada en 6.3.

Cuando el refuerzo de vigas esté colocado en dos o más capas, la distancia vertical libre entre capas no será menor que el diámetro de las barras, ni que 20 mm. Las barras de las capas superiores se colocarán de modo que no se menoscabe la eficacia del colado.

En columnas, la distancia libre entre barras longitudinales no será menor que 1.5 veces el diámetro de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo del agregado, ni que 40 mm.

## 6.9 Inclusiones

Debe evitarse la inclusión de elementos no estructurales en el concreto, en particular tubos de alimentación o desagüe dentro de las columnas. Las dimensiones y ubicación de los elementos no estructurales que lleguen a quedar dentro del concreto, así como los procedimientos de ejecución usados en la inclusión (inciso 15.3.11), serán tales que no afecten indebidamente las condiciones de resistencia y deformabilidad, ni que impidan que el concreto penetre, sin segregarse, en todos los intersticios.

## **7. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DUCTILIDAD BAJA**

### **7.1 Requisitos especiales**

Los elementos estructurales de ductilidad baja deberán cumplir con las disposiciones de esta sección, además de los requisitos generales de las secciones precedentes.

#### **7.1.1 Características mecánicas de los materiales**

##### **7.1.1.1 Concreto**

Se deberá usar concreto clase 1. La resistencia especificada,  $f_c'$  del concreto no será menor que 25 MPa (250 kg/cm<sup>2</sup>). Los concretos de alta resistencia deberán cumplir con los requisitos especificados en 12.2.

##### **7.1.1.2 Acero de refuerzo**

Las barras de refuerzo que resistan fuerzas axiales y de flexión producidas por sismo en elementos de marcos y de bordes de muros serán corrugadas, con fluencia definida, de acero normal o de baja aleación, de cualquiera de los grados normalizados, que cumplan, respectivamente, con los requisitos de las normas mexicanas NMX-C-407-ONNCCE y NMX-B-457-CANACERO.

El valor de  $f_y$  para el refuerzo transversal, incluyendo los refuerzos en hélice, no debe exceder de 420 MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>).

#### **7.1.2 Elementos prefabricados**

Las estructuras prefabricadas se diseñarán con los mismos criterios empleados para estructuras coladas en el lugar, teniendo en cuenta las condiciones de carga que se presenten durante toda la vida útil de los elementos prefabricados, desde la fabricación, transporte y montaje de los mismos hasta la terminación de la estructura y su estado de servicio (sección 15.5), así como las condiciones de restricción que den las conexiones, incluyendo la liga con la cimentación.

En los elementos estructurales de sección compuesta formados por prefabricados y colados en el lugar se aplicarán los requisitos del inciso 7.2.7.

Se debe asegurar la integridad estructural de los sistemas prefabricados. Todos los miembros deben estar conectados al sistema estructural resistente a cargas laterales y a sus miembros de soporte.

### **7.2 Vigas**

Las disposiciones de esta sección se aplican a miembros en los que la carga axial de diseño,  $P_u$ , sea menor que  $A_g f_c' / 10$ , en los que sean aplicables las hipótesis de la sección 3.5 y que formen parte de estructuras de ductilidad baja ( $Q = 2$ ).

#### **7.2.1 Requisitos generales**

El claro se contará a partir del centro del apoyo, siempre que el ancho de éste no sea mayor que el peralte efectivo de la viga; en caso contrario, el claro se contará a partir de la sección que se halla a medio peralte efectivo del paño interior del apoyo.

En el dimensionamiento de vigas continuas monolíticas con sus apoyos puede usarse el momento en el paño del apoyo.

Para calcular momentos flexionantes en vigas que soporten losas de tableros rectangulares, se puede tomar la carga tributaria de la losa como si estuviera uniformemente repartida a lo largo de la viga.

La relación entre la altura y el ancho de la sección transversal,  $h/b$ , no debe exceder de 6. Para valuar  $h/b$  en vigas T o I, se usará el ancho del alma,  $b'$ .

#### **7.2.2 Refuerzo mínimo a flexión**

En toda sección se dispondrá de refuerzo tanto en el lecho inferior como en el superior. En cada lecho, el área de refuerzo no será menor que la obtenida de la ecuación 5.1.18 y constará de por lo menos dos barras corridas de 12.7 mm de diámetro (número 4).

### **7.2.3 Refuerzo máximo a flexión**

El refuerzo máximo de tensión no excederá de 90 por ciento del área balanceada calculada de acuerdo con el inciso 5.1.1.1.

### **7.2.4 Refuerzo por tensión diagonal**

Se aplicará lo especificado en el inciso 5.3.5.

### **7.2.5 Pandeo lateral**

Deben analizarse los efectos de pandeo lateral cuando la separación entre apoyos laterales sea mayor que 35 veces el ancho de la viga o el ancho del patín a compresión.

### **7.2.6 Refuerzo complementario en las paredes de las vigas**

En las paredes de vigas debe proporcionarse refuerzo longitudinal por cambios volumétricos de acuerdo con la sección 6.7, el cual deberá cumplir con lo estipulado en el inciso 5.3.5.5d. Se puede tener en cuenta este refuerzo en los cálculos de resistencia si se determina la contribución del acero por medio de un estudio de compatibilidad de deformaciones según las hipótesis básicas de la sección 3.5.

### **7.2.7 Vigas de sección compuesta**

#### **7.2.7.1 Conceptos generales**

Una viga de sección compuesta es la formada por la combinación de un elemento prefabricado y concreto colado en el lugar. Las partes integrantes deben estar interconectadas de manera que actúen como una unidad. El elemento prefabricado puede ser de concreto reforzado o presforzado, o de acero.

Las disposiciones que siguen se refieren únicamente a secciones con elementos prefabricados de concreto. Para secciones compuestas con elementos de acero, aplíquense las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero.

Si la resistencia especificada, el peso volumétrico u otras propiedades del concreto de los elementos componentes son distintos, deben tomarse en cuenta estas diferencias al diseñar, o usarse las propiedades más desfavorables.

Deberán tenerse en cuenta los efectos del apuntalamiento, o falta del mismo, sobre las deflexiones y el agrietamiento.

#### **7.2.7.2 Efectos de la fuerza cortante horizontal**

a) El esfuerzo cortante horizontal,  $v_h$ , en la superficie de contacto entre los elementos que forman la viga compuesta puede calcularse con la ecuación 7.2.1.

$$v_h = \frac{V_u}{F_R b_v d} \quad (7.2.1)$$

donde:

- $V_u$  fuerza cortante de diseño;
- $b_v$  ancho del área de contacto; y
- $d$  peralte efectivo de la sección compuesta.

b) Debe asegurarse que en la superficie de contacto entre los elementos componentes se transmitan los esfuerzos cortantes que ahí actúan.

c) Para transmitir en la superficie de contacto los esfuerzos cortantes de diseño, se admitirán los esfuerzos resistentes siguientes:

1) En elementos donde no se usen anclajes metálicos y la superficie de contacto esté rugosa y limpia: 0.3 MPa (3 kg/cm<sup>2</sup>). Se admitirá que una superficie está rugosa si tiene rugosidades de amplitud total normal a ella del orden de 5 mm o más;

2) Donde se cumplan los requisitos mínimos para los conectores que indica el inciso 7.2.7.2.d y la superficie de contacto esté limpia pero no rugosa: 0.6 MPa (6 kg/cm<sup>2</sup>); y

3) Donde se cumplan los requisitos mínimos para los conectores del inciso 7.2.7.2.d y la superficie de contacto esté limpia y rugosa: 2.5 MPa (25 kg/cm<sup>2</sup>).

Cuando el esfuerzo cortante de diseño exceda de 2.5 MPa (25 kg/cm<sup>2</sup>), el diseño por cortante horizontal se hará de acuerdo con los criterios de cortante por fricción del inciso 5.3.3.3.

d) Para que sean válidos los esfuerzos prescritos en los incisos 7.2.7.2.c.2 y 7.2.7.2.c.3, deben usarse conectores formados por barras o estribos normales al plano de contacto. El área mínima de este refuerzo será  $0.3/f_y$  veces el área de contacto  $f_y$  en MPa, ( $3/f_y$ , con  $f_y$  en kg/cm<sup>2</sup>). Su separación no excederá de seis veces el espesor del elemento colado en el lugar ni de 600 mm. Además, los conectores deben anclarse en ambos componentes del elemento compuesto de modo que en el plano de contacto puedan desarrollar al menos 80 por ciento del esfuerzo de fluencia.

#### *7.2.7.3 Efectos de la fuerza cortante vertical*

Los efectos de la fuerza cortante vertical en miembros compuestos se tomarán en cuenta como si se tratara de una viga monolítica de la misma forma (sección 5.3).

### **7.3 Columnas**

Las disposiciones de esta sección se aplican a miembros en los que la carga axial de diseño,  $P_u$ , sea mayor que  $A_g f'_c / 10$  y que formen parte de estructuras de ductilidad baja ( $Q=2$ ).

#### *7.3.1 Geometría*

La relación entre la dimensión transversal mayor de una columna y la menor no excederá de 4. La dimensión transversal menor será por lo menos igual a 200 mm.

#### *7.3.2 Resistencia mínima a flexión de columnas*

Con excepción de los nudos de azotea, las resistencias a flexión de las columnas en un nudo deberán ser mayores que las resistencias a flexión de las vigas, de tal manera que se cumpla el criterio de diseño de columna fuerte-viga débil.

#### *7.3.3 Refuerzo longitudinal mínimo y máximo*

La cuantía del refuerzo longitudinal de la sección no será menor que  $0.01A_g$  ni mayor que  $0.06A_g$ . El número mínimo de barras será seis en columnas circulares y cuatro en rectangulares.

#### *7.3.4 Requisitos para refuerzo transversal*

##### *7.3.4.1 Criterio general*

El refuerzo transversal de toda columna no será menor que el necesario por resistencia a fuerza cortante y torsión, en su caso, y debe cumplir con los requisitos mínimos de los párrafos siguientes.

#### 7.3.4.2 Separación

Todas las barras o paquetes de barras longitudinales deben restringirse contra el pandeo con estribos o zunchos con separación no mayor que:

- a)  $269/\sqrt{f_y}$  veces el diámetro de la barra o de la barra más delgada del paquete ( $f_y$ , en MPa, es el esfuerzo de fluencia de las barras longitudinales, u  $850/\sqrt{f_y}$ , con  $f_y$  en kg/cm<sup>2</sup>);
- b) 48 diámetros de la barra del estribo; ni que
- c) La mitad de la menor dimensión de la columna.

La separación máxima de estribos se reducirá a la mitad de la antes indicada en una longitud no menor que:

- a) la dimensión transversal máxima de la columna;
- b) un sexto de su altura libre; ni que
- c) 600 mm

arriba y abajo de cada unión de columna con traveses o losas, medida a partir del respectivo plano de intersección. En los nudos se aplicará lo dispuesto en la sección 7.7.1.

#### 7.3.4.3 Detallado

- a) Estribos y zunchos

Los estribos se dispondrán de manera que cada barra longitudinal de esquina y una de cada dos consecutivas de la periferia tenga un soporte lateral suministrado por el doblez de un estribo con un ángulo interno no mayor de 135 grados. Además, ninguna barra que no tenga soporte lateral debe distar más de 150 mm (libres) de una barra soportada lateralmente. Cuando seis o más varillas estén repartidas uniformemente sobre una circunferencia se pueden usar anillos circulares rematados como se especifica en el inciso 6.1.4; también pueden usarse zunchos cuyos traslapes y anclajes cumplan con los requisitos del inciso 7.3.4.4.

La fuerza de fluencia que pueda desarrollar la barra de un estribo o anillo no será menor que seis centésimas de la fuerza de fluencia de la mayor barra o el mayor paquete longitudinal que restringe. En ningún caso se usarán estribos o anillos de diámetro menores de 7.9 mm (número 2.5). Los estribos rectangulares se rematarán de acuerdo con lo prescrito en el inciso 6.1.4. El esfuerzo de diseño de los estribos no será superior a 420 MPa, (4200 kg/cm<sup>2</sup>).

- b) Grapas

Para dar restricción lateral a barras que no sean de esquina, pueden usarse grapas formadas por barras rectas, cuyos extremos terminen en un doblez a 135 grados alrededor de la barra o paquete restringido, seguido de un tramo recto con longitud no menor que seis diámetros de la barra de la grapa ni menor que 80 mm. Las grapas se colocarán perpendiculares a las barras o paquetes que restringen y a la cara más próxima del miembro en cuestión. La separación máxima de las grapas se determinará con el criterio prescrito antes para estribos.

#### 7.3.4.4 Columnas zunchadas

El refuerzo transversal de una columna zunchada debe ser una hélice continua de paso constante o estribos circulares cuya separación sea igual al paso de la hélice.

La cuantía volumétrica del refuerzo transversal,  $p_s$ , no será menor que

$$0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_y} \text{ ni que } 0.12 \frac{f_c'}{f_y} \quad (7.3.1)$$

donde:

- $A_c$  área transversal del núcleo, hasta la circunferencia exterior de la hélice o estribo;
- $A_g$  área transversal de la columna; y
- $f_y$  esfuerzo de fluencia del acero de la hélice o estribo.

El esfuerzo de fluencia de diseño del acero de la hélice o estribo no debe ser mayor que 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>). La distancia libre entre dos vueltas consecutivas o entre dos estribos no será menor que una vez y media el tamaño máximo del agregado, ni mayor que 70 mm. Los traslapes tendrán una vuelta y media. Las hélices se anclarán en los extremos de la columna mediante dos vueltas y media. Los estribos se anclarán como se indica en el inciso 7.3.4.3.

## 7.4 Muros

Las disposiciones de esta sección se aplican a muros de ductilidad baja (Q=2).

En edificios con muros de concreto perimetrales en la cimentación de mucha mayor rigidez que los superiores, y con losas de sótano que se comportan como diafragmas rígidos en su plano, la altura total del muro,  $H_m$ , y la altura crítica,  $H_{cr}$ , definida en el inciso 7.4.2.2, se medirán desde el piso de la planta baja.

### 7.4.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas

Estos muros deben dimensionarse por flexocompresión como si fueran columnas, teniendo en cuenta las disposiciones complementarias de los incisos 7.4.1.1 y 7.4.1.2.

#### 7.4.1.1 Ancho efectivo ante cargas concentradas

Si las cargas son concentradas, se tomará como ancho efectivo una longitud igual a la de contacto más cuatro veces el espesor del muro, pero no mayor que la distancia centro a centro entre cargas.

#### 7.4.1.2 Refuerzo mínimo

Si la resultante de la carga vertical de diseño queda dentro del tercio medio del espesor del muro y, además, su magnitud no excede de  $0.3f_c' A_g$ , el refuerzo mínimo vertical del muro será el indicado en la sección 6.7, sin que sea necesario restringirlo contra el pandeo; si no se cumple alguna de las condiciones anteriores, el refuerzo vertical mínimo será el prescrito en el inciso 7.3.3 y habrá que restringirlo contra el pandeo mediante grapas.

El refuerzo mínimo horizontal será el que se pide en la sección 6.7.

### 7.4.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano

#### 7.4.2.1 Alcances y requisitos generales

Las disposiciones de este inciso se aplican a muros cuya principal función sea resistir fuerzas horizontales en su plano, con cargas verticales menores que  $0.3f_c' A_g$ , con relación  $L/t$  no mayor de 70 (donde  $L$  es la longitud horizontal del muro y  $t$  es el espesor del muro). Si actúan cargas verticales mayores, la relación  $L/t$  debe limitarse a 40 y se aplicará lo dispuesto en el inciso 7.4.1 y en la sección 5.2. El espesor de estos muros no será menor de 130 mm; tampoco será menor que 0.06 veces la altura no restringida lateralmente, a menos que se realice un análisis de pandeo lateral de los bordes del muro, o se les suministre restricción lateral. En construcciones de no más de dos niveles, con altura de entrepiso no mayor que 3 m, el espesor de los muros puede ser de 100 mm.

Los muros diseñados de acuerdo con este inciso 7.4.2 no requieren los elementos de refuerzo en los extremos referidos en inciso 8.4.2.4.

### 7.4.2.2 Momentos flexionantes de diseño

En muros en que  $H_m/L \geq 2$ , se considerará al momento flexionante de diseño a lo largo de  $H_{cr}$  con un valor constante e igual al momento  $M_u$  obtenido del análisis en la base del muro. La altura crítica  $H_{cr}$  será igual al valor mayor de  $L$  o  $M_u/4V_u$ . A partir de la altura del muro,  $H_{cr}$ , se usará un diagrama de momentos flexionantes lineal tal que sea paralelo a la línea que une los momentos calculados en la base y en la punta del muro (figura 7.4.1). En edificios con muros perimetrales de cimentación, se considerará el momento flexionante de magnitud constante a lo largo del primer nivel del sótano y de la altura crítica,  $H_{cr}$ , medida desde la planta baja hacia arriba.

### 7.4.2.3 Flexión y flexocompresión

#### a) Resistencia de muros a flexión y flexocompresión

La resistencia a flexión o flexocompresión de muros se puede calcular como si fueran columnas cumpliendo con las especificaciones de las secciones 3.5, 5.1 y 5.2, con excepción del inciso 5.1.1.2. Con base en un análisis de compatibilidad de deformaciones, se deberá incluir todo el refuerzo vertical colocado dentro de un ancho efectivo de los patines y de los elementos extremos (si existen) y en el alma del muro. Toda barra de refuerzo tomada en cuenta en el cálculo de la resistencia deberá estar anclada como lo especifican los incisos 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.4.

La cimentación debe diseñarse para resistir las fuerzas demandadas por los elementos extremos y el alma.

Si el muro posee aberturas, se deberá considerar su influencia en la resistencia a flexión y cortante (ver los incisos 7.4.2.4 y 7.4.2.5). Se deberá verificar que alrededor de las aberturas se pueda desarrollar un flujo de fuerzas tal que no exceda la resistencia de los materiales y que esté en equilibrio con el sistema de acciones o fuerzas internas de diseño (momentos flexionantes, cargas axiales, fuerzas cortantes).

En muros con patines se acepta considerar un ancho efectivo adyacente al alma del muro, tanto en el patín a compresión como a tensión, igual al menor de:

- 1) La mitad de la distancia al paño del alma del muro más cercano; o
- 2)  $0.25H_m$ .

Opcionalmente, la resistencia de muros a flexión en su plano puede calcularse con la ecuación 7.4.1 si la carga vertical de diseño,  $P_u$  no es mayor que  $0.3F_R t L f_c'$  y la cuantía del acero a tensión  $A_s/t d$ , no excede de 0.008. En esta expresión,  $A_s$  es el acero longitudinal del muro colocado tal que el brazo  $z$  sea el obtenido con el criterio de las ecuaciones 7.4.2; y  $d$  es el peralte efectivo del muro en dirección de la flexión

$$M_R = F_R A_s f_y z \quad (7.4.1)$$

$$z = 1.2 H_m \quad \text{si} \quad \frac{H_m}{L} \leq 0.5 \quad (7.4.2)$$

$$z = 0.4 \left( 1 + \frac{H_m}{L} \right) L \quad \text{si} \quad 0.5 < \frac{H_m}{L} < 1.0$$

$$z = 0.8 L \quad \text{si} \quad 1.0 \leq \frac{H_m}{L}$$

donde  $H_m$  es la altura total del muro, medida desde el empotramiento o desplante hasta su punta. El área de acero a tensión  $A_s$  no será menor que la obtenida por la ecuación 5.1.18.

#### b) Colocación de refuerzo vertical

En muros con relación  $H_m/L$  no mayor que 1.2, el refuerzo vertical para flexión o flexocompresión que se calcule en la sección de momento máximo se prolongará recto y sin reducción en toda la altura del muro, distribuido en los extremos de éste en anchos iguales a  $(0.25-0.1H_m/L)L$ , medido desde el correspondiente borde, pero no mayor cada uno que  $0.4H_m$ .

Si la relación  $H_m/L$  es mayor que 1.2, el refuerzo para flexión o flexocompresión se colocará en los extremos del muro en anchos iguales a  $0.15L$  medidos desde el correspondiente borde. Arriba del nivel  $H_{cr}$  este refuerzo se puede hacer variar de acuerdo con los diagramas de momentos y carga axial, respetando las disposiciones de la sección 6.1 y el inciso 7.4.2.2.

c) Restricción contra pandeo del refuerzo vertical

El refuerzo cuyo trabajo a compresión sea necesario para lograr la resistencia requerida debe restringirse contra el pandeo con estribos o grapas con separación no mayor que:

- 8 veces el diámetro de la barra o de la barra más delgada del paquete;
- 24 diámetros de la barra del estribo; ni que
- la mitad del espesor del muro.

El detallado de los estribos o grapas debe cumplir con lo especificado en el inciso 7.3.4.3

7.4.2.4 Fuerza cortante

a) Fuerza cortante que toma el concreto

La fuerza cortante,  $V_{cR}$ , que toma el concreto en muros se determinará con el criterio siguiente:

1) Si la relación de altura total a longitud,  $H_m/L$  del muro o  $H_s/L$  del segmento (véase el inciso 8.4.2.4) no excede de 1.5, se aplicará la ecuación 7.4.3

$$V_{cR} = 0.27F_R\sqrt{f'_c} tL \tag{7.4.3}$$

$$\left( V_{cR} = 0.85F_R\sqrt{f'_c} tL \right)$$

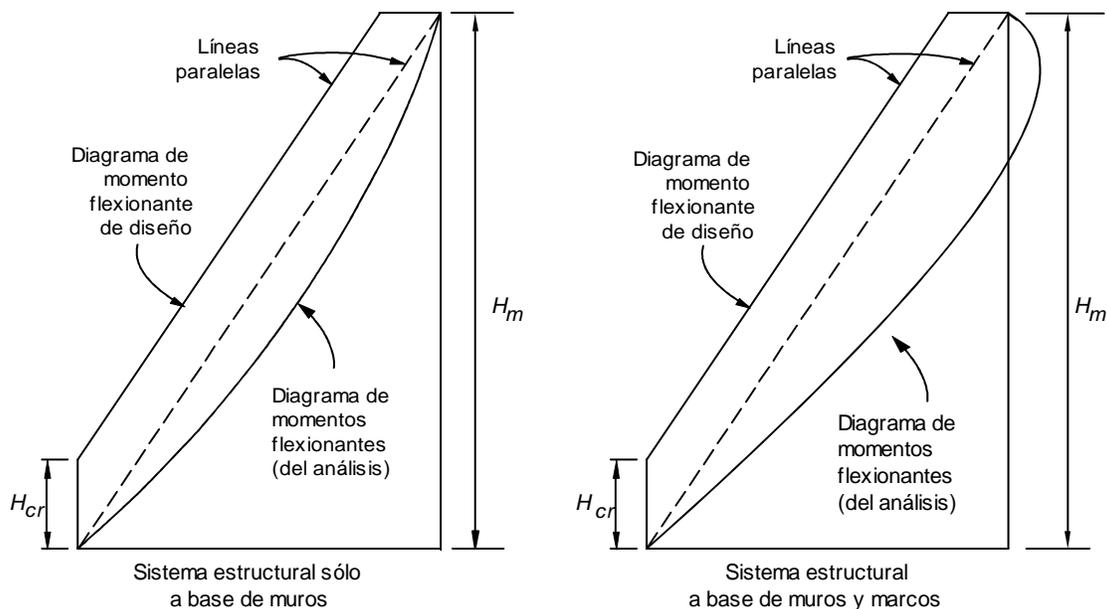


Figura 7.4.1 Diagrama de momento flexionante de diseño para muro

2) Si  $H_m/L$  o  $H_s/L$  es igual a 2.0 o mayor, se aplicarán las ecuaciones 5.3.1 o 5.3.2 en las que  $b$  se sustituirá por el espesor del muro,  $t$ ; y el peralte efectivo del muro se tomará igual a  $0.8L$ . Cuando  $H_m/L$  o  $H_s/L$  esté comprendido entre 1.5 y 2.0 puede interpolarse linealmente.

3) En muros con aberturas, para valuar la fuerza cortante que toma el concreto en los segmentos verticales entre aberturas o entre una abertura y un borde, se tomará la mayor relación altura a longitud, entre la del muro completo y la del segmento considerado.

b) Fuerza cortante que toma el acero del alma

El refuerzo necesario por fuerza cortante se determinará a partir de las ecuaciones 7.4.4 y 7.4.5, respetando los requisitos de refuerzo mínimo que se establecen en 7.4.2.4c.

La cuantía de refuerzo paralelo a la dirección de la fuerza cortante de diseño,  $p_m$ , se calculará con la expresión

$$p_m = \frac{V_u - V_c R}{F_R f_y A_{cm}} \quad (7.4.4)$$

y la del refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño,  $p_n$ , con

$$p_n = 0.0025 + 0.5 \left( 2.5 - \frac{H_m}{L} \right) (p_m - 0.0025) \quad (7.4.5)$$

donde:

$$p_m = \frac{A_{vm}}{s_m t}; \quad p_n = \frac{A_{vn}}{s_n t};$$

$s_m, s_n$  separación de los refuerzos paralelo y perpendicular a la fuerza cortante de diseño, respectivamente;

$A_{vm}$  área de refuerzo paralelo a la fuerza cortante de diseño comprendida en una distancia  $s_m$ ; y

$A_{vn}$  área de refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño comprendida en una distancia  $s_n$ .

No es necesario que la cuantía de refuerzo  $p_n$  por fuerza cortante sea mayor que  $p_m$ . Si la relación  $H_m/L$  o  $H_s/L$  no excede de 2.0, la cuantía  $p_n$  no debe ser menor que  $p_m$ .

Las barras verticales deben estar ancladas de modo que en la sección de la base del muro sean capaces de alcanzar su esfuerzo de fluencia.

c) Refuerzo mínimo, separación y anclaje del refuerzo

Las cuantías de refuerzo  $p_m$  y  $p_n$  no serán menores de 0.0025.

El refuerzo se colocará uniformemente distribuido con separación no mayor de 350 mm. Se pondrá en dos capas, cada una próxima a una cara del muro, cuando el espesor de éste exceda de 150 mm, o el esfuerzo cortante medio debido a las cargas de diseño sea mayor que  $0.19 \sqrt{f'_c}$  en MPa (o  $0.6 \sqrt{f'_c}$  en kg/cm<sup>2</sup>); en caso contrario, se podrá colocar en una capa a medio espesor.

Todas las barras horizontales y verticales deben estar ancladas de modo que sean capaces de alcanzar su esfuerzo de fluencia.

d) Limitación para  $V_u$

En ningún caso se admitirá que la fuerza cortante de diseño,  $V_u$ , sea mayor que:

$$0.63F_R A_{cm} \sqrt{f_c} \quad (7.4.6)$$

$$\left( 2F_R A_{cm} \sqrt{f_c} \right)$$

e) Aberturas

Se proporcionará refuerzo en la periferia de toda abertura para resistir las tensiones que puedan presentarse. Como mínimo deben colocarse dos barras de 12.7 mm de diámetro (número 4), o su equivalente, a lo largo de cada lado de la abertura. El refuerzo se prolongará una distancia no menor que su longitud de desarrollo,  $L_d$ , desde las esquinas de la abertura.

Las aberturas deben tomarse en cuenta al calcular rigideces y resistencias.

f) Juntas de colado

Todas las juntas de colado cumplirán con el inciso 15.3.10.

7.4.2.5 Muros acoplados

Todas las reglas señaladas anteriormente serán válidas para los segmentos de muros que formen parte de muros acoplados destinados a resistir fuerzas laterales en su plano. Las vigas de acoplamiento se diseñarán y detallarán según lo especificado en el inciso 10.3.7.

**7.5 Losas apoyadas en su perímetro**

Las disposiciones de esta sección se aplican a losas apoyadas en su perímetro que forman parte de estructuras de ductilidad baja (Q=2). El análisis estructural de estas losas se hará de acuerdo con la sección 3.3.

**7.5.1 Peralte mínimo**

Cuando sea aplicable la tabla 3.3.1 podrá omitirse el cálculo de deflexiones si el peralte efectivo no es menor que el perímetro del tablero entre 250 para concreto clase 1 y 170 para concreto clase 2. En este cálculo, la longitud de lados discontinuos se incrementará 50 por ciento si los apoyos de la losa no son monolíticos con ella, y 25 por ciento cuando lo sean. En losas alargadas no es necesario tomar un peralte mayor que el que corresponde a un tablero con  $a_2 = 2a_1$ .

La limitación que dispone el párrafo anterior es aplicable a losas en que

$$f_s \leq 252 \text{ MPa y } w \leq 3.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\left( f_s \leq 2520 \text{ kg/cm}^2 \text{ y } w \leq 380 \text{ kg/m}^2 \right)$$

para otras combinaciones de  $f_s$  y  $w$ , el peralte efectivo mínimo se obtendrá multiplicando por

$$0.182 \sqrt[4]{f_s w} \quad (7.5.1)$$

$$\left( 0.032 \sqrt[4]{f_s w} \right)$$

el valor obtenido según el párrafo anterior. En esta expresión  $f_s$  es el esfuerzo en el acero en condiciones de servicio, en MPa y  $w$  es la carga uniformemente distribuida en condiciones de servicio, en kN/m<sup>2</sup> ( $f_s$  puede suponerse igual a  $0.6f_y$ ) ( $f_s$  y  $w$  en kg/cm<sup>2</sup> y kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, en la expresión entre paréntesis).

### 7.5.2 Revisión de la resistencia a fuerza cortante

Se supondrá que la sección crítica se encuentra a un peralte efectivo del paño del apoyo. La fuerza cortante que actúa en un ancho unitario se calculará con la expresión:

$$V = \left( \frac{a_1}{2} - d \right) \left( 0.95 - 0.5 \frac{a_1}{a_2} \right) w \quad (7.5.2)$$

a menos que se haga un análisis más preciso. Cuando haya bordes continuos y bordes discontinuos,  $V$  se incrementará en 15 por ciento. La resistencia de la losa a fuerza cortante, se supondrá igual a:

$$\begin{aligned} & 0.16F_Rbd\sqrt{f_c'} \\ & \left( 0.5F_Rbd\sqrt{f_c'} \right) \end{aligned}$$

### 7.5.3 Losas que trabajan en una dirección

En el diseño de losas que trabajan en una dirección son aplicables las disposiciones para vigas del inciso 7.2.1 que sean pertinentes.

Además del refuerzo principal de flexión, debe proporcionarse refuerzo por cambios volumétricos, normal al anterior, de acuerdo con los requisitos de la sección 6.7.

### 7.5.4 Losas encasetonadas

Las losas encasetonadas, sean planas o perimetralmente apoyadas, en que la distancia centro a centro entre nervaduras no sea mayor que un sexto del claro de la losa paralelo a la dirección en que se mide la separación de las nervaduras, se pueden analizar como si fueran macizas, con los criterios que anteceden y los de la sección 7.6.

En cada caso, de acuerdo con la naturaleza y magnitud de la carga que vaya a actuar, se revisará la resistencia a cargas concentradas de las zonas comprendidas entre nervaduras. Como mínimo se considerará una carga concentrada de 10 kN (1 000 kg) en un área de 100×100 mm actuando en la posición más desfavorable.

Las nervaduras de losas encasetonadas se dimensionarán como vigas, excepto que, si la losa se apoya en su perímetro, no será necesario cumplir con el refuerzo mínimo por tensión diagonal que se pide en el inciso 5.3.5.2 cuando la fuerza cortante de diseño,  $V_u$ , sea menor que  $V_{cr}$ . Tampoco será necesario cumplir con el requisito mencionado en las nervaduras de losas planas; para estos elementos el refuerzo mínimo por fuerza cortante se establece en el inciso 5.3.6.5.

### 7.5.5 Sistemas de piso prefabricados

En edificios con sistemas de piso prefabricados se deberá garantizar la acción de diafragma rígido horizontal y la transmisión de las fuerzas horizontales a los elementos verticales. Para este fin se aplicará lo dispuesto en la sección 7.8.

Cuando no pueda garantizarse mediante el firme la acción conjunta de un sistema de piso prefabricado a base de elementos paralelos, se deben proveer conectores mecánicos a lo largo de los lados de las piezas adyacentes, según se requiera para transmitir las fuerzas cortantes en el plano, la tensión por cambio de temperatura y los efectos por contracción.

## 7.6 Losas planas

### 7.6.1 Requisitos generales

Losas planas son aquellas que transmiten las cargas directamente a las columnas, sin la ayuda de vigas. Pueden ser macizas, o aligeradas por algún medio (bloques de material ligero, alvéolos formados por moldes removibles, etc.). También pueden ser de espesor constante o pueden tener un cuadro o rectángulo de espesor menor en la parte central de los tableros, con tal que dicha zona quede enteramente dentro del área de intersección de las franjas centrales y que su espesor sea por lo menos de dos tercios del espesor del resto de la losa, excepto el del ábaco, y no menor de 100 mm. Según la magnitud de la carga por transmitir, la losa puede apoyar directamente sobre las columnas o a través de ábacos, capiteles o una combinación de ambos. En ningún caso se admitirá que las columnas de orilla sobresalgan del borde de la losa.

Las losas aligeradas contarán con una zona maciza adyacente a cada columna de cuando menos  $2.5h$ , medida desde el paño de la columna o el borde del capitel. Asimismo, contarán con zonas macizas de por lo menos  $2.5h$  adyacentes a muros de rigidez, medidas desde el paño del muro, las cuales deberán ser más amplias si así lo exige la transmisión de las fuerzas sísmicas entre losa y muro. En los ejes de columnas deben suministrarse nervaduras de ancho no menor de 250 mm; las nervaduras adyacentes a los ejes de columnas serán de por lo menos 200 mm de ancho y el resto de ellas de al menos 100 mm. En la zona superior de la losa habrá un firme de espesor no menor de 50 mm, monolítico con las nervaduras y que sea parte integral de la losa. Este firme o capa maciza debe ser capaz de soportar, como mínimo, una carga de 10 kN (1 000 kg) en un área de  $100 \times 100$  mm, actuando en la posición más desfavorable. En cada entre-eje de columnas y en cada dirección, debe haber al menos seis hileras de casetones o alvéolos. La losa se revisará como diafragma con los criterios de la sección 7.8, a fin de asegurar la correcta transmisión en su plano de las fuerzas de inercia generadas por el sismo a los elementos verticales resistentes.

### 7.6.2 Transmisión de momento entre losa y columnas

Cuando por excentricidad de la carga vertical o por la acción de fuerzas laterales haya transmisión de momento entre losa y columna, se supondrá que una fracción del momento dada por:

$$1 - \alpha = \frac{I}{1 + 0.67 \sqrt{(c_1 + d) / (c_2 + d)}} \quad (7.6.1)$$

se transmite por flexión en un ancho igual a  $c_2 + 3h$ , centrado con el eje de columnas; el refuerzo de la losa necesario para este momento debe colocarse en el ancho mencionado respetando siempre la cuantía máxima de refuerzo. El resto del momento, esto es, la fracción  $\alpha$ , se admitirá que se transmite por esfuerzos cortantes y torsiones según se prescribe en el inciso 7.6.7.

### 7.6.3 Dimensionamiento del refuerzo para flexión

En estructuras sujetas a carga vertical y fuerzas laterales de sismo se admitirá proceder en la forma siguiente:

a) Determinése el refuerzo necesario por carga vertical y distribúyase en las franjas de columna y centrales de acuerdo con lo señalado en el inciso 7.6.6, excepto el necesario para momento negativo exterior en claros extremos, el cual se colocará como si fuera refuerzo por sismo. Al menos la mitad del refuerzo negativo por carga vertical de las franjas de columnas quedará en un ancho  $c_2 + 3h$  centrado con respecto al eje de columnas.

b) Determinése el refuerzo necesario por sismo y colóquese en el mencionado ancho  $c_2 + 3h$ , de modo que al menos el 60 por ciento de él cruce el núcleo de la columna correspondiente.

El refuerzo necesario por sismo puede obtenerse a partir de la envolvente de momentos resistentes necesarios,  $M_u$ .

### 7.6.4 Disposiciones complementarias sobre el refuerzo

Además de los requisitos de los incisos 7.6.2 y 7.6.3, el refuerzo cumplirá con lo siguiente:

- a) Al menos la cuarta parte del refuerzo negativo que se tenga sobre un apoyo en una franja de columna debe continuarse a todo lo largo de los claros adyacentes.
- b) Al menos la mitad del refuerzo positivo máximo debe extenderse en todo el claro correspondiente.
- c) En las franjas de columna debe existir refuerzo positivo continuo en todo el claro en cantidad no menor que la tercera parte del refuerzo negativo máximo que se tenga en la franja de columna en el claro considerado.
- d) Toda nervadura de losas aligeradas llevará, como mínimo, a todo lo largo, una barra en el lecho inferior y una en el lecho superior.
- e) Todo el refuerzo cumplirá con los requisitos de anclaje de la sección 6.1 que sean aplicables.
- f) Se respetarán las disposiciones sobre refuerzo mínimo por flexión y por cambios volumétricos del inciso 5.1.4.1 y la sección 6.7, respectivamente. Asimismo, las relativas a refuerzo máximo por flexión del inciso 5.1.4.2.
- g) Se deberá colocar refuerzo de integridad estructural que cruce el núcleo de la columna correspondiente. Este refuerzo consistirá al menos de dos barras del lecho inferior en la franja de columna de cada dirección que sean continuas, traslapadas o ancladas en el apoyo, y que en todos los casos sean capaces de fluir en las caras de la columna. En conexiones interiores, el área del refuerzo de integridad estructural, en  $\text{mm}^2$  ( $\text{cm}^2$ ), en cada dirección principal será al menos igual a

$$A_{sm} = \frac{550 w_u l_1 l_2}{f_y} \quad (7.6.2)$$

$$\left( A_{sm} = \frac{0.55 w_u l_1 l_2}{f_y} \right)$$

donde  $w_u$  es la carga de diseño de la losa, en  $\text{kN/m}^2$  ( $\text{kg/m}^2$ ), pero no menor que dos veces la carga muerta de servicio de la losa,  $l_1$  y  $l_2$  son los claros centro a centro en cada dirección principal, en m. Para conexiones de borde, el área  $A_{sm}$  calculada con la ecuación 7.6.2 se puede reducir a dos tercios y, para conexiones de esquina, a la mitad. Se deberá usar el mayor valor de  $A_{sm}$  cuando los valores calculados en una misma dirección difieran para claros adyacentes. En el área de refuerzo de integridad estructural se incluirán las barras de lecho inferior que por otros requisitos crucen el núcleo de la columna

### 7.6.5 Secciones críticas para momento

La sección crítica para flexión negativa en las franjas de columna y central se supondrá a una distancia  $c/2$  del eje de columnas correspondientes. Aquí,  $c$  es la dimensión transversal de la columna paralela a la flexión, o el diámetro de la intersección con la losa o el ábaco, del mayor cono circular recto, con vértice de 90 grados, que pueda inscribirse en el capitel.

En columnas se considerará como crítica la sección de intersección con la losa o el ábaco. Si hay capiteles, se tomará la intersección con el arranque del capitel.

### 7.6.6 Distribución de los momentos en las franjas

Los momentos flexionantes en secciones críticas a lo largo de las losas de cada marco se distribuirán entre las franjas de columna y las franjas centrales, de acuerdo con los porcentajes indicados en la tabla 7.6.1.

**Tabla 7.6.1 Distribución de momentos en franjas de losas planas**

	Franjas de columna	Franjas centrales
Momentos positivos <sup>1</sup>	60	40
Momentos negativos	75	25

<sup>1</sup> Si el momento positivo es adyacente a una columna se distribuirá como si fuera negativo.

### 7.6.7 Efecto de la fuerza cortante

Se aplicarán las disposiciones del inciso 5.3.6 con especial atención a la transmisión correcta del momento entre columnas y losa, y a la presencia de aberturas cercanas a las columnas. Se tendrá en cuenta el refuerzo mínimo de estribos que allí se prescribe.

### 7.6.8 Peraltes mínimos

Puede omitirse el cálculo de deflexiones en tableros interiores de losas planas macizas si su peralte efectivo mínimo no es menor que

$$kL(1 - 2c/3L) \quad (7.6.3)$$

donde  $L$  es el claro mayor y  $k$  un coeficiente que se determina como sigue:

Losas con ábacos que cumplan con los requisitos del inciso 7.6.9.

$$k = 0.0034 \sqrt[4]{f_s w} \geq 0.020 \quad (7.6.4)$$
$$\left( k = 0.0006 \sqrt[4]{f_s w} \geq 0.020 \right)$$

Losas sin ábacos

$$k = 0.0043 \sqrt[4]{f_s w} \geq 0.025 \quad (7.6.5)$$
$$\left( k = 0.00075 \sqrt[4]{f_s w} \geq 0.025 \right)$$

En las expresiones anteriores  $f_s$  es el esfuerzo en el acero en condiciones de servicio, en MPa (puede suponerse igual a  $0.6f_y$ ),  $w$  es la carga en condiciones de servicio, en kN/m<sup>2</sup>, y  $c$  la dimensión de la columna o capitel paralela a  $L$  (usar  $f_s$  y  $w$  en kg/cm<sup>2</sup> y kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, para las expresiones entre paréntesis).

Los valores obtenidos con la ecuación 7.6.3 deben aumentarse 20 por ciento en tableros exteriores y 20 por ciento en losas aligeradas.

### 7.6.9 Dimensiones de los ábacos

Las dimensiones de cada ábaco en planta no serán menores que un tercio del claro en la dirección considerada. El peralte efectivo del ábaco no será menor que 1.3 por el peralte efectivo de la losa, pero no se supondrá mayor que 1.5 por dicho peralte, para fines de dimensionamiento.

### 7.6.10 Aberturas

Se admiten aberturas de cualquier tamaño en la intersección de dos franjas centrales, a condición de que se mantenga, en cada dirección, el refuerzo total que se requeriría si no hubiera la abertura.

En la intersección de dos franjas de columna, las aberturas no deben interrumpir más de un octavo del ancho de cada una de dichas franjas. En los lados de las aberturas debe suministrarse el refuerzo que correspondería al ancho que se interrumpió en cada dirección.

En la intersección de una franja de columna y una franja central, las aberturas no deben interrumpir más de un cuarto del ancho de cada una de dichas franjas. En los lados de las aberturas debe suministrarse el refuerzo que correspondería al ancho que se interrumpió en cada dirección.

Deben cumplirse los requisitos para fuerza cortante del inciso 5.3.6 y se revisará que no se exceda la cuantía máxima de acero de tensión del inciso 5.1.4.2, calculada con el ancho que resulte descontando las aberturas.

## **7.7 Conexiones**

Esta sección se aplica a intersecciones de vigas o losas con columnas que forman parte de estructuras de ductilidad baja ( $Q=2$ ).

### **7.7.1 Detalles del refuerzo en intersecciones de columnas con vigas o losas**

El refuerzo transversal de una columna en su intersección con una viga o losa debe ser tal que su separación no sea mayor y su diámetro no sea menor que los usados en la columna en las secciones próximas a dicha intersección. Si el nudo está confinado por cuatro trabes que llegan a él y el ancho de cada una es al menos igual a 0.75 veces el ancho respectivo de la columna, puede usarse la mitad del refuerzo transversal horizontal mínimo. Al menos se colocarán dos juegos de refuerzo transversal entre los lechos superior e inferior del refuerzo longitudinal de vigas o losa.

Si la intersección es excéntrica, en el dimensionamiento y detallado de la conexión deben tomarse en cuenta las fuerzas cortantes, y los momentos flexionantes y torsionantes causados por la excentricidad.

Cuando un cambio de sección de una columna obliga a doblar sus barras longitudinales en una junta, la pendiente de la porción inclinada de cada barra respecto al eje de columna no excederá de 1 a 6. Las porciones de las barras por arriba y por debajo de la junta serán paralelas al eje de la columna. Además deberá proporcionarse refuerzo transversal adicional al necesario por otros conceptos, en cantidad suficiente para resistir una y media veces la componente horizontal de la fuerza axial que pueda desarrollarse en cada barra, considerando en ella el esfuerzo de fluencia.

### **7.7.2 Resistencia del concreto en las intersecciones**

Cuando el concreto de las columnas tenga una resistencia diferente a la del concreto de las vigas o losas, se usará en la intersección el concreto que tenga mayor resistencia. La zona en que se use el concreto de mayor resistencia se deberá extender hasta una distancia igual a dos veces el peralte total de la losa a partir del perímetro de la columna.

### **7.7.3 Anclaje del refuerzo longitudinal que termina en un nudo**

Toda barra de refuerzo longitudinal de vigas que termine en un nudo debe prolongarse hasta la cara lejana del núcleo de la columna y rematarse con un doblez a 90 grados seguido de un tramo recto no menor de 12 diámetros. La sección crítica para revisar el anclaje de estas barras será en el plano externo del núcleo de la columna. La revisión se efectuará de acuerdo con el inciso 6.1.2.2, donde será suficiente usar una longitud de desarrollo del 80 por ciento de la allí determinada. Este porcentaje no afecta a los valores mínimos,  $150\text{ mm}$  y  $8d_b$ , ni el tramo recto de  $12d_b$  que sigue al doblez.

### **7.7.4 Conexiones prefabricadas**

Las conexiones se diseñarán de modo que, el grado de restricción que proporcionen, esté de acuerdo con lo supuesto en el análisis de la estructura, y deberán ser capaces de transmitir todas las fuerzas y momentos que se presentan en los extremos de cada una de las piezas que unen. Cuando una conexión forme parte del sistema estructural de soporte ante acciones laterales, deberá resistir no menos que 1.3 veces el valor de diseño de las fuerzas y momentos internos que transmita y 1.4 para conexión columna con columna.

En marcos formados por elementos prefabricados se define como nudo aquella parte de la columna comprendida en el peralte de las vigas que llegan a ella.

Las conexiones deberán cumplir los requisitos siguientes:

- a) Cuando se diseñen conexiones usando materiales con diferentes propiedades estructurales, se deberá de tomar en cuenta sus rigideces, resistencias y ductilidades relativas.
- b) En conexiones que formen parte del sistema estructural de soporte ante cargas laterales, la resistencia,  $f_c'$ , del concreto empleado en las conexiones entre elementos prefabricados, requerido para transmitir esfuerzos de tensión o compresión, deberá ser al menos igual a la mayor que tengan los elementos que conectan.
- c) El acero de refuerzo localizado en las conexiones de elementos prefabricados, requerido para transmitir esfuerzos de tensión o compresión, deberá tener un esfuerzo especificado de fluencia no mayor que 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>) y deberá de anclarse apropiadamente dentro de los miembros a conectar.
- d) En las conexiones se deberá colocar refuerzo transversal con el diámetro y la separación indicados en estas Normas para estructuras coladas en el lugar de manera que se asegure la resistencia y el confinamiento requeridos en la conexión, de acuerdo con el valor de  $Q$  usado al diseñar.
- e) Si la conexión se realiza dentro del nudo deberá cumplir con los requisitos mencionados en la sección 7.1. Se deberá asegurar el confinamiento del nudo como se indica en el inciso 7.7.1 y que la articulación plástica se presente en la viga.
- f) Cuando se utilicen colados in situ para garantizar la continuidad de una conexión, donde quiera que ésta se encuentre, deberán realizarse por la parte superior de ella obligando al uso de cimbras en caras laterales (costados) e inferiores (fondo) de la conexión.
- g) Al detallar las conexiones deben especificarse las holguras para la manufactura y el montaje. Los efectos acumulados de dichas holguras deberán considerarse en el diseño de las conexiones. Cuando se diseñe la conexión para trabajar monolíticamente, las holguras deberán rellenarse con mortero con estabilizador de volumen de manera que se garantice la transmisión de los esfuerzos de compresión y cortante.
- h) Las conexiones se detallarán para minimizar el agrietamiento potencial debido a las restricciones por fuerzas de cambio volumétrico.
- i) Cada ducto que atraviesa un nudo deberá tener un diámetro de por lo menos el doble del diámetro de la barra que contiene y se rellenará con lechada a presión de modo que asegure la adherencia de las barras.
- j) Todas las superficies de los elementos prefabricados que forman parte de una conexión deberán tener un acabado rugoso, de 5 mm de amplitud aproximadamente; estas superficies se limpiarán y se saturarán de agua cuando menos 24 horas antes de colar la conexión. En el colado de la conexión se incluirá un aditivo estabilizador de volumen.

## **7.8 Diafragmas y elementos a compresión**

### **7.8.1 Alcance**

Los requisitos de esta sección se aplican a diafragmas, como sistemas de piso o techo, así como a puntales y diagonales a compresión de sistemas que transmitan fuerzas laterales en su plano, como las inducidas por los sismos, a elementos resistentes a fuerzas laterales o entre ellos. Se aplican a elementos que formen parte de estructuras de ductilidad baja.

### **7.8.2 Firmes colados sobre elementos prefabricados**

En sistemas de piso o techo prefabricados se aceptará que un firme colado sobre los elementos prefabricados funcione como diafragma a condición de que se dimensione de modo que por sí solo resista las acciones de diseño que actúan en su plano. También se aceptará un firme que esté reforzado y cuyas conexiones con los elementos prefabricados de piso estén diseñadas y detalladas para resistir las acciones de diseño en el plano. En este caso, la superficie de concreto endurecido cumplirá con el inciso 15.3.10 y con la rugosidad del inciso 5.3.3.3. En todo caso se deberán colocar los elementos de refuerzo prescritos en la sección 6.7.

### **7.8.3 Espesor mínimo del firme**

El espesor del firme no será menor que 60 mm, si el claro mayor de los tableros es de 6 m o más. En ningún caso será menor que 50 mm.

#### **7.8.4 Diseño**

Los diafragmas se dimensionarán con los criterios para vigas comunes o vigas diafragma, según su relación claro a peralte. Debe comprobarse que posean suficiente resistencia a flexión en el plano y a cortante en el estado límite de falla, así como que sea adecuada la transmisión de las fuerzas sísmicas entre el diafragma horizontal y los elementos verticales destinados a resistir las fuerzas laterales. En particular, se revisará el efecto de aberturas en el diafragma en la proximidad de muros de concreto y columnas. En lo que se refiere a aberturas se aplicará lo prescrito en el inciso 7.4.2.4e.

Para revisar los estados límite de servicio, se deberán considerar las rigideces del diafragma a flexión y cortante, así como los efectos de flujo plástico, contracción y gradientes térmicos.

#### **7.8.5 Refuerzo**

El refuerzo mínimo por fuerza cortante no será menor de 0.0025. Si se utiliza malla soldada de alambre para resistir la fuerza cortante en firmes sobre elementos prefabricados, la separación de los alambres paralelos al claro de los elementos prefabricados no excederá de 250 mm. El refuerzo por fuerza cortante debe ser continuo y distribuido uniformemente a través del plano de corte.

#### **7.8.6 Elementos de refuerzo en los extremos**

Los elementos de refuerzo en los extremos de diafragmas podrán estar incluidos en el espesor del diafragma o bien, preferentemente, en vigas de borde.

Los elementos extremos de diafragmas se dimensionarán para resistir la suma de la fuerza axial directa factorizada actuando en el plano del diafragma y la fuerza obtenida de dividir el momento  $M_u$  en la sección entre la distancia entre los elementos extremos de frontera del diafragma en esa sección.

Los elementos a compresión de diafragmas horizontales y de armaduras verticales, así como las diagonales de contraventeo, sujetos a esfuerzos de compresión mayores que  $0.2f_c'$ , contarán en su longitud con el refuerzo transversal mínimo que se prescribe en el inciso 7.3.4. Este refuerzo puede interrumpirse en las zonas donde el esfuerzo de compresión calculado sea menor que  $0.15f_c'$ . Los esfuerzos se valuarán con las cargas de diseño, usando un modelo elástico lineal y las propiedades de las secciones brutas de los miembros considerados.

Las barras de refuerzo longitudinal de elementos extremos deberán ser continuas y podrán ser unidas mediante traslapes, soldadura o dispositivos mecánicos. En todo caso, deberán poder alcanzar su esfuerzo de fluencia. Las uniones soldadas o con dispositivos mecánicos deberán cumplir con el inciso 6.6.1.4.

En las zonas de traslape y anclaje se deberá suministrar refuerzo transversal en cuantía al menos igual a la mínima del inciso 5.3.5.1, excepto cuando se coloque el refuerzo transversal prescrito en el inciso 7.3.4.

### **7.9 Elementos estructurales en cimentaciones**

#### **7.9.1 Alcance**

A los elementos estructurales en cimentaciones se les aplicarán los requerimientos especificados de esta sección, los de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, así como todos los de estas Normas Técnicas Complementarias que no se contrapongan a ellos.

#### **7.9.2 Análisis y diseño**

El modelo de análisis debe de contemplar todo el sistema de cimentación. Se verificará que tanto la estructura como su cimentación resistan las fuerzas cortantes y axiales, momentos torsionantes y momentos de volteo inducidos por sismo,

combinados con los que correspondan a las otras solicitaciones correspondientes a la condición de carga en estudio y afectados por los factores de carga correspondientes.

Las fuerzas actuantes en la cimentación se deben calcular según lo especificado en el inciso 1.2.3 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

Los detalles de los elementos de la superestructura que se extiende por debajo de la base de la estructura hacia la cimentación requieren ser consistentes con los de la parte de arriba de la base.

### **7.9.3 Zapatas**

#### *7.9.3.1 Espesor mínimo de zapatas de concreto reforzado*

El espesor mínimo del borde de una zapata reforzada será de 150 mm. Si la zapata apoya sobre pilotes, dicho espesor mínimo será de 300 mm.

#### *7.9.3.2 Diseño por flexión*

Para dimensionar por flexión se tomarán las siguientes secciones críticas:

- a) En zapatas que soporten elementos de concreto, el plano vertical tangente a la cara del elemento.
- b) En zapatas que soportan muros de piedra o tabique, la sección media entre el paño y el eje del muro.
- c) En zapatas que soportan columnas de acero a través de placas de base, la sección crítica será en el perímetro de la columna, a menos que la rigidez y resistencia de la placa permitan considerar una sección más alejada.

Las zapatas con refuerzo en una dirección y las zapatas cuadradas reforzadas en dos direcciones llevarán su refuerzo espaciado uniformemente.

En zapatas aisladas rectangulares con flexión en dos direcciones, el refuerzo paralelo al lado mayor se distribuirá uniformemente; el paralelo al lado menor se distribuirá en tres franjas en la forma siguiente: en la franja central, de ancho  $a_1$ , una cantidad de refuerzo igual a la totalidad que debe colocarse en esa dirección, multiplicada por  $2a_1/(a_1+a_2)$ , donde  $a_1$  y  $a_2$ , son, respectivamente, los lados corto y largo de la zapata. El resto del refuerzo se distribuirá uniformemente en las dos franjas extremas.

#### *7.9.3.3 Diseño por cortante*

Los cálculos para diseño por cortante requieren que las reacciones en el suelo se obtengan de las cargas factorizadas y que el diseño sea de acuerdo con las ecuaciones apropiadas del capítulo 5. Las secciones críticas para diseño por tensión diagonal se definen en los incisos 5.3.6.1 y 5.3.6.2.

Si la zapata se apoya sobre pilotes, al calcular la fuerza cortante en una sección se supondrá que en ella produce cortante la reacción de los pilotes cuyos centros queden a  $0.5D_p$  o más hacia fuera de dicha sección ( $D_p$  es el diámetro de un pilote en la base de la zapata). Se supondrá que no producen cortante las reacciones de los pilotes cuyos centros queden a  $0.5D_p$  o más hacia dentro de la sección considerada. Para calcular la fuerza cortante en una sección situada dentro del diámetro del pilote se interpolará linealmente.

Cuando la carga que la columna transmite a la zapata es excéntrica, debe seguirse el criterio de dimensionamiento para losas planas que se presenta en el inciso 5.3.6

#### *7.9.3.4 Anclaje*

Se supondrá que las secciones críticas por anclaje son las mismas que por flexión. También deben revisarse todas las secciones donde ocurran cambios de sección o donde se interrumpa parte del refuerzo.

#### 7.9.3.5 *Diseño por aplastamiento*

Los esfuerzos de aplastamiento en el área de contacto no excederán los valores consignados en la sección 5.5.

#### 7.9.3.6 *Cortante por penetración*

En el caso de zapatas que contengan pilas y o pilotes deberá hacerse una revisión del cortante por penetración.

### 7.9.4 **Contratraves y trabes de liga**

#### 7.9.4.1 *Dimensiones mínimas*

Además de cumplir con las disposiciones de la sección 7.1 para trabes, la menor de las dimensiones de la sección transversal de trabes de liga y contratraves diseñadas como elementos de unión entre muros, contratraves, pilas y o pilotes, en cajones de cimentación o entre zapatas debe ser igual o mayor que el claro libre entre columnas dividido entre 20, pero no requiere ser mayor que 450 mm. Se deben proporcionar estribos cerrados con una separación que no exceda la mitad de la dimensión menor de dicha sección transversal o 300 mm.

#### 7.9.4.2 *Uniones con otros elementos*

Las contratraves diseñadas como elementos de unión entre pilas o pilotes o entre zapatas deben tener acero de refuerzo longitudinal continuo que debe desarrollarse en la columna o más allá de la columna de apoyo o deberá ser anclado en las cabezas de pilas o pilotes y en todas las discontinuidades.

Las contratraves y trabes que sean parte de una cimentación a base de zapatas o cajones sujetas a flexión de columnas que son parte del sistema sismo resistente deberán de cumplir con las mismas especificaciones correspondientes al factor de comportamiento sísmico que los elementos de la superestructura.

### 7.9.5 **Losas de cimentación**

Las losas de cimentación que resistan fuerzas sísmicas de columnas o muros que son parte del sistema sismo resistente deben diseñarse como diafragmas y cumplir con lo prescrito en la sección 7.8. Los planos y memorias deberán indicar si éstas son parte del sistema sismo resistente y evitar cortes a dicha losa. Se deberá revisar en dichas losas los efectos de fuera de fase del movimiento potencial del terreno.

### 7.9.6 **Pilas y pilotes**

#### 7.9.6.1 *Pilas y pilotes en tensión*

Cuando las pilas y pilotes resistan fuerzas de tensión, se debe proporcionar acero longitudinal en la longitud total resistente a esas fuerzas de tensión, despreciando la contribución del concreto. Dicho refuerzo deberá detallarse para transferir las fuerzas de tensión de la cabeza de la pila o pilote al miembro de la estructura de soporte.

Cuando las fuerzas a tensión sean transferidas por barras post-instaladas o con elementos con *grout*, se deberá demostrar que las barras puedan desarrollar un esfuerzo de  $1.25f_y$ .

#### 7.9.6.2 *Refuerzo longitudinal en pilas y pilotes*

El refuerzo a flexocompresión se extenderá más allá de la zona resultante del análisis, donde solo se trabaja a compresión una longitud igual a 6 veces la dimensión menor de la pila o pilote más una longitud de desarrollo.

#### 7.9.6.3 *Refuerzo transversal en pilas y pilotes*

El refuerzo longitudinal deberá ser confinado por estribos o hélices no menores del número 3 para pilotes y del número 4 para pilas. La separación del refuerzo de confinamiento no excederá el menor de: 12 diámetros de la barra longitudinal, la mitad de la dimensión menor de la pila o pilote o 300 mm.

#### 7.9.6.4 Elementos clasificados como columnas

Los elementos de cimentaciones profundas que no estén rodeados por suelo deben diseñarse como columnas.

#### 7.9.6.5 Conexión con otros elementos estructurales

El refuerzo deberá penetrar en el otro elemento una distancia igual a su longitud de desarrollo.

## 8. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DUCTILIDAD MEDIA

### 8.1 Requisitos especiales

Las disposiciones de esta sección se cumplirán para los elementos estructurales de ductilidad media descritos en la Tabla 4.2.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, además de los requisitos generales de las secciones precedentes.

En lo referente a los valores de  $Q$ , debe cumplirse con las secciones 5.1 y 5.2 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

En el caso de estructuras prefabricadas, se podrá usar un factor  $Q$  igual a 3, cuando la estructura emule a una colada en sitio y la conexión de los elementos se lleve a cabo en una sección donde los momentos flexionantes de diseño debidos a sismo tengan un valor no mayor que el 70 por ciento del momento flexionante total debido a cargas muerta, viva y accidental en la sección crítica por sismo, del elemento de que se trate o a dos peraltes de la sección crítica. Además, la estructura debe cumplir con los requisitos para  $Q$  igual a 3 que se especifican en el Capítulo 5 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo y con el Capítulo 7 de estas Normas, que no se contrapongan con lo que se especifica en este Capítulo 8.

#### 8.1.1 Características mecánicas de los materiales

##### 8.1.1.1 Concreto

Se deberá usar concreto clase 1. La resistencia especificada,  $f_c'$  del concreto no será menor que 25 MPa (250 kg/cm<sup>2</sup>). Los concretos de alta resistencia deberán cumplir con los requisitos especificados en 12.2.

##### 8.1.1.2 Acero de refuerzo

Las barras de refuerzo que resistan fuerzas axiales y de flexión producidas por sismo en elementos de marcos y de bordes de muros serán corrugadas, de baja aleación, con esfuerzo especificado de fluencia de 420 MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>) o de 550 MPa (5500 kg/cm<sup>2</sup>) que cumplan con los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-B-457-CANACERO.

También se permite el empleo de acero normal con esfuerzo especificado de fluencia de 420 MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>) o 520 MPa (5200 kg/cm<sup>2</sup>) que cumpla con los requisitos de la norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE, siempre y cuando:

- a) Los ensayos realizados al material indiquen que el acero tiene fluencia definida y que el esfuerzo de fluencia no excede al nominal en más de 130 MPa (1300 kg/cm<sup>2</sup>).
- b) La relación entre el esfuerzo máximo de tensión y el esfuerzo de fluencia no sea menor de 1.25.

El valor de  $f_y$  para el refuerzo transversal, incluyendo los refuerzos en hélice, no debe exceder de 420 MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>).

### 8.2 Vigas

Los requisitos de esta sección se aplican a miembros principales que trabajan esencialmente a flexión y que forman parte de estructuras de ductilidad intermedia ( $Q=3$ ). Se incluyen vigas y aquellas columnas con cargas axiales pequeñas que satisfagan la ecuación 8.2.1.

$$P_u \leq A_g f_c / 10 \quad (8.2.1)$$

### 8.2.1 Requisitos geométricos

- a) El claro libre no debe ser menor que cuatro veces el peralte efectivo;
- b) En sistemas de vigas y losa monolítica, la relación entre la separación de apoyos que eviten el pandeo lateral y el ancho de la viga no debe exceder de 35;
- c) La relación entre el peralte y el ancho no será mayor de 4.0;
- d) El ancho de la viga no será menor de 250 mm, ni excederá el ancho de las columnas a las que llega; y
- e) El eje de la viga no debe separarse horizontalmente del eje de la columna más de un décimo del ancho de la columna normal a la viga.

### 8.2.2 Refuerzo longitudinal

- a) En toda sección se dispondrá de refuerzo tanto en el lecho inferior como en el superior. En cada lecho el área de refuerzo no será menor que la obtenida de la ecuación 5.1.18 y constará por lo menos de dos barras corridas de 12.7 mm de diámetro (número 4).

La cuantía de acero longitudinal a tensión,  $p$ , no excederá del 75 por ciento del área balanceada calculada de acuerdo con el inciso 5.1.1.1.

- b) El momento resistente positivo en el paño de la unión viga–columna no será menor que un tercio del momento resistente negativo que se suministre en esa sección. En ninguna sección a lo largo del miembro, ni el momento resistente negativo, ni el resistente positivo, serán menores que la cuarta parte del máximo momento resistente que tenga en los extremos.

- c) No se permitirán las uniones por traslape en los casos siguientes:

- 1) Dentro de los nudos (uniones viga–columna);
- 2) En una distancia de dos veces el peralte del miembro, medida desde el paño del nudo; y
- 3) En aquellas zonas donde se suponga que pueden formarse articulaciones plásticas causadas por desplazamientos laterales del marco.

- d) Con el refuerzo longitudinal pueden formarse paquetes de dos barras cada uno.

- e) Las uniones soldadas o con dispositivos mecánicos, deberán cumplir los requisitos de los incisos 6.6.1.5 ó 6.6.1.6, respectivamente, a condición de que en toda sección de unión cuando mucho se unan barras alternadas y que las uniones de barras adyacentes no disten entre sí menos de 600 mm en la dirección longitudinal del miembro.

### 8.2.3 Refuerzo transversal para confinamiento

- a) Se suministrarán estribos cerrados de al menos 7.9 mm de diámetro (número 2.5) que cumplan con los requisitos de los incisos 8.2.3.b a 8.2.3.e, en las zonas siguientes (figura 8.2.1):

- 1) En cada extremo del miembro sobre una distancia de dos peraltes, medida a partir del paño del nudo; y
- 2) En la porción del elemento que se halle a una distancia igual a dos peraltes ( $2h$ ) de toda sección donde se suponga que puede formarse una articulación plástica causada por desplazamientos laterales del marco. Si la articulación se forma en una sección intermedia, los dos peraltes se tomarán a cada lado de la sección.

- b) El primer estribo se colocará a no más de 50 mm de la cara del miembro de apoyo. La separación de los estribos no excederá ninguno de los valores siguientes:

- 1)  $0.25d$ ;

- 2) Ocho veces el diámetro de la barra longitudinal más delgada;
- 3) 24 veces el diámetro de la barra del estribo; o
- 4) 300 mm.

c) Los estribos deben ser cerrados, de una pieza, y deben rematar en una esquina con dobleces de 135 grados, seguidos de tramos rectos de no menos de seis diámetros de largo ni de 80 mm. En cada esquina del estribo debe quedar por lo menos una barra longitudinal. Los radios de doblez cumplirán con los requisitos de la sección 6.5. La localización del remate del estribo debe alternarse de uno a otro.

d) En las zonas definidas en el inciso 8.2.3.a, se usarán estribos de por lo menos cuatro ramas si el ancho de la viga excede de 40 cm.

e) Fuera de las zonas definidas en el inciso 8.2.3.a, la separación de los estribos no será mayor que  $0.5d$  a todo lo largo. En todo el elemento, la separación de estribos no será mayor que la requerida por fuerza cortante (inciso 8.2.4).

### 8.2.4 Requisitos para fuerza cortante

#### 8.2.4.1 Fuerza cortante de diseño

Los elementos que trabajan principalmente a flexión se dimensionarán de manera que no se presente falla por cortante antes que puedan formarse las articulaciones plásticas por flexión en sus extremos. Para ello, la fuerza cortante de diseño se obtendrá del equilibrio del miembro entre caras de apoyos; se supondrá que en los extremos actúan momentos del mismo sentido (figura 8.2.2). Estos momentos representan una aproximación de la resistencia a flexión y son valuados con las propiedades del elemento en esas secciones, con factor de resistencia unitario, y con el esfuerzo en el acero de tensión al menos igual a  $1.25f_y$ . A lo largo del miembro actuarán las cargas correspondientes multiplicadas por el factor de carga. En el caso de vigas que formen parte de conexiones viga–columna con articulaciones alejadas de la cara de la columna (Sección 9.8), para calcular la fuerza cortante de diseño se podrá usar el método anterior considerando que el claro  $\ell$  de la figura 8.2.1 es la distancia centro a centro entre dichas articulaciones. El refuerzo por cortante así diseñado se deberá extender dentro de la región de la viga comprendida entre las secciones 1 y 2 definidas en el inciso 9.8.2.

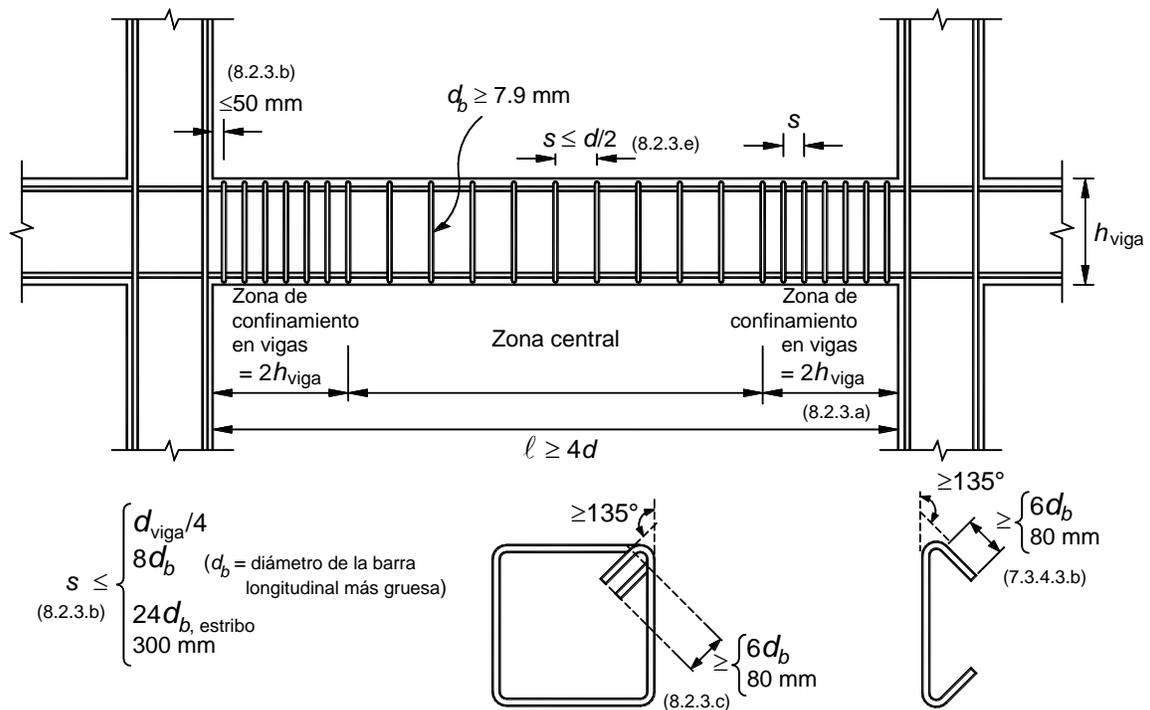


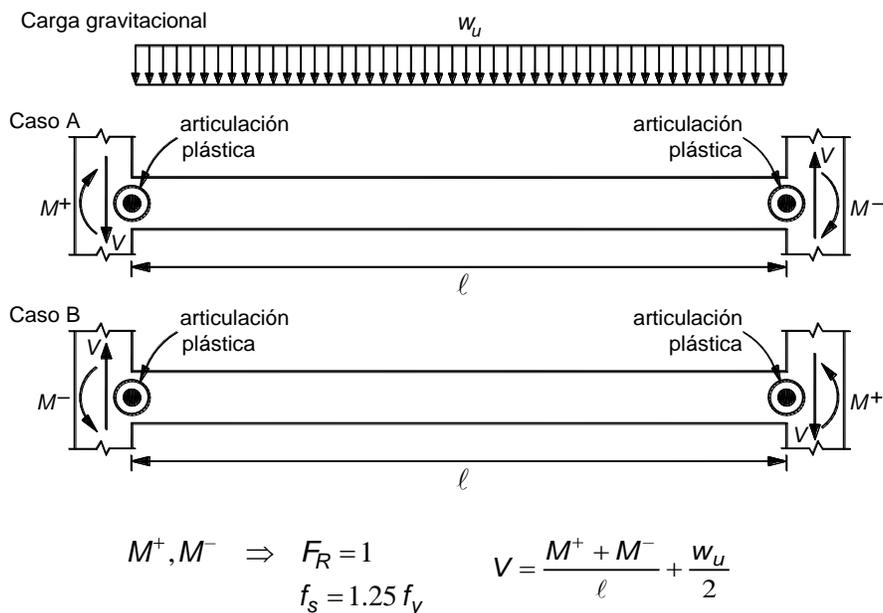
Figura 8.2.1 Detallado de elementos a flexión de ductilidad media

### 8.2.4.2 Refuerzo transversal para fuerza cortante

Al calcular el refuerzo transversal por cortante, se despreciará la contribución del concreto a la resistencia si, en las zonas definidas en el inciso 8.2.3.a, la fuerza cortante de diseño causada por el sismo es igual o mayor que la mitad de la fuerza cortante de diseño calculada según el inciso 8.2.4.1. La fuerza cortante de diseño no excederá de la indicada en el inciso 5.3.4.

En el refuerzo para fuerza cortante puede incluirse el refuerzo de confinamiento prescrito en el inciso 8.2.3.

El refuerzo para fuerza cortante estará formado por estribos verticales cerrados de una pieza, de diámetro no menor que 7.9 mm (número 2.5), rematados como se indica en el inciso 8.2.3.c.



El sentido de la fuerza cortante  $V$  depende de la magnitud relativa de la fuerza cortante producida por la carga gravitacional de diseño  $w_u$  y de aquella que equilibra a los momentos que aproximan la resistencia a flexión.

**Figura 8.2.2 Determinación de la fuerza cortante de diseño en un elemento a flexión de ductilidad media**

## 8.3 Columnas

Las disposiciones de esta sección se aplican a miembros en los que la carga axial de diseño,  $P_u$ , sea mayor que  $A_g f'_c / 10$  y que formen parte de estructuras de ductilidad media ( $Q=3$ ).

### 8.3.1 Geometría

La relación entre la dimensión transversal mayor de una columna y la menor no excederá de 4. La dimensión transversal menor será por lo menos igual a 250 mm.

### 8.3.2 Resistencia mínima a flexión de columnas

#### 8.3.2.1 Procedimiento general

Las resistencias a flexión de las columnas en un nudo deben satisfacer la ecuación 8.3.1

$$\Sigma M_e \geq 1.2 \Sigma M_g \quad (8.3.1)$$

donde:

- $\Sigma M_e$  suma al paño del nudo de los momentos resistentes en el plano de análisis calculados con factor de resistencia igual a uno, de las columnas que llegan a ese nudo; el momento resistente será el que corresponde a la carga axial factorizada que, en un diagrama de interacción de la columna, produzca el menor momento resistente. Al calcular los momentos resistentes en el plano de análisis no se considerarán los momentos que actúan en el plano perpendicular; y
- $\Sigma M_g$  suma al paño del nudo de los momentos resistentes calculados con factor de resistencia igual a uno, de las vigas que llegan al nudo.

Las sumas anteriores deben realizarse de modo que los momentos de las columnas se opongan a los de las vigas. La condición debe cumplirse para los dos sentidos en que puede actuar el sismo.

No será necesario cumplir con la ecuación 8.3.1 en los nudos de azotea.

### **8.3.3 Refuerzo longitudinal mínimo y máximo**

Se deberán cumplir los requisitos del inciso 7.3.3

### **8.3.4 Requisitos para fuerza cortante**

#### **8.3.4.1 Criterio y fuerza de diseño**

Los elementos a flexocompresión se dimensionarán de manera que no fallen por fuerza cortante antes que se formen articulaciones plásticas por flexión en sus extremos. Para esto, la fuerza cortante de diseño se calculará del equilibrio del elemento en su altura libre, suponiendo que en sus extremos actúan momentos flexionantes del mismo sentido, numéricamente iguales a los momentos que representan una aproximación a la resistencia real a flexión de esas secciones, con factor de resistencia igual a uno, y obtenidos con la carga axial de diseño que conduzca al mayor momento flexionante resistente. Sin embargo, no será necesario que el dimensionamiento por fuerza cortante sea más conservador que el obtenido con la fuerza cortante de diseño proveniente del análisis y un factor de resistencia igual a 0.5.

#### **8.3.4.2 Contribución del concreto a la resistencia**

Se despreciará la contribución del concreto,  $V_{cr}$ , si se satisface simultáneamente que:

- a) La fuerza axial de diseño, incluyendo los efectos del sismo, sea menor que  $A_g f_c / 20$ ; y que
- b) La fuerza cortante de diseño causada por el sismo sea igual o mayor que la mitad de la fuerza cortante de diseño calculada según el inciso 8.3.4.1.

#### **8.3.4.3 Refuerzo transversal por cortante**

El refuerzo para fuerza cortante deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.3.4, excepto que el diámetro de la barra para los estribos no será menor que 9.5 mm (número 3).

## **8.4 Muros**

Las disposiciones de esta sección se aplican a muros de ductilidad media ( $Q=3$ ).

En edificios con muros de concreto perimetrales en la cimentación de mucha mayor rigidez que los superiores, y con losas de sótano que se comportan como diafragmas rígidos en su plano, la altura total del muro,  $H_m$ , y la altura crítica,  $H_{cr}$ , definidas en el inciso 7.4.2.2, se medirán desde el piso de la planta baja.

### **8.4.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas**

Estos muros deben dimensionarse con las especificaciones del inciso 7.4.1.

## 8.4.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano

### 8.4.2.1 Alcances y requisitos generales

Las disposiciones de esta sección se aplican a muros cuya principal función sea resistir fuerzas horizontales en su plano, con cargas verticales menores que  $0.3f_c A_g$ , con relación  $L_m/t$  no mayor de 70 (donde  $L_m$  es la longitud horizontal del muro y  $t$  es el espesor del muro). Si actúan cargas verticales mayores, la relación  $L_m/t$  debe limitarse a 40 y se aplicará lo dispuesto en el inciso 7.4.1 y la sección 5.2. El espesor de estos muros no será menor de 180 mm; tampoco será menor que 0.06 veces la altura no restringida lateralmente, a menos que se realice un análisis de pandeo lateral de los bordes del muro, o se les suministre restricción lateral.

En los muros diseñados de acuerdo con esta sección se evaluará la necesidad de suministrar elementos de refuerzo en los extremos con los procedimientos del inciso 8.4.2.4.

### 8.4.2.2 Momentos flexionantes de diseño

Se aplicará lo establecido en el inciso 7.4.2.2.

### 8.4.2.3 Flexión y flexocompresión

Se aplicará lo establecido en el inciso 7.4.2.3, agregando al final del inciso 7.4.2.3 *b* la siguiente frase:

Cuando sean necesarios los elementos de refuerzo en los extremos a que se refiere el inciso 8.4.2.4, el refuerzo por flexión se colocará en dichos elementos independientemente de la relación  $H_m/L_m$ .

### 8.4.2.4 Elementos de refuerzo en los extremos de muros

Se evaluará la necesidad de suministrar elementos de refuerzo en las orillas de muros de conformidad con lo dispuesto en los incisos 8.4.2.4.a u 8.4.2.4.b (figura 8.4.1). Los elementos de borde deberán satisfacer el inciso 8.4.2.4.c. En muros con patines se usará un ancho efectivo del patín igual al definido en el inciso 7.4.2.3.a.

a) Los requisitos de este inciso son aplicables a muros o segmentos de muro continuos, desde la base de la estructura hasta la punta del muro y que estén diseñados para formar una articulación plástica bajo flexión y carga axial. Se entiende por segmento de un muro a la porción de éste entre aberturas o entre una abertura y un borde vertical, figura 8.4.1. Los muros o segmentos que no satisfagan lo anterior se deberán diseñar según el inciso 8.4.2.4.b.

Se deberá suministrar elementos extremos en las zonas a compresión del muro, o de un segmento de muro, si:

$$c \geq \frac{L_m}{600 (1.5QR\Delta / H_m)} \quad (8.4.1)$$

donde:

$QR\Delta/H_m$  no deberá ser menor que 0.005.

$c$  profundidad del eje neutro calculada a partir de las hipótesis de la sección 3.5 y que corresponde al momento resistente (momento resistente de diseño con factor de resistencia unitario) cuando el muro se desplace una cantidad  $Q\Delta$ . La carga axial es la carga axial de diseño consistente con la combinación de cargas y fuerzas que produzca el desplazamiento lateral  $Q\Delta$ ; y

$QR\Delta$  corresponde al desplazamiento inelástico producido por el sismo de diseño.

Cuando se necesiten elementos extremos según la ecuación 8.4.1, el refuerzo de ellos se extenderá verticalmente en la altura crítica,  $H_{cr}$  (inciso 7.4.2.2), medida a partir de la sección crítica (figura 7.4.1).

En edificios con muros perimetrales de cimentación mucho más rígidos que los superiores, los elementos de refuerzo en los extremos se extenderán en la altura del primer entrepiso del sótano.

b) En muros o segmentos de muro no diseñados de acuerdo con el inciso 8.4.2.4.a, se deberán suministrar elementos de refuerzo en las orillas del muro y en bordes de aberturas donde el esfuerzo de compresión en la fibra más esforzada exceda de  $0.2f_c'$  bajo las cargas de diseño incluyendo el sismo. Los elementos de refuerzo pueden interrumpirse en las zonas donde el máximo esfuerzo de compresión calculado sea menor que  $0.15f_c'$ . Los esfuerzos se calcularán con las cargas de diseño, usando un modelo elástico lineal y las propiedades de secciones brutas.

El elemento extremo se dimensionará como columna corta para que resista, como carga axial, la fuerza de compresión que le corresponda, calculada en la base del muro cuando sobre éste actúe el máximo momento de volteo causado por las fuerzas laterales y las cargas debidas a la gravedad, incluyendo el peso propio y las que le transmita el resto de la estructura. Se incluirán los factores de carga y de resistencia que corresponda.

c) Cuando se requieran elementos de refuerzo en los extremos de muros y bordes de aberturas, según los incisos 8.4.2.4.a u 8.4.2.4.b, se deberá cumplir simultáneamente que (figura 8.4.2):

- 1) El elemento de refuerzo se extienda en una distancia a partir de la fibra extrema en compresión al menos igual al mayor de  $(c - 0.125L_m)$  y  $c/2$ ;
- 2) En muros con patines, el elemento de refuerzo abarque el ancho efectivo del patín a compresión (inciso 7.4.2.3.a), se extienda al menos 300 mm dentro del alma y tenga un ancho por lo menos igual a  $H/16$ ;
- 3) En muros en los que la relación  $H_m/L_m \geq 2$ , que sean continuos desde su base hasta su extremo superior, que se diseñen para tener una sola sección crítica a flexocompresión y con una relación  $c/L_m \geq 3/8$ , el ancho  $t$  en la longitud calculada según 8.4.2.4. c1 sea por lo menos de 300 mm;
- 4) Todas las barras o paquetes de barras longitudinales queden restringidos contra el pandeo con estribos, grapas o zunchos con separación no mayor que:
  - 8 veces el diámetro de la barra o de la barra más delgada del paquete;
  - 24 diámetros de la barra del estribo;
  - La tercera parte de la menor dimensión del elemento de borde.

El detallado de los estribos o grapas debe cumplir con lo señalado en el inciso 7.3.4.3.

- 5) El refuerzo transversal del elemento, que no deberá ser menor que barras #3, se continúe dentro de la cimentación cuando menos en una distancia igual a la longitud de desarrollo de la barra longitudinal más gruesa o del paquete de barras longitudinales más gruesas del elemento extremo, con excepción de que el elemento extremo termine en una zapata o losa de cimentación, caso en que el refuerzo transversal se extenderá 300 mm dentro de la cimentación;
- 6) El refuerzo horizontal de muros se ancle en los núcleos confinados de los elementos extremos de manera que pueda alcanzar su esfuerzo de fluencia; y
- 7) Las uniones soldadas o con dispositivos mecánicos cumplan con lo especificado en el inciso 6.6.1.3.

d) Cuando no se requieran elementos de refuerzo como los indicados en los incisos 8.4.2.4.a a 8.4.2.4.c, se deberá satisfacer que:

- 1) Si la cuantía del refuerzo longitudinal del muro colocado en el entrepiso es mayor que  $2.8/f_y$ , en MPa ( $28/f_y$ , en  $\text{kg/cm}^2$ ), se deberá colocar refuerzo transversal que cumpla con el inciso 8.4.2.4.c y que se extienda una distancia a partir de la fibra extrema en compresión al menos igual al mayor de  $(c - 0.125L_m)$  y  $c/2$ . La separación máxima del refuerzo transversal no excederá de 200 mm.
- 2) Excepto cuando la fuerza cortante de diseño  $V_u$  en el plano del muro sea menor que

$$0.083A_{cm} \sqrt{f_c'} \quad ; \quad \text{en mm}^2 \text{ y MPa}$$

$$\left( 0.26A_{cm} \sqrt{f_c'} \quad ; \quad \text{en cm}^2 \text{ y kg/cm}^2 \right)$$

el refuerzo horizontal que termine en los bordes de un muro sin elementos de refuerzo, deberá rematarse mediante un doblez que rodee el refuerzo longitudinal extremo del muro (figura 8.4.2).  $A_{cm}$  es el área bruta de la sección de concreto, calculada como el producto del espesor por la longitud del muro.

Opcionalmente, el refuerzo longitudinal extremo del muro se podrá confinar con estribos en forma de letra U, que tengan el mismo diámetro y separación que el refuerzo horizontal. Estos estribos se extenderán hacia el alma del muro cuando menos en una distancia igual a la longitud de traslape medida desde la cara interna de las barras longitudinales extremas reforzadas transversalmente.

#### 8.4.2.5 Fuerza cortante

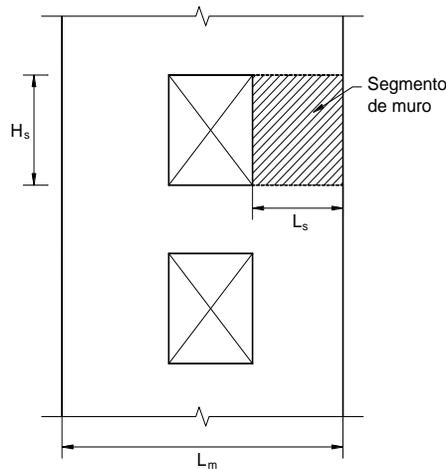
a) Fuerza cortante que toma el concreto

La fuerza cortante,  $V_{cR}$ , que toma el concreto en muros se determinará con el criterio siguiente:

- 1) Si la relación de altura total a longitud,  $H_m/L_m$  del muro o  $H_s/L_s$  del segmento, no excede de 1.5, se aplicará la ecuación 8.4.2 (figura 8.4.1).

$$V_{cR} = 0.27 F_R \sqrt{f_c'} t L \quad (8.4.2)$$

$$\left( V_{cR} = 0.85 F_R \sqrt{f_c'} t L \right)$$



**Figura 8.4.1 Segmento de muro**

- 2) Si  $H_m/L_m$  o  $H_s/L_s$  es igual a 2.0 o mayor, se aplicarán las ecuaciones 5.3.1 o 5.3.2 en las que  $b$  se sustituirá por el espesor del muro,  $t$ , y el peralte efectivo del muro se tomará igual a  $0.8L_m$  o  $0.8L_s$ , según el caso. Cuando  $H_m/L_m$  o  $H_s/L_s$  esté comprendido entre 1.5 y 2.0 puede interpolarse linealmente.
- 3) En muros con aberturas, para valuar la fuerza cortante que toma el concreto en los segmentos verticales entre aberturas o entre una abertura y un borde, se tomará la mayor relación altura a longitud entre la del muro completo y la del segmento considerado.

b) Fuerza cortante que toma el acero del alma

El refuerzo necesario por fuerza cortante se determinará a partir de las ecuaciones 8.4.3 y 8.4.4, respetando los requisitos de refuerzo mínimo que se establecen en 8.4.2.5.c.

La cuantía de refuerzo paralelo a la dirección de la fuerza cortante de diseño,  $p_m$ , se calculará con la ecuación

$$p_m = \frac{V_u - V_{cR}}{F_R f_y A_{cm}} \quad (8.4.3)$$

y la del refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño,  $p_n$ , con:

$$p_n = 0.0025 + 0.5 \left( 2.5 - \frac{H_m}{L_m} \right) (p_m - 0.0025) \quad (8.4.4)$$

donde:

$$p_m = \frac{A_{vm}}{s_m t}; \quad p_n = \frac{A_{vn}}{s_n t};$$

$s_m, s_n$  separación de los refuerzos paralelo y perpendicular a la fuerza cortante de diseño, respectivamente;

$A_{vm}$  área de refuerzo paralelo a la fuerza cortante de diseño comprendida en una distancia  $s_m$ ; y

$A_{vn}$  área de refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño comprendida en una distancia  $s_n$ .

No es necesario que la cuantía de refuerzo  $p_n$  por fuerza cortante sea mayor que  $p_m$ . Si la relación  $H_m/L_m$  no excede de 2.0, la cuantía  $p_n$  no debe ser menor que  $p_m$ .

Las barras verticales deben estar ancladas de modo que en la sección de la base del muro sean capaces de alcanzar su esfuerzo de fluencia.

#### c) Refuerzo mínimo, separación y anclaje del refuerzo

Las cuantías de refuerzo  $p_m$  y  $p_n$  no serán menores de 0.0025.

El refuerzo se colocará uniformemente distribuido con separación no mayor de 350 mm (figura 8.4.2). Se pondrá en dos capas, cada una próxima a una cara del muro, cuando el espesor de éste exceda de 150 mm, o el esfuerzo cortante medio debido a las cargas de diseño sea mayor que  $0.19\sqrt{f'_c}$  en MPa (o  $0.6\sqrt{f'_c}$  en kg/cm<sup>2</sup>); en caso contrario, se podrá colocar en una capa a medio espesor.

Todas las barras horizontales y verticales deben estar ancladas de modo que sean capaces de alcanzar su esfuerzo de fluencia.

#### d) Limitación para $V_u$

En ningún caso se admitirá que la fuerza cortante de diseño,  $V_u$ , sea mayor que:

$$0.63 F_R A_{cm} \sqrt{f'_c}$$

$$\left( 2 F_R A_{cm} \sqrt{f'_c} \right)$$

#### e) Aberturas

Se aplicarán los requisitos del inciso 7.4.2.4.e.

#### f) Juntas de colado

Todas las juntas de colado cumplirán con los incisos 15.3.10 y 5.3.3.3.

### 8.4.2.6 Muros acoplados

Todas las reglas señaladas anteriormente serán válidas para los segmentos de muros que formen parte de muros acoplados destinados a resistir fuerzas laterales en su plano. Las vigas de acoplamiento se diseñarán y detallarán según lo especificado en el inciso 10.3.7.

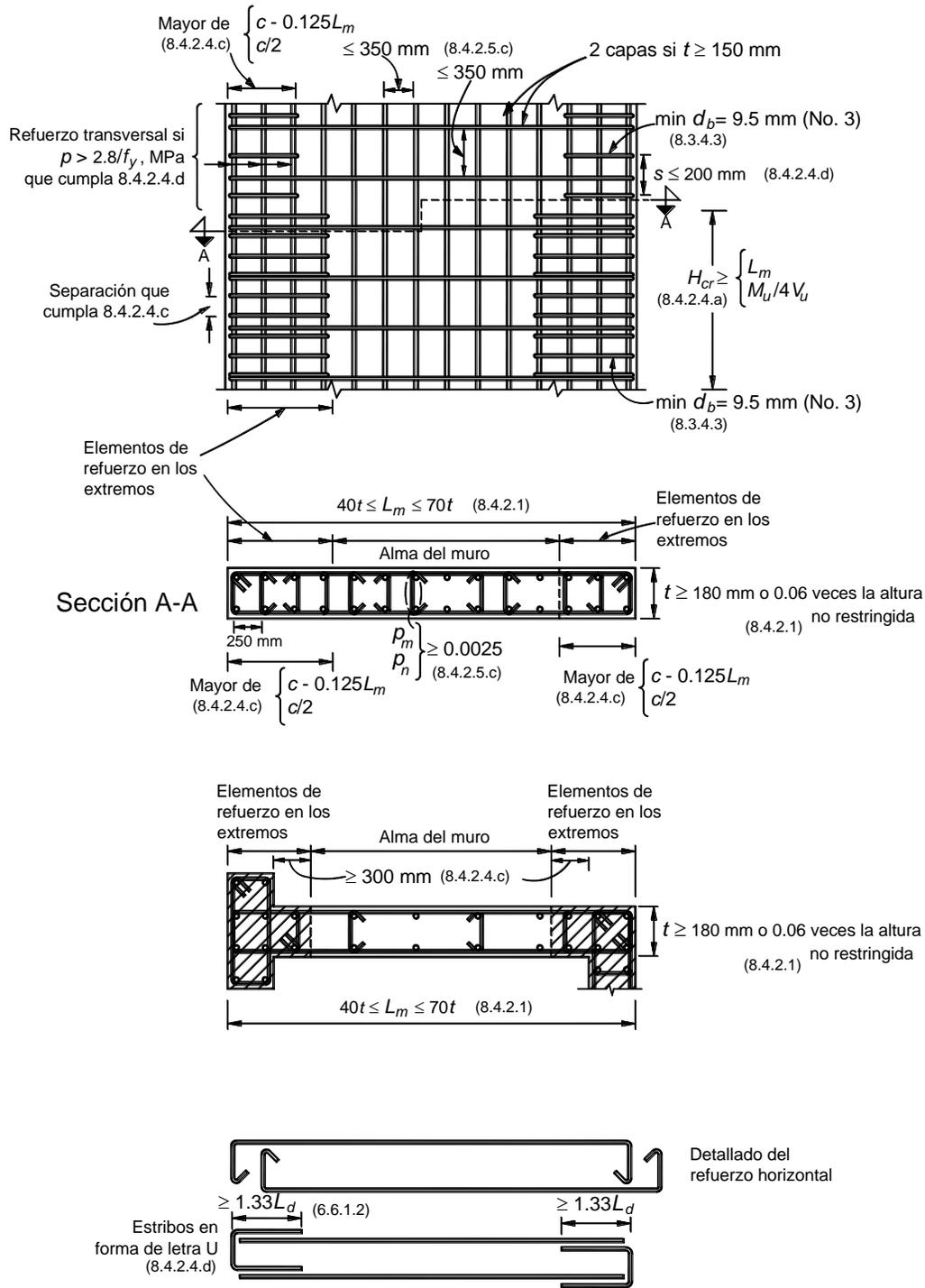


Figura 8.4.2 Detallado de muros

## 8.5 Losas apoyadas en su perímetro

Toda las disposiciones de la sección 7.5 son aplicables a losas apoyadas en su perímetro que formen parte de estructuras de ductilidad media (Q=3).

## 8.6 Losas planas

Todas las disposiciones de la sección 7.6 son aplicables a losas planas que formen parte de estructuras con sistemas de marcos o marcos y muros con losa plana de ductilidad media (Q=3). Adicionalmente a dichas disposiciones, en todas las conexiones losa plana-columna se deberá satisfacer la ecuación 8.6.1

$$P_u \leq 0.5V_{cR} \quad (8.6.1)$$

donde:

$P_u$  carga axial de diseño en la conexión  
 $V_{cR}$  resistencia a fuerza cortante por penetración en la conexión calculada con la ecuación 8.6.2

$$V_{cR} = v_{cR} b_o d \quad (8.6.2)$$

donde:

$v_{cR}$  es el esfuerzo cortante máximo de diseño calculado con la ecuación 5.3.36  
 $b_o$  es el perímetro de la sección crítica definido en el inciso 5.3.6.2.

## 8.7 Conexiones

Esta sección se aplica a intersecciones monolíticas de vigas y columnas que forman parte de estructuras de ductilidad media (Q=3).

### 8.7.1 Detalles del refuerzo en intersecciones de columnas con vigas o losas

Se deberá cumplir con los requisitos de la sección 7.7.1. El refuerzo transversal utilizado en los nudos será por lo menos del No. 3.

### 8.7.2 Resistencia del concreto en las intersecciones

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.7.2.

### 8.7.3 Anclaje del refuerzo longitudinal que termina en un nudo

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.7.3.

## 8.8 Diafragmas y elementos a compresión

### 8.8.1 Alcance

Los requisitos de esta sección se aplican a diafragmas, como sistemas de piso o techo, así como a puntales y diagonales a compresión de sistemas que transmitan fuerzas laterales en su plano, como las inducidas por los sismos, a elementos resistentes a fuerzas laterales o entre ellos.

### 8.8.2 Firmes colados sobre elementos prefabricados

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.2.

### 8.8.3 Espesor mínimo del firme

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.3.

#### **8.8.4 Diseño**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.4.

#### **8.8.5 Refuerzo**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.5.

#### **8.8.6 Elementos de refuerzo en los extremos**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.6, excepto que en el tercer párrafo del inciso 7.8.6 se sustituirá inciso 7.3.4 por inciso 8.3.4.3.

### **8.9 Elementos en cimentaciones**

Se aplicarán los requisitos de la sección 7.9.

## **9. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DUCTILIDAD ALTA**

### **9.1 Requisitos especiales**

Las disposiciones de esta sección se cumplirán para los elementos estructurales de ductilidad alta descritos en la Tabla 4.1.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, además de los requisitos generales de las secciones precedentes.

Las características mecánicas del concreto y del acero de refuerzo para estructuras diseñadas con ductilidad alta, serán las especificadas en 8.1.1 para estructuras de ductilidad media.

### **9.2 Vigas**

Los requisitos de esta sección se aplican a miembros principales que trabajan esencialmente a flexión y que forman parte de estructuras de ductilidad alta ( $Q=4$ ). Se incluyen vigas y aquellas columnas con cargas axiales pequeñas que satisfagan la ecuación 9.2.1.

$$P_u \leq A_g f_c ' / 10 \quad (9.2.1)$$

#### **9.2.1 Requisitos geométricos**

- a) El claro libre no debe ser menor que cuatro veces el peralte efectivo;
- b) En sistemas de vigas y losa monolíticas, la relación entre la separación de apoyos que eviten el pandeo lateral y el ancho de la viga no debe exceder de 30;
- c) La relación entre el peralte y el ancho no será mayor de 3;
- d) El ancho de la viga no será menor de 250 mm, ni excederá el ancho de las columnas a las que llega; y
- e) El eje de la viga no debe separarse horizontalmente del eje de la columna más de un décimo del ancho de la columna normal a la viga.

#### **9.2.2 Refuerzo longitudinal**

a) En toda sección se dispondrá de refuerzo tanto en el lecho inferior como en el superior. En cada lecho el área de refuerzo no será menor que la obtenida de la ecuación 5.1.18 y constará por lo menos de dos barras corridas de 12.7 mm de diámetro (número 4).

La cuantía de acero longitudinal a tensión,  $p$ , no excederá de 0.025.

b) El momento resistente positivo en el paño de la unión viga–columna no será menor que la mitad del momento resistente negativo que se suministre en esa sección. En ninguna sección a lo largo del miembro, ni el momento resistente negativo, ni el resistente positivo, serán menores que la cuarta parte del máximo momento resistente que tenga en los extremos.

c) Se permiten traslapes del refuerzo longitudinal sólo si en la longitud del traslape se suministra refuerzo transversal de confinamiento en forma de hélices o estribos cerrados. El paso o la separación de este refuerzo no será mayor que  $0.25d$ , ni que 100 mm. No se permitirán las uniones por traslape en los casos siguientes:

- 1) Dentro de los nudos (uniones viga–columna);
- 2) En una distancia de dos veces el peralte del miembro, medida desde el paño de nudo; y
- 3) En aquellas zonas donde se suponga que pueden formarse articulaciones plásticas causadas por desplazamientos laterales del marco.

d) Con el refuerzo longitudinal pueden formarse paquetes de dos barras cada uno.

e) Las uniones soldadas o con dispositivos mecánicos, deberán cumplir los requisitos de los incisos 6.6.1.5 ó 6.6.1.6, respectivamente, a condición de que en toda sección de unión cuando mucho se unan barras alternadas y que las uniones de barras adyacentes no disten entre sí menos de 600 mm en la dirección longitudinal del miembro.

### **9.2.3 Refuerzo transversal para confinamiento**

Se cumplirá con lo estipulado en el inciso 8.2.3

### **9.2.4 Requisitos para fuerza cortante**

Se cumplirá con lo estipulado en el inciso 8.2.4.

## **9.3 Columnas**

Los requisitos de esta sección (figura 9.3.1) se aplican a miembros en los que la carga axial de diseño,  $P_u$ , sea mayor que  $A_g f'_c / 10$ , y que formen parte de estructuras de alta ductilidad diseñadas con  $Q=4$

### **9.3.1 Requisitos geométricos**

- a) La dimensión transversal mínima no será menor que 300 mm;
- b) El área  $A_g$ , no será menor que  $P_u / 0.5f'_c$  para toda combinación de carga;
- c) La relación entre la menor dimensión transversal y la dimensión transversal perpendicular no debe ser menor que 0.4; y
- d) La relación entre la altura libre y la menor dimensión transversal no excederá de 15.

### **9.3.2 Resistencia mínima a flexión de columnas**

Las resistencias a flexión de las columnas en un nudo deben satisfacer la ecuación 9.3.1

$$\Sigma M_e \geq 1.2 \Sigma M_g \quad (9.3.1)$$

donde:

- $\Sigma M_e$  suma al paño del nudo de los momentos resistentes en el plano de análisis calculados con factor de resistencia igual a uno, de las columnas que llegan a ese nudo; el momento resistente será el que corresponde a la carga axial factorizada que, en un diagrama de interacción de la columna, produzca el menor momento resistente. Al calcular los momentos resistentes en el plano de análisis no se considerarán los momentos que actúan en el plano perpendicular; y
- $\Sigma M_g$  suma al paño del nudo de los momentos resistentes calculados con factor de resistencia igual a uno, de las vigas que llegan al nudo.

Las sumas anteriores deben realizarse de modo que los momentos de las columnas se opongan a los de las vigas. La condición debe cumplirse para los dos sentidos en que puede actuar el sismo.

No será necesario cumplir con la ecuación 9.3.1 en los nudos de azotea.

### **9.3.3 Refuerzo longitudinal**

- a) La cuantía de refuerzo longitudinal no será menor que 0.01, ni mayor que 0.04. El número mínimo de barras será seis en columnas circulares y cuatro en rectangulares.
- b) Sólo se permitirá formar paquetes de dos barras.
- c) El traslape de barras longitudinales sólo se permite en la mitad central del elemento; estos traslapes deben cumplir con los requisitos de los incisos 6.6.1.1 y 6.6.1.2 (figura 9.3.1). La zona de traslape debe confinarse con refuerzo transversal de acuerdo con el inciso 9.3.4.3.d.
- d) Las uniones soldadas o mecánicas de barras deben cumplir con los incisos 6.6.1.5 y 6.6.1.6. Se pueden usar con tal que en una misma sección cuando más se unan barras alternadas y que las uniones de barras adyacentes no disten entre sí menos de 600 mm en la dirección longitudinal del miembro.
- e) El refuerzo longitudinal cumplirá con las disposiciones del inciso 7.7.1 que no se vean modificadas por esta sección.

### **9.3.4 Requisitos para fuerza cortante**

#### **9.3.4.1 Criterio y fuerza de diseño**

Los elementos a flexocompresión se dimensionarán de manera que no fallen por fuerza cortante antes que se formen articulaciones plásticas por flexión en sus extremos. Para esto, la fuerza cortante de diseño se calculará del equilibrio del elemento en su altura libre, suponiendo que en sus extremos actúan momentos flexionantes del mismo sentido, numéricamente iguales a los momentos que representan una aproximación a la resistencia real a flexión de esas secciones, con factor de resistencia igual a uno, y obtenidos con la carga axial de diseño que conduzca al mayor momento flexionante resistente.

#### **9.3.4.2 Contribución del concreto a la resistencia**

Se despreciará la contribución del concreto,  $V_{cR}$ , si se satisface simultáneamente que:

- a) La fuerza axial de diseño, incluyendo los efectos del sismo, sea menor que  $A_g f_c / 20$ ; y que
- b) La fuerza cortante de diseño causada por el sismo sea igual o mayor que la mitad de la fuerza cortante de diseño calculada según el inciso 9.3.4.1.

#### **9.3.4.3 Refuerzo transversal por cortante**

El refuerzo transversal no será menor que el necesario por resistencia a fuerza cortante y torsión, en su caso, su diámetro no será menor que 9.5 mm (número 3) y deberá cumplir con lo señalado en los incisos 9.3.4.3a a 9.3.4.3d.

- a) Debe cumplir con los requisitos mínimos de la figura 9.3.1.

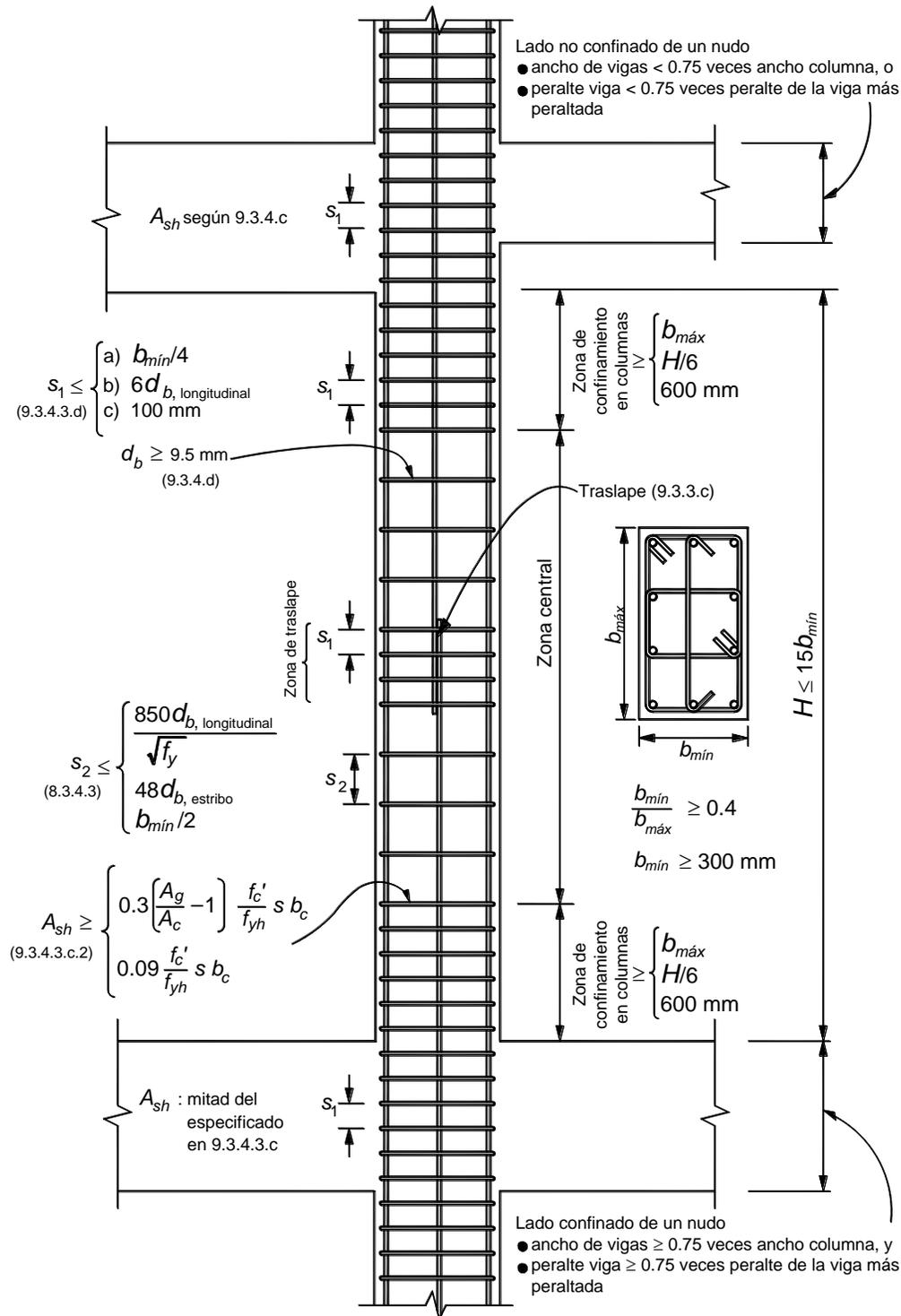


Figura 9.3.1 Detallado de elementos a flexocompresión marcos de ductilidad alta

b) Se suministrará el refuerzo transversal mínimo que se especifica en el inciso 9.3.4.3c en una longitud en ambos extremos del miembro y a ambos lados de cualquier sección donde sea probable que fluya por flexión el refuerzo longitudinal ante desplazamientos laterales en el intervalo inelástico de comportamiento. La longitud será la mayor de:

- 1) La mayor dimensión transversal del miembro;
- 2) Un sexto de su altura libre; o
- 3) 600 mm.

En la parte inferior de columnas de planta baja este refuerzo debe llegar hasta media altura de la columna, y debe continuarse dentro de la cimentación al menos en una distancia igual a la longitud de desarrollo en compresión de la barra más gruesa.

c) Cuantía mínima de refuerzo transversal

- 1) En columnas de núcleo circular, la cuantía volumétrica de refuerzo helicoidal o de estribos circulares,  $p_s$ , no será menor que la calculada con las ecuaciones 7.3.1.
- 2) En columnas de núcleo rectangular, la suma de las áreas de estribos y grapas,  $A_{sh}$ , en cada dirección de la sección de la columna no será menor que la obtenida a partir de las ecuaciones 9.3.2 y 9.3.3

$$A_{sh} = 0.3 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yh}} s b_c \quad (9.3.2)$$

$$A_{sh} = 0.09 \frac{f_c'}{f_{yh}} s b_c \quad (9.3.3)$$

donde  $s$  es la separación de los estribos,  $b_c$  es la dimensión del núcleo del elemento a flexocompresión, normal al refuerzo con área  $A_{sh}$  y esfuerzo de fluencia  $f_{yh}$  (figura 9.3.2).

d) El refuerzo transversal debe estar formado por estribos cerrados de una pieza sencillos o sobrepuestos, de diámetro no menor que 9.5 mm (número 3) y rematados como se indica en el inciso 7.3.4.3 (figura 9.3.2). Puede complementarse con grapas del mismo diámetro que los estribos, separadas igual que éstos a lo largo del miembro. Cada extremo de una grapa debe abrazar a una barra longitudinal de la periferia con un doblar de 135 grados seguido de un tramo recto de al menos seis diámetros de la grapa pero no menor que 80 mm.

La separación del refuerzo transversal no debe exceder de:

- 1) La cuarta parte de la menor dimensión transversal del elemento;
- 2) Seis veces el diámetro de la barra longitudinal más gruesa; o
- 3) 100 mm.

e) Si la distancia entre barras longitudinales no soportadas lateralmente es menor o igual que 200 mm, el límite del inciso 9.3.4.d.3 anterior podrá tomarse como 150 mm.

f) La distancia centro a centro, transversal al eje del miembro, entre ramas de estribos sobrepuestos no será mayor de 450 mm, y entre grapas, así como entre éstas y ramas de estribos no será mayor de 250 mm. Si el refuerzo consta de estribos sencillos, la mayor dimensión de éstos no excederá de 450 mm.

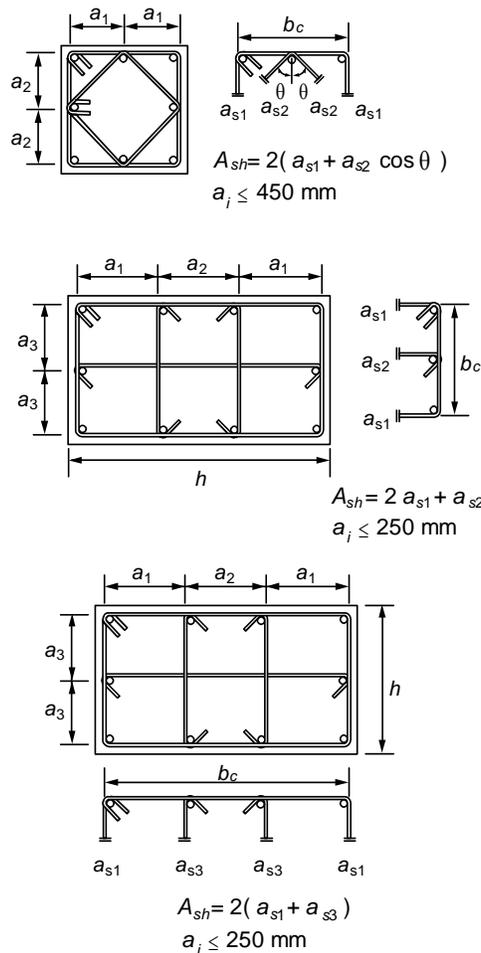
g) En el resto de la columna, el refuerzo transversal cumplirá con los requisitos del inciso 7.3.4.

En los nudos se cumplirá con los requisitos de la sección 9.7.

## 9.4 Muros

Las disposiciones de esta sección se aplican a muros de ductilidad alta ( $Q=4$ ).

En edificios con muros de concreto perimetrales en la cimentación de mucha mayor rigidez que los superiores, y con losas de sótano que se comportan como diafragmas rígidos en su plano, la altura total del muro,  $H_m$ , y la altura crítica,  $H_{cr}$ , definida en la sección 7.4.2.2, se medirán desde el piso de la planta baja.



**Figura 9.3.2 Determinación de la cuantía de refuerzo transversal en miembros a flexocompresión**

#### 9.4.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas

Estos muros deben dimensionarse con las especificaciones de la sección 7.4.1.

#### 9.4.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano

##### 9.4.2.1 Alcances y requisitos generales

Las disposiciones de esta sección se aplican a muros cuya principal función sea resistir fuerzas horizontales en su plano, con cargas verticales menores que  $0.3f_c A_g$ , con relación  $L/t$  no mayor de 70 (donde  $L$  es la longitud horizontal del muro y  $t$  es el espesor del muro). Si actúan cargas verticales mayores, la relación  $L/t$  debe limitarse a 40 y se aplicará lo dispuesto en las secciones 9.4.1 y 5.2. El espesor de estos muros no será menor de 250 mm; tampoco será menor que 0.06 veces la altura no restringida lateralmente, a menos que se realice un análisis de pandeo lateral de los bordes del muro, o se les suministre restricción lateral.

En los muros diseñados de acuerdo con esta sección se evaluará la necesidad de suministrar elementos de refuerzo en los extremos con los procedimientos de la sección 9.4.2.4.

##### 9.4.2.2 Momentos flexionantes de diseño

Se aplicará lo establecido en la sección 7.4.2.2.

### 9.4.2.3 Flexocompresión

Se aplicará lo establecido en la sección 7.4.2.3, agregando al final de la sección 7.4.2.3 *b* la siguiente frase:

Cuando sean necesarios los elementos extremos a que se refiere la sección 9.4.2.4, el refuerzo por flexión se colocará en dichos elementos independientemente de la relación  $H_m/L_m$ .

### 9.4.2.4 Elementos de refuerzo en los extremos de muro

Se evaluará la necesidad de suministrar elementos de refuerzo en las orillas de muros de conformidad con lo dispuesto en los incisos 9.4.2.4.a o 9.4.2.4.b (figura 9.4.1). Los elementos de borde deberán satisfacer el inciso 9.4.2.4.c: En muros con patines se usará un ancho efectivo del patín igual al definido en el inciso 7.4.2.3.a.

9.4.2.4.a Se aplicará lo establecido en la sección 8.4.2.4.a.

9.4.2.4.b Se aplicará lo establecido en la sección 8.4.2.4.b.

9.4.2.4.c Cuando se requieran elementos de refuerzo en los extremos de muros y bordes de aberturas, según los incisos 8.4.2.4.a u 8.4.2.4.b, se deberá cumplir simultáneamente que (figura 9.4.1):

1) El elemento de refuerzo se extienda en una distancia a partir de la fibra extrema en compresión al menos igual al mayor de  $(c - 0.1L_m)$  y  $c/2$ ;

2) En muros con patines, el elemento de refuerzo abarque el ancho efectivo del patín a compresión (inciso 7.4.2.3.a), se extienda al menos 300 mm dentro del alma y tenga un ancho por lo menos igual a  $H/16$ ;

3) En muros en los que la relación  $H_m/L_m \geq 2$ , que sean continuos desde su base hasta su extremo superior, que se diseñen para tener una sola sección crítica a flexocompresión y con una relación  $c/L_m \geq 3/8$ , el ancho  $t$  en la longitud calculada según 9.4.2.4.c.1 sea por lo menos de 300 mm;

4) El elemento extremo cuente, a todo lo largo, con el refuerzo transversal mínimo que se especifica en el inciso 9.3.4.3.c y d para elementos a flexocompresión;

5) La separación del refuerzo transversal no exceda la menor de:

- 6 veces el diámetro de la barra longitudinal o de la barra más delgada del paquete;
- la cuarta parte del espesor del muro;
- 100 mm;

6) El refuerzo transversal del elemento, que no deberá ser menor que barras #3, se continúe dentro de la cimentación cuando menos en una distancia igual a la longitud de desarrollo de la barra longitudinal más gruesa o del paquete de barras longitudinales más gruesas del elemento extremo, con excepción de que el elemento extremo termine en una zapata o losa de cimentación, caso en que el refuerzo transversal se extenderá 300 mm dentro de la cimentación;

7) El refuerzo horizontal de muros se ancle en los núcleos confinados de los elementos extremos de manera que pueda alcanzar su esfuerzo de fluencia; y

8) Las uniones soldadas o con dispositivos mecánicos cumplan con lo especificado en el inciso 6.6.1.5 ó 6.6.1.6.

9.4.2.4.d Se aplicará lo establecido en 8.4.2.4.d sustituyendo el término  $(c - 0.125L)$  por  $(c - 0.1L)$ .

### 9.4.2.5 Fuerza cortante

Se aplicará lo establecido en la sección 8.4.2.5.

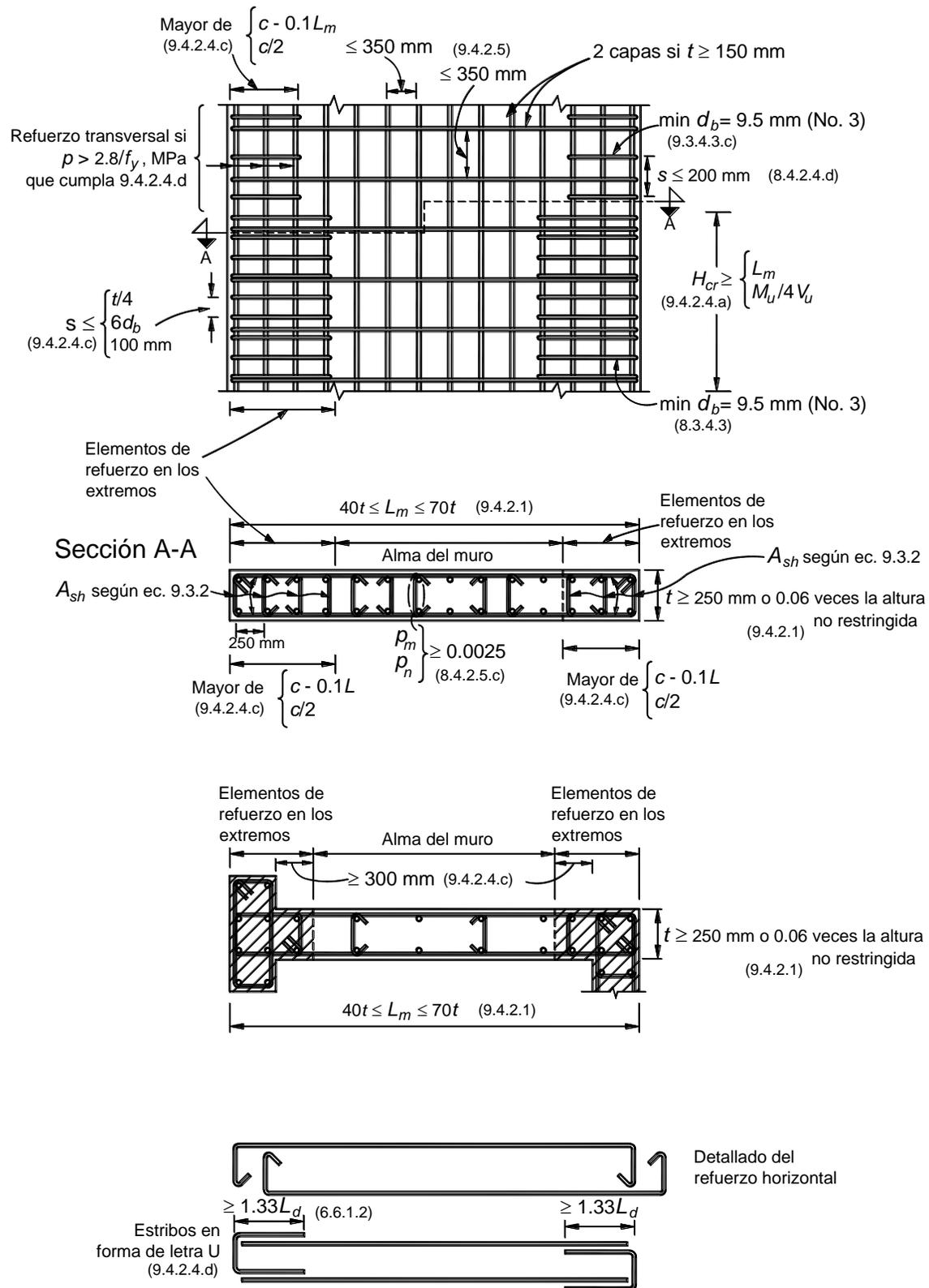


Figura 9.4.1 Detallado de muros

### 9.5 Losas apoyadas en su perímetro

Todas las disposiciones de la sección 7.5 son aplicables a losas apoyadas en su perímetro que formen parte de estructuras de ductilidad alta ( $Q=4$ ).

## **9.6 Losas planas**

No se permiten estructuras de ductilidad alta ( $Q=4$ ) a base de losas planas.

## **9.7 Conexiones viga–columna**

Las disposiciones de esta sección se aplican a conexiones monolíticas de miembros que forman parte de estructuras de alta ductilidad ( $Q=4$ ). Una conexión viga–columna o nudo se define como aquella parte de la columna comprendida en la altura de la viga más peraltada que llega a ella.

### **9.7.1 Requisitos generales**

Se supondrá que la demanda de fuerza cortante en el nudo se debe a las barras longitudinales de las vigas que llegan a la unión. Si la losa está colada monolíticamente con las vigas, se considerará que el refuerzo de la losa trabajando a tensión alojado en un ancho efectivo, contribuye a aumentar la demanda de fuerza cortante. En secciones T, este ancho del patín de tensión a cada lado del alma será al menos ocho veces el espesor del patín; en secciones L, el ancho del patín será de seis veces el espesor del patín. Las fuerzas que intervienen en el dimensionamiento por fuerza cortante de la unión se determinarán suponiendo que el esfuerzo de tensión en las barras es  $1.25f_y$ .

El refuerzo longitudinal de las vigas que llegan a la unión debe pasar dentro del núcleo de la columna.

En los planos estructurales deben incluirse dibujos acotados y a escala del refuerzo en las uniones viga–columna.

### **9.7.2 Refuerzo transversal horizontal**

Se debe suministrar el refuerzo transversal horizontal mínimo especificado en los incisos 9.3.4.3.c y e. Si el nudo está confinado por cuatro trabes que llegan a él y el ancho de cada una es al menos igual a 0.75 veces el ancho respectivo de la columna, puede usarse la mitad del refuerzo transversal horizontal mínimo. La separación será la especificada en el inciso 9.3.4.3.d.

### **9.7.3 Refuerzo transversal vertical**

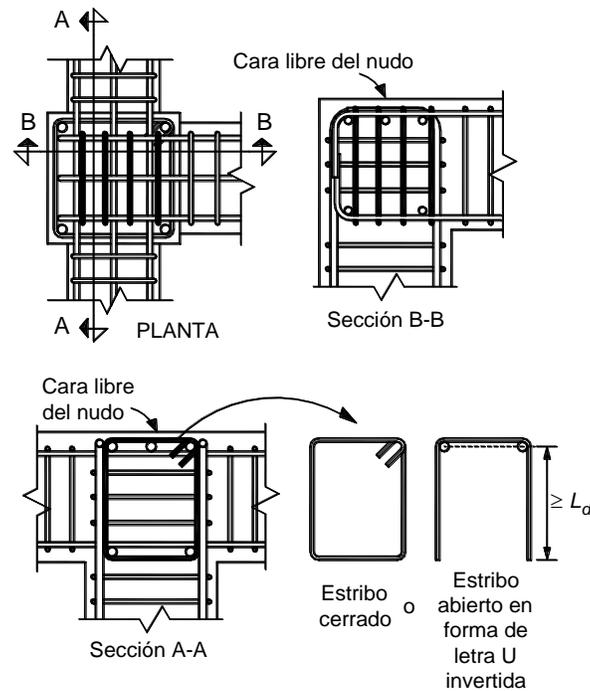
Cuando el signo de los momentos flexionantes de diseño se invierta a causa del sismo, se deberá suministrar refuerzo transversal vertical a lo largo de la dimensión horizontal del nudo en uniones de esquina (figura 9.7.1).

La cuantía y separación del refuerzo transversal vertical deberá cumplir con lo especificado en los incisos 9.3.4.3.c y 9.3.4.3.d.

Se aceptará el uso de estribos abiertos en forma de letra U invertida y sin dobleces, siempre que la longitud de las ramas cumpla con la longitud de desarrollo de la sección 6.1.2.1, medida a partir del eje del refuerzo longitudinal adyacente a la cara libre del nudo (figura 9.7.1).

### **9.7.4 Resistencia a fuerza cortante**

Se admitirá revisar la resistencia del nudo a fuerza cortante en cada dirección principal de la sección en forma independiente. La fuerza cortante se calculará en un plano horizontal a media altura del nudo (figura 9.7.2). Para calcular la resistencia de diseño a fuerza cortante del nudo se deberá clasificarlo según el número de caras verticales confinadas por los miembros horizontales y si la columna es continua o discontinua. Se considerará que la cara vertical está confinada si la viga cubre al menos 0.75 veces el ancho respectivo de la columna, y si el peralte del elemento confinante es al menos 0.75 veces la altura de la viga más peraltada que llega al nudo.



**Figura 9.7.1 Refuerzo transversal vertical en uniones viga – columna**

En nudos con tramos de viga o de columna sin cargar, se admite considerar a la cara del nudo como confinada si los tramos satisfacen las especificaciones geométricas del párrafo anterior y se extienden al menos un peralte efectivo a partir de la cara de la unión. La resistencia de diseño a fuerza cortante de nudos con columnas continuas se tomará igual a (ecuaciones 9.7.1 a 9.7.3):

a) Nudos confinados en sus cuatro caras verticales

$$1.7F_R\sqrt{f'_c} b_e h; \text{ en mm y MPa} \quad (9.7.1)$$

$$\left( 5.5F_R\sqrt{f'_c} b_e h; \text{ en cm y kg/cm}^2 \right)$$

b) Nudos confinados en tres caras verticales o en caras verticales opuestas

$$1.3F_R\sqrt{f'_c} b_e h; \text{ en mm y MPa} \quad (9.7.2)$$

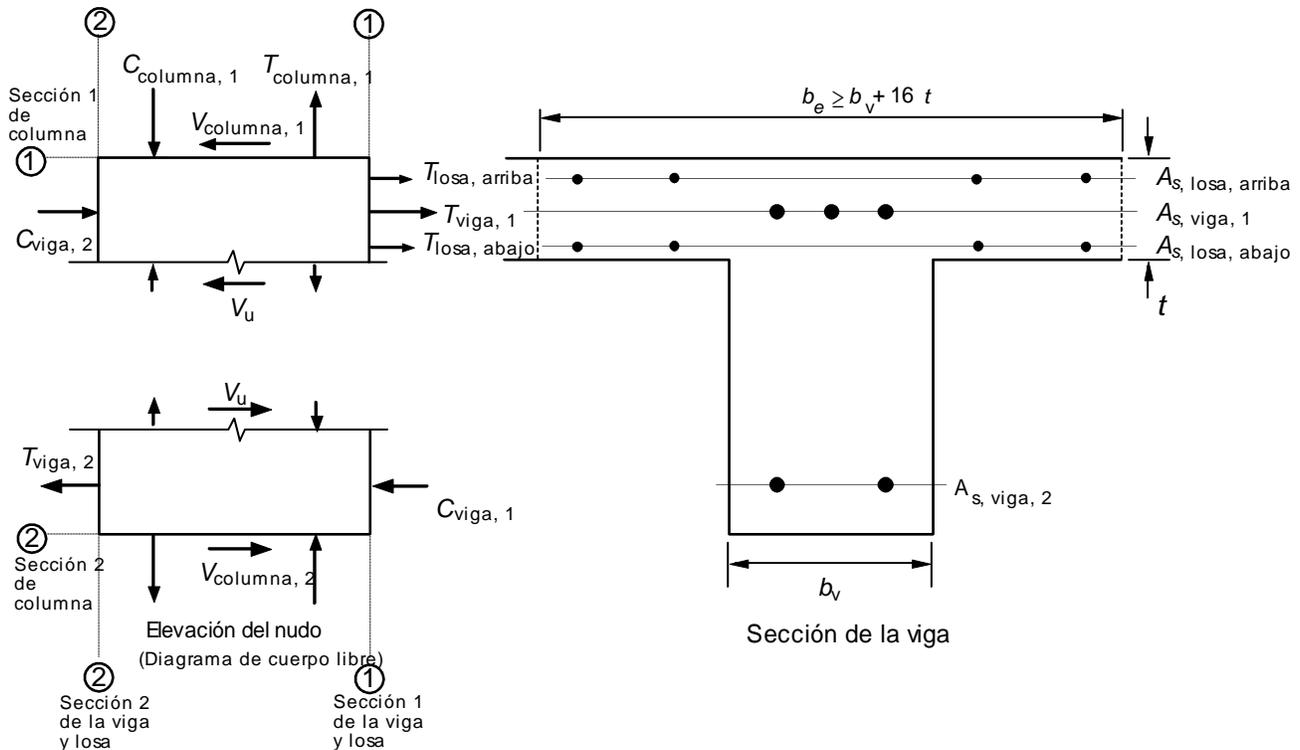
$$\left( 4.5F_R\sqrt{f'_c} b_e h; \text{ en cm y kg/cm}^2 \right)$$

c) Otros casos

$$1.0F_R\sqrt{f'_c} b_e h; \text{ si se usan mm y MPa} \quad (9.7.3)$$

$$\left( 3.5F_R\sqrt{f'_c} b_e h; \text{ si se usan cm y kg/cm}^2 \right)$$

En nudos con columnas discontinuas, la resistencia de diseño a fuerza cortante será 0.75 veces la obtenida de las ecuaciones 9.7.1 a 9.7.3.



$$V_u = T_{viga,1} + T_{losa, arriba} + T_{losa, abajo} + C_{viga,2} - V_{columna,1}$$

Donde

$$T_{viga,1} + T_{losa, arriba} + T_{losa, abajo} = 1.25 f_y (A_{s, viga, 1} + A_{s, losa, arriba} + A_{s, losa, abajo})$$

$$C_{viga,2} = T_{viga,2} = 1.25 A_{s, viga, 2} f_y$$

**Figura 9.7.2 Determinación de la fuerza cortante actuante en un nudo de estructuras de ductilidad alta.**

El ancho  $b_e$  se calculará promediando el ancho medio de las vigas consideradas y la dimensión transversal de la columna normal a la fuerza. Este ancho  $b_e$  no será mayor que el ancho de las vigas más el peralte de la columna,  $h$ , o que la dimensión transversal de la columna normal a la fuerza,  $b$  (figura 9.7.3).

Cuando el peralte de la columna en dirección de la fuerza cambia en el nudo y las barras longitudinales se doblan según la sección 7.7.1, se usará el menor valor en las ecuaciones 9.7.1 a 9.7.3.

### 9.7.5 Anclaje del refuerzo longitudinal

#### 9.7.5.1 Barras que terminan en el nudo

Toda barra de refuerzo longitudinal de vigas que termine en un nudo debe prolongarse hasta la cara lejana del núcleo de la columna y rematarse con un doblé a 90 grados seguido de un tramo recto no menor de 12 diámetros. La sección crítica para revisar el anclaje de estas barras será en el plano externo del núcleo de la columna.

La revisión se efectuará de acuerdo con la sección 6.1.2.2, donde será suficiente usar una longitud de desarrollo del 80 por ciento de la allí determinada. Este porcentaje no afecta a los valores mínimos, 150 mm y  $8d_b$ , ni el tramo recto de  $12d_b$  que sigue al doblé.

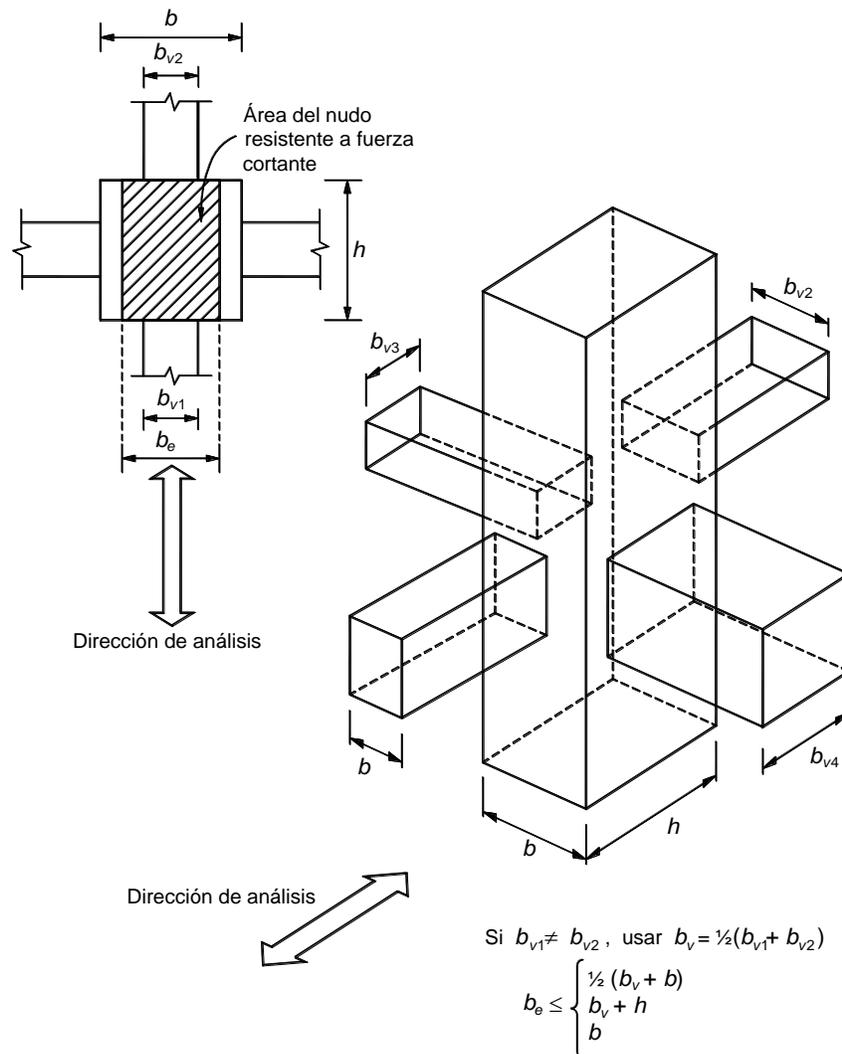
### 9.7.5.2 Barras continuas a través del nudo

Los diámetros de las barras de vigas y columnas que pasen rectas a través de un nudo deben seleccionarse de modo que se cumplan las relaciones siguientes:

$$h_{(\text{columna})}/d_b \text{ (barra de viga)} \geq 20$$

$$h_{(\text{viga})}/d_b \text{ (barra de columna)} \geq 20$$

donde  $h_{(\text{columna})}$  es la dimensión transversal de la columna en dirección de las barras de viga consideradas.



**Figura 9.7.3 Área de la sección que resiste la fuerza cortante en nudos de estructuras de ductilidad alta.**

Si en la columna superior del nudo se cumple que  $P_u/A_g f_c' \geq 0.3$ , la relación del peralte total de la viga al diámetro de las barras de columna se puede reducir a 15. También es suficiente esta relación cuando en la estructura los muros de concreto reforzado resisten más del 50 por ciento de la fuerza lateral total inducida por el sismo.

### 9.7.6 Resistencia del concreto en las intersecciones

Se deberá cumplir con lo especificado en el inciso 7.7.2

## 9.8 Conexiones viga–columna con articulaciones alejadas de la cara de la columna

### 9.8.1 Requisitos generales

Se aceptará diseñar y detallar las vigas, columnas y su unión de modo que las articulaciones plásticas por flexión de las vigas ante sismo, tanto a flexión positiva como negativa, se formen alejadas del paño de la columna (figura 9.8.1). Se aceptará que se diseñen y detallen para que se formen al menos a una distancia igual a un peralte efectivo de la viga. En el diseño y detallado se aplicarán todos los criterios de estas Normas que no sean modificadas en la sección 9.8.

La sección 9.8 sólo se aplica si el claro de cortante de las vigas es al menos tres veces el peralte efectivo. El claro de cortante se define como la distancia entre la cara de la columna y el punto de inflexión en el diagrama de momentos flexionantes de diseño.

### 9.8.2 Refuerzo longitudinal de las vigas

Se deberá usar la combinación de carga con sismo que produzca el máximo momento flexionante en la viga.

a) En vigas de sección constante, se deberán revisar dos secciones. La sección 1 corresponde a la cara de la columna y la sección 2, a un peralte efectivo de la viga.

b) Se revisará que la resistencia a flexión de la sección 1, con factor de resistencia unitario, sea al menos 1.3 veces el momento de diseño obtenido del análisis considerando las acciones permanentes, variables y accidentales.

En adición al refuerzo longitudinal principal, calculado de acuerdo con el párrafo anterior, la sección 1 se reforzará con al menos cuatro barras longitudinales dispuestas en dos lechos intermedios y que sean continuas a través del nudo (figura 9.8.1). El área total del acero intermedio no será mayor que 0.35 veces el área principal a tensión. Las barras intermedias deberán ser del menor diámetro posible y se deberán anclar dentro de la viga, a partir de la sección 1, en una distancia igual a la longitud de desarrollo de la barra calculada según la sección 6.1.1. En ningún caso la longitud de anclaje de las barras intermedias dentro de la viga será menor que 1.5 veces el peralte efectivo de la sección.

Si es necesario, con objeto de aumentar la resistencia a flexión, se podrán adicionar barras en los lechos extremos de la sección 1 y con longitud igual a la del acero intermedio (figura 9.8.1).

c) La resistencia a flexión de la sección 2, con factor de resistencia unitario, deberá ser igual al momento de diseño calculado en el análisis en esa sección y para la misma combinación de carga que la usada en el inciso 9.8.2b.

Para calcular la resistencia a flexión de esta sección no se considerarán las barras intermedias ni las barras adicionales (si existen), de la sección 1.

### 9.8.3 Resistencia mínima a flexión de columnas

Las resistencias a flexión de las columnas en un nudo deben satisfacer la ecuación 9.8.1

$$\sum M_e \geq 1.2 \sum M_g \quad (9.8.1)$$

donde:

$\sum M_e$  suma al paño del nudo de los momentos resistentes en el plano de análisis calculados con factor de resistencia igual a uno, de las columnas que llegan a ese nudo; el momento resistente será el que corresponde a la carga axial factorizada que, en un diagrama de interacción de la columna, produzca el menor momento resistente. Al calcular los momentos resistentes en el plano de análisis no se considerarán los momentos que actúan en el plano perpendicular; y

$\sum M_g$  suma al paño del nudo de los momentos resistentes calculados con factor de resistencia igual a uno, de las vigas que llegan al nudo.

Las sumas anteriores deben realizarse de modo que los momentos de las columnas se opongan a los de las vigas. La condición debe cumplirse para los dos sentidos en que puede actuar el sismo.

No será necesario cumplir con la ecuación 9.3.1 en los nudos de azotea.

### 9.8.4 Uniones viga–columna

Se aplicará lo señalado en las secciones 9.7.1 a 9.7.6 que no se vea modificado en esta sección.

Si la losa está colada monolíticamente con las vigas, se considerará que el refuerzo de la losa que trabaja a tensión alojado en un ancho efectivo, contribuye a aumentar la demanda de fuerza cortante. En secciones T, este ancho del patín a tensión a cada lado del alma se podrá valorar como:

$$8t \frac{M_{a2}}{M_{a1}}$$

En secciones L, el ancho del patín a tensión al lado del alma se podrá valorar como:

$$6t \frac{M_{a2}}{M_{a1}}$$

Las fuerzas que intervienen en el dimensionamiento por fuerza cortante se determinarán suponiendo que el esfuerzo de tensión en las barras de las vigas es igual a  $1.0f_y$ .

Si las barras de las vigas son continuas a través del nudo, su diámetro debe cumplir con

$$h_{(columna)}/d_b \text{ (barra de viga)} \geq 16$$

No será necesario cumplir con la ecuación 9.8.1 en los nudos de azotea.

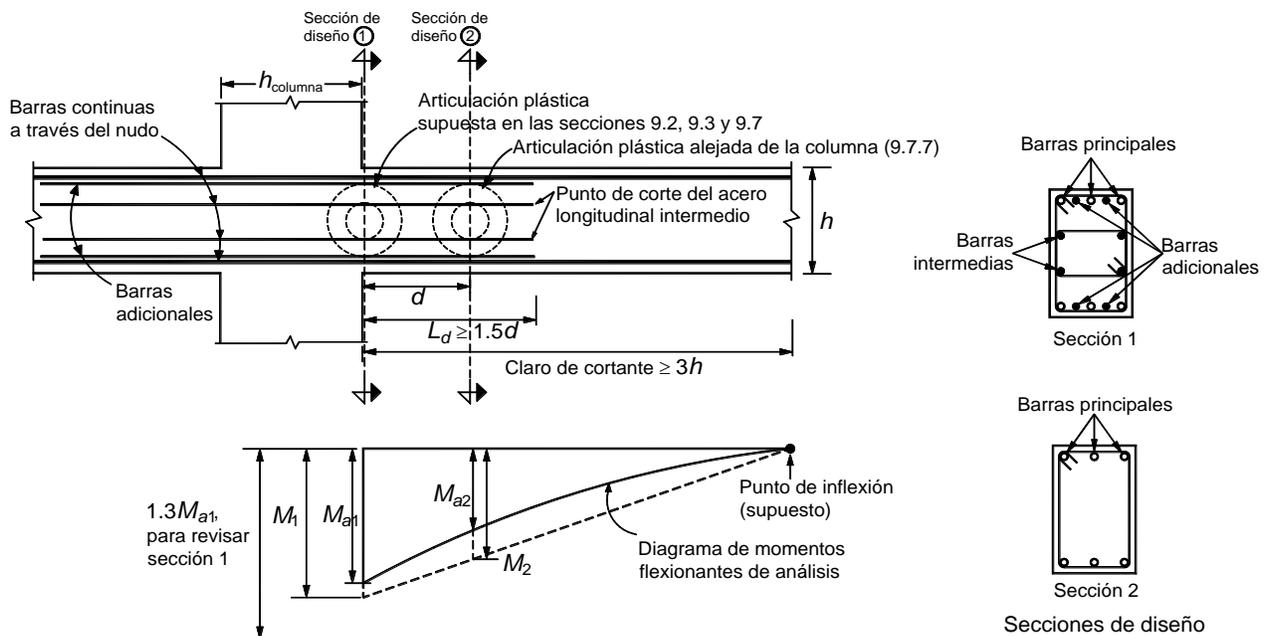


Figura 9.8.1 Marcos de alta ductilidad con articulaciones plásticas alejadas de la cara de la columna

## **9.9 Diafragmas y elementos a compresión**

### **9.9.1 Alcance**

Los requisitos de esta sección se aplican a diafragmas, como sistemas de piso o techo, así como a puntales y diagonales a compresión de sistemas que transmitan fuerzas laterales en su plano, como las inducidas por los sismos, elementos resistentes a fuerzas laterales o entre ellos.

### **9.9.2 Firmes colados sobre elementos prefabricados**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.2.

### **9.9.3 Espesor mínimo del firme**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.3.

### **9.9.4 Diseño**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.4.

### **9.9.5 Refuerzo**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.5.

### **9.9.6 Elementos de refuerzo en los extremos**

Se deberá cumplir con los requisitos del inciso 7.8.6, excepto que en el tercer párrafo del inciso 7.8.6 se sustituirá inciso 7.3.4 por inciso 9.3.4.3.

### **9.9.7 Elementos de cimentaciones**

Se aplicarán los requisitos de la sección 7.9.

## **10. CASOS EN LOS QUE NO APLICA LA TEORÍA GENERAL DE FLEXIÓN (ELEMENTOS CON DISCONTINUIDADES)**

### **10.1 Ménsulas**

#### **10.1.1 Requisitos generales**

Se permite dimensionar las ménsulas con el método de puntales y tensores del Apéndice B, cuando la relación entre la distancia de la carga vertical al paño donde arranca la ménsula,  $a$ , y el peralte efectivo medido en dicho paño,  $d$ , es menor que 2.0. Cuando la relación  $a/d$ , sea menor o igual a 1.0, y la tensión horizontal de diseño,  $P_{hu}$ , no exceda la carga vertical de diseño,  $P_{vu}$ , se pueden aplicar las disposiciones de los incisos 10.1.2 a 10.1.4 en el dimensionamiento de ménsulas.

El peralte total en el extremo de la ménsula no debe ser menor que  $0.5d$ .

La sección donde arranca la ménsula debe dimensionarse para que resista simultáneamente:

- a) Una fuerza cortante,  $P_{vu}$ ;
- b) Un momento flexionante

$$P_{vu} a + P_{hu} (h-d) \quad (10.1.1)$$

c) Y una tensión horizontal,  $P_{hu}$ .

Para diseño se debe considerar que la fuerza  $P_{vu}$  está a un tercio de la distancia y del extremo de la ménsula, como se indica en la figura 10.1.1.

En todos los cálculos relativos a ménsulas, el factor de resistencia,  $F_R$ , se tomará igual a 0.75.

### 10.1.2 Dimensionamiento del refuerzo

El refuerzo de una ménsula constará de barras principales de área  $A_s$ , y de estribos complementarios horizontales de área  $A_h$ , (figura 10.1.1).

El área  $A_s$  se tomará como la mayor de las obtenidas con las expresiones siguientes:

$$A_f + A_n$$
$$\frac{2}{3} A_{vf} + A_n$$

La cuantía,  $A_s/bd$ , no debe ser menor que

$$0.04 \frac{f_c'}{f_y}$$

El área  $A_h$  se tomará al menos igual a  $0.5(A_s - A_n)$ .

En las expresiones anteriores,  $A_f$ , es el área de refuerzo necesario para resistir el momento flexionante calculado de acuerdo con la ecuación 10.1.1.

El área  $A_{vf}$ , es la del refuerzo para resistir la fuerza cortante  $P_{vu}$ , y  $A_n$ , la del necesario para resistir la tensión  $P_{hu}$ .

El área  $A_f$  no debe exceder al área balanceada obtenida con la ecuación 5.1.1, y puede calcularse con la expresión 10.3.1, suponiendo que el brazo  $z$  es igual a  $0.9d$ .

El refuerzo  $A_{vf}$  se determinará de acuerdo con el criterio de cortante por fricción de 5.3.3.3, suponiendo la compresión  $N_u$  igual a cero.

El área  $A_n$ , se calculará como:

$$\frac{P_{hu}}{F_R f_y}$$

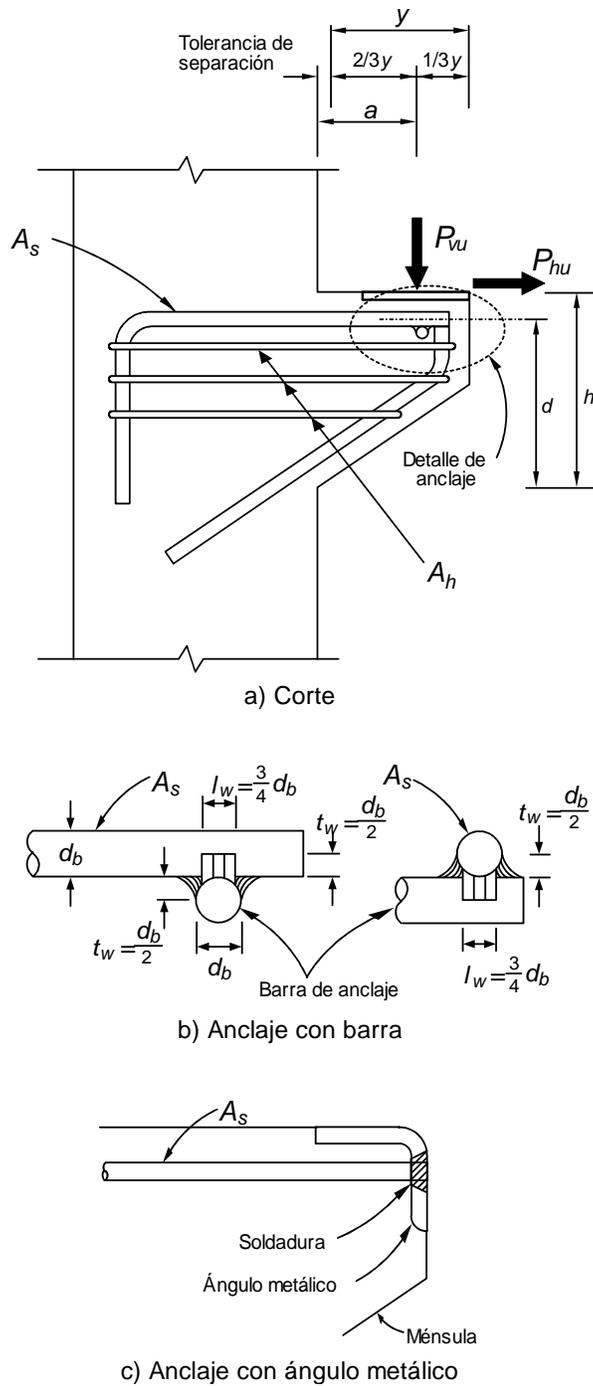
La tensión,  $P_{hu}$ , no se tomará menor que  $0.2P_{vu}$ , a menos que se tomen precauciones especiales para evitar que se generen tensiones.

### 10.1.3 Detallado del refuerzo

El refuerzo primario  $A_s$  debe anclarse en el extremo de la ménsula en alguna de las formas siguientes:

- Soldándolo a una barra transversal de diámetro no menor que el de las barras que forman  $A_s$ . La soldadura debe ser capaz de permitir que  $A_s$  alcance su esfuerzo de fluencia;
- Doblándolo horizontalmente de modo de formar barras en forma de letra U en planos horizontales; y
- Mediante algún otro medio efectivo de anclaje.

El refuerzo  $A_h$  debe constar de estribos cerrados paralelos a las barras  $A_s$ , los cuales estarán uniformemente repartidos en los dos tercios del peralte efectivo adyacentes al refuerzo  $A_s$ . Los estribos se detallarán como se indica en el inciso 6.1.4.



**Figura 10.1.1** Detalles de anclaje en ménsulas

#### 10.1.4 Área de apoyo

El área de apoyo no debe extenderse más allá de donde termina la parte recta de las barras  $A_s$ , ni más allá del borde interior de la barra transversal de anclaje, cuando ésta se utilice.

## 10.2 Vigas con apoyos no monolíticos

### 10.2.1 Vigas con extremos completos

Existen dos tipos de condiciones en traveses que apoyan, aquellas con peralte completo y las que tienen el extremo recortado. En ambos casos debe proporcionarse acero de refuerzo de acuerdo con los tipos de falla específicos (figuras 10.2.1 y 10.2.2).

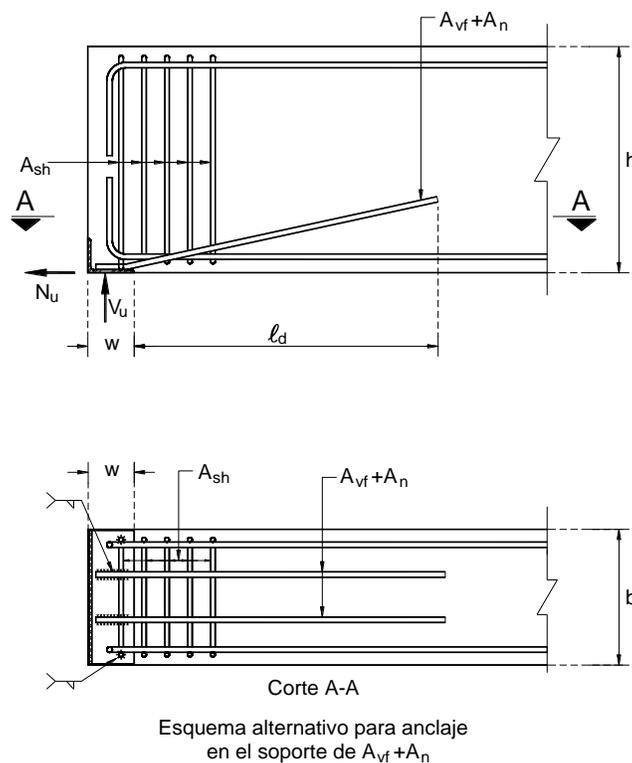
Para las traveses apoyadas de peralte completo se deberán utilizar las fórmulas correspondientes de la sección 10.2.1. Para las traveses con extremo recortado se utilizarán los requerimientos de 10.2.2. para ambos casos se podrá utilizar el método de puntales y tensores descrito en el Apéndice B.

#### 10.2.1.1 Refuerzo del extremo completo

El área de refuerzo perpendicular a la falla por cortante por fricción será

$$A_{vf} = \frac{V_u}{F_R f_y \mu_e} \quad (10.2.1)$$

donde  $m_e$  se determinará de acuerdo con la ecuación 10.2.6 y el factor de resistencia será el correspondiente a cortante y torsión.



**Figura 10.2.1 Refuerzo en viga con extremo completo**

El acero de refuerzo para tensión axial será

$$A_n = \frac{N_u}{F_R f_y} \quad (10.2.2)$$

El acero vertical será:

$$A_{sh} = \frac{(A_{vf} + A_n) f_y}{f_{ys} \mu_e} \quad (10.2.3)$$

donde:

$f_y$  esfuerzo de fluencia del refuerzo previsto en  $A_{vf}$  y  $A_n$ ; y  
 $f_{ys}$  esfuerzo de fluencia del refuerzo previsto en  $A_{sh}$

### 10.2.2 Vigas con extremos recortados

El extremo recortado de una viga está formado por un segmento que sobresale de menor peralte que el cuerpo principal de dicha viga y que sirve para apoyarla (nariz) y un recorte por debajo de ese segmento que sobresale, figura 10.2.2.

Se debe proveer refuerzo en el extremo recortado cuando una o más de las siguientes condiciones se presenten:

- El claro de cortante ( $a$ ) entre el peralte efectivo de la nariz no es mayor a 1.0 (véase figura 10.2.2).
- El peralte del recorte  $h_r$  excede a  $0.2H$  o 200 mm.
- La longitud de la nariz  $l_p$ , es mayor a 300 mm (figura 10.2.2).

#### 10.2.2.1 Requisitos geométricos

El peralte del recorte no debe ser menor que la mitad del peralte total de la trabe, a menos que la trabe sea significativamente más peraltada de lo necesario por razones estructurales.

#### 10.2.2.2 Refuerzo del extremo recortado

El refuerzo por flexión como voladizo y por tensión axial en el recorte extendido (refuerzo horizontal en la parte inferior del recorte) será:

$$A_s = A_f + A_n = \frac{1}{F_R f_y} \left( V_u \frac{a}{d} + N_u \frac{h}{d} \right) \quad (10.2.4)$$

El refuerzo para fuerza cortante directa en la unión del recorte y el cuerpo principal de la trabe se calculará como la combinación de  $A_s$  y  $A_n$  como sigue:

$$A_s = \frac{2V_u}{3F_R f_y \mu_e} + A_n \quad (10.2.5)$$

donde:

$$\mu_e = 1.4 \frac{7bh}{V_u} \leq 3.4 \quad (10.2.6)$$

$$\left( \mu_e = 1.4 \frac{70bh}{V_u} \leq 3.4 \right)$$

$$A_n = \frac{N_u}{F_R f_y} \quad (10.2.7)$$

Se usará el mayor valor de  $A_s$  de los obtenidos con las ecuaciones 10.2.4 y 10.2.5.

La resistencia a fuerza cortante del miembro recortado estará limitada por:

$$V_{u,m\acute{a}x} = 0.30f'_c A_{cr} \leq 7A_{cr}$$

$$V_{u,m\acute{a}x} = 0.30f'_c A_{cr} \leq 70A_{cr} \quad (10.2.8)$$

En una longitud igual al peralte total de la viga,  $h$ , después del recorte, la resistencia a cortante del concreto  $A_{cr}$  será la menor de la calculada con las ecuaciones 5.3.15 y 5.3.18 para  $V_{ci}$  y  $V_{cw}$ , respectivamente. El cálculo se hará en una sección ubicada a  $h/2$  de donde se tiene el peralte completo.

El refuerzo por tensión diagonal en la esquina entrante se calculará como

$$A_{sh} = \frac{V_u}{F_R f_y} \quad (10.2.9)$$

Se requiere refuerzo adicional por tensión diagonal en el extremo extendido de forma que se cumpla

$$V_u \leq F_R(A_v f_y + A_h f_y + 0.16\sqrt{f'_c} bd) \quad (10.2.10)$$

$$\left( V_u \leq F_R(A_v f_y + A_h f_y + 0.5\sqrt{f'_c} bd) \right)$$

donde:

$$A_h = 0.5(A_s - A_n) \quad (10.2.11)$$

Por lo menos la mitad del refuerzo requerido en el extremo extendido debe proporcionarse verticalmente. El área mínima de refuerzo vertical será:

$$A_{v, \text{mín}} = \frac{1}{2f_y} \left( \frac{V_u}{F_R} - 0.16\sqrt{f'_c} bd \right) \quad (10.2.12)$$

$$\left( A_{v, \text{mín}} = \frac{1}{2f_y} \left( \frac{V_u}{F_R} - 0.5\sqrt{f'_c} bd \right) \right)$$

### 10.2.2.3 Anclaje del refuerzo del extremo recortado

Las barras horizontales que integran  $A_s$  deben extenderse al menos una longitud de desarrollo  $L_d$  después de la sección H-D indicada en la figura 10.2.2.

Las barras horizontales que integran  $A_h$  deben extenderse al menos una longitud de desarrollo  $L_d$  después de la sección donde se tiene el peralte completo, y se deben anclar al final del extremo recortado de la viga mediante dobleces o anclajes mecánicos.

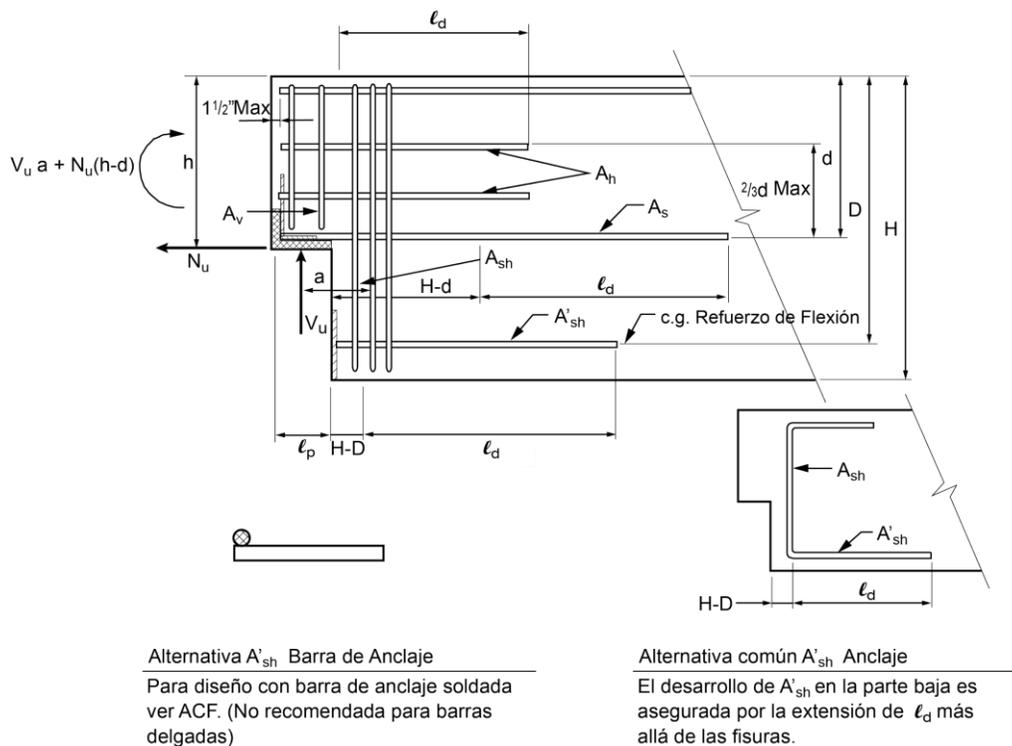
Para asegurar que el refuerzo proporcionado mediante  $A_{sh}$ , tenga la longitud de desarrollo suficiente, éste puede doblarse y continuar en forma paralela a la parte inferior de la viga donde se tiene el peralte completo. Si se decide separar  $A_{sh}$  del acero horizontal, se debe garantizar que  $A'_{sh} \geq A_{sh}$ , y que  $A_{sh}$  sea proporcionado mediante estribos cerrados.

El refuerzo vertical proporcionado mediante  $A_v$  debe anclarse adecuadamente ya sea en forma de estribos cerrados o mediante anclajes mecánicos.

### 10.2.2.4 Detallado

El acero de refuerzo proporcionado mediante  $A_{sh}$  debe de colocarse lo más cerca y prácticamente posible al recorte.

Si el esfuerzo máximo por flexión en la sección inmediata al recorte donde se tiene el peralte completo, calculado mediante cargas factorizadas y propiedades de la sección bruta excede  $0.16\sqrt{f'_c}$  ( $0.5\sqrt{f'_c}$ ), deberá proporcionarse refuerzo longitudinal adicional en la viga para poder resistir la tensión asociada con dicho esfuerzo.



**Figura 10.2.2 Refuerzo en viga con extremo recortado**

### 10.3 Vigas de gran peralte

#### 10.3.1 Resistencia a flexión de vigas de gran peralte

Se consideran como vigas de gran peralte aquéllas cuya relación de claro libre entre apoyos,  $L$ , a peralte total,  $h$ , es menor que 2.5 si son continuas en varios claros, o menor que 2.0 si constan de un solo claro libremente apoyado. En su diseño no son aplicables las hipótesis generales de la sección 3.5. Si la cuantía  $A_s/bd$  es menor o igual que 0.008, la resistencia a flexión de vigas de gran peralte se puede calcular con la expresión

$$M_R = F_R A_s f_y z \tag{10.3.1}$$

donde  $z$  es el brazo del par interno. En vigas de un claro,  $z$  se valúa con el criterio siguiente:

$$z = \left( 0.4 + 0.2 \frac{L}{h} \right) h ; \quad \text{si } 1.0 < \frac{L}{h} \leq 2.0$$

$$z = 0.6L ; \quad \text{si } \frac{L}{h} \leq 1.0$$

Las vigas de gran peralte continuas se pueden diseñar por flexión con el procedimiento siguiente:

- a) Analícese la viga como si no fuera peraltada y obténganse los momentos resistentes necesarios;
- b) Calcúlense las áreas de acero con la ecuación 10.3.1, valuando el brazo en la forma siguiente:

$$z = \left( 0.3 + 0.2 \frac{L}{h} \right) h ; \quad \text{si } 1.0 < \frac{L}{h} \leq 2.5$$

$$z = 0.5L ; \quad \text{si } \frac{L}{h} \leq 1.0$$

El acero de tensión se colocará como se indica en el inciso 10.3.2 .

Las vigas de gran peralte que unan muros de cortante de edificios (vigas de acoplamiento) se diseñarán según lo prescrito en el inciso 10.3.7.

### 10.3.2 Disposición del refuerzo por flexión

- a) Vigas de un claro

El refuerzo que se determine en la sección de momento máximo debe colocarse recto y sin reducción en todo el claro; debe anclarse en las zonas de apoyo de modo que sea capaz de desarrollar, en los paños de los apoyos, no menos del 80 por ciento de su esfuerzo de fluencia, y debe estar uniformemente distribuido en una altura igual a

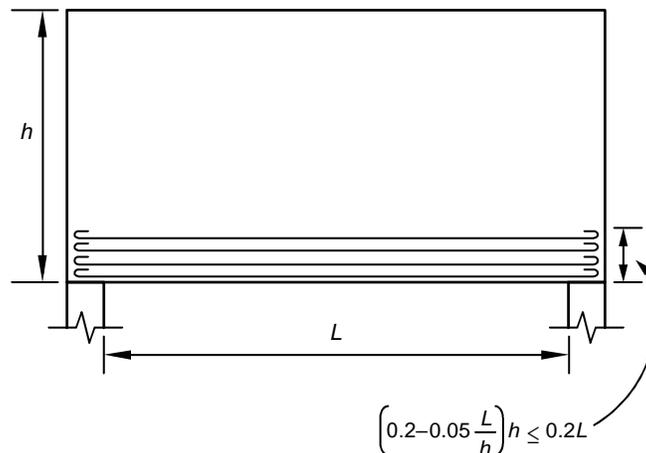
$$\left( 0.2 - 0.05 \frac{L}{h} \right) h \leq 0.2 L$$

medida desde la cara inferior de la viga (figura 10.3.1).

- b) Vigas continuas

El refuerzo que se calcule con el momento positivo máximo de cada claro debe prolongarse recto en todo el claro en cuestión. Si hay la necesidad de hacer uniones, éstas deben localizarse cerca de los apoyos intermedios. El anclaje de este refuerzo en los apoyos y su distribución en la altura de la viga cumplirán con los requisitos prescritos en el inciso 10.3.2.a.

Al menos la mitad del refuerzo calculado para momento negativo en los apoyos debe prolongarse en toda la longitud de los claros adyacentes. El resto del refuerzo negativo máximo, en cada claro, puede interrumpirse a una distancia del paño del apoyo no menor que  $0.4h$ , ni que  $0.4L$ .



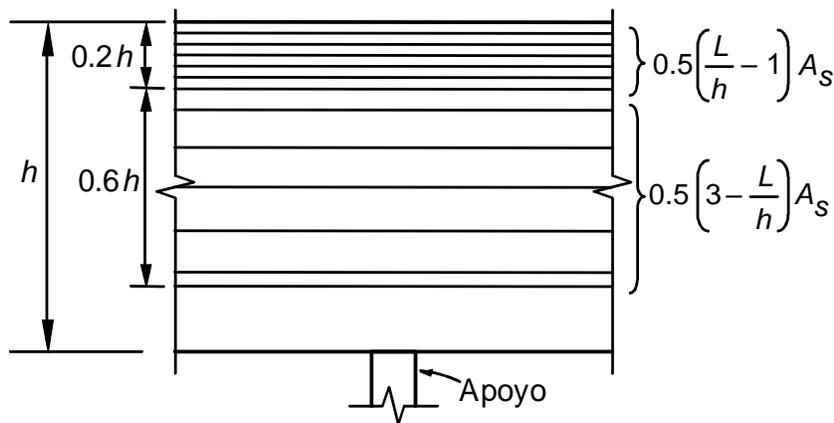
**Figura 10.3.1 Disposición del refuerzo de flexión en una viga de gran peralte de un claro**

El refuerzo para el momento negativo sobre los apoyos debe repartirse en dos franjas paralelas al eje de la viga de acuerdo con lo siguiente.

Una fracción del área total, igual a:

$$0.5 \left( \frac{L}{h} - 1 \right) A_s$$

debe repartirse uniformemente en una franja de altura igual a  $0.2h$  y comprendida entre las cotas  $0.8h$  y  $h$ , medidas desde el borde inferior de la viga (figura 10.3.2). El resto se repartirá uniformemente en una franja adyacente a la anterior, de altura igual a  $0.6h$ . Si  $L/h$  es menor que 1.0, se sustituirá  $L$  en lugar de  $h$  para determinar las alturas de las franjas señaladas.



**Figura 10.3.2** Franjas en que se distribuye el refuerzo negativo  $A_s$ , en una viga de gran peralte continua con  $L/h \geq 1$

### 10.3.3 Fuerza cortante en vigas de gran peralte

#### 10.3.3.1 Sección crítica

La sección crítica para fuerza cortante se considerará situada a una distancia del paño del apoyo igual a  $0.15L$  en vigas con carga uniformemente repartida, e igual a la mitad de la distancia a la carga más cercana en vigas con cargas concentradas, pero no se supondrá a más de un peralte efectivo del paño del apoyo si las cargas y reacciones comprimen directamente dos caras opuestas de la viga, ni a más de medio peralte efectivo en caso contrario.

#### 10.3.3.2 Fuerza cortante que toma el concreto

Para determinar la fuerza cortante,  $V_{CR}$ , que resiste el concreto en vigas de gran peralte, se aplicará lo que en el inciso 5.3.3.1a se dispone para vigas con relación  $L/h$  menor que 4.

#### 10.3.3.3 Fuerza cortante que toma el refuerzo transversal

Si la fuerza cortante de diseño,  $V_u$ , es mayor que  $V_{CR}$ , la diferencia se tomará con refuerzo. El refuerzo que se determine en la sección crítica antes definida se usará en todo el claro.

a) En vigas donde las cargas y reacciones comprimen directamente caras opuestas, dicho refuerzo constará de estribos cerrados verticales y barras horizontales, cuyas contribuciones se determinarán como:

##### 1) Contribución del refuerzo vertical

La contribución del refuerzo vertical,  $A_v$ , se supondrá igual a:

$$0.083 F_R f_{yv} d A_v \frac{1+L/d}{s} \quad (10.3.2)$$

donde:

$A_v$  área del acero vertical comprendida en cada distancia  $s$ ; y  
 $f_{yv}$  esfuerzo de fluencia del acero  $A_v$ .

## 2) Contribución del refuerzo horizontal

La contribución del refuerzo horizontal,  $A_{vh}$ , se supondrá igual a:

$$0.083 F_R f_{yh} d A_{vh} \frac{11-L/d}{s_h} \quad (10.3.3)$$

donde:

$A_{vh}$  área de acero horizontal comprendida en cada distancia  $s_h$ ; y  
 $f_{yh}$  esfuerzo de fluencia del acero  $A_{vh}$ .

b) En vigas donde las cargas y reacciones no comprimen directamente dos caras opuestas, además de lo aquí prescrito, se tomarán en cuenta las disposiciones del inciso 5.3.5.5 que sean aplicables.

Las zonas próximas a los apoyos se dimensionarán de acuerdo con el inciso 10.3.6.

### 10.3.3.4 Refuerzo mínimo

En las vigas de gran peralte se suministrarán refuerzos vertical y horizontal que en cada dirección cumpla con los requisitos de la sección 6.7, para refuerzo por cambios volumétricos.

### 10.3.3.5 Limitación para $V_u$

La fuerza  $V_u$  no debe ser mayor que:

$$0.6 F_R b d \sqrt{f'_c}$$

$$\left( 2 F_R b d \sqrt{f'_c} \right)$$

### 10.3.4 Disposición del refuerzo por fuerza cortante

El refuerzo que se calcule con las ecuaciones 10.3.2 y 10.3.3 en la sección crítica, se usará en todo el claro. Las barras horizontales se colocarán, con la misma separación, en dos capas verticales próximas a las caras de la viga. Estas barras se anclarán de modo que en las secciones de los paños de los apoyos extremos sean capaces de desarrollar al menos 80 por ciento de su esfuerzo de fluencia.

### 10.3.5 Revisión de las zonas a compresión

Si una zona a compresión de una viga de gran peralte no tiene restricción lateral, debe tomarse en cuenta la posibilidad de que ocurra pandeo lateral.

### 10.3.6 Dimensionamiento de los apoyos

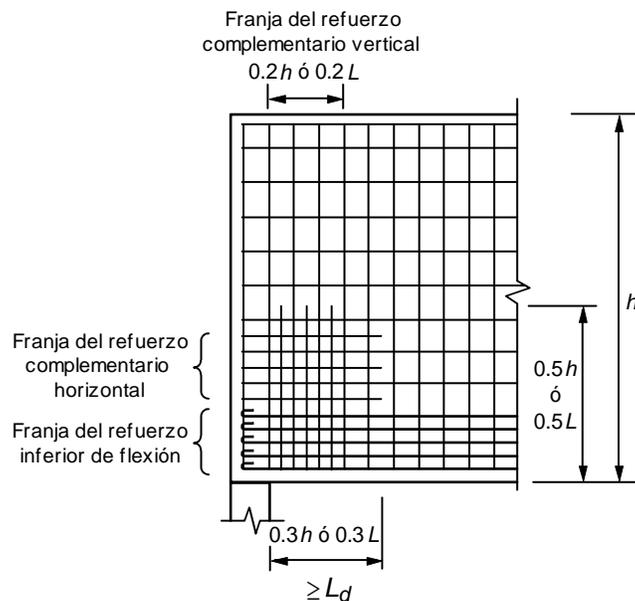
Para valuar las reacciones en los apoyos se puede analizar la viga como si no fuera de gran peralte aumentando en 10 por ciento el valor de las reacciones en los apoyos extremos.

Cuando las reacciones comprimen directamente la cara inferior de la viga, el esfuerzo de contacto con el apoyo no debe exceder el valor especificado en el inciso 5.5.3, haya atiesadores en la viga o no los haya.

Si la viga no está atiesada sobre los apoyos y las reacciones comprimen directamente su cara inferior, deben colocarse en zonas próximas a los apoyos, barras complementarias verticales y horizontales en cada una de las mallas de refuerzo para fuerza cortante, del mismo diámetro que las de este refuerzo y de modo que la separación de las barras en esas zonas sea la mitad que en el resto de la viga (figura 10.3.3).

a) Las barras complementarias horizontales se situarán en una franja contigua a la que contiene el refuerzo inferior de flexión y de ancho igual al de esta última. Dichas barras complementarias deben anclarse de modo que puedan alcanzar su esfuerzo de fluencia en la sección del paño del apoyo; además, su longitud dentro de la viga, medida desde dicha sección, no debe ser menor que  $0.3h$ .

b) Las barras complementarias verticales se colocarán en una franja vertical limitada por la sección del paño del apoyo y de ancho igual a  $0.2h$ . Estas barras deben abarcar desde el lecho inferior de la viga hasta una altura igual a  $0.5h$ .

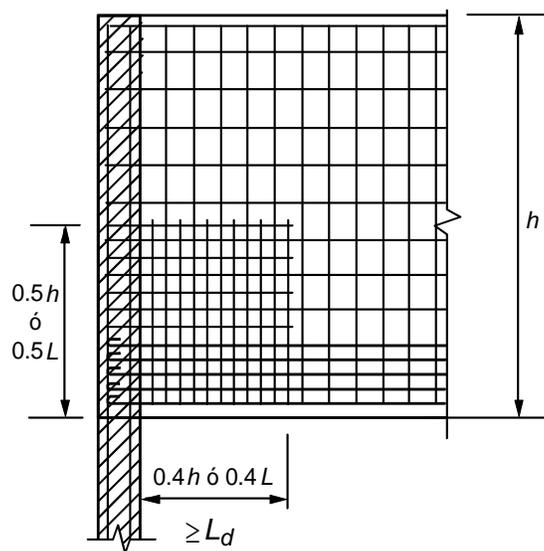


**Figura 10.3.3 Refuerzo complementario en una zona de apoyo directo de una viga diafragma no atiesada**

Si  $h$  es mayor que  $L$ , se sustituirá  $L$  en lugar de  $h$  en los incisos 10.3.6.a y 10.3.6.b.

Cuando la viga esté atiesada sobre los apoyos en todo su peralte, o cuando la reacción no comprima directamente la cara inferior de la viga sino que se transmita a lo largo de todo el peralte, se aplicarán las disposiciones siguientes.

Cerca de cada apoyo se colocarán dos mallas de barras, horizontales y verticales en una zona limitada por un plano horizontal distante del borde inferior de la viga no menos de  $0.5h$ , y por un plano vertical distante de la sección del paño del apoyo no menos de  $0.4h$  (figura 10.3.4). El área total de las barras horizontales se determinará con el criterio de cortante por fricción del inciso 5.3.3.3, suponiendo como plano de falla el que pasa por el paño del apoyo. El área total de las barras verticales será la misma que la de las horizontales. En estos refuerzos pueden incluirse las barras del refuerzo en el alma de la viga situadas en la zona antes definida, con tal que las horizontales sean capaces de alcanzar su esfuerzo de fluencia en la sección del paño del apoyo.



**Figura 10.3.4 Refuerzo en una zona de apoyo indirecto**

Si  $h$  es mayor que  $L$ , se sustituirá  $L$  en lugar de  $h$  en el párrafo anterior.

### 10.3.7 Vigas de gran peralte que unen muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano (vigas de acoplamiento)

El refuerzo de vigas de gran peralte con relaciones  $L/h$  no mayores de 2, que unen muros sujetos a fuerzas horizontales inducidas por el sismo, constará de dos grupos de barras diagonales dispuestas simétricamente respecto al centro del claro, según se indica en la figura 10.3.5. Se supondrá que cada grupo forma un elemento que trabajará a tensión o compresión axiales y que las fuerzas de interacción entre los dos muros, en cada viga, se transmiten sólo por las tensiones y compresiones en dichos elementos.

Para determinar el área de acero longitudinal de cada diagonal  $A_{sd}$ , se despreciará el concreto y se usará la ecuación 10.3.4.

$$V_u = 2F_R A_{sd} f_y \text{ sen } \theta \leq 0.78 F_R \sqrt{f'_c} b d \quad (10.3.4)$$

$$\left( V_u = 2F_R A_{sd} f_y \text{ sen } \theta \leq 2.5 F_R \sqrt{f'_c} b d \right)$$

donde:

- $A_{sd}$  área total del refuerzo longitudinal de cada diagonal; y
- $\theta$  ángulo que forma el elemento diagonal con la horizontal.

El ancho de estas vigas será el mismo que el espesor de los muros que unen.

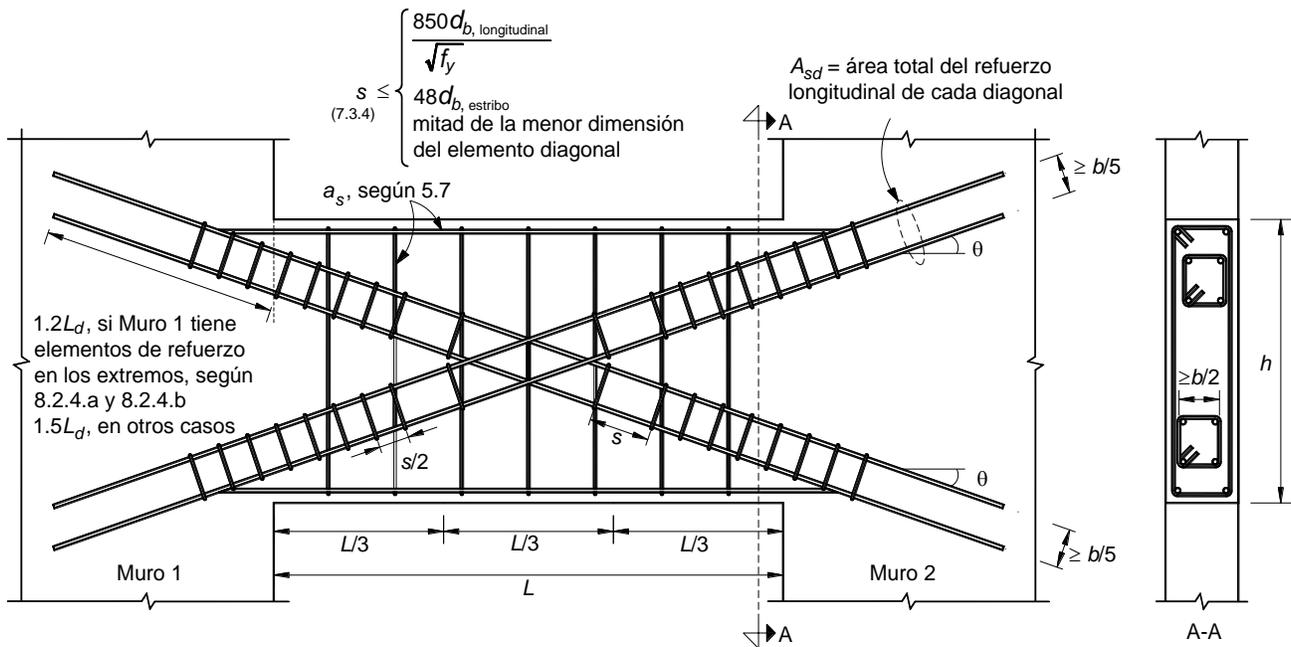
Cada elemento diagonal constará de no menos de cuatro barras rectas sin uniones. Los lados de los elementos diagonales, medidos perpendicularmente a su eje y al paño del refuerzo transversal, deberán ser al menos iguales a  $b/2$  para el lado perpendicular al plano de la viga (y del muro) y a  $b/5$  para el lado en el plano de la viga. Cada extremo del elemento diagonal estará anclado en el muro respectivo una longitud no menor que 1.5 veces  $L_d$ , obtenida ésta según el inciso 6.1.2.

Si los muros que unen tienen elementos de refuerzo en los extremos diseñados según los incisos 8.4.2.4.a u 8.4.2.4.b, la longitud de anclaje del refuerzo diagonal se podrá reducir a 1.2 veces  $L_d$ .

Las barras de los elementos diagonales se colocarán tan próximas a las caras de la viga como lo permitan los requisitos de recubrimiento, y se restringirán contra el pandeo con estribos o hélices que, en el tercio medio del claro de la viga, cumplirán con los requisitos del inciso 7.3.4.

En los tercios extremos, la separación se reducirá a la mitad del que resulte en el central. Los estribos o el zuncho que se use en los tercios extremos se continuarán dentro de cada muro en una longitud no menor que  $L/8$ , a menos que el muro cuente con los elementos de refuerzo en los extremos que se tratan en el inciso 8.4.2.4.

En el resto de la viga se usará refuerzo vertical y horizontal que en cada dirección cumpla con los requisitos para refuerzo por cambios volumétricos de la sección 6.7. Este refuerzo se colocará en dos capas próximas a las caras de la viga, por afuera del refuerzo diagonal.



**Figura 10.3.5 Refuerzo de una viga de gran peralte que une muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano**

## 11 ELEMENTOS PRESFORZADOS

### 11.1 Introducción

Las disposiciones contenidas en otras partes de este documento que no contradigan a los requisitos de este capítulo serán aplicables al concreto presforzado y parcialmente presforzado. En la fabricación de elementos presforzados y parcialmente presforzados, se usará concreto clase 1 (véase el inciso 2.1.1). Las losas con tendones no adheridos deberán cumplir con los requisitos de sección 11.7.

En elementos de concreto presforzado y parcialmente presforzado deben revisarse los estados límite de falla y los de servicio. Se deberán tomar en cuenta las concentraciones de esfuerzos debidos al presfuerzo.

#### 11.1.1 Definición de elementos de acero para presfuerzo

Para fines de las presentes Normas se considerarán los siguientes elementos de acero para presfuerzo:

##### Alambre

Refuerzo de acero de presfuerzo que cumple con los requisitos indicados en la sección 2.2 y que, por lo general, se suministra en forma de rollos.

### Barra

Refuerzo de acero que puede ser de presfuerzo, que cumple con las normas NMX-B-293 o NMX-B-292 y que comúnmente se suministra en tramos rectos.

### Torón

Grupo de alambres torcidos en forma de hélice alrededor de un alambre recto longitudinal.

### Cable

Elemento formado por varios alambres o torones.

### Tendón

Elemento utilizado para transmitir presfuerzo, que puede estar formado por alambres, barras o torones individuales o por grupos de éstos.

## 11.2 Requerimientos de resistencia y servicio para miembros a flexión presforzados

Las revisiones de los estados límite de resistencia y de servicio deben de ser calculadas de acuerdo con la tabla 11.2.1.

**Tabla 11.2.1 Requerimientos de diseño por estados límite de servicio para elementos presforzados**

	Miembros presforzados	Miembros parcialmente presforzados	Miembros reforzados
Comportamiento asumido	No agrietado	Transición entre agrietado y no agrietado	Agrietado
Clasificación	Controlado a compresión	Transición	Controlado por tensión
Propiedades de la secciones para el cálculo de esfuerzos ante cargas de servicio	Sección bruta	Sección bruta	Sección agrietada
Esfuerzos permisibles en transferencia	11.4.1.1	11.4.1.1	Sin requerimiento
Esfuerzo permisible a compresión basado en propiedades de sección sin agrietar	11.4.1.2	11.4.1.2	Sin requerimiento
Esfuerzo de tensión ante cargas de servicio	$f_t \leq 0.62\sqrt{f'_c}$ $\left( f_t \leq 2\sqrt{f'_c} \right)$	$0.62\sqrt{f'_c} \leq f_t \leq 1.0\sqrt{f'_c}$ $\left( 2\sqrt{f'_c} \leq f_t \leq 3.2\sqrt{f'_c} \right)$	$f_t > \sqrt{f'_c}$ $\left( f_t > 3.2\sqrt{f'_c} \right)$
Bases para el cálculo de las deflexiones	Sección bruta	Momento efectivo de inercia de la sección agrietada	Momento efectivo de inercia de la sección agrietada
Control del agrietamiento	Sin requerimientos	11.4.2.4	Como sección reforzada
Cálculos de $Af_{ps}$ o $f_s$ para el control del agrietamiento	Sin requerimientos	Sin requerimientos	Como sección reforzada

## 11.3 Estados límite de falla

Se revisarán los estados límite de flexión, flexocompresión, fuerza cortante, torsión, pandeo y, cuando sean significativos, los efectos de la fatiga.

### 11.3.1 Flexión y flexocompresión

La resistencia a flexión o flexocompresión de elementos presforzados y parcialmente presforzados se calculará con base en las condiciones de equilibrio y en las hipótesis generales enunciadas en la sección 3.5, tomando en cuenta la deformación inicial del acero debida al presfuerzo.

De acuerdo con la clasificación de la tabla 11.2.1, se utilizarán los factores de reducción correspondientes  $F_R$  de la sección 3.6 y las disposiciones del Apéndice A.

### 11.3.1.1 Esfuerzo en el acero de presfuerzo en elementos a flexión

En elementos total y parcialmente presforzados, el esfuerzo en el acero de presfuerzo  $f_{sp}$ , cuando se alcanza la resistencia, deberá valuarse a partir del equilibrio y las hipótesis generales. Sin embargo, como método alternativo a una determinación más exacta de  $f_{sp}$ , se permite utilizar los aproximados si  $f_{se}$  es mayor que  $0.5 f_{sr}$ :

a) Secciones con presfuerzo adherido:

$$f_{sp} = f_{sr} \left[ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left( p_p \frac{f_{sr}}{f_c} + \frac{d}{d_p} (q - q') \right) \right] \quad (11.3.1)$$

donde:

$$p_p = \frac{A_{sp}}{bd_p}$$

$$q = \frac{p f_y}{f_c}$$

$$q' = \frac{p' f_y}{f_c}$$

$\gamma_p$  es: 0.55 para  $f_{sp}/f_{sr}$  no menor que 0.8, 0.40 para  $f_{sp}/f_{sr}$  no menor que 0.85 y 0.28 para  $f_{sp}/f_{sr}$  no menor que 0.9, y

$\beta_1$  (ver sección 3.5).

Si se toma en cuenta el refuerzo a compresión al calcular  $f_{sp}$ , el término:

$$\left[ p_p \frac{f_{sr}}{f_c} + \frac{d}{d_p} (q - q') \right]$$

no debe tomarse menor a 0.17 y  $d'$  no debe ser mayor que  $0.15d_p$ .

b) Secciones con presfuerzo no adherido y con una relación claro a peralte de 35 o menos:

$$f_{sp} = f_{sr} + 70 + \frac{f'_c}{10p_p} \quad (11.3.2)$$

$$\left[ f_{sp} = f_{sr} + 700 + \frac{f'_c}{100p_p} \right]$$

Pero  $f_{sp}$  no debe ser mayor que el menor de  $f_{yp}$  o  $f_{sr} + 420$ ; en MPa ( $f_{yp}$  o  $f_{sr} + 4200$ ; en  $kg/cm^2$ )

c) Secciones con presfuerzo no adherido y con una relación claro a peralte mayor a 35:

$$f_{sp} = f_{sr} + 70 + \frac{f'_c}{30p_p} \quad (11.3.3)$$

$$[f_{sp} = f_{sr} + 700 + \frac{f'_c}{300p_p}]$$

Pero  $f_{sp}$  no debe ser mayor que el menor de  $f_{yp}$  o  $f_{sr} + 210$ ; en MPa ( $f_{yp}$  o  $f_{sr} + 2100$ ; en kg/cm<sup>2</sup>).

#### 11.3.1.2 Refuerzo mínimo en elementos a flexión

El acero a tensión, presforzado y ordinario, en secciones presforzadas, será por lo menos el necesario para que el momento resistente de diseño de la sección sea igual a 1.2 veces su momento flexionante de agrietamiento.

Para valuar los momentos resistentes y de agrietamiento se tomará en cuenta el efecto del presfuerzo; los momentos de agrietamiento se calcularán con la resistencia media a tensión por flexión no reducida,  $\overline{f}_f$ , definida en la sección 2.1.3.

#### 11.3.1.3 Refuerzo máximo en elementos a flexión

Las cantidades de acero de presfuerzo y de acero ordinario que se utilicen en la zona de tensión y en la de compresión serán tales que se cumpla la siguiente condición:

$$\epsilon_{sp} \geq \frac{\epsilon_{yp}}{0.75}$$

donde  $\epsilon_{sp}$  es la deformación unitaria del acero de presfuerzo cuando se alcanza el momento resistente de la sección y  $\epsilon_{yp}$  es la deformación unitaria convencional de fluencia del acero de presfuerzo. La deformación  $\epsilon_{sp}$  debe incluir la deformación debida al presfuerzo efectivo. El valor de  $\epsilon_{yp}$  se obtendrá del fabricante del acero de presfuerzo; si no se tienen datos puede suponerse igual a 0.01.

#### 11.3.1.4 Secciones T sujetas a flexión

Para determinar el ancho efectivo del patín de secciones T presforzadas que forman parte integral de un piso monolítico, se aplicará el criterio dado en el inciso 5.1.1.2 para vigas reforzadas.

En vigas T presforzadas aisladas regirá el mismo criterio, a menos que se compruebe experimentalmente la posibilidad de tomar anchos efectivos mayores.

#### 11.3.1.5 Refuerzo transversal en miembros a flexo-compresión

Este refuerzo debe cumplir con los requisitos del inciso 7.3.4, aplicados con base en el acero longitudinal ordinario que tenga el miembro. También cumplirá con el inciso 11.3.2.

### 11.3.2 Fuerza cortante

Para tomar en cuenta los efectos de la fuerza cortante en elementos total o parcialmente presforzados, se aplicarán las disposiciones de los incisos 5.3.3.1d, 5.3.5.3 y 5.3.5.4.

### 11.3.3 Pandeo debido al presfuerzo

En todo diseño debe considerarse la posibilidad de pandeo de un elemento entre puntos en que estén en contacto el concreto y el acero de presfuerzo. Se considerarán pandeo de patines y almas delgadas así como efectos biaxiales en elementos curvos o donde la trayectoria del presfuerzo no sea simétrica con respecto a los ejes de las piezas.

### 11.3.4 Torsión

Los efectos de torsión en elementos de concreto parcial y totalmente presforzados se tomarán en cuenta mediante las disposiciones establecidas en la sección 5.4.

### 11.4 Estados límite de servicio

Cumpliendo con la sección 11.2, las deflexiones y el agrietamiento bajo las condiciones de carga que pueden ser críticas durante el proceso constructivo y la vida útil de la estructura no deben exceder los valores que en cada caso se consideren aceptables. Cuando sea significativo, se revisarán los efectos de la fatiga.

Debe realizarse un estudio cuidadoso del agrietamiento y deflexiones en elementos parcialmente presforzados.

#### 11.4.1 Esfuerzos permisibles en el concreto

En elementos con presfuerzo total, una forma indirecta de lograr que el agrietamiento no sea excesivo y limitar las pérdidas por flujo plástico es obligar a que los esfuerzos en condiciones de servicio se mantengan dentro de ciertos límites. Para este fin, al dimensionar o al revisar esfuerzos bajo condiciones de servicio, se usará la teoría elástica del concreto y la sección transformada. En estas operaciones no se emplean secciones reducidas, esfuerzos reducidos ni factores de resistencia.

Si se opta por limitar los esfuerzos, se considerarán los valores siguientes:

##### 11.4.1.1 Esfuerzos permisibles en el concreto en transferencia

Esfuerzos inmediatamente después de la transferencia y antes que ocurran las pérdidas por contracción y por flujo plástico del concreto indicadas en la sección 11.5:

1) Compresión:

$0.70f_{ci}'$  para los extremos de elementos simplemente apoyados

$0.60f_{ci}'$  para otros casos

2) Tensión en miembros sin refuerzo en la zona de tensión, excepto lo indicado en el inciso 11.4.1.1.3:

$0.25 \sqrt{f_{ci}'}$ ; en MPa

$\left( 0.8 \sqrt{f_{ci}'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$

3) Tensión en los extremos de miembros simplemente apoyados

$0.5 \sqrt{f_{ci}'}$

$\left( 1.6 \sqrt{f_{ci}'} \right)$

Cuando el esfuerzo de tensión calculado exceda estos valores, se suministrará refuerzo ordinario para que resista la fuerza total de tensión del concreto, valuada en la sección sin agrietar.

En las expresiones anteriores,  $f_{ci}'$ , es la resistencia a compresión del concreto a la edad en que ocurre la transferencia. Esta tiene lugar en concreto pretensado cuando se cortan los tendones o se disipa la presión en el gato, o, en postensado, cuando se anclan los tendones.

##### 11.4.1.2 Esfuerzos permisibles en el concreto bajo cargas de servicio

Esfuerzos bajo cargas de servicio (después de que han ocurrido todas las pérdidas de presfuerzo).

1) Compresión:

$0.45f_c'$  para presfuerzo más cargas sostenidas

$0.60f_c'$  para presfuerzo más carga total

2) Tensión:

$0.5\sqrt{f_c'}$  ; en MPa

$\left( 1.6\sqrt{f_c'} \text{ ; en kg/cm}^2 \right)$

Estos valores pueden excederse con tal que se justifique que el comportamiento estructural del elemento será adecuado, pero sin que el esfuerzo de tensión llegue a ser mayor que

$\sqrt{f_c'}$  ; en MPa

$\left( 3.2\sqrt{f_c'} \text{ ; en kg/cm}^2 \right)$

Si el esfuerzo calculado de tensión resulta mayor que

$\sqrt{f_c'}$

$\left( 3.2\sqrt{f_c'} \right)$

puede usarse acero ordinario y tratar el elemento como parcialmente presforzado. Deberá cumplirse con los requisitos de deflexiones indicados en el inciso 11.4.1.4 y con los de la tabla 11.2.1.

Cuando la estructura va a estar sujeta a ambiente corrosivo, no deberá haber tensiones en el concreto en condiciones de servicio.

#### 11.4.1.3 Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo

a) Debidos a la fuerza aplicada por el gato

$0.94f_{yp}$

pero no deberá exceder de  $0.8f_{sr}$

b) Inmediatamente después de la transferencia

$0.82f_{yp}$

pero no será mayor que  $0.74f_{sr}$

c) En cables de postensado, anclajes y acoplamientos, inmediatamente después del anclaje de los tendones

$0.70f_{sr}$

En estas expresiones,  $f_{sr}$  es el esfuerzo resistente del acero de presfuerzo.

#### 11.4.1.4 Deflexiones

Las deflexiones inmediatas en elementos totalmente presforzados se calcularán con los métodos usuales para determinar deflexiones elásticas; en los cálculos se puede usar el momento de inercia de la sección total cuando no se encuentre agrietada.

Las deflexiones diferidas deben calcularse tomando en cuenta los efectos de las pérdidas en la fuerza de presfuerzo debidas a contracción y a flujo plástico del concreto, y de relajación del acero indicadas en la sección 11.5. Además, se deben cumplir con los requisitos de la sección 11.2.

#### ***11.4.2 Elementos parcialmente presforzados***

En elementos parcialmente presforzados se recomienda que la magnitud del momento de descompresión sea cuando menos igual al que produce la carga muerta más la carga viva media estipulada en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. El momento de descompresión es aquél que produce esfuerzos nulos en la fibra extrema en tensión al sumar sus efectos a los del presfuerzo.

##### *11.4.2.1 Esfuerzos permisibles en el concreto*

a) Los esfuerzos permisibles de compresión y tensión inmediatamente después de la transferencia, y antes que ocurran las pérdidas debidas a contracción y a flujo plástico del concreto, serán los estipulados en el inciso 11.4.1.1.a para concretos totalmente presforzados.

b) Esfuerzos bajo cargas de servicio

Serán los indicados en el inciso 11.4.1.2 para elementos de concreto con presfuerzo total.

##### *11.4.2.2 Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo*

Serán los mismos que para elementos totalmente presforzados, indicados en el inciso 11.4.1.3.

##### *11.4.2.3 Deflexiones*

Las deflexiones en elementos parcialmente presforzados deberán calcularse considerando todas las etapas de carga, y la condición de agrietamiento en cada etapa. Se calcularán con los métodos usuales. Además se deben cumplir con los requisitos de las secciones 11.2 y 11.5.

##### *11.4.2.4 Agrietamiento*

El criterio siguiente se aplica a elementos de concreto parcialmente presforzado que no deban ser impermeables y que no estén expuestos a un ambiente corrosivo.

El agrietamiento siempre deberá ser controlado con acero de refuerzo ordinario, despreciando la posible contribución del acero de presfuerzo, por lo que deberá cumplirse con las disposiciones para agrietamiento de elementos no presforzados indicadas en la sección 14.3.

### **11.5 Pérdidas de presfuerzo**

Para valuar el presfuerzo efectivo se tomarán en cuenta las pérdidas debidas a las siguientes causas:

a) Pérdidas inmediatas

- 1) Acortamiento elástico del concreto;
- 2) Desviación de los tendones;
- 3) Fricción, sólo en elementos postensados, en el acero presforzado, debida a curvatura intencional o accidental; y
- 4) Deslizamiento de los anclajes.

b) Pérdidas diferidas

- 1) Flujo plástico del concreto;
- 2) Contracción del concreto; y
- 3) Relajación del esfuerzo en el acero de presfuerzo.

#### **11.5.1 Pérdidas de presfuerzo en elementos pretensados**

Si los elementos pretensados, con presfuerzo total o parcial, van a ser construidos en plantas de fabricación establecidas, y dichas plantas cuentan con estudios estadísticos de pérdidas de presfuerzo, se puede suponer una pérdida total global de presfuerzo, considerada como un porcentaje, basándose en dichos estudios estadísticos. En caso contrario la pérdida total de presfuerzo será la suma de las pérdidas debidas a lo siguiente:

- a) Acortamiento elástico del concreto;
- b) Deslizamiento de los anclajes;
- c) Desviación de los tendones;
- d) Flujo plástico del concreto;
- e) Contracción del concreto; y
- f) Relajación del esfuerzo en el acero de presfuerzo.

#### **11.5.2 Pérdidas de presfuerzo en elementos postensados**

La pérdida total de presfuerzo, en elementos postensados con presfuerzo total o parcial será la suma de las pérdidas debidas a lo siguiente:

- a) Acortamiento elástico del concreto;
- b) Fricción en el acero de presfuerzo debida a curvatura accidental o intencional;
- c) Deslizamiento de los anclajes;
- d) Flujo plástico del concreto;
- e) Contracción del concreto; y
- f) Relajación del esfuerzo en el acero de presfuerzo.

#### **11.5.3 Criterios de valuación de las pérdidas de presfuerzo**

En función del tipo de estructura, modalidades del presfuerzo y grado de precisión requerido, se utilizará alguno de los tres métodos de estimación de pérdidas indicados en la tabla 11.5.1.

El método de estimación global se usará únicamente en caso de no tener información para evaluar las pérdidas individuales de presfuerzo. En elementos pretensados se puede suponer que la suma de las pérdidas varía entre 20 y 25 por ciento de la fuerza aplicada por el gato. En postensados, la suma de las pérdidas, sin incluir las de fricción, se puede suponer que varía entre 15 y 20 por ciento de la fuerza aplicada por el gato.

Se tomará el porcentaje de pérdidas que proporcione las condiciones más desfavorables en los elementos tanto pretensados como postensados.

**Tabla 11.5.1 Métodos de estimación de pérdidas de presfuerzo**

Métodos para estimar las pérdidas de la fuerza de presfuerzo	Descripción
A Estimación global	Las pérdidas de presfuerzo se definen como un porcentaje de la fuerza aplicada por el gato.
B Estimación individual	Las pérdidas de presfuerzo se valúan de manera individual mediante fórmulas. Las contribuciones de cada una de ellas se suman para obtener la pérdida total.
C Estimaciones por el método de los intervalos	Las pérdidas inmediatas se calculan con el método de estimación individual. Las estimaciones de las pérdidas de presfuerzo diferidas se efectúan estableciendo como mínimo cuatro intervalos de tiempo, que toman en cuenta la edad del concreto en la cual ocurre la pérdida.

En la tabla 11.5.2 se presenta el criterio de selección del método de valuación de pérdidas para edificios convencionales descrito en la tabla 11.5.1.

Las pérdidas por fricción en acero postensado se basarán en coeficientes de fricción por desviación accidental y por curvatura, determinados experimentalmente.

**Tabla 11.5.2 Criterios para seleccionar el método de evaluación de pérdidas de presfuerzo**

Pretensado		Postensado	
Estimación preliminar	Estimación definitiva	Estimación preliminar	Estimación definitiva
A	B	A	C

Al respecto, la ecuación que sigue proporciona, en función de los coeficientes mencionados, el valor de la fuerza,  $P_0$ , que es necesaria aplicar en el gato para producir una tensión determinada,  $P_x$ , en un punto  $x$  del tendón

$$P_0 = P_x e^{KL + \eta\mu} \quad (11.5.1)$$

Cuando  $(KL + \eta\mu)$  no sea mayor que 0.3, el efecto de la pérdida por fricción puede calcularse con la expresión

$$P_0 = P_x (1 + KL + \eta\mu) \quad (11.5.2)$$

donde:

- $K$  coeficiente de fricción por desviación accidental, por metro de tendón, en  $m^{-1}$ ;
- $L$  longitud de tendón desde el extremo donde se une al gato hasta el punto  $x$ , en m;
- $\mu$  coeficiente de fricción por curvatura;
- $\eta$  cambio angular total en el perfil del tendón, desde el extremo donde actúa el gato hasta el punto  $x$ , en radianes; y
- $e$  base de los logaritmos naturales.

Para el diseño preliminar de elementos y en casos en los que no se cuente con información del fabricante, se podrán emplear los valores de  $K$  y  $\mu$  de la tabla 11.5.3.

**Tabla 11.5.3 Coeficientes de fricción para tendones postensados**

Cables dentro de una camisa metálica inyectada con lechada, formados por:	Coefficiente $K$ , por metro de longitud	Coefficiente de curvatura, $\mu$
Alambres	0.003 a 0.005	0.15 a 0.25
Barras de alta resistencia	0.0003 a 0.002	0.08 a 0.30
Torones de siete alambres	0.0015 a 0.0065	0.15 a 0.25

#### 11.5.4 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.

Además, para elementos postensados, deben indicarse en los planos estructurales los valores de los coeficientes de fricción por curvatura,  $\mu$ , y por desviación accidental,  $K$ , usados en el diseño, los intervalos aceptables para las fuerzas producidas por el gato en los cables, el deslizamiento esperado en los anclajes y el diagrama de tensado.

### 11.6 Requisitos complementarios

#### 11.6.1 Zonas de anclaje

En vigas con tendones postensados deben utilizarse bloques extremos a fin de distribuir las fuerzas concentradas de presfuerzo en el anclaje.

En vigas pretensadas se puede prescindir de los bloques extremos.

Los bloques extremos deben tener suficiente espacio para permitir la colocación del acero de presfuerzo y para alojar los dispositivos de anclaje.

#### 11.6.1.1 Geometría

Preferentemente los bloques extremos deben ser tan anchos como el patín más estrecho de la viga, y tener una longitud mínima igual a tres cuartas partes del peralte de la viga, pero no menos de 600 mm.

#### 11.6.1.2 Refuerzo

Para resistir el esfuerzo de ruptura debe colocarse en los miembros postensados una parrilla transversal formada por barras verticales y horizontales con la separación y cantidad recomendada por el fabricante del anclaje, o algún refuerzo equivalente.

Cuando las recomendaciones del fabricante no sean aplicables, la parrilla debe constar, como mínimo, de barras de 9.5 mm de diámetro (número 3), colocadas cada 80 mm, centro a centro, en cada dirección.

La parrilla se colocará a no más de 40 mm de la cara interna de la placa de apoyo de anclaje.

En las zonas de transferencia de vigas pretensadas debe colocarse refuerzo transversal en forma y cantidad tales que evite la aparición de grietas de más de 0.1 mm de ancho paralelas a los tendones.

#### 11.6.1.3 Esfuerzos permisibles de aplastamiento en el concreto de elementos postensados para edificios

El esfuerzo de aplastamiento permisible,  $f_b$ , en el concreto bajo la acción de la placa de anclaje de los cables de postensado se puede calcular con las expresiones siguientes, si la zona de anclaje cumple con los incisos 11.6.1.1 y 11.6.1.2:

a) Inmediatamente después del anclaje del cable

$$f_b = 0.8 f_{ci}' \sqrt{\frac{A_2}{A_1} - 0.2} \leq 1.25 f_{ci}' \quad (11.6.1)$$

b) Después de que han ocurrido las pérdidas de presfuerzo

$$f_b = 0.6 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_c' \quad (11.6.2)$$

donde:

$A_1$  área de aplastamiento de la placa de anclaje de los cables de postensado; y

$A_2$  área de la figura de mayor tamaño, semejante a  $A_1$  y concéntrica con ella, que puede inscribirse en la superficie de anclaje.

#### 11.6.2 Longitud de desarrollo y de transferencia del acero de presfuerzo

a) Los torones de pretensado de tres o siete alambres deberán estar adheridos, más allá de la sección crítica, en una longitud no menor que

$$0.14 (f_{sp} - 0.67 f_{se}) d_b$$

$$[0.014(f_{sp} - 0.67f_{se})d_b]$$

para alambres lisos de presfuerzo dicha longitud no será menor que

$$0.27(f_{sp} - 0.67f_{se})d_b$$

$$[0.028(f_{sp} - 0.67f_{se})d_b]$$

Esta revisión puede limitarse a las secciones más próximas a las zonas de transferencia del miembro, y en las que sea necesario que se desarrolle la resistencia de diseño.

Cuando la adherencia del torón no se extienda hasta el extremo del elemento y en condiciones de servicio existan esfuerzos de tensión por flexión en el concreto en la zona precomprimida, se debe duplicar la longitud de desarrollo del torón dada por la expresión anterior.

b) La longitud de transferencia de alambres lisos de presfuerzo se supondrá de 100 diámetros. En torones será de 50 diámetros.

### **11.6.3 Anclajes y acopladores para postensado**

Los anclajes para tendones no adheridos deben desarrollar, por lo menos, el 90 por ciento de la resistencia máxima de los tendones cuando se prueben bajo condición de no adherencia, sin que se excedan los corrimientos previstos. Sin embargo, dichos anclajes deben ser capaces de desarrollar la resistencia máxima especificada de los tendones una vez producida la adherencia.

Los acopladores deben colocarse en zonas aprobadas por el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra cuando no se requiera Corresponsable, y en ductos lo suficientemente amplios para permitir los movimientos necesarios.

Los dispositivos de anclaje en los extremos deben protegerse permanentemente contra la corrosión.

### **11.6.4 Revisión de los extremos con continuidad**

En extremos de elementos presforzados que posean cierto grado de continuidad, se debe considerar el efecto de la fuerza de presfuerzo en la zona de compresión revisando que la deformación unitaria máxima no exceda 0.003.

### **11.6.5 Recubrimiento en elementos de concreto presforzado**

#### **11.6.5.1 Elementos que no están en contacto con el terreno**

El recubrimiento de alambres, varillas, torones, tendones, cables, ductos y conexiones, para elementos de concreto presforzado que no están en contacto con el terreno, no será menor que su diámetro,  $d_b$ , ni menor que lo indicado en la tabla 11.6.1.

**Tabla 11.6.1 Recubrimiento en elementos de concreto presforzado que no están en contacto con el terreno**

Tipo de elemento	Recubrimiento mínimo, mm
Columnas y trabes	20
Cascarones, losas y otro tipo de elementos	15

#### **11.6.5.2 Elementos de concreto presforzado en contacto con el terreno**

Para elementos presforzados que estén en contacto con el terreno y permanentemente expuestos a él deberá utilizarse un recubrimiento de 40 mm si no se utiliza plantilla, y de 20 mm si se tiene plantilla.

#### **11.6.5.3 Elementos de concreto presforzado expuestos a agentes agresivos**

En elementos de concreto presforzado expuestos a agentes agresivos (ciertas sustancias o vapores industriales, terreno particularmente corrosivo, etc.), el recubrimiento del acero de presfuerzo será el mayor entre lo aquí dispuesto y lo establecido en la sección 4.9.

#### 11.6.5.4 Barras de acero ordinario en elementos de concreto presforzado

El recubrimiento de las barras de acero ordinario que se incluyan en elementos de concreto presforzado deberá cumplir con las disposiciones de la sección 4.9.

### 11.6.6 Separación entre elementos de acero para presfuerzo

#### 11.6.6.1 Separación libre horizontal entre alambres y entre torones

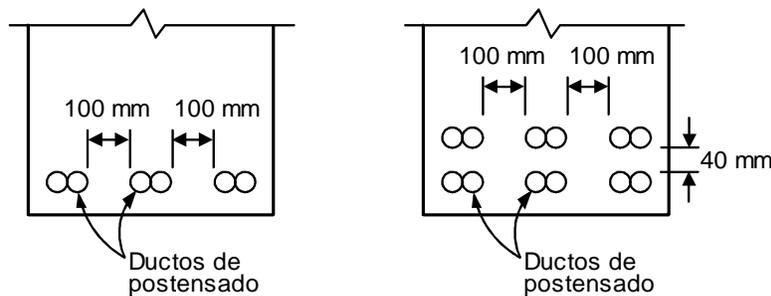
La separación libre horizontal,  $S_{Lh}$ , entre elementos de acero para presfuerzo, será como se indica en la tabla 11.6.2.

#### 11.6.6.2 Separación libre horizontal entre ductos de postensado

La separación libre horizontal entre ductos de postensado,  $S_{Lh}$ , será como se indica en la tabla 11.6.2.

Se permite formar paquetes de ductos siempre y cuando se demuestre que el concreto puede colarse satisfactoriamente y se garantice que los tendones no se romperán al tensarse. Sin embargo, cuando se tengan dos o más lechos horizontales de ductos no se permitirá formar paquetes en el sentido vertical (ver figura 11.6.1).

Cuando se tengan paquetes de ductos, la separación libre horizontal,  $S_{Lh}$ , entre cada paquete y en toda la longitud del paquete no será menor que la indicada en la tabla 11.6.2.



**Figura 11.6.1 Separaciones libres mínimas entre paquetes de ductos de postensado**

#### 11.6.6.3 Separación libre vertical entre alambres y entre torones

La separación libre vertical,  $S_{Lv}$ , entre alambres y entre torones no será menor que la indicada en la tabla 11.6.2. En la zona central del claro se permite una separación vertical menor y la formación de paquetes en el sentido vertical.

#### 11.6.6.4 Separación libre vertical entre ductos de postensado

La separación libre vertical,  $S_{Lv}$ , entre ductos de postensado y entre paquetes de ductos será la indicada en la tabla 11.6.2.

**Tabla 11.6.2 Separación libre entre elementos de acero para presfuerzo**

Tipo de elemento de presfuerzo	Separación libre horizontal, $S_{Lh}$	Separación libre vertical, $S_{Lv}$
Alambres	$S_{Lh} \geq 4d_b$ y $S_{Lh} \geq 1.5 t_{ma}^1$	$S_{Lv} \geq 1.25 t_{ma}$
Torones	$S_{Lh} \geq 3d_b$ y $S_{Lh} \geq 1.5 t_{ma}$	$S_{Lv} \geq 1.25 t_{ma}$
Ductos individuales	$S_{Lh} \geq 40 \text{ mm}$ y $S_{Lh} \geq 1.5 t_{ma}$	$S_{Lv} \geq 40 \text{ mm}$

<sup>1</sup> tma: Tamaño máximo del agregado

#### *11.6.6.5 Separación libre vertical y horizontal entre barras de acero ordinario en elementos de concreto presforzado*

Las separaciones libres deberán cumplir con las disposiciones de las secciones 6.3 y 6.4.

#### *11.6.7 Protección contra corrosión*

Los tendones no adheridos deberán estar recubiertos completamente con un material adecuado que asegure su protección contra la corrosión. El material de recubrimiento deberá ser continuo en toda la longitud no adherida, deberá prevenir la penetración de pasta de cemento y deberá ser resistente al manejo durante la construcción. Las zonas de anclaje y los dispositivos auxiliares deberán protegerse permanentemente contra la corrosión mediante dispositivos probados o materiales que garanticen dicha protección. Si se emplean concretos o morteros fluidos, éstos deberán estar libres de elementos corrosivos.

#### *11.6.8 Resistencia al fuego*

Deberá cumplirse con los recubrimientos especificados en el inciso 11.6.5.

#### *11.6.9 Ductos para postensado*

Los ductos para tendones que se inyectarán con lechada deben ser herméticos y no deberán reaccionar con los tendones, con el concreto ni con la lechada de relleno.

Los ductos para tendones o para alambres individuales que se vayan a inyectar con lechada deberán tener un diámetro interior por lo menos 10 mm mayor que el diámetro del tendón o alambre,  $d_b$ . Los ductos para grupos de alambres o tendones deberán tener un área transversal interna no menor que dos veces el área transversal neta de los alambres o tendones.

#### *11.6.10 Lechada para tendones de presfuerzo*

La lechada deberá estar constituida por cemento y agua, o por cemento, arena y agua. El cemento, el agua y la arena deberán cumplir con las disposiciones del capítulo 2. Así mismo, deberá cumplirse con lo especificado en el inciso 15.4.2.

### **11.7 Losas postensadas con tendones no adheridos**

#### *11.7.1 Requisitos generales*

##### *11.7.1.1 Definiciones*

Un sistema de losas de concreto postensadas con presfuerzo no adherido consta de tendones no adheridos, anclajes y refuerzo adicional ordinario a base de barras corrugadas de acero. Los tendones no adheridos son alambres o torones de acero cubiertos por grasa lubricante y resistente a la corrosión y forrados por una funda plástica. Los anclajes, fijos y de tensado, están compuestos por una placa de acero dúctil, por dispositivos que sujetan al tendón y transmiten la tensión a la placa de acero y por acero de confinamiento en la zona adyacente a la placa. El refuerzo adicional a base de barras corrugadas tiene la función de resistir el cortante y momento en conexiones losa–columna, controlar el agrietamiento causado por las restricciones al acortamiento axial y a los cambios volumétricos del concreto, así como la de incrementar la redundancia de la estructura, en particular ante cargas imprevistas.

##### *11.7.1.2 Losas planas apoyadas en columnas*

Si se emplean losas planas apoyadas sobre columnas, la estructura deberá tener un sistema primario reforzado con barras corrugadas capaz de resistir el sismo sin contar con la contribución de la losa más que en su acción como diafragma para resistir cargas en su plano. El análisis sísmico se hará con los criterios del inciso 11.7.3. Se deberá considerar el efecto en la estructura de los momentos debidos al presfuerzo de la losa, tanto por el acortamiento elástico como por las deformaciones a

largo plazo del concreto. En el diseño de la estructura se prestará atención a evitar que se alcance algún estado límite de falla frágil. Para losas planas, la relación claro mayor–espesor no deberá exceder de 40.

#### 11.7.1.3 Losas apoyadas en vigas

Si se emplean losas apoyadas en vigas se deberá satisfacer los requisitos aplicables de la sección 11.7.

Para losas apoyadas en vigas, la relación claro mayor–espesor no deberá exceder de 50.

#### 11.7.1.4 Factores de reducción

Los factores de reducción para losas postensadas con tendones no adheridos,  $F_R$ , serán:

- a)  $F_R = 0.8$  para flexión.
- b)  $F_R = 0.75$  para cortante y torsión.
- c)  $F_R = 0.65$  para aplastamiento del concreto.
- d)  $F_R = 0.65$  para diseño de las zonas de anclaje.

### 11.7.2 Estados límite de falla

#### 11.7.2.1 Flexión

##### a) Análisis

Las fuerzas y momentos internos pueden obtenerse por medio de métodos reconocidos de análisis elástico. Ante cargas laterales se adoptarán las hipótesis señaladas en el inciso 3.4.3. Para valuar los momentos se deberá considerar la secuencia de construcción. Los momentos de diseño serán la suma de los momentos producidos por el acortamiento de la losa debido al presfuerzo, incluyendo pérdidas (con factor de carga unitario) y los debidos a cargas de diseño.

##### b) Esfuerzos normales máximo y mínimo

El esfuerzo normal promedio debido al presfuerzo deberá ser mayor o igual que 0.9 MPa (9 kg/cm<sup>2</sup>) e inferior a 3.5 MPa (35 kg/cm<sup>2</sup>).

##### c) Esfuerzo en el acero de presfuerzo

Se deberá calcular a partir del equilibrio y de las hipótesis generales enunciadas en la sección 3.5, tomando en cuenta la deformación inicial del acero debida al presfuerzo. Sin embargo, cuando el presfuerzo efectivo,  $f_{se}$ , no es menor que la mitad del esfuerzo resistente,  $f_{sr}$ , del acero de presfuerzo, el esfuerzo en el acero de presfuerzo cuando se alcanza la resistencia a flexión,  $f_{sp}$ , puede calcularse como:

$$f_{sp} = f_{se} + 70 + \frac{f_c'}{10 p_p} \quad (11.7.1)$$

$$\left( f_{sp} = f_{se} + 700 + \frac{f_c'}{100 p_p} \right)$$

para losas con relaciones claro–espesor menores que 35, donde  $f_{sp}$  deberá ser menor que  $f_{yp}$  y que  $f_{sr} + 420$ , en MPa, ( $f_{sr} + 4\ 200$  en kg/cm<sup>2</sup>) o bien

$$f_{sp} = f_{se} + 70 + \frac{f_c'}{30 p_p} \quad (11.7.2)$$

$$\left( f_{sp} = f_{se} + 700 + \frac{f_c'}{300 p_p} \right)$$

para losas con relaciones claro–espesor mayores o iguales a 35, donde  $f_{sp}$  deberá ser menor que  $f_{yp}$  y que  $f_{sr} + 210$ , en MPa ( $f_{sr} + 2100$ , en kg/cm<sup>2</sup>).

#### d) Refuerzo mínimo

La cuantía de acero a tensión, presforzado y sin presforzar, será por lo menos la necesaria para que el momento resistente de la sección sea igual a 1.2 veces su momento de agrietamiento. Los momentos de agrietamiento se calcularán con la resistencia media a tensión por flexión no reducida,  $\bar{f}_f$ , establecida en el inciso 2.1.3.

#### e) Pérdidas de presfuerzo

Se revisarán las debidas a las causas descritas en la sección 11.5.

En las primeras dos losas por encima de la cimentación no presforzada y en la losa de azotea, se deberá valorar el efecto de restricciones estructurales sobre la pérdida de precompresión del presfuerzo considerando varios posibles anchos efectivos de losa.

#### f) Geometría de los tendones

La configuración de los tendones deberá ser consistente con la distribución de los momentos obtenida por el método de análisis elegido.

El radio de curvatura de los tendones no deberá ser menor de 2.4 m. La separación entre alambres, torones o bandas de torones en una dirección no deberá ser mayor de ocho veces el espesor de la losa, ni 1.5 m. Las desviaciones verticales en la colocación de los tendones no deberán exceder de  $\pm 6.5$  mm para espesores de losa de hasta 200 mm y de  $\pm 10$  mm para losas con más de 200 mm de espesor. Los valores de las tolerancias deberán considerarse cuando se determinen los recubrimientos de concreto para los tendones (sección 4.9 e inciso 11.7.4.6). Las desviaciones horizontales deberán tener un radio de curvatura mínimo de 7 m.

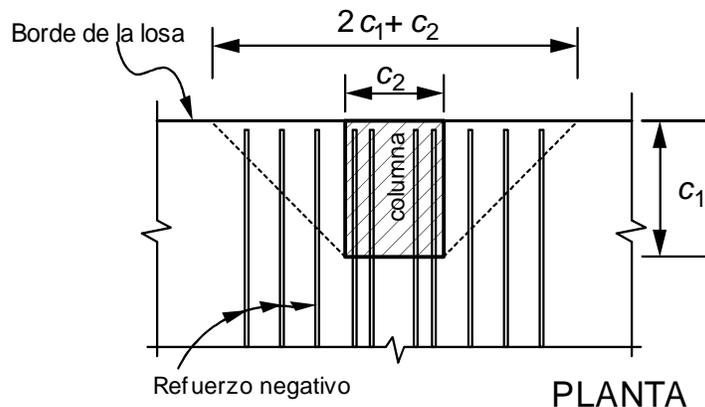
#### g) Dimensionamiento del refuerzo para flexión

Se aplicará lo indicado en el inciso 7.6.3 El refuerzo por sismo se determinará a partir del momento de diseño obtenido en el análisis descrito en el inciso 11.7.3. Cuando menos dos de las barras del lecho superior o tendones de presfuerzo en cada dirección y todo el refuerzo de integridad estructural, prescrito en el inciso 7.6.4g, deberán cruzar el núcleo de la columna correspondiente. Para conexiones exteriores en donde el vector de momento sea paralelo al borde de la losa, se deberá colocar refuerzo negativo perpendicular al borde en una franja igual a  $2c_1 + c_2$  centrada en el centroide de la sección crítica para transmitir a la columna todo el momento que proviene de la losa (figura 11.7.1), a menos que el borde se diseñe para resistir la torsión. Si el borde de la losa se diseña para transmitir por torsión a la columna el momento de la losa, el refuerzo negativo se distribuirá en el ancho de la losa tributario a la columna.

El área de refuerzo de integridad estructural se determinará según el inciso 7.6.4g. Los tendones del lecho inferior que pasen por las columnas o apoyos se consideran efectivos para cumplir con lo anterior.

#### 11.7.2.2 Fuerza cortante

Se revisará la losa a fuerza cortante para las condiciones señaladas en los incisos 5.3.6.1.a y 5.3.6.1.b. Para conexiones losa–columna interiores y exteriores, la fracción de momento transmitido entre losa y columna por flexión se considerará como lo establece el inciso 3.4.4. Se deberá colocar un refuerzo mínimo en la losa como el señalado en el inciso 5.3.6.6.



**Figura 11.7.1 Refuerzo negativo perpendicular a un borde no diseñado para resistir torsión**

El refuerzo transversal en la columna en la unión con la losa debe cumplir con lo establecido en el inciso 7.3.4.

En caso de que los esfuerzos cortantes sean mayores que la resistencia del concreto, se colocarán estribos diseñados de acuerdo con el inciso 5.3.6.5.

### **11.7.3 Sistemas de losas postensadas–columnas bajo sismo**

Las fuerzas y momentos internos de diseño para el sistema primario resistente a sismo se obtendrán de un análisis sísmico de un modelo donde se desprece la contribución de la losa plana, excepto por su efecto de diafragma. Se usará el valor de  $Q$  que corresponda a dicho sistema estructural primario resistente a sismo. Se revisará que la cuantía de refuerzo por flexión no exceda al indicado en el inciso 5.1.4.2.

Para diseñar el sistema losa plana–columnas para momentos flexionantes y fuerzas cortantes, siguiendo lo establecido en los incisos 11.7.2.1 y 11.7.2.2, se hará el análisis sísmico de un modelo completo de la estructura que incluya las losas planas y su interacción con las columnas y con el sistema estructural resistente a sismo. Las losas se modelarán según el inciso 3.4.3; se considerarán los momentos de inercia de las secciones de la losa sin agrietar. Se usará un valor de  $Q = 2$ .

Se deberá revisar que no se alcance estado límite de falla frágil alguno, en particular en la conexión losa–columna. La losa deberá satisfacer los requisitos de diafragmas de la sección 7.8.

### **11.7.4 Estados límite de servicio**

#### **11.7.4.1 Esfuerzos permisibles en el concreto**

La cantidad de torones y el nivel de presfuerzo se determinarán de manera que los esfuerzos a compresión y tensión en el concreto no excedan los valores de la sección 11.4 para cargas muerta y viva de servicio.

#### **11.7.4.2 Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo**

Después del anclaje del tendón,  $0.70f_{sr}$ .

#### **11.7.4.3 Deflexiones**

Las deflexiones en losas postensadas deberán calcularse para carga viva según su distribución más desfavorable (deflexiones inmediatas) y para carga sostenidas (flechas diferidas). Para calcular las flechas diferidas, sólo se considerará la carga sostenida en exceso a la equilibrada por el postensado.

#### 11.7.4.4 Agrietamiento

En regiones de momento positivo, cuando el esfuerzo a tensión en el concreto en condiciones de servicio (después de considerar las pérdidas de presfuerzo) sea mayor que  $0.16\sqrt{f_c'}$ , en MPa ( $0.5\sqrt{f_c'}$ , en kg/cm<sup>2</sup>), se colocará un área mínima de refuerzo corrugado adherido igual a

$$A_s = \frac{2N_c}{f_y} \quad (11.7.3)$$

donde  $N_c$  es la fuerza a tensión en el concreto debida a cargas muerta y viva de servicio. En esta expresión el esfuerzo especificado de fluencia  $f_y$  no deberá ser mayor de 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>). El refuerzo tendrá una longitud mínima de un tercio del claro libre y deberá ser centrado en la región de momento positivo. Se deberá colocar lo más cercano a la fibra extrema a tensión y se deberá distribuir uniformemente sobre la zona a tensión precomprimida. Se aplicarán las disposiciones sobre separación máxima de la sección 6.3 y 6.4.

en zonas de momento negativo sobre las columnas se colocará una área mínima de acero adherido sin presforzar en ambas direcciones igual a

$$A_s = 0.00075 A_{cf} \quad (11.7.4)$$

donde  $A_{cf}$  es el área bruta de la banda viga-losa mayor en dos marcos equivalentes ortogonales intersectando a la columna en losas que trabajan en ambas direcciones. Dicho refuerzo debe de ser distribuido entre líneas que están  $1.5h$  fuera de las caras opuestas del soporte de la columna. Por lo menos se deben de colocar cuatro barras. El espaciamiento del refuerzo adherido no deberá de exceder 200 mm.

Cuando se construyan las losas postensadas en varios tramos, se emplearán separaciones temporales cuyo ancho deberá ser suficiente para postensar los tendones. En estas separaciones se deberá colocar refuerzo para resistir los momentos flexionantes y fuerzas cortantes que ocurrirían como si la losa fuera continua. El acero se anclará en las losas a ambos lados de dicha separación de acuerdo con los requisitos de la sección 6.1 que sean aplicables. La separación se cerrará mediante la colocación de concreto con las mismas características que las empleadas en la losa.

#### 11.7.4.5 Corrosión

Los tendones no adheridos estarán completamente recubiertos por un material idóneo que asegure su protección contra la corrosión. La funda deberá ser continua en toda la longitud no adherida, deberá prevenir la penetración de pasta de cemento y deberá ser resistente al manejo durante la construcción. Las zonas de anclaje deberán protegerse contra la corrosión mediante dispositivos probados o materiales que garanticen dicha protección. Si se emplean concretos o morteros fluidos, éstos deberán estar libres de cloruros.

#### 11.7.4.6 Resistencia al fuego

El recubrimiento mínimo sobre los tendones postensados será de 20 mm para cualquier tipo de edificio.

#### 11.7.5 Zonas de anclaje

Las zonas de anclaje deberán resistir la máxima fuerza aplicada durante el tensado. El esfuerzo permisible de aplastamiento en el concreto será el indicado en el inciso 11.6.1.3 cuando han ocurrido las pérdidas de presfuerzo.

Para resistir las fuerzas de tensión que ocurren adelante del anclaje en la dirección del espesor de la losa, se deberá usar cuando menos dos barras de 9.5 mm de diámetro (número 3) para cada anclaje, colocadas a una distancia de  $1.5h$  adelante del anclaje. La separación no deberá exceder de 300 mm ni 24 veces el diámetro de las barras (figura 11.7.2). El refuerzo se deberá anclar cerca de las caras de la losa con ganchos estándar

Se deberá proveer refuerzo en el plano de la losa, perpendicular al eje del monotorón, para resistir las fuerzas de tensión en el plano de la losa a lo largo del borde de la misma. Cuando menos se colocarán dos barras paralelas al borde de la losa inmediatamente adelante de los anclajes; las barras deberán incluir a todos los anclajes adyacentes. El refuerzo se colocará arriba y abajo del plano de los tendones. Además, se colocará refuerzo para tomar las fuerzas delante de los anclajes; este refuerzo se distribuirá sobre la longitud de la zona de anclaje. Se deberá colocar otro par de barras paralelas al borde de la losa a una distancia desde los anclajes igual a la mitad de la separación entre tendones (figura 11.7.2). Estas barras deberán extenderse más allá del último tendón con una distancia igual a la longitud de desarrollo de las barras.

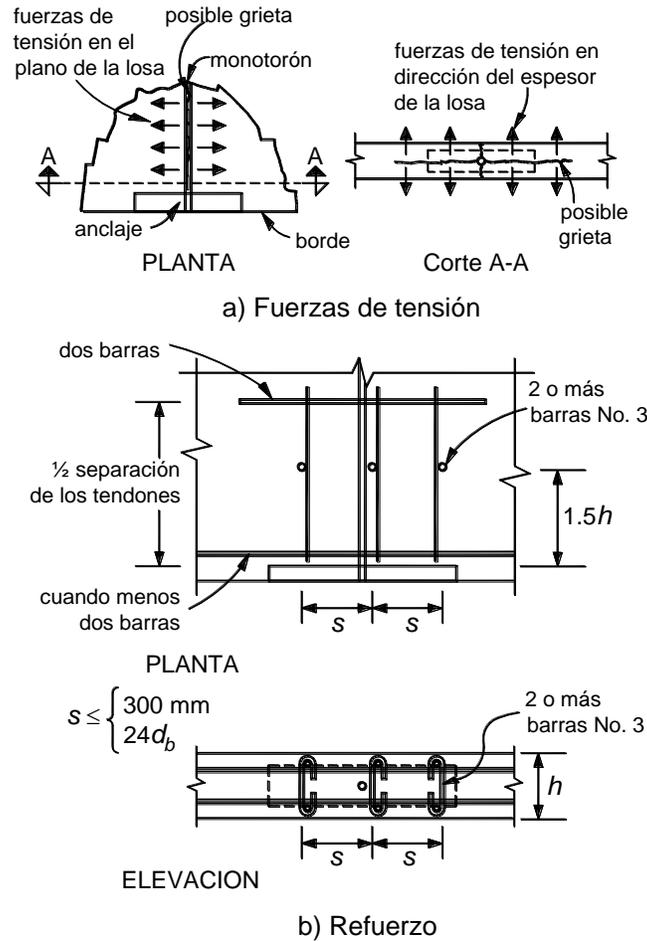


Figura 11.7.2 Refuerzo en la zona de anclaje

## 12. CONCRETOS ESPECIALES

### 12.1 Definición

Se definen como concretos especiales aquellos que, por sus características y propiedades, tienen un desempeño diferente al de los concretos convencionales y que, por tanto, requieren modificar algunas expresiones de diseño.

Los parámetros de resistencia para concretos especiales que se presentan de 12.2 a 12.7 y los que intervengan en las expresiones de diseño estarán afectados por los factores de resistencia,  $F_R$ , correspondientes.

### 12.2 Concreto de alta resistencia

En estas Normas se entiende por concreto de alta resistencia aquel que tiene una resistencia a la compresión  $f_c'$  igual o mayor que 40 MPa (400 kg/cm<sup>2</sup>).

### 12.2.1 Empleo de concretos de alta resistencia

#### 12.2.1.1 Disposiciones generales

Se permite el uso de concretos de alta resistencia con valores de  $f_c'$  hasta de 70 MPa (700 kg/cm<sup>2</sup>), excepto en los casos mencionados en el inciso 12.2.1.2. Se podrán usar concretos de resistencia mayor si el Corresponsable en Seguridad Estructural presenta evidencia de que la estructura puede alcanzar los niveles de resistencia y ductilidad apropiados en zonas sísmicas.

Los requisitos de los capítulos anteriores serán aplicables al concreto de alta resistencia en lo que no se opongan a lo estipulado en este Capítulo

#### 12.2.1.2 Limitaciones al empleo de concretos de alta resistencia

En estructuras diseñadas con un factor de ductilidad,  $Q$ , igual a 4, y en miembros sujetos a flexocompresión que formen parte de marcos que resistan más de 50 por ciento de las acciones sísmicas y cuya carga axial de diseño,  $P_u$ , sea mayor que  $0.2 P_{R0}$ , donde  $P_{R0}$  es la carga axial resistente de diseño, sólo se podrán usar concretos con valores de  $f_c'$  hasta de 55 MPa (550 kg/cm<sup>2</sup>).

### 12.2.2 Propiedades mecánicas

#### 12.2.2.1 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de concretos de alta resistencia se supondrá igual a:

$$E_c = 2\,700\sqrt{f_c'} + 11\,000; \text{ en MPa} \quad (12.2.1)$$

$$\left( E_c = 8\,500\sqrt{f_c'} + 110\,000 \quad ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

para concretos con agregado grueso calizo.

Para concretos con agregado grueso basáltico:

$$E_c = 2\,700\sqrt{f_c'} + 5\,000; \text{ en MPa} \quad (12.2.2)$$

$$\left( E_c = 8500\sqrt{f_c'} + 50000 \quad ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

#### 12.2.2.2 Resistencia a tensión

A falta de información experimental, la resistencia media a tensión de concretos de alta resistencia, correspondiente a ensayos en cilindros de 150×300 mm cargados diametralmente, se supondrá igual a:

$$\bar{f}_t = 0.53\sqrt{f_c'}; \text{ en MPa} \quad (12.2.3)$$

$$\left( \bar{f}_t = 1.67\sqrt{f_c'} \quad ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

para concretos con agregado grueso calizo.

Para concretos con agregado grueso basáltico:

$$\bar{f}_t = 0.47\sqrt{f_c'} ; \text{ en MPa} \quad (12.2.4)$$

$$\left( \bar{f}_t = 1.50\sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

A falta de información experimental, la resistencia media a tensión por flexión, o módulo de rotura, de concretos de alta resistencia se supondrá igual a

$$\bar{f}_f = 0.85\sqrt{f_c'} ; \text{ en MPa} \quad (12.2.5)$$

$$\left( \bar{f}_f = 2.70\sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

para concretos con agregado grueso calizo.

Para concretos con agregado grueso basáltico:

$$\bar{f}_f = 0.80\sqrt{f_c'} ; \text{ en MPa} \quad (12.2.6)$$

$$\left( \bar{f}_f = 2.54\sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

### **12.2.3 Contracción por secado**

Para concretos de alta resistencia la contracción por secado final,  $\epsilon_{cf}$ , se supondrá igual a 0.0006.

### **12.2.4 Flujo plástico**

El coeficiente de flujo plástico, definido en el inciso 2.1.6, se supondrá igual a 2.0.

Las deflexiones diferidas se pueden calcular con la ecuación 14.2.4, sustituyendo el numerador por 1.6.

## **12.3 Concreto autocompactante**

### **12.3.1 Alcance**

Se define como concreto autocompactante aquel que, como consecuencia de una dosificación adecuada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, sin presentar segregación, bloqueo de agregado grueso, sangrado, ni exudación de la lechada.

### **12.3.2 Diseño estructural**

Son aplicables los principios y métodos de cálculo establecidos en estas normas. Para cualquier análisis en el tiempo, así como para el cálculo de pérdidas de presfuerzo o de deflexiones diferidas, el módulo de elasticidad, el flujo plástico y la contracción, pueden ser diferentes en su valor y desarrollo en el tiempo a la de los concretos de compactación convencional.

A falta de ensayos experimentales que proporcionen los parámetros reológicos de este concreto, éstos se obtendrán de la información local disponible.

### **12.3.3 Propiedades de los materiales**

#### **12.3.3.1 Cemento**

El concreto autocompactante se fabricará preferentemente con los cementos que resulten adecuados de acuerdo con la finalidad de su empleo en función del tipo y cantidad de adiciones que contenga o bien, con cemento común tipo CPO, las adiciones al concreto necesarias y utilizando, cuando así se requiera, un “filler” inerte adecuado como agregado de corrección de la granulometría de la arena en las partículas más finas que pasan por el tamiz # 230 (0.063 mm).

De una u otra manera se debe conseguir una cantidad de finos (partículas que pasan por el tamiz # 120 (0.12 mm)) suficiente para alcanzar la propiedad de autocompactabilidad. La cantidad total de finos menores de 0.12 mm aportada por el cemento, las adiciones al concreto y los agregados, necesaria para fabricar concreto autocompactante es del orden de 25%, en peso, de la masa del concreto, pudiendo determinarse cuando sea necesario, con mayor precisión mediante los ensayos correspondientes. La cantidad de adiciones complementarias no se considerará en el cálculo de la relación agua/cemento, ni en la cantidad máxima de cemento.

#### **12.3.3.2 Agregados**

El tamaño máximo de agregado para el concreto autocompactante se limita a 25 mm (1”), siendo recomendable utilizar tamaños máximos comprendidos entre 12 mm y 20 mm, en función del espacio entre las barras de refuerzo.

Los materiales “fillers” son aquellos cuya mayor parte pasa por la malla # 230 (0.063 mm) y se obtienen por tratamiento de los materiales de los que provienen. La granulometría de un “filler” se define en la tabla 12.3.1.

**Tabla 12.3.1 Granulometría del “filler”**

Tamaño de tamiz, mm (#)	Porcentaje que pasa en peso
2 (# 10)	100
0.125 (# 120)	85 a 100
0.063 (# 230)	70 a 100

Se recomienda, exclusivamente para los concretos autocompactantes, que la cantidad resultante de sumar el contenido de partículas de agregado fino que pasa por el tamiz de 0.063 mm y la adición caliza en el cemento, en su caso, no sea mayor de 250 kg/m<sup>3</sup> de concreto autocompactante.

#### **12.3.3.3 Aditivos**

El uso de un aditivo superplastificante es requisito fundamental en el concreto autocompactante y, en ocasiones, puede ser conveniente el uso de un aditivo regulador de la viscosidad que minimice los efectos de la variación granulométrica, del contenido de humedad, del contenido de finos o de la distribución granulométrica, haciendo que el concreto autocompactante sea menos sensible, en cuanto a la propiedad de autocompactabilidad, a pequeñas variaciones en la calidad de las materias primas y en sus proporciones.

Su empleo se realizará después de conocer su compatibilidad con el cemento y las adiciones, comprobando que exista una buena conservación de las propiedades reológicas durante el tiempo previsto para la puesta en obra del concreto autocompactante, así como las características mecánicas correspondientes mediante la realización de ensayos previos.

Los aditivos superplastificantes cumplirán con la norma NMX-C-255-ONNCCE.

Los aditivos reguladores de la viscosidad cumplirán con la norma ASTM C494/C494M.

### **12.3.4 Propiedades del concreto autocompactante**

El concreto autocompactante tiene tres propiedades intrínsecas básicas:

- Fluidez o habilidad de fluir sin ayuda externa y llenar el molde
- Resistencia al bloqueo o habilidad de pasar entre las barras de refuerzo
- Estabilidad dinámica y estática o resistencia a la segregación, que le permite alcanzar una distribución uniforme del agregado en toda su masa.

Mientras que las propiedades en estado fresco del concreto autocompactante difieren en gran medida de las del concreto de compactación convencional, su comportamiento en términos de resistencia, durabilidad y demás propiedades en estado endurecido puede considerarse similares a las de un concreto convencional de igual relación agua/cemento y elaborado con los mismos materiales componentes.

En relación con su comportamiento a edad temprana podrían producirse algunas variaciones en propiedades como la contracción y/o alteraciones en el tiempo de fraguado, como consecuencia de que incorporan dosis mayores de finos y aditivos.

En aplicaciones donde el módulo de elasticidad, la contracción por secado o el flujo plástico puedan ser factores críticos y el contenido de pasta o agregado grueso varíe de forma sustancial sobre el normalmente utilizado, estas propiedades deben ser analizadas mediante ensayos específicos.

En general, las diferencias con el concreto convencional son suficientemente pequeñas de forma que se permite utilizar para el concreto autocompactante las expresiones de diseño incluidas en estas normas para el diseño estructural. Se pueden utilizar las mismas longitudes de anclaje de las barras de refuerzo o presfuerzo, iguales criterios para especificar la resistencia mínima del concreto y el mismo tratamiento de las juntas de construcción.

### 12.3.5 Composición

Los componentes del concreto autocompactante son los mismos que los del concreto estructural convencional, aunque las proporciones de los mismos pueden variar respecto a las habituales para estos últimos, caracterizándose por un menor contenido de agregado grueso, un mayor contenido de finos minerales y, en general, un menor tamaño máximo de agregado.

### 12.3.6 Consistencia

La consistencia del concreto autocompactante no puede ser caracterizada con los procedimientos empleados para el concreto convencional. La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las características del material en términos de:

- Fluidez, mediante ensayos de escurrimiento o de escurrimiento en embudo **V**, según ASTM C 1611/C 1611M
- Resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo **J**, o mediante ensayos en caja en **L**, según ASTM C 1621/C 1621M
- Resistencia a la segregación según ASTM C 1610.

La resistencia a la segregación, también se puede apreciar a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en **V**. En el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme de agregado grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la “torta” final del ensayo.

En la tabla 12.3.2 se muestran los intervalos admisibles de los parámetros de autocompactabilidad que deben cumplirse simultáneamente según los diferentes métodos de ensayo.

**Tabla 12.3.2 Requisitos generales para la autocompactabilidad<sup>(1)</sup>**

Ensayo	Parámetro medido	Intervalo admisible
Escurrecimiento	$T_{50}$	$T_{50} \leq 8 \text{ s}$
	$d_f$	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en <b>V</b>	$T_v$	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$
Caja en <b>L</b>	$C_{bL}$	$0.75 \leq C_{bL} \leq 1.00$

<sup>(1)</sup> Ver significado de la notación en las normas correspondientes.

### **12.3.7 Propiedades mecánicas**

#### *12.3.7.1 Resistencia a compresión*

En el concreto autocompactante la evolución de la resistencia a compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un concreto de compactación convencional, sin embargo, se deberá tener en cuenta la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados. Para la resistencia a tensión pueden aplicarse las relaciones entre ambas resistencias establecidas para el concreto convencional.

#### *12.3.7.2 Módulo de elasticidad*

Debido a que los concretos autocompactantes contienen un mayor volumen de pasta que el concreto de compactación convencional y tomando en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los agregados, se puede prever que el módulo de elasticidad para el concreto autocompactante resulte entre 7% y 15% menor que el del concreto de compactación convencional. Cuando se requiera un conocimiento detallado del valor del módulo de elasticidad como, por ejemplo, en algunas estructuras con un proceso de construcción evolutivo en el que el control de la deformación resulte crítico, se deben hacer determinaciones experimentales de dicho valor, al igual que se hace cuando se utiliza concreto de compactación convencional.

#### *12.3.7.3 Resistencia a fuerza cortante*

Aunque no se han detectado diferencias importantes dignas de ser tomadas en cuenta en el diseño estructural, debido al menor contenido de agregado grueso y en general agregado de menor tamaño, los concretos autocompactantes presentan una superficie de fisura más lisa que la de los concretos de compactación convencional de la misma resistencia. Esto reduce ligeramente la componente resistente de trabazón. En cualquier caso el cálculo correspondiente puede realizarse utilizando las expresiones de diseño de estas normas para el concreto de compactación convencional.

### **12.3.8 Contracción por secado**

Debido a que el concreto autocompactante tiene una mayor cantidad de finos en su composición y una alta resistencia frente a la segregación, el material prácticamente no exuda agua durante la puesta en obra. Si bien teóricamente este aspecto resulta positivo, en la práctica, el efecto puede resultar adverso, ya que muchas veces es el agua de exudación (sangrado) la que compensa el agua que se evapora en estado fresco y, consecuentemente, evita el agrietamiento por contracción plástica.

Debido a las bajas relaciones agua/cementante que en general se consideran, cobra especial importancia el curado del concreto autocompactante, especialmente en estructuras con altas relaciones superficie/volumen.

De manera equivalente a lo que sucede con el concreto de compactación convencional, un alto contenido de cemento conducirá a un mayor calor de hidratación, una consecuente dilatación y una posterior contracción térmica, lo cual en elementos de mediana o gran masa puede resultar crítico en términos de agrietamiento. Se deben emplear las mismas precauciones que para el concreto de compactación convencional.

### **12.3.9 Flujo plástico**

El comportamiento en flujo plástico del concreto autocompactante puede considerarse equivalente al de un concreto de compactación convencional de igual relación agua/cemento. Aunque para el mismo nivel resistente podrían producirse deformaciones ligeramente mayores, si el secado al aire es permitido, esta diferencia puede desaparecer a causa del mayor refinamiento de la estructura de poro del concreto autocompactante. En aplicaciones donde el flujo plástico pueda ser un factor crítico, esta propiedad deberá ser tomada en cuenta durante el proceso de dosificación y verificada mediante ensayos específicos de laboratorio sobre probetas expuestas a un ambiente controlado.

## **12.4 Concreto ligero**

### 12.4.1 Requisitos generales

En estas Normas se entiende por concreto ligero aquel cuyo peso volumétrico en estado fresco es inferior a  $19 \text{ kN/m}^3$  ( $1.9 \text{ t/m}^3$ ).

Sólo se permite el uso de concreto ligero en elementos secundarios. Su uso en elementos principales de estructuras requiere de la autorización especial del Corresponsable en Seguridad Estructural o del Director Responsable de Obra cuando no se requiera de Corresponsable.

En el diseño de elementos estructurales de concreto ligero son aplicables los criterios para concreto de peso normal con las modificaciones que aquí se estipulan.

Se supondrá que un elemento de concreto ligero reforzado alcanza su resistencia a flexocompresión cuando la deformación unitaria del concreto es  $0.003E_c/E_L$ , donde  $E_c$  y  $E_L$ , son, respectivamente, los módulos de elasticidad del concreto de peso normal clase 1 y ligero de igual resistencia.

En las ecuaciones relacionadas con el cálculo de resistencias, aplicables a concreto de peso normal, se usará  $1.6f_t$  en lugar de  $\sqrt{f_c'}$  siendo  $f_t$  en MPa ( $0.5f_t$  en lugar de  $\sqrt{f_c'}$  si se usan  $\text{kg/cm}^2$ ), la resistencia nominal a tensión indirecta obtenida de acuerdo con el inciso 2.1.3 para concreto clase 2.

El valor de  $f_t$  que se use no debe ser mayor que  $0.38\sqrt{f_c'}$  en MPa ( $1.2\sqrt{f_c'}$  en  $\text{kg/cm}^2$ ). Si no se conoce  $f_t$  se supondrá igual a  $0.28\sqrt{f_c'}$  en MPa ( $0.9\sqrt{f_c'}$  en  $\text{kg/cm}^2$ ).

No son aplicables las ecuaciones de peraltes mínimos que en elementos de peso normal permiten omitir el cálculo de deflexiones.

El módulo de elasticidad del concreto ligero se determinará experimentalmente, con un mínimo de seis pruebas para cada resistencia y cada tipo de agregado.

### 12.4.2 Requisitos complementarios

El refuerzo por cambios volumétricos que se estipula en la sección 6.7 será obligatorio en toda dirección en que la dimensión de un elemento estructural, en metros, exceda de

$$\frac{2.35\bar{f}_t}{\sqrt{f_c'}} \quad (12.4.1)$$

$$\left( \frac{0.75\bar{f}_t}{\sqrt{f_c'}} \right)$$

y las cuantías requeridas en ese inciso se incrementará en la relación:

$$\frac{0.63\sqrt{f_c'}}{\bar{f}_t} \quad (12.4.2)$$

$$\left( \frac{2\sqrt{f_c'}}{\bar{f}_t} \right)$$

$f_c'$  y  $\bar{f}_t$  en MPa (kg/cm<sup>2</sup>).

El esfuerzo  $\bar{f}_t$  se define en el inciso 2.1.3.

El refuerzo no se doblará con un radio menor que  $\frac{f_y}{30 \bar{f}_t}$  veces el diámetro de la barra doblada ni menor que el que señale la respectiva Norma Mexicana de las indicadas en la sección 2.2, para la prueba de doblado.

Si se desconoce,  $\bar{f}_t$  se sustituirá por  $0.38 \sqrt{f_c'}$  en MPa ( $1.2 \sqrt{f_c'}$  en kg/cm<sup>2</sup>) en las expresiones de esta sección.

## **12.5 Concretos reforzados con fibras**

### **12.5.1 Alcance**

Los concretos reforzados con fibras se definen como aquellos que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y distribuidas aleatoriamente en su masa.

La aplicación de estos concretos puede ser con finalidad estructural o no estructural. El empleo de fibras en el concreto tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite de resistencia o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total del refuerzo convencional en algunas aplicaciones. Se considera que las fibras no tienen función estructural, cuando se incluyen en el concreto con otros objetivos, como la mejora de la resistencia al fuego o el control del agrietamiento.

### **12.5.2 Propiedades de los materiales**

#### **12.5.2.1 Fibras**

Las fibras son elementos de corta longitud y sección pequeña que se incorporan a la masa de concreto con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas. Se clasifican como fibras estructurales aquellas que proporcionan una tenacidad importante al concreto, en cuyo caso la contribución de las fibras se considera en el cálculo de la respuesta de la sección de concreto; como fibras no estructurales aquellas que, sin considerarlas en el cálculo de la respuesta, la tenacidad que desarrollan permite tener una mejora en las propiedades del concreto como el control del agrietamiento por contracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otras. De acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas. La efectividad de las fibras se valora por medio de la energía de rotura (tenacidad) en Julios (J) en especímenes de concreto de conformidad con la norma ASTM C 1018.

a) Las fibras de acero deben cumplir con los requisitos de la especificación ASTM A-820. La forma de la fibra tiene un impacto importante en la adherencia de la fibra con el concreto, pueden ser rectas, onduladas, corrugadas, con extremos de distintas formas, etc. Su sección transversal puede ser circular, rectangular, semicircular, irregular o de sección transversal variable.

La longitud de la fibra,  $l_f$ , debe ser mayor o igual a 2 veces el tamaño máximo del agregado (tma); es usual el empleo de longitudes de 2.5 a 3 veces el tma. Además, el diámetro de la tubería para el bombeo del concreto exige que la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro del tubo.

La longitud de la fibra debe ser suficiente para lograr la adherencia necesaria a la matriz y evitar que sea arrancada con facilidad. Un parámetro conveniente para describir la geometría de la fibra es el llamado relación de aspecto, que es la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra o diámetro equivalente, en caso de que la sección transversal no sea circular. A igualdad de longitud, fibras de diámetro pequeño aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente al permitir una mejor redistribución de esfuerzos.

b) Pueden usarse fibras plásticas de material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon o poliéster). Las fibras plásticas deben cumplir con la norma ASTM D 7508/D 7508M. Su longitud debe estar comprendida entre 20 mm y 60 mm, y debe guardar una relación con el tamaño máximo del agregado (tma) de al menos 3:1 (fibra:tma).

Las fibras plásticas de longitud menor a 30 mm pueden usarse para reducir el agrietamiento por contracción plástica del concreto, especialmente en pavimentos y para mejorar el desempeño frente a fuego, pero no pueden tener ninguna función estructural.

c) Las fibras inorgánicas, entre las que se encuentran las de vidrio, pueden usarse para fines estructurales, para reducir el agrietamiento, la contracción por secado y el flujo plástico, así como para mejorar el desempeño del concreto ante fatiga e impacto, pero debe garantizarse que tengan un desempeño adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de su deterioro como consecuencia de la alcalinidad del medio. Cuando se usen en elementos estructurales donde se presenten cargas de flexión o tensión, como en vigas, columnas y losas, se debe considerar en su dimensionamiento que toda la fuerza de tensión debe ser resistida por barras de refuerzo.

#### *12.5.2.2 Concreto*

El concreto empleado en la mezcla es del tipo convencional aunque deben variarse las proporciones de los materiales componentes para alcanzar una trabajabilidad adecuada y sacar ventaja de las fibras. Para ello, se debe limitar el tamaño del agregado, optimizar la granulometría, incrementar el contenido de cemento y adicionarle ceniza volante o aditivos químicos para mejorar la trabajabilidad. Cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ión cloruro total aportado por los materiales componentes no excederá de 0.4% del peso del cemento.

#### *12.5.3 Criterio de diseño*

Se debe considerar al concreto reforzado con fibras como un concreto con capacidad de deformación, resistencia al impacto, absorción de energía y resistencia a tensión incrementadas. El incremento en estas propiedades variará desde sustanciales hasta nulo dependiendo de la cantidad y tipo de fibras empleados; las propiedades no se incrementarán en la misma proporción en el que se incrementa el contenido de fibras.

El dimensionamiento de miembros de concreto reforzado con fibras de acero se basa en los métodos de diseño convencionales complementados con procedimientos para tomar en cuenta la tensión adicional que proporcionan las fibras.

Para aplicaciones estructurales, las fibras de acero se usan como refuerzo complementario de las barras de refuerzo. Las fibras de acero pueden inhibir las grietas satisfactoriamente y mejorar la resistencia al deterioro del material como consecuencia de fatiga, impacto, y contracción por secado o esfuerzos térmicos. En miembros estructurales donde se presenten cargas de flexión o tensión, como en vigas, columnas o losas (no sobre el terreno) un enfoque conservador, pero justificable, para el dimensionamiento es considerar que toda la tensión es soportada por las barras de refuerzo.

En aplicaciones donde no es esencial la presencia de refuerzo continuo para la seguridad e integridad de la estructura, (pisos sobre el terreno, pavimentos, recubrimientos y revestimientos con concreto lanzado) las mejoras en la resistencia a flexión, impacto y en el desempeño a la fatiga asociadas con el uso de las fibras, pueden emplearse para reducir el espesor de la sección, mejorar el desempeño o ambos.

#### *12.5.4 Propiedades mecánicas*

##### *12.5.4.1 Resistencia a compresión*

Los incrementos en la resistencia a compresión del concreto varían desde nulo en la mayor parte de los casos hasta 20 por ciento para concretos que incluyen 2%, por volumen, de fibras.

Las curvas esfuerzo-deformación presentan un incremento en la deformación correspondiente al esfuerzo máximo y una pendiente menos pronunciada de la parte descendente de dichas curvas, en relación con las obtenidas en los especímenes de control sin fibras. Esto es indicativo de que se alcanza una tenacidad sustancialmente mayor. La tenacidad es una medida de la capacidad de absorber energía durante la deformación y se estima a partir del área abajo de la curva esfuerzo-deformación.

La mejora en la tenacidad a compresión propiciada por las fibras es útil para evitar fallas explosivas bajo carga estática y absorber energía bajo carga dinámica.

#### *12.5.4.2 Resistencia a tensión*

La resistencia del concreto reforzado con fibras de acero a tensión directa es del mismo orden que la del concreto sin refuerzo; su tenacidad puede ser uno o dos órdenes de magnitud más grande, debido a la fricción desarrollada durante la extracción de la fibra a ambos lados de la grieta.

#### *12.5.4.3 Resistencia a flexión*

La resistencia a flexión última generalmente se incrementa en relación con el volumen de fibras y la relación de aspecto. Fibras con baja relación de aspecto (menores que 50) y concentraciones menores que 0.5% del volumen, tienen un efecto despreciable en las propiedades de resistencia estática. Las características de la gráfica carga-deflexión posterior al agrietamiento depende en gran parte del tipo de fibra seleccionado y del porcentaje volumétrico de fibra usado.

#### *12.5.4.4 Tenacidad en flexión*

Bajo carga estática la tenacidad en flexión se define como el área bajo la curva carga-deflexión en flexión y representa la energía total absorbida antes de que las fibras se separen totalmente del espécimen. Los índices de tenacidad en flexión se calculan como la relación entre el área bajo la curva carga-deflexión del concreto con fibra hasta una deflexión final específica y el área hasta la aparición de la primera grieta o el área de la curva carga-deflexión de la matriz sin fibras.

Los índices de tenacidad dependen principalmente del tipo, concentración y relación de aspecto de las fibras y son independientes de que la matriz sea mortero o concreto.

En general fibras onduladas, con deformaciones superficiales y fibras con anclajes en los extremos producen índices de tenacidad más grandes que los alcanzados con fibras rectas y lisas para las mismas concentraciones volumétricas o permiten alcanzar índices similares con concentraciones menores de fibras.

#### *12.5.4.5 Desempeño bajo cargas dinámicas*

La resistencia dinámica de concreto reforzado con varios tipos de fibras y sujeto a cargas explosivas, caída de objetos pesados y cargas dinámicas a flexión, tensión y compresión es de 3 a 10 veces mayor que la del concreto simple. La mayor energía requerida para extraer las fibras de la matriz proporciona la resistencia al impacto y la resistencia al despostillamiento y fragmentación bajo cargas dinámicas. Para concretos con fibras el número de impactos requeridos para alcanzar la falla usualmente es de varios cientos comparados con 30 a 50 requeridos para el concreto simple.

#### *12.5.5 Contracción por secado y flujo plástico*

Las fibras de acero tienen poco efecto en la contracción por secado libre del concreto reforzado con fibras de acero. Sin embargo, cuando la contracción por secado está restringida, las fibras de acero reducen sustancialmente la cantidad y el ancho promedio de las grietas.

La adición de fibras de acero no reduce en forma significativa las deformaciones originadas por el flujo plástico en el material compuesto.

#### *12.5.6 Resistencia a congelación-deshielo*

Las fibras de acero no afecta significativamente la resistencia del concreto a congelación-deshielo, aunque puede reducir la severidad del agrietamiento visible y el despostillamiento, como resultado de la congelación en concretos con un sistema inadecuado de vacíos. La inclusión de aire sigue siendo el criterio más efectivo para asegurar resistencia a congelación-deshielo satisfactoria, como en el concreto simple.

#### *12.5.7 Resistencia a abrasión/cavitación/erosión*

El concreto reforzado con fibras de acero tiene alta resistencia a las fuerzas de cavitación originadas por flujo de agua a alta velocidad y el daño causado por el impacto de grandes rocas arrastradas por dicho flujo de agua.

La adición de fibras de acero no mejora la resistencia a abrasión/erosión de concretos originada por partículas pequeñas a baja velocidad, debido a que los ajustes requeridos en las proporciones de las mezclas para dar cabida a las fibras reducen el contenido del agregado grueso y aumenta el contenido de pasta.

## **12.6 Concreto lanzado**

El concreto lanzado se define como aquel que se coloca por medios neumáticos a alta velocidad, en capas relativamente delgadas, sobre la superficie a ser recubierta; puede ser de concreto simple o reforzado, con fibra o mallas de barras de refuerzo, según las necesidades del proyecto.

### ***12.6.1 Procesos de lanzado***

El concreto lanzado se clasifica de acuerdo con el proceso usado: mezcla húmeda o mezcla seca y con el agregado empleado, grueso o fino. En la tabla 12.6.1 se presenta las granulometrías requeridas para el agregado fino (No. 1) y para el agregado grueso (No. 2).

#### ***12.6.1.1 Proceso de mezcla seca***

El proceso de mezcla seca consiste de los cinco pasos siguientes:

1. Se mezclan completamente todos los ingredientes, excepto el agua;
2. Se coloca la mezcla cementante-agregado dentro de un alimentador mecánico especial o cañón llamado equipo de impulsión;
3. Se introduce la mezcla en la manguera de impulsión mediante un dispositivo de control: rueda alimentadora, rotor, o recipiente alimentador. Algunos equipos usan solamente aire a presión para impulsar el material dentro las mangueras;
4. El material es impulsado con aire a presión a través de la manguera hasta la boquilla. La boquilla está provista internamente de un anillo a través del cual se introduce el agua a presión, la cual se mezcla completamente con los otros ingredientes; y
5. El material es lanzado a alta velocidad a través de la boquilla hasta la superficie a ser recubierta.

#### ***12.6.1.2 Proceso de mezcla húmeda***

El proceso de mezcla húmeda consiste de cinco pasos:

1. Todos los ingredientes incluyendo el agua de mezclado, se mezclan completamente;
2. Se introduce el mortero o el concreto dentro la cámara del equipo de impulsión;
3. La mezcla se regula dentro de la manguera de impulsión y se mueve mediante desplazamientos positivos o se conduce mediante aire comprimido hasta la boquilla;
4. Se inyecta aire comprimido en la boquilla para incrementar la velocidad y mejorar el procedimiento de lanzado; y
5. El mortero o concreto se lanza a alta velocidad a través de la boquilla sobre la superficie a ser recubierta.

**Tabla 12.6.1 Límites de granulometría para agregados combinados**

Tamaño de tamiz, malla cuadrada estándar	Porcentaje en peso que pasa en los tamices individuales	
	Granulometría No. 1	Granulometría No. 2
19 mm (3/4 pulg.)	---	---
12 mm (1/2 pulg.)	---	100
10 mm (3/8 pulg.)	100	90 a 100
4.75 mm (No. 4)	95 a 100	70 a 85
2.4 mm (No. 8)	80 a 98	50 a 70
1.2 mm (No. 16)	50 a 85	35 a 55
600 µm (No. 30)	25 a 60	20 a 35
300 µm (No. 50)	10 a 30	8 a 20
150 µm (No. 100)	2 a 10	2 a 10

### 12.6.2 Comparación de los procesos

Cualquiera de los procesos puede producir concreto lanzado adecuado para los requisitos de las construcciones normales. Sin embargo, diferencias en la inversión y costo de mantenimiento del equipo, características de operación del equipo, material disponible adecuado y características de colocación, puede hacer que un método u otro sea más atractivo para una aplicación particular. La tabla 12.6.2 establece diferencias en las características de operación y otras propiedades que merecen tomarse en cuenta.

#### 12.6.2.1 Concreto lanzado con agregado grueso

Hay cinco razones para incluir agregado grueso en el concreto lanzado:

1. La reducción del área superficial del agregado grueso versus la del agregado fino permite reducir el consumo de agua;
2. El agregado grueso reduce la contracción por secado al reducir el contenido de agregado fino;
3. La incorporación de agregado grueso mejora la bombeabilidad de la mezcla húmeda;
4. El impacto del agregado grueso en el concreto lanzado en estado plástico mejora la densidad del concreto colocado;
5. Se puede mejorar la economía de la mezcla.

Sin embargo, para ambos procesos, mezcla seca y mezcla húmeda, el concreto lanzado con más de 30 por ciento de agregado grueso incrementa el rebote, es más difícil de darle el acabado y no puede emplearse para capas delgadas. El concreto lanzado con agregado grueso requiere el empleo de mangueras de mayor diámetro y produce cráteres en la superficie del concreto cuando se lanza a alta velocidad.

**Tabla 12.6.2 Comparación de los procesos de mezcla seca y mezcla húmeda**

Proceso de mezcla seca	Proceso de mezcla húmeda
1. Control instantáneo del agua de mezclado y de la consistencia de la mezcla en la boquilla para adaptarse a las condiciones variables del sitio	1. El agua de mezclado se controla en el equipo de mezclado y puede ser medida con precisión
2. Mejor adecuación para la colocación de mezclas que contienen agregado ligero o material refractario	2. Mayor confianza de que el agua de mezclado se mezcla completamente con los otros ingredientes
3. Posibilidad de ser transportado a distancias más largas	3. Menor cantidad de polvo y menor pérdida de material cementante durante la operación de lanzado
4. Las mangueras para conducirlo se pueden mover con mayor facilidad	4. Normalmente tiene menor rebote, dando como resultado menor desperdicio
5. Menor volumen para un tamaño de manguera dado.	5. Mayor volumen para un tamaño de manguera dado.

### 12.6.3 Propiedades

Los tipos de mezclas de concreto que se aplican por medio de lanzado, incluyen al concreto simple, con micro sílice, reforzado con fibra, de alta resistencia y de alto desempeño. Los diferentes tipos tienen propiedades diferentes y endurecidos.

La composición de la mezcla debe ser tal que el concreto lanzado endurecido ya en el sitio desarrolle propiedades mecánicas y físicas aceptables. La composición de la mezcla afectará las propiedades del concreto lanzado endurecido de la misma manera como lo hace en el concreto convencional. Los efectos asociados con el proceso de lanzado, como la compactación, el rebote y la orientación de las fibras, afectará las propiedades del concreto lanzado endurecido.

La relación agua-material cementante ( $a/mc$ ) es clave para las mezclas húmedas de concreto lanzado, como lo es la relación cemento-agregado para las mezclas secas de concreto lanzado. La reducción de la relación  $a/mc$  mejora la mayor parte de las propiedades del concreto lanzado, incluyendo resistencia, permeabilidad y durabilidad. La presencia de acelerantes, micro sílice u otras puzolanas modifica las propiedades físicas, especialmente la permeabilidad y durabilidad. El empleo de un aditivo inclusor de aire mejora la resistencia del concreto lanzado a la congelación y deshielo, mientras que el empleo de fibras mejora la tenacidad. La aplicación de un curado adecuado al concreto lanzado es importante, ya que siempre mejorará su desempeño mecánico y físico.

El concreto lanzado de alto desempeño, el cual incluye propiedades de alta resistencia, baja permeabilidad, alta durabilidad y resistencia al calor o química se alcanza con aditivos o materiales especiales, como la micro sílice.

#### *12.6.3.1 Resistencia a compresión*

La resistencia a compresión de las mezclas secas de concreto lanzado depende en gran medida de la relación cemento-agregado. Se pueden alcanzar resistencias de 85 MPa (850 kg/cm<sup>2</sup>) y son comunes resistencias de 40 y 50 MPa (400 y 500 kg/cm<sup>2</sup>).

El empleo de bajas relaciones  $a/mc$  mediante la incorporación de aditivos reductores de agua de alto rango a las mezclas húmedas de concreto lanzado propicia concretos de alta resistencia. Las resistencias usuales en mezclas húmedas de concreto lanzado varían entre 30 y 50 MPa (300 y 500 kg/cm<sup>2</sup>). En trabajos de rehabilitación, túneles y apoyos subterráneos, es más importante el desarrollo de resistencia a corta edad que la resistencia última. En estos casos, se emplean aditivos acelerantes para mejorar el desarrollo temprano de la resistencia. Esto puede conducir a la reducción de resistencia a largo plazo, inclusive a 28 días, y de la durabilidad, en comparación con la de concretos lanzados sin acelerantes de la misma composición. Estos efectos son proporcionales a la dosificación del acelerante o son afectados por la composición química de los mismos.

#### *12.6.3.2 Propiedades a flexión*

Tradicionalmente, se han empleado mallas de alambre soldado en el recubrimiento de túneles con concreto lanzado para proporcionar ductilidad al recubrimiento. Ahora, el refuerzo con mallas de alambre soldado está siendo sustituido progresivamente por fibras de acero o sintéticas. El refuerzo con fibras proporciona al concreto lanzado tenacidad y capacidad para soportar cargas después del agrietamiento. También ayuda al control del agrietamiento por contracción restringida y mejora la resistencia al impacto.

#### *12.6.3.3 Resistencia a la adherencia*

Debido a que el concreto lanzado es físicamente enviado a la superficie receptora, usualmente presenta buena adherencia con concreto, mampostería, roca, acero y muchos otros materiales. La resistencia a la adherencia se mide por cortante o por tensión directa. El concreto lanzado deberá desarrollar una resistencia a tensión mínima de 0.7 MPa (7 kg/cm<sup>2</sup>). El concreto lanzado aplicado correctamente con suficiente compactación sobre un sustrato bien preparado desarrolla una resistencia a la adherencia superior a 1 MPa (10 kg/cm<sup>2</sup>).

Los resultados de los ensayos de resistencia a la adherencia para los concretos lanzados vía mezclas seca o húmeda llevados a cabo sobre sustratos de concreto con diferentes preparaciones, indican que la composición de la mezcla de concreto lanzado tiene menos influencia en la adherencia que la preparación de la superficie. Los mejores resultados se obtienen con hidroescarificación, escarificado solamente con chorro de arena, o martelinado seguido de escarificado con chorro de arena. Los otros tipos de preparación de la superficie (desbastado, martelinado sin escarificado con chorro de arena) dan como resultado, ya sea una resistencia a la adherencia menor, o una reducción de la adherencia con el tiempo. También es importante

la condición de humedad del sustrato en el momento de aplicar el concreto lanzado. Los mejores resultados se obtienen cuando el concreto lanzado se aplica sobre un sustrato saturado superficialmente seco. Una superficie del sustrato excesivamente seca o húmeda en el momento de aplicar el concreto lanzado reduce la resistencia a la adherencia. El escobillado entre capas de concreto lanzado rompe la capa de material exudado a la superficie y elimina el material lanzado suelto y en exceso, mejorando con esto la adherencia. Es importante que la superficie del sustrato se mantenga limpia entre aplicaciones.

#### *12.6.3.4 Contracción por secado*

La contracción por secado es un parámetro importante en relación con el agrietamiento potencial o la reducción de la adherencia con el tiempo, especialmente si el concreto lanzado se emplea en la reparación de estructuras de concreto. La contracción por secado del concreto lanzado varía con la dosificación de la mezcla, pero generalmente se encuentra entre 0.06 y 0.10 % a 3 meses. La contracción por secado del concreto lanzado es mayor que la de los concretos convencionales, debido principalmente a que el concreto lanzado tiene menos agregado grueso y mayor cantidad de material cementante y agua. El empleo de acelerantes tiende a incrementar la contracción por secado y el potencial de agrietamiento.

#### *12.6.3.5 Absorción y volumen de vacíos permeables*

El ensaye de absorción (ASTM C 642) se debe realizar en concreto lanzado endurecido para proporcionar una indicación completa de la calidad del concreto lanzado, especialmente en concreto lanzado vía mezcla húmeda, donde los resultados son influenciados en gran medida por la relación agua/material cementante. El valor de la absorción y el volumen de los vacíos permeables son útiles para identificar los concretos con una microestructura débil o dañada.

Valores aceptables de volumen de vacíos permeables varían entre 14 y 17 %. Valores típicos de absorción en agua hirviendo varían entre 6 y 9 %. Los resultados varían en función de las características absorbentes del agregado. El agregado ligero tiene una absorción alta. La absorción de un espécimen de concreto lanzado es proporcional a su relación  $a/mc$ . Una relación  $a/mc$  baja conduce a volúmenes de vacíos permeables relativamente bajos o a valores bajos de absorción, los cuales son indicativos de una buena calidad del concreto lanzado. Una mezcla demasiado seca, conducirá a un volumen de vacíos permeables relativamente alto o a altos valores de absorción debido a la rigidez del concreto lanzado en estado plástico. La velocidad de impacto es otro parámetro importante que influye en la porosidad del concreto lanzado endurecido. Una velocidad de impacto insuficiente no proporcionará una compactación adecuada, dando como resultado una permeabilidad y valores de absorción altos.

Los acelerantes de fraguado tienen un efecto detrimental en la porosidad del concreto lanzado, debido al efecto de fraguado instantáneo del aditivo, el cual disminuye el efecto de autocompactación del concreto lanzado; la influencia de diferentes acelerantes varía y debe ser verificada con ensayos en paneles antes de usarlos en obra.

Valores de vacíos permeables o de absorción altos indican baja calidad y durabilidad reducida del concreto lanzado colocado en el sitio.

#### *12.6.3.6 Otras propiedades*

La permeabilidad varía de acuerdo con la composición de la mezcla ( $a/mc$  y micro sílice). El concreto lanzado y el concreto convencional tienen coeficiente de permeabilidad similares para materiales constituyentes y relaciones agua/material cementante también similares. El coeficiente de expansión térmica del concreto lanzado es aproximadamente igual al del acero de refuerzo, siendo por tanto mínimos los esfuerzos internos desarrollados por cambio de temperatura. La densidad del concreto lanzado de alta calidad varía entre 2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup>, similar a la del concreto convencional. El módulo de elasticidad está entre 17 y 40 GPa (170 000 y 400 000 kg/cm<sup>2</sup>), similar al del concreto convencional.

## **12.7 Concretos reciclados**

### *12.7.1 Requisitos generales*

En estas normas se entiende por concretos reciclados a los concretos fabricados con agregado grueso reciclado proveniente de la trituración de residuos de concreto. Para su uso como concreto estructural el contenido de agregado grueso reciclado se limita a 20%, en peso, del contenido total de agregado grueso. No se permite el empleo de agregado fino reciclado como sustituto parcial o total del agregado fino, ni de agregado grueso procedente de estructuras con patologías que puedan afectar

la calidad del concreto. El agregado grueso reciclado puede emplearse tanto para concreto simple como para concreto reforzado. La resistencia especificada,  $f_c'$ , será inferior a 40 MPa (400 kg/cm<sup>2</sup>); no se permite su empleo en estructuras de concreto presforzado, ni en estructuras con marcos dúctiles.

Se deberán establecer depósitos separados e identificados para agregados naturales y reciclados. Debido a que la calidad del concreto de origen afecta la calidad del agregado reciclado se requiere mantener en depósitos separados los agregados reciclados procedentes de concretos de calidades muy diferentes.

### **12.7.2 Requisitos para el agregado grueso reciclado**

El tamaño mínimo para el agregado grueso reciclado es de 4.75 mm (malla #4). El contenido de partículas que pasan la malla #4 no debe ser superior a 5%. El contenido de terrones de arcilla en el agregado grueso reciclado no debe ser superior a 0.6% y en el agregado grueso natural a 0.15%.

En los concretos reciclados con contenido de agregado grueso reciclado inferior a 20%, la absorción de este agregado debe ser inferior a 7%; adicionalmente, la absorción del agregado grueso natural deberá tener una absorción inferior a 4.5%. Para la resistencia al desgaste de la grava se mantiene el requisito aplicado para los agregados naturales: coeficiente de los Ángeles no superior a 40%.

Se deberá controlar en el agregado reciclado el contenido de impurezas limitando los valores máximos a lo establecido en la tabla 12.7.1.

**Tabla 12.7.1 Impurezas máximas en el agregado reciclado**

Impurezas	Máximo contenido de impurezas, % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Otros materiales (vidrio, plásticos, metales, madera, papel, etc.)	1

Se deberá determinar el contenido total de cloruros y aplicar el mismo límite recomendado en 4.8.1; además, los agregados reciclados no presentarán reactividad potencial con los álcalis del cemento.

### **12.7.3 Durabilidad**

La durabilidad del concreto reciclado con un porcentaje de agregado reciclado no superior a 20% es similar a la que presenta un concreto convencional, por lo que son aplicables las recomendaciones establecidas en el capítulo 4.

### **12.7.4 Diseño estructural**

Las prescripciones establecidas en estas Normas Técnicas Complementarias son aplicables al diseño estructural de concreto reciclado, si el contenido máximo de agregado grueso reciclado se limita a 20%. El agregado grueso reciclado debe cumplir con las prescripciones adicionales establecidas en este apartado.

## **13. CONCRETO SIMPLE**

### **13.1 Limitaciones**

El uso de concreto simple con fines estructurales se limitará a:

- Miembros que estén apoyados sobre el suelo en forma continua, o soportados por otros miembros estructurales capaces de proporcionar apoyo vertical continuo;
- Miembros para los cuales la acción de arco origina compresiones bajo todas las condiciones de carga; o

c) Muros y pedestales. No se permite el uso del concreto simple en columnas con fines estructurales.

### 13.2 Juntas

Se proporcionarán juntas de contracción o de aislamiento para dividir los miembros estructurales de concreto simple en elementos a flexión discontinuos. El tamaño de cada elemento limitará el incremento excesivo en los esfuerzos internos generados por las restricciones al movimiento originado por el flujo plástico, la contracción por secado, y los efectos de temperatura.

En la determinación del número y localización de las juntas de contracción o aislamiento se le dará atención a: influencia de las condiciones climáticas; selección y proporcionamiento de materiales; mezclado, colocación y curado del concreto; grado de restricción al movimiento; esfuerzos debidos a las cargas que actúan sobre el elemento; y técnicas de construcción.

### 13.3 Método de diseño

Los miembros de concreto simple se diseñarán para una resistencia adecuada de acuerdo con estas Normas, usando factores de carga y de resistencia.

La resistencia de diseño de miembros estructurales de concreto simple en flexión y carga axial se basarán en una relación esfuerzo–deformación lineal, tanto en tensión como en compresión.

No se transmitirá tensión a través de bordes externos, juntas de construcción, juntas de contracción, o juntas de aislamiento de un elemento individual de concreto simple. No se supondrá continuidad en flexión debido a tensión entre elementos estructurales adyacentes de concreto simple.

Cuando se calcule la resistencia a flexión, carga axial y flexión combinadas, y cortante, en el diseño se considerará la sección transversal completa, con excepción de los elementos colados contra el suelo a los cuales se reducirá 50 mm al espesor total  $h$ .

### 13.4 Esfuerzos de diseño

Los esfuerzos calculados bajo cargas de diseño (ya multiplicadas por el factor de carga), suponiendo comportamiento elástico, no excederán a los valores siguientes, donde  $F_R$  vale 0.65 en todos los casos:

a) Compresión por flexión

$$F_R f_c' \quad (13.4.1)$$

b) Tensión por flexión

1) concreto clase 1

$$0.47 F_R \sqrt{f_c'} ; \text{ si se usan MPa} \quad (13.4.2)$$

$$\left( 1.5 F_R \sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

2) concreto clase 2

$$0.34 F_R \sqrt{f_c'} ; \text{ si se usan MPa} \quad (13.4.3)$$

$$\left( 1.1F_R \sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

c) Compresión axial

$$0.56F_R f_c' \left( 1 - \left( \frac{H'}{32h} \right)^2 \right) \quad (13.4.4)$$

d) Cortante, como medida de la tensión diagonal en elementos angostos que trabajen en una dirección

$$0.05 F_R \sqrt{f_c'} ; \text{ si se usan MPa} \quad (13.4.5)$$

$$\left( 0.18 F_R \sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

e) Cortante, como medida de la tensión diagonal cuando el elemento trabaje en dos direcciones y la falla sea cónica y piramidal alrededor de la carga ( $\gamma$  es la relación entre la dimensión menor de la zona cargada y la mayor)

$$(0.5 + \gamma)0.28F_R\sqrt{f_c'} \leq 0.28F_R\sqrt{f_c'} ; \quad \text{si se usan MPa} \quad (13.4.6)$$

$$\left( (0.5 + \gamma)0.9F_R\sqrt{f_c'} \leq 0.9F_R\sqrt{f_c'} ; \text{ en kg/cm}^2 \right)$$

## 14. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

### 14.1 Esfuerzos bajo condiciones de servicio

Para estimar los esfuerzos producidos en el acero y el concreto por acciones exteriores en condiciones de servicio, pueden utilizarse las hipótesis usuales de la teoría elástica de vigas. Si el momento de agrietamiento es mayor que el momento exterior, se considerará la sección completa del concreto sin tener en cuenta el acero. Si el momento de agrietamiento es menor que el momento actuante, se recurrirá a la sección transformada, despreciando el concreto agrietado. Para valuar el momento de agrietamiento se usará el módulo de rotura,  $\overline{f_f}$ , prescrito en el inciso 2.1.3.

### 14.2 Deflexiones

Las dimensiones de elementos de concreto reforzado deben ser tales que las deflexiones que puedan sufrir bajo condiciones de servicio o trabajo se mantengan dentro de los límites prescritos en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

#### 14.2.1 Deflexiones en elementos no presforzados que trabajan en una dirección

La deflexión total será la suma de la inmediata más la diferida.

##### 14.2.1.1 Deflexiones inmediatas

Las deflexiones que ocurren inmediatamente al aplicar la carga se calcularán con los métodos o fórmulas usuales para determinar deflexiones elásticas. A menos que se utilice un análisis más racional o que se disponga de datos experimentales, las deflexiones de elementos de concreto de peso normal se calcularán con un módulo de elasticidad congruente con el inciso 2.1.4 y con el momento de inercia efectivo,  $I_e$  calculado con la ecuación 14.2.1, pero no mayor que  $I_g$ .

$$I_e = \left( \frac{M_{ag}}{M_{m\acute{a}x}} \right)^3 I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{ag}}{M_{m\acute{a}x}} \right)^3 \right] I_{ag} \quad (14.2.1)$$

donde:

$$M_{ag} = \frac{\overline{f}_f I_g}{h_2} \quad (14.2.2)$$

$M_{m\acute{a}x}$  momento flexionante máximo correspondiente al nivel de carga para el cual se estima la deflexión; y  
 $h_2$  distancia entre el eje neutro y la fibra más esforzada en tensión.

En forma opcional, y como simplificación de la estimación anterior, se puede emplear el momento de inercia de la sección transformada agrietada ( $I_{ag}$ ) en vez del momento de inercia efectivo.

En claros continuos, el momento de inercia que se utilice será un valor promedio calculado en la forma siguiente:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + 2I_3}{4} \quad (14.2.3)$$

donde  $I_1$  e  $I_2$  son los momentos de inercia de las secciones extremas del claro e  $I_3$  el de la sección central. Si el claro sólo es continuo en un extremo, el momento de inercia correspondiente al extremo discontinuo se supondrá igual a cero, y en la ecuación 14.2.3 el denominador será igual a 3.

#### 14.2.1.2 Deflexiones diferidas

A no ser que se utilice un análisis más preciso, la deflexión adicional que ocurra a largo plazo en miembros de concreto normal clase 1, sujetos a flexión, se obtendrá multiplicando la flecha inmediata, calculada de acuerdo con el inciso 14.2.1.1 para la carga muerta y la porción de la carga viva que actúa en forma permanente y, en su caso, el efecto del presfuerzo, por el factor:

$$\frac{2}{1 + 50p'} \quad (14.2.4)$$

donde  $p'$  es la cuantía de acero a compresión ( $A_s'/bd$ ). En elementos continuos se usará un promedio de  $p'$  calculado con el mismo criterio aplicado para determinar el momento de inercia.

Para elementos de concreto normal clase 2, el numerador de la ecuación 14.2.4 será igual a 4.

### 14.3 Agrietamiento en elementos no presforzados que trabajan en una dirección

Cuando en el diseño se use un esfuerzo de fluencia mayor de 300 MPa (3 000 kg/cm<sup>2</sup>) para el refuerzo de tensión, las secciones de máximo momento positivo y negativo se dimensionarán de modo que la cantidad:

$$f_s \sqrt[3]{d_c A} \frac{h_2}{h_1} \quad (14.3.1)$$

no exceda los valores que se indican en la tabla 14.3.1, de acuerdo con la agresividad del medio a que se encuentre expuesta la estructura.

En la ecuación 14.3.1:

- $f_s$  esfuerzo en el acero en condiciones de servicio;
- $d_c$  recubrimiento de concreto medido desde la fibra extrema en tensión al centro de la barra más próxima a ella;
- A área de concreto a tensión que rodea al refuerzo principal de tensión y cuyo centroide coincide con el de dicho refuerzo, dividida entre el número de barras (cuando el refuerzo principal conste de barras de varios diámetros, el número de barras equivalente se calculará dividiendo el área total de acero entre el área de la barra de mayor diámetro);
- $h_1$  distancia entre el eje neutro y el centroide del refuerzo principal de tensión; y
- $h_2$  distancia entre el eje neutro y la fibra más esforzada en tensión.

**Tabla 14.3.1 Límites para la condición de agrietamiento**

Clasificación de exposición (tabla 4.1)	Valores máximos de la ecuación 14.3.1, en N/mm (kg/cm)
A1	40 000 (40 000)
A2	
B1	30 000 (30 000)
B2	
C	20 000 (20 000)
D	

## 14.4 Vibración

### 14.4.1 Criterio general

Los sistemas de piso susceptibles a vibración se diseñarán para que las vibraciones no tengan efectos indeseables en los usuarios de los edificios.

Cuando la frecuencia de vibración fundamental de un sistema estructural, utilizado para actividades rítmicas (como danza, conciertos, ejercicios a saltos o gimnásticos) sea menor que 6 Hz, se investigarán los posibles efectos de resonancia por medio de un análisis dinámico.

Edificios susceptibles de vibración lateral bajo cargas de viento serán diseñados para que las vibraciones no tengan efectos adversos significativos en los usuarios del edificio.

### 14.4.2 Percepción humana

La sensibilidad humana a la vibración estructural es principalmente función de la aceleración. Usualmente se cuantifica en términos de la amplitud y de la frecuencia empleando un factor de sensibilidad,  $K$ , definido como

$$K = d \frac{f^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_o}\right)^2}} \quad (14.4.1)$$

donde:

- $d$  es la amplitud de la vibración, mm
- $f$  es la frecuencia en Hz
- $f_o = 10$  Hz

En la tabla 14.4.1 se relacionan valores de  $K$  y la intensidad perceptible de vibración. El intervalo de sensibilidad se ha dividido en nueve clases, de A a I. Estas clases se correlacionan con los efectos psicológicos de la vibración sobre los humanos. Movimientos en las clases A, B, C y D generalmente se consideran como aceptables; vibraciones en las clases E y F pueden ser no placenteras pero se consideran soportables; vibraciones en las clases G, H e I no son soportables y deben evitarse.

**Tabla 14.4.1 Percepción humana de vibraciones estructurales**

K	Clase	Percepción humana
$K < 0.10$	A	Imperceptible
$0.10 \leq K < 0.25$	B	Ligeramente perceptible
$0.25 \leq K < 0.63$	C	Perceptible
$0.63 \leq K < 1.60$	D	Fácilmente perceptible
$1.60 \leq K < 4.00$	E	Fuertemente perceptible
$4.00 \leq K < 10.00$	F	Muy fuertemente perceptible
$10.00 \leq K < 25.00$	G	
$25.00 \leq K < 63.00$	H	
$63.00 \leq K$	I	

## 14.5 Resistencia al fuego

Las estructuras de concreto deben tener una resistencia al fuego mínima de 4 hr. Para lograr la citada resistencia se permite utilizar cualquier sistema de protección contra el fuego de calidad comprobada.

El diseño se basará en el Capítulo ACI 216R01 “Guide for Determining the Fire Endurance of Elements of Concrete”

## 15 CONSTRUCCIÓN

### 15.1 Cimbra

#### 15.1.1 Disposiciones generales

Toda cimbra se construirá de manera que resista las acciones a que pueda estar sujeta durante la construcción, incluyendo las fuerzas causadas por la colocación, compactación y vibrado del concreto. Debe ser lo suficientemente rígida para evitar movimientos y deformaciones excesivos; y suficientemente estanca para evitar el escurrimiento del mortero. En su geometría se incluirán las contraflechas prescritas en el proyecto.

Inmediatamente antes del colado deben limpiarse los moldes cuidadosamente. Si es necesario se dejarán registros en la cimbra para facilitar su limpieza. La cimbra de madera o de algún otro material absorbente debe estar húmeda durante un período mínimo de dos horas antes del colado. Se recomienda cubrir los moldes con algún lubricante para protegerlos y facilitar el descimbrado.

La cimbra para miembros de concreto presforzado deberá diseñarse y construirse de tal manera que permita el movimiento del elemento sin provocar daño durante la transferencia de la fuerza de presfuerzo.

#### 15.1.2 Descimbrado

Todos los elementos estructurales deben permanecer cimbrados el tiempo necesario para que el concreto alcance la resistencia suficiente para soportar su peso propio y otras cargas que actúen durante la construcción, así como para evitar que las deflexiones sobrepasen los valores fijados en el Título Sexto del Reglamento.

Los elementos de concreto presforzado deberán permanecer cimbrados hasta que la fuerza de presfuerzo haya sido aplicada y sea tal que, por lo menos, permita soportar el peso propio del elemento y las cargas adicionales que se tengan inmediatamente después del descimbrado.

### 15.2 Acero

#### 15.2.1 Disposiciones generales

El acero de refuerzo y especialmente el de presfuerzo y los ductos de postensado deben protegerse durante su transporte, manejo y almacenamiento.

Inmediatamente antes de su colocación se revisará que el acero no haya sufrido algún daño, en especial, después de un largo período de almacenamiento. Si se juzga necesario, se realizarán ensayos mecánicos en el acero dudoso.

Al efectuar el colado el acero debe estar exento de grasa, aceites, pinturas, polvo, tierra, oxidación excesiva y cualquier sustancia que reduzca su adherencia con el concreto, a excepción del uso de recubrimientos epóxicos o lodos bentoníticos.

No deben doblarse barras parcialmente ahogadas en concreto, a menos que se tomen las medidas para evitar que se dañe el concreto vecino.

Todos los dobleces se harán en frío, excepto cuando el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera de Corresponsable, permita calentamiento, pero no se admitirá que la temperatura del acero se eleve a más de la que corresponde a un color rojo café (aproximadamente 803 K [530 °C]) si no está tratado en frío, ni a más de 673 K (400 °C) en caso contrario. No se permitirá que el enfriamiento sea rápido.

Los tendones de presfuerzo que presenten algún doblez concentrado no se deben tratar de enderezar, sino que se rechazarán.

El acero debe sujetarse en su sitio con amarres de alambre, silletas y separadores, de resistencia, rigidez y en número suficiente para impedir movimientos durante el colado.

Los paquetes de barras deben amarrarse firmemente con alambre.

Antes de colar debe comprobarse que todo el acero se ha colocado en su sitio de acuerdo con los planos estructurales y que se encuentra correctamente sujeto.

### ***15.2.2 Control en la obra***

El acero de refuerzo ordinario se someterá al control siguiente, por lo que se refiere al cumplimiento de la respectiva Norma Mexicana.

Para cada tipo de barras se procederá como sigue:

De cada lote de 100 kN (10 toneladas) o fracción, formado por barras de una misma marca, un mismo grado, un mismo diámetro y correspondientes a una misma remesa de cada proveedor, se tomará un espécimen para ensaye de tensión y uno para ensaye de doblado, que no sean de los extremos de barras completas; las corrugaciones se podrán revisar en uno de dichos especímenes. Si algún espécimen presenta defectos superficiales, puede descartarse y sustituirse por otro.

Cada lote definido según el párrafo anterior debe quedar perfectamente identificado y no se utilizará en tanto no se acepte su empleo con base en resultados de los ensayos. Éstos se realizarán de acuerdo con la norma NMX-B-172. Si algún espécimen no cumple con los requisitos de tensión especificados en la norma, se permitirá repetir la prueba como se señala en la misma norma.

En sustitución del control de obra, el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera Corresponsable, podrá admitir la garantía escrita del fabricante de que el acero cumple con la norma correspondiente; en su caso, definirá la forma de revisar que se cumplan los requisitos adicionales para el acero, establecidos en el inciso 8.1.1.2.

### ***15.2.3 Requisitos y control de calidad de las uniones soldadas***

#### ***15.2.3.1 Requisitos***

Las uniones de barras unidas con soldadura deberán cumplir con los requisitos establecidos en 6.6, 6.6.1.4, y 6.6.1.5. Adicionalmente, para que las barras de refuerzo sean soldables, el carbón equivalente, calculado a partir del análisis químico del acero con la expresión 15.2.1, no debe exceder de 0.55 por ciento.

$$C.E. = \% C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (15.2.1)$$

Además se debe cumplir con los porcentajes máximos de los elementos indicados a continuación.

<b>Elemento</b>	<b>% máximo</b>
Carbón	0.33
Manganeso	1.56
Fósforo	0.043
Azufre	0.053
Silicón	0.55

Las uniones soldadas se deben realizar de acuerdo con las especificaciones y métodos expuestos en Structural Welding Code Reinforcing Steel AWS D1.4 y D12.1.

#### 15.2.3.2 Control de calidad

El objeto del control de calidad es verificar que las soldaduras satisfacen las especificaciones de la obra.

Se deben establecer las condiciones necesarias para asegurar una supervisión simultánea al avance del trabajo sin esperar que todas las soldaduras estén terminadas para revisarlas.

Durante la inspección, se debe verificar que:

- El acero de refuerzo que se va a soldar es el indicado en los planos y especificaciones de proyecto, y si sus características de soldabilidad son las requeridas.
- Todos los soldadores que van a intervenir en el trabajo estén calificados.
- El equipo que se debe utilizar es el adecuado y está en condiciones correctas de operación.
- Las caras y los bordes de las partes en que se va a colocar soldadura no tengan defectos inaceptables.
- En la preparación de las juntas, el ángulo de inclinación de los biselés, la abertura de la raíz, etc., sean correctos.
- La limpieza de las zonas en que se debe depositar la soldadura, el alineamiento de las barras que se van a empalmar y los dispositivos empleados para mantenerlas en posición, sean los especificados.
- El diámetro y el tipo de electrodo, la posición en que debe depositarse la soldadura, las características de las corriente (amperaje, voltaje, polaridad) y la velocidad de colocación de los cordones, sean los especificados.

#### a) Inspección visual

Terminadas las juntas de una zona y antes de que se coloque el concreto, debe hacerse una inspección visual.

No es necesario que el inspector revise personalmente cada uno de los cordones de todas las juntas, pero la inspección debe realizarse en al menos el 50 por ciento de ellas. El objeto de la inspección visual es observar los siguientes aspectos:

- Dimensiones, distribución, tamaño, contorno y continuidad de las soldaduras.
- Apariencia de las soldaduras.
- Defectos superficiales, tales como grietas, poros, cráteres, socavación, etc. Aunque una soldadura con defectos internos de importancia puede en algunas ocasiones presentar una buena apariencia exterior, ésta es, en la mayor parte de los casos, un indicio de que la soldadura se ha hecho correctamente.

- El inspector debe identificar con marcas fácilmente visibles, todas las partes o juntas que requieren correcciones o sustitución, y volver a marcarlas cuando las haya aceptado.

#### b) Inspección radiográfica y pruebas destructivas

La inspección radiográfica y las pruebas destructivas de tensión, no sustituyen la supervisión e inspección visuales durante la colocación de la soldadura y demás operaciones relacionadas con ella, efectuadas a través de todo el proceso.

La inspección radiográfica es conveniente para determinar la calidad final de algunos empalmes, escogidos de manera que sean representativos del resto, lo que permite comprobar si por medio de la inspección visual se han obtenido los resultados deseados.

La radiografía y las pruebas destructivas no deben emplearse nunca aisladamente, sino como un complemento de la inspección visual y del control mantenidos a través de todas las etapas.

##### Inspección radiográfica.

En las especificaciones de construcción se debe de indicar el número o porcentaje de juntas que se deben radiografiar.

En estructuras especiales o en zonas críticas de estructuras ordinarias, debe especificarse que se radiografie un porcentaje elevado, o aún la totalidad de las uniones soldadas a tope; en general, se deben tomar radiografías de al menos 10 por ciento de las juntas.

##### Pruebas destructivas.

La obtención de los especímenes para las pruebas destructivas de tensión, deben llevarse a cabo en forma continua, durante todo el proceso de construcción y no debe autorizarse algún colado sin que se conozcan previamente los resultados obtenidos en las pruebas efectuadas en juntas de la zona en donde el concreto se va a colocar.

Se consideran inaceptables las uniones en las que la fractura se presenta en la soldadura o en la zona inmediata a ella, bajo una carga menor que la correspondiente a 1.25 del esfuerzo de fluencia de la barra, o cuando la fractura se presente bajo una carga mayor, pero la ductilidad del espécimen, medida en porcentaje de la longitud inicial de 200 mm, disminuye a menos de los dos tercios de la especificada para la barra, o a menos del cuatro por ciento.

Los especímenes deben ser representativos de la totalidad de las juntas efectuadas en la obra, y se escogen de las uniones que, de acuerdo con la inspección visual, tiene más probabilidades de resultar defectuosas. En estas condiciones suele ser suficiente un número de pruebas destructivas mínimo de cinco por ciento del total de las uniones.

#### ***15.2.4 Requisitos y control de calidad de uniones con dispositivos mecánicos***

##### *15.2.4.1 Requisitos*

Las uniones de barras de refuerzo con dispositivos mecánicos deben cumplir con los requisitos establecidos en 6.6, 6.6.1.4 y 6.6.1.6.

##### *15.2.4.2 Control de calidad*

El control de calidad de las uniones con dispositivos mecánicos se realizará mediante inspección visual para verificar que las uniones se realizaron de acuerdo con las instrucciones del fabricante de los dispositivos de unión y mediante pruebas destructivas a tensión de una muestra obtenida de las uniones efectuadas en obra. El número de elementos que forma la muestra será de al menos 5 por ciento del total de las uniones.

Se considera que las uniones con dispositivos mecánicos Tipo 1 tienen un desempeño satisfactorio si la falla se presenta por fractura de la barra fuera de la zona de unión (no por deslizamiento de la barra dentro del dispositivo mecánico) a una carga

mayor que la correspondiente a un esfuerzo de  $1.25 f_y$  y el módulo de elasticidad del sistema barra-conector, determinado en la zona de unión sobre una longitud inicial de medición de 200 mm, es al menos igual a 50 por ciento del correspondiente al de las barras de refuerzo.

Para las uniones con dispositivos mecánicos Tipo 2, el desempeño se considera satisfactorio si la carga de falla es igual o mayor que la correspondiente al esfuerzo máximo especificado para las barras que se unen, además de cumplir con los otros requisitos que se especifican para las uniones con dispositivos mecánicos Tipo 1.

### 15.2.5 Extensiones futuras

Todo el acero de refuerzo, así como las placas y, en general, todas las preparaciones metálicas que queden expuestas a la intemperie con el fin de realizar extensiones a la construcción en el futuro, deberán protegerse contra la corrosión y contra el ataque de agentes externos.

## 15.3 Concreto

### 15.3.1 Materiales componentes

La calidad y proporciones de los materiales componentes del concreto serán tales que se logren la resistencia, rigidez y durabilidad necesarias.

La calidad de todos los materiales componentes del concreto deberá verificarse antes del inicio de la obra y también cuando exista sospecha de cambio en las características de los mismos o haya cambio de las fuentes de suministro. Esta verificación de calidad se realizará a partir de muestras tomadas del sitio de suministro o del almacén del productor de concreto. El Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera Corresponsable, en lugar de esta verificación podrá admitir la garantía del fabricante del concreto de que los materiales fueron ensayados en un laboratorio acreditado por la entidad de acreditación reconocida en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y que cumplen con los requisitos establecidos en la sección 2.1 y los que a continuación se indican. En cualquier caso podrá ordenar la verificación de la calidad de los materiales cuando lo juzgue procedente.

Los materiales pétreos, grava y arena, deberán cumplir con los requisitos de la norma NMX-C-111-ONNCCE, con las modificaciones y adiciones de la tabla 15.3.1.

**Tabla 15.3.1 Requisitos adicionales para materiales pétreos**

Propiedad	Concreto clase 1	Concreto clase 2
Coefficiente volumétrico de la grava, mínimo	0.20	—
Material más fino que la malla F 0.075 (No. 200) en la arena, porcentaje máximo en peso (NMX-C-084-ONNCCE)	15	15
Contracción lineal de los finos (pasan la malla No. 40) de la arena y la grava, en la proporción en que éstas intervienen en el concreto, a partir del límite líquido, porcentaje máximo	2	3

En adición a la frecuencia de verificación estipulada para todos los materiales componentes al principio de esta sección, los requisitos especiales precedentes deberán verificarse cuando menos una vez por mes para el concreto clase 1.

Los límites correspondientes a estos requisitos especiales pueden modificarse si el fabricante del concreto demuestra, con pruebas realizadas en un laboratorio acreditado por la entidad de acreditación reconocida en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, que con los nuevos valores se obtiene concreto que cumpla con el requisito de módulo de elasticidad establecido en la sección 15.3.4.3. En tal caso, los nuevos límites serán los que se apliquen en la verificación de estos requisitos para los agregados específicamente considerados en dichas pruebas.

### 15.3.2 Elaboración del concreto

El concreto podrá ser dosificado en una planta central y transportado a la obra en camiones revolvedores, o dosificado y mezclado en una planta central y transportado a la obra en camiones agitadores, o bien podrá ser elaborado directamente en la obra; en todos los casos deberá cumplir con los requisitos de elaboración que aquí se indican. La dosificación establecida no deberá alterarse, en especial, el contenido de agua.

El concreto clase 1, premezclado o hecho en obra, deberá ser elaborado en una planta de dosificación y mezclado de acuerdo con los requisitos de elaboración establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE.

El concreto clase 2, si es premezclado, deberá satisfacer los requisitos de elaboración de la norma NMX-C-155-ONNCCE. Si es hecho en obra, podrá ser dosificado en peso o en volumen, pero deberá ser mezclado en una revolvedora mecánica, ya que no se permitirá la mezcla manual de concreto estructural.

### 15.3.3 Requisitos y control del concreto fresco

Al concreto en estado fresco, antes de su colocación en las cimbras, se le harán pruebas para verificar que cumple con los requisitos de revenimiento y peso volumétrico. Estas pruebas se realizarán al concreto muestreado en obra, con las frecuencias de la tabla 15.3.2 como mínimo.

**Tabla 15.3.2 Frecuencia mínima para toma de muestras de concreto fresco**

Prueba y método	Concreto clase 1	Concreto clase 2
Revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE)	Una vez por cada entrega, si es premezclado.	Una vez por cada entrega, si es premezclado.
	Una vez por cada revoltura, si es hecho en obra.	Una vez por cada 5 revolturas, si es hecho en obra.
Peso volumétrico (NMX-C-162-ONNCCE)	Una vez por cada día de colado, pero no menos de una vez por cada 20 m <sup>3</sup> de concreto.	Una vez por cada día de colado, pero no menos de una vez por cada 40 m <sup>3</sup> .

El revenimiento será el mínimo requerido para que el concreto fluya a través de las barras de refuerzo y para que pueda bombearse en su caso, así como para lograr un aspecto satisfactorio. El revenimiento nominal de los concretos no será mayor de 120 mm. Para permitir la colocación del concreto en condiciones difíciles, o para que pueda ser bombeado, se autoriza aumentar el revenimiento nominal hasta un máximo de 180 mm, mediante el uso de aditivo superfluidificante, de manera que no se incremente el contenido unitario de agua. En tal caso, la verificación del revenimiento se realizará en la obra antes y después de incorporar el aditivo superfluidificante, comparando con los valores nominales de 120 y 180 mm, respectivamente. Las demás propiedades, incluyendo las del concreto endurecido, se determinarán en muestras que ya incluyan dicho aditivo.

El Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera Corresponsable, podrá autorizar la incorporación del aditivo superfluidificante en la planta de premezclado para cumplir con revenimientos nominales mayores de 120 mm y estará facultado para inspeccionar tal operación en la planta cuando lo juzgue procedente.

Si el concreto es premezclado y se surte con un revenimiento nominal mayor de 120 mm, deberá ser entregado con un comprobante de incorporación del aditivo en planta; en la obra se medirá el revenimiento para compararlo con el nominal máximo de 180 mm.

Para que el concreto cumpla con el requisito de revenimiento, su valor determinado deberá concordar con el nominal especificado, con las tolerancias indicadas en la tabla 15.3.3.

Estas tolerancias también se aplican a los valores nominales máximos de 120 y 180 mm.

Para que el concreto cumpla con el requisito de peso volumétrico en estado fresco o endurecido, su valor determinado deberá ser mayor de 22 kN/m<sup>3</sup> (2 200 kg/m<sup>3</sup>) para el concreto clase 1, y no menor de 19 kN/m<sup>3</sup> (1 900 kg/m<sup>3</sup>) para el concreto clase 2.

**Tabla 15.3.3 Tolerancias para revenimientos**

Revenimiento nominal, mm	Tolerancia, mm
menor de 50	± 15
50 a 100	± 25
mayor de 100	± 35

**15.3.4 Requisitos y control del concreto endurecido**

**15.3.4.1 Resistencia media de diseño de la mezcla**

La resistencia media a la compresión requerida,  $\bar{f}_c$ , usada como base para la dosificación del concreto debe ser igual al mayor valor determinado según la tabla 15.3.4, empleando el valor de desviación estándar,  $\sigma$ , determinado de acuerdo con la expresión:

$$S = \sqrt{\frac{S(x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (15.3.1)$$

en la que

- $\sigma$  es la desviación estándar de la muestra:
- $x_i$  es el resultado individual de resistencia a compresión
- $\bar{X}$  es el promedio de  $n$  resultados de ensaye de resistencia a compresión
- $n$  es el número de ensayos consecutivos de resistencia a compresión

El control de calidad en la producción de concreto debe ser el requerido para que la desviación estándar sea igual o menor que 3.5 MPa (35 kg/cm<sup>2</sup>) para  $f_c'$  menor a 40 MPa (400 kg/cm<sup>2</sup>) e igual o menor que  $0.1f_c'$  para concretos con  $f_c'$  mayor o igual a 40 MPa (400 kg/cm<sup>2</sup>).

**Tabla 15.3.4 Resistencia a la compresión media requerida**

Clase de concreto	Resistencia a la compresión especificada, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión promedio requerida, MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
1	$f_c' < 40$ ( $f_c' < 400$ )	$\bar{f}_c = f_c' + 1.34\sigma$ $\bar{f}_c = f_c' + 2.33\sigma - 3.5$ ( $\bar{f}_c = f_c' + 2.33\sigma - 35$ )
	$f_c' \geq 40$ ( $f_c' \geq 400$ )	$\bar{f}_c = f_c' + 1.34\sigma$ $\bar{f}_c = 0.9f_c' + 2.33\sigma$
2	$f_c' \geq 20$ ( $f_c' \geq 200$ )	$\bar{f}_c = f_c' + 1.34\sigma - 1.7$ ( $\bar{f}_c = f_c' + 1.34\sigma - 17$ )
		$\bar{f}_c = f_c' + 2.33\sigma - 5.0$
		( $\bar{f}_c = f_c' + 2.33\sigma - 50$ )

**15.3.4.2 Resistencia a compresión**

La calidad del concreto endurecido se verificará mediante pruebas de resistencia a compresión en cilindros elaborados, curados y probados de acuerdo con las normas NMX-C-160-ONNCCE y NMX-C-83-ONNCCE, en un laboratorio acreditado por la entidad de acreditación reconocida en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Cuando la mezcla de concreto se diseñe para obtener la resistencia especificada a 14 días, las pruebas anteriores se efectuarán a esta edad; de lo contrario, las pruebas deberán efectuarse a los 28 días de edad.

Para verificar la resistencia a compresión de concreto de las mismas características y nivel de resistencia, se tomará como mínimo una muestra por cada día de colado, pero al menos una por cada 40 m<sup>3</sup>; cuando el concreto se emplea para el colado de columnas, se tomará por lo menos una muestra por cada 10 m<sup>3</sup>.

De cada muestra se elaborarán y ensayarán al menos dos cilindros; se entenderá por resistencia de una muestra el promedio de las resistencias de los cilindros que se elaboren de ella.

Para el concreto clase 1 con resistencia a la compresión especificada menor a 40 MPa (400 kg/cm<sup>2</sup>) se admitirá que la resistencia del concreto cumple con la resistencia especificada,  $f_c'$ , si ninguna muestra da una resistencia inferior a  $f_c' - 3.5$  MPa ( $f_c' - 35$  kg/cm<sup>2</sup>), y, además, si ningún promedio de resistencias de todos los conjuntos de tres muestras consecutivas, pertenecientes o no al mismo día de colado, es menor que  $f_c'$ .

Para el concreto clase 1 con resistencia a la compresión especificada mayor o igual a 40 MPa (400 kg/cm<sup>2</sup>) se admitirá que la resistencia del concreto cumple con la resistencia especificada,  $f_c'$ , si ninguna muestra da una resistencia inferior a  $0.9f_c'$ , y, además, si ningún promedio de resistencias de todos los conjuntos de tres muestras consecutivas, pertenecientes o no al mismo día de colado, es menor que  $f_c'$ .

Para el concreto clase 2, se admitirá que la resistencia del concreto cumple con la resistencia especificada,  $f_c'$ , si ninguna muestra da una resistencia inferior a  $f_c' - 5$  MPa ( $f_c' - 50$  kg/cm<sup>2</sup>), y, además, si ningún promedio de resistencias de todos los conjuntos de tres muestras consecutivas, pertenecientes o no al mismo día de colado, es menor que  $f_c' - 1.7$  MPa ( $f_c' - 17$  kg/cm<sup>2</sup>).

Si sólo se cuenta con dos muestras, el promedio de las resistencias de ambas no será inferior a  $f_c' - 0.3\sigma$  (MPa o kg/cm<sup>2</sup>) para concretos clase 1 de cualquier resistencia a la compresión especificada, ni a  $f_c' - 2.8$  MPa ( $f_c' - 28$  kg/cm<sup>2</sup>), para clase 2, además de cumplir con el respectivo requisito concerniente a las muestras tomadas una por una.

Cuando el concreto no cumpla con el requisito de resistencia, el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera Corresponsable, tomará las medidas conducentes para garantizar la seguridad de la estructura. Estas medidas estarán basadas principalmente en el buen criterio de los responsables mencionados; como factores de juicio deben considerarse, entre otros, el tipo de elemento en que no se alcanzó el nivel de resistencia especificado, el monto del déficit de resistencia y el número de muestras o grupos de ellas que no cumplieron. En ocasiones debe revisarse el proyecto estructural a fin de considerar la posibilidad de que la resistencia que se obtuvo sea suficiente.

Si subsiste la duda sobre la seguridad de la estructura se podrán extraer y ensayar corazones, de acuerdo con la norma NMX-C-169-ONNCCE, del concreto en la zona representada por los cilindros que no cumplieron. Se probarán tres corazones por cada incumplimiento con la calidad especificada. La humedad de los corazones al probarse debe ser representativa de la que tenga la estructura en condiciones de servicio (ver sección 16.7.3).

El concreto clase 1 representado por los corazones se considerará adecuado si el promedio de las resistencias de los tres corazones es mayor o igual que  $0.85f_c'$  y la resistencia de ningún corazón es menor que  $0.75f_c'$ . El concreto clase 2 representado por los corazones se considerará adecuado si el promedio de las resistencias de los tres corazones es mayor o igual que  $0.80f_c'$  y la resistencia de ningún corazón es menor que  $0.70f_c'$ . Para comprobar que los especímenes se extrajeron y ensayaron correctamente, se permite probar nuevos corazones de las zonas representadas por aquellos que hayan dado resistencias erráticas. Si la resistencia de los corazones ensayados no cumple con el criterio de aceptación que se ha descrito, el responsable en cuestión nuevamente debe decidir a su juicio y responsabilidad las medidas que han de tomarse. Puede optar por reforzar la estructura hasta lograr la resistencia necesaria, o recurrir a realizar pruebas de carga (artículo 185 del Reglamento) en elementos no destinados a resistir sismo, u ordenar la demolición de la zona de resistencia escasa, etc. Si el concreto se compra ya elaborado, en el contrato de compraventa se establecerán, de común acuerdo entre el fabricante y el consumidor, las responsabilidades del fabricante en caso de que el concreto no cumpla con el requisito de resistencia.

### 15.3.4.3 Módulo de elasticidad

El concreto debe cumplir con el requisito de módulo de elasticidad especificado en la tabla 15.3.5. Debe cumplirse tanto el requisito relativo a una muestra cualquiera, como el que se refiere a los conjuntos de dos muestras consecutivas.

Para la verificación anterior se tomará una muestra por cada 100 metros cúbicos, o fracción, de concreto, pero no menos de dos en una cierta obra. De cada muestra se fabricarán y ensayarán al menos tres especímenes. Se considerará como módulo de elasticidad de una muestra, el promedio de los módulos de los tres especímenes elaborados con ella. El módulo de elasticidad se determinará según la norma NMX-C-128-ONNCCE.

**Tabla 15.3.5 Requisitos para el módulo de elasticidad**

	Módulo de elasticidad a 28 días de edad, MPa (kg/cm <sup>2</sup> ), mínimo.				
	Alta resistencia		Clase 1		Clase 2
	Caliza <sup>1</sup>	Basalto <sup>1</sup>	Caliza <sup>1</sup>	Basalto <sup>1</sup>	Andesita <sup>1</sup>
Una muestra cualquiera	$2\,700\sqrt{f'_c}+8\,500$ ( $8\,500\sqrt{f'_c}+84\,800$ )	$2\,700\sqrt{f'_c}+3\,300$ ( $8\,500\sqrt{f'_c}+33\,200$ )	$4\,000\sqrt{f'_c}$ ( $12\,700\sqrt{f'_c}$ )	$3\,100\sqrt{f'_c}$ ( $9\,700\sqrt{f'_c}$ )	$2\,200\sqrt{f'_c}$ ( $7\,000\sqrt{f'_c}$ )
Además, promedio de todos los conjuntos de dos muestras consecutivas	$2\,700\sqrt{f'_c}+10\,100$ ( $8\,500\sqrt{f'_c}+101\,100$ )	$2\,700\sqrt{f'_c}+4\,400$ ( $8\,500\sqrt{f'_c}+44\,100$ )	$4\,300\sqrt{f'_c}$ ( $13\,500\sqrt{f'_c}$ )	$3\,300\sqrt{f'_c}$ ( $10\,500\sqrt{f'_c}$ )	$2\,300\sqrt{f'_c}$ ( $7\,400\sqrt{f'_c}$ )

<sup>1</sup> Agregado grueso

El Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera Corresponsable, no estará obligado a exigir la verificación del módulo de elasticidad; sin embargo, si a su criterio las condiciones de la obra lo justifican, podrá requerir su verificación, o la garantía escrita del fabricante de que el concreto cumple con él. En dado caso, la verificación se realizará en un laboratorio acreditado por la entidad de acreditación reconocida en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Cuando el concreto no cumpla con el requisito mencionado, el responsable de la obra evaluará las consecuencias de la falta de cumplimiento y determinará las medidas que deberán tomarse. Si el concreto se compra ya elaborado, en el contrato de compraventa se establecerán, de común acuerdo entre el fabricante y el consumidor, las responsabilidades del fabricante por incumplimiento del requisito antedicho.

### 15.3.5 Transporte

Los métodos que se empleen para transportar el concreto serán tales que eviten la segregación o pérdida de sus ingredientes.

### 15.3.6 Colocación y compactación

Antes de efectuar un colado debe limpiarse el lugar donde se va a depositar el concreto.

Los procedimientos de colocación y compactación serán tales que aseguren una densidad uniforme del concreto y eviten la formación de huecos.

El lugar en el que se colocará el concreto deberá cumplir con lo siguiente:

- Estar libre de material suelto como partículas de roca, polvo, clavos, tornillos, tuercas, basura, etc.;
- Los moldes que recibirán al concreto deben estar firmemente sujetos;
- Las superficies de mampostería que vayan a estar en contacto con el concreto deberán humedecerse previamente al colado;
- El acero de refuerzo deberá estar completamente limpio y adecuadamente colocado y sujeto; y

e) No deberá existir agua en el lugar del colado, a menos que se hayan tomado las medidas necesarias para colar concreto en agua.

No se permitirá la colocación de concreto contaminado con materia orgánica.

El concreto se vaciará en la zona del molde donde vaya a quedar en definitiva y se compactará con picado, vibrado o apisonado. El concreto autocompactante se compactará mediante su propio peso.

No se permitirá trasladar el concreto mediante el vibrado.

### ***15.3.7 Temperatura***

Cuando la temperatura ambiente durante el colado o poco después sea inferior a 278 K (5 °C), se tomarán las precauciones especiales tendientes a contrarrestar el descenso en resistencia y el retardo en endurecimiento, y se verificará que estas características no hayan sido desfavorablemente afectadas.

### ***15.3.8 Morteros aplicados neumáticamente***

El mortero aplicado neumáticamente satisfará los requisitos de compacidad, resistencia y demás propiedades que especifique el proyecto. Se aplicará perpendicularmente a la superficie en cuestión, la cual deberá estar limpia y húmeda (ver 12.6).

### ***15.3.9 Curado***

El concreto debe mantenerse en un ambiente húmedo por lo menos durante siete días en el caso de cemento ordinario y tres días si se empleó cemento de alta resistencia inicial. Estos lapsos se aumentarán si la temperatura desciende a menos de 278 K (5 °C); en este caso también se observará lo dispuesto en el inciso 15.3.7.

Para acelerar la adquisición de resistencia y reducir el tiempo de curado, puede usarse el curado con vapor a alta presión, vapor a presión atmosférica, calor y humedad, o algún otro proceso que sea aceptado. El proceso de curado que se aplique debe producir concreto cuya durabilidad sea por lo menos equivalente a la obtenida con curado en ambiente húmedo prescrito en el párrafo anterior.

### ***15.3.10 Juntas de colado***

Las juntas de colado se ejecutarán en los lugares y con la forma que indiquen los planos estructurales. Antes de iniciar un colado las superficies de contacto se limpiarán y saturarán con agua. Se tomará especial cuidado en todas las juntas de columnas y muros en lo que respecta a su limpieza y a la remoción de material suelto o poco compacto.

### ***15.3.11 Tuberías y ductos incluidos en el concreto***

Con las excepciones indicadas en el párrafo que sigue, se permitirá la inclusión de tuberías y ductos en los elementos de concreto, siempre y cuando se prevean en el diseño estructural, sean de material no perjudicial para el concreto y sean aprobados por el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra cuando no se requiera Corresponsable.

No se permitirá la inclusión de tuberías y ductos de aluminio en elementos de concreto, a menos que se tengan cubiertas o protecciones especiales para evitar la reacción aluminio–concreto y la reacción electrolítica entre aluminio y acero de refuerzo. No se permitirá la inclusión de tuberías y ductos longitudinales en columnas y en elementos de refuerzo en los extremos de muros.

Las tuberías y los ductos incluidos en los elementos no deberán afectar significativamente la resistencia de dichos elementos ni de la construcción en general. Asimismo, no deberán impedir que el concreto penetre, sin segregarse, en todos los intersticios.

Excepto cuando se haya establecido en los planos o haya sido aprobado por el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra cuando no se requiera Corresponsable, las tuberías y los ductos incluidos en losas, muros y trabes de concreto deberán cumplir con lo siguiente:

- a) El diámetro exterior no será mayor que  $1/3$  del espesor de la losa o del ancho del muro y de la trabe;
- b) Estarán colocados con una separación, medida centro a centro, mayor que 3 veces el diámetro de los ductos; y
- c) No deberán afectar significativamente la resistencia estructural de los elementos de concreto.

Las tuberías y los ductos deberán diseñarse para resistir los efectos del concreto, la presión y la temperatura a la que estarán expuestos al quedar incluidos en el concreto.

Las tuberías no deberán contener líquidos, gas, vapor ni agua a altas temperaturas ni a altas presiones, hasta que el concreto haya alcanzado completamente la resistencia de diseño.

En losas, las tuberías y los ductos deberán quedar incluidos entre el acero de refuerzo inferior y superior, a menos que sean para captar agua o materiales exteriores.

El recubrimiento mínimo para tuberías y ductos no será menor que 40 mm para elementos expuestos a la intemperie o en contacto con el terreno, ni menor que 20 mm para elementos no expuestos a la intemperie y que no están en contacto con el terreno.

Las tuberías y ductos deberán construirse y colocarse de tal manera que no se requiera cortar, doblar, ni mover de su posición original el acero de refuerzo.

## **15.4 Requisitos para concreto presforzado**

### ***15.4.1 Prácticas de Construcción***

Los equipos de tensado deberán de calibrarse por lo menos una vez al año o cada 100 usos.

Los moldes y cimbras deberán de quedar limpios después de cada uso y se deberá de revisar y asegurar su alineamiento.

Todos los dispositivos y anclajes de presfuerzo deben de inspeccionarse y estar limpios antes de usarse y se deben de remover con métodos y herramientas adecuados.

Las contraflechas después de la transferencia del presfuerzo deben de medirse y compararse con las calculadas.

En el caso de piezas postensadas se deberá de medir y comparar la longitud inicial con la final (acortamiento). El anclaje se debe de sellar y proteger de manera adecuada.

Es obligatorio llevar registros exactos de cada pieza que incluyen: inspección de camas, moldes y cimbras, registros de tensado, registros de calidad iniciales y finales de los materiales, evaluación del producto final, dimensiones finales y comparativa con tolerancias.

### ***15.4.2 Lechada para tendones adheridos***

La lechada para inyección debe ser de cemento portland y agua, o de cemento portland, arena y agua. Para mejorar la manejabilidad y reducir el sangrado y la contracción, pueden usarse aditivos que no sean dañinos a la lechada, al acero, ni al concreto. No debe utilizarse cloruro de calcio.

El proporcionamiento de la lechada debe basarse en lo señalado en alguno de los dos incisos siguientes:

- a) Resultados de ensayos sobre lechada fresca y lechada endurecida realizados antes de iniciar las operaciones de inyección;
- o

b) Experiencia previa documentada, con materiales y equipo semejantes y en condiciones de campo comparables.

El contenido de agua será el mínimo necesario para que la lechada pueda bombearse adecuadamente, pero no será mayor de 0.50 con relación al cementante, en peso.

La lechada debe mezclarse con equipo capaz de suministrar mezclado y agitación mecánicos continuos que den lugar a una distribución uniforme de los materiales; asimismo, debe cribarse y bombearse de modo que llene completamente los ductos de los tendones.

La temperatura del elemento presforzado, cuando se inyecte la lechada, debe ser mayor de 275 K (2 °C), y debe mantenerse por encima de este valor hasta que la resistencia de cubos de 50 mm, fabricados con la lechada y curados en la obra, llegue a 5.5 MPa (55 kg/cm<sup>2</sup>). Las características de la lechada se determinarán de acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCCE.

Durante el mezclado y el bombeo, la temperatura de la lechada no debe exceder de 303 K (30 °C).

#### **15.4.3 Tendones de presfuerzo**

Las operaciones con soplete y las de soldadura en la proximidad del acero de presfuerzo deben realizarse de modo que éste no quede sujeto a temperaturas excesivas, chispas de soldadura, o corrientes eléctricas a tierra.

#### **15.4.4 Aplicación y medición de la fuerza de presfuerzo**

La fuerza de presfuerzo se determinará con un dinamómetro o una celda de carga, o midiendo la presión en el aceite del gato con un manómetro y, además, midiendo el alargamiento del tendón. Debe determinarse y corregirse la causa de toda discrepancia mayor de 5 por ciento entre la fuerza determinada a partir del alargamiento del tendón y la obtenida con el otro procedimiento. Para determinar a qué alargamiento corresponde una cierta fuerza de presfuerzo se usarán las curvas medias fuerza-alargamiento de los tendones empleados.

Cuando la fuerza de pretensado se transfiera al concreto cortando los tendones con soplete, la localización de los cortes y el orden en que se efectúen deben definirse de antemano con el criterio de evitar esfuerzos temporales indeseables. Los tramos largos de torones expuestos se cortarán cerca del elemento presforzado para reducir al mínimo el impacto sobre el concreto.

La pérdida total de presfuerzo debida a tendones rotos no repuestos no debe exceder de dos por ciento del presfuerzo total.

### **15.5 Requisitos para estructuras prefabricadas**

El Corresponsable en Seguridad Estructural deberá aprobar el procedimiento constructivo establecido y los planos y documentos con las secuencias y limitaciones de erección y montaje, desarrolladas en conjunto por el Proyectista, el montador, el constructor y el Director Responsable de Obra, con el fin de garantizar la estabilidad total de la estructura. Debe verificarse que los dispositivos y procedimientos constructivos empleados garanticen que los miembros prefabricados y el conjunto de la estructura, se mantengan correctamente y de forma estable en su posición, durante todas las etapas constructivas.

Los medios de sujeción o rigidización temporales, el equipo de izado, los apoyos provisionales, y demás componentes y elementos necesarios para la construcción deben diseñarse para las fuerzas que puedan presentarse durante el montaje, incluyendo los efectos de sismo y viento (según las Normas Técnicas Complementarias correspondientes), así como las deformaciones que se prevea ocurrirán durante estas operaciones. Los factores de carga serán los determinados por las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. En caso de ser necesario y para asegurar la estabilidad durante todas las etapas constructivas se deberán proporcionar elementos estructurales temporales o conexiones a desarrollar en etapas.

Se deberá demostrar que las conexiones de los elementos estructurales durante la construcción son seguras y estables en todo momento de modo que la transmisión de esfuerzos permita el izaje y montaje de elementos de los siguientes niveles.

Adicionalmente a las notas en los planos, el Corresponsable en Seguridad Estructural deberá aprobar los protocolos de seguridad diseñados conjuntamente por el Proyectista, el montador, el constructor y el Director Responsable de Obra para

todas las etapas de construcción, a fin de evitar accidentes y salvaguardar vidas. Estos protocolos deberán indicar preparaciones, distancias de acercamiento y alejamiento, posiciones permitidas de personal para ayuda en maniobras de montaje, zonas de acordonamiento y prohibición, desalojos, etc.

## 15.6 Tolerancias

### 15.6.1 Tolerancias en elementos colados en sitio

Las tolerancias que a continuación se señalan rigen con respecto a los planos constructivos del proyecto ajustado como se especifica en el Título Séptimo del Reglamento.

- a) Las dimensiones de la sección transversal de un miembro no excederán de las del proyecto en más de  $10 \text{ mm} + 0.05x$ , siendo  $x$  la dimensión en la dirección en que se considera la tolerancia, ni serán menores que las del proyecto en más de  $3 \text{ mm} + 0.03x$ .
- b) El espesor de zapatas, losas, muros y cascarones no excederá al de proyecto en más de  $5 \text{ mm} + 0.05t$ , siendo  $t$  el espesor de proyecto, ni será menor que éste en más de  $3 \text{ mm} + 0.03t$ .
- c) En cada planta se trazarán los ejes de acuerdo con el proyecto ajustado, con tolerancia de un centímetro. Toda columna quedará desplantada de tal manera que su eje no diste, del que se ha trazado, más de  $10 \text{ mm}$  más dos por ciento de la dimensión transversal de la columna paralela a la desviación. Además, no deberá excederse esta cantidad en la desviación del eje de la columna, con respecto al de la columna inmediata inferior.
- d) La tolerancia en desplomo de una columna será de  $5 \text{ mm}$  más dos por ciento de la dimensión de la sección transversal de la columna paralela a la desviación.
- e) El eje centroidal de una columna no deberá distar de la recta que une los centroides de las secciones extremas, más de  $5 \text{ mm}$  más uno por ciento de la dimensión de la columna paralela a la desviación.
- f) La posición de los ejes de vigas con respecto a los de las columnas donde apoyan no deberá diferir de la de proyecto en más de  $10 \text{ mm}$  más dos por ciento de la dimensión de la columna paralela a la desviación, ni más de  $10 \text{ mm}$  más dos por ciento del ancho de la viga.
- g) El eje centroidal de una viga no deberá distar de la recta que une los centroides de las secciones extremas, más de  $10 \text{ mm}$  más dos por ciento de la dimensión de la viga paralela a la desviación.
- h) En ningún punto la distancia medida verticalmente entre losas de pisos consecutivos, diferirá de la de proyecto más de  $30 \text{ mm}$ , ni la inclinación de una losa respecto a la de proyecto más de uno por ciento.
- i) La desviación angular de una línea de cualquier sección transversal de un miembro respecto a la dirección que dicha línea tendría según el proyecto, no excederá de cuatro por ciento.
- j) La localización de dobleces y cortes de barras longitudinales no debe diferir en más de  $10 \text{ mm} + 0.01L$  de la señalada en el proyecto, siendo  $L$  el claro, excepto en extremos discontinuos de miembros donde la tolerancia será de  $10 \text{ mm}$ .
- k) La posición de refuerzo de losas, zapatas, muros, cascarones, arcos y vigas será tal que no reduzca el peralte efectivo,  $d$ , en más de  $3 \text{ mm} + 0.03d$  ni reduzca el recubrimiento en más de  $5 \text{ mm}$ . En columnas rige la misma tolerancia, pero referida a la mínima dimensión de la sección transversal, en vez del peralte efectivo. La separación entre barras no diferirá de la de proyecto más de  $10 \text{ mm}$  más diez por ciento de dicha separación, pero en todo caso respetando el número de barras y su diámetro, y de tal manera que permita pasar al agregado grueso.
- l) Las dimensiones del refuerzo transversal de vigas y columnas, medidas según el eje de dicho refuerzo, no excederá a las del proyecto en más de  $10 \text{ mm} + 0.05x$ , siendo  $x$  la dimensión en la dirección en que se considera la tolerancia, ni serán menores que las de proyecto en más de  $3 \text{ mm} + 0.03x$ .

m) La separación del refuerzo transversal de vigas y columnas no diferirá de la de proyecto más de 10 mm más diez por ciento de dicha separación, respetando el número de elementos de refuerzo y su diámetro.

n) Si un miembro estructural no es claramente clasificable como columna o viga, se aplicarán las tolerancias relativas a columnas, con las adaptaciones que procedan si el miembro en cuestión puede verse sometido a compresión axial apreciable, y las correspondientes a traveses en caso contrario. En cascarones rigen las tolerancias relativas a losas, con las adaptaciones que procedan.

### **15.6.2 Tolerancias en elementos prefabricados**

El proyecto estructural de las estructuras prefabricadas deberán de contener los tres grupos de tolerancias: tolerancias de producto, tolerancias de erección y tolerancias de interfaces.

Por razones ajenas al comportamiento estructural, tales como aspecto, o colocación de acabados, puede ser necesario imponer tolerancias más estrictas que las arriba prescritas.

De no satisfacerse cualquiera de las tolerancias especificadas, el Corresponsable en Seguridad Estructural, o el Director Responsable de Obra, cuando no se requiera Corresponsable, estudiará las consecuencias que de ahí deriven y tomará las medidas pertinentes para garantizar la estabilidad y correcto funcionamiento de la estructura.

## **16. EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN**

### **16.1 Definiciones**

*Evaluación.* Conclusiones sobre la condición, comportamiento, integridad y conveniencia de rehabilitar, reparar o reforzar una estructura o partes de ella basadas en investigaciones, inspecciones y aplicaciones de conocimientos de ingeniería estructural.

*Reforzamiento.* Incremento de la capacidad para resistir cargas de una estructura o de una parte de una estructura.

*Rehabilitación.* Proceso de reparación o modificación de una estructura para que alcance los estados límite de resistencia y servicio establecidos.

*Reparación.* Reemplazar o corregir materiales, componentes o elementos de una estructura que se encuentren dañados o deteriorados.

### **16.2 Alcance**

Estas disposiciones son complementarias al Título Sexto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

### **16.3 Evaluación**

#### **16.3.1 Necesidad de evaluación**

Se deberá revisar la seguridad estructural de una edificación cuando se tengan indicios de que ha sufrido algún daño, presente problemas de servicio o de durabilidad, vaya a sufrir alguna modificación, cambiar su uso o bien, cuando se requiera verificar el cumplimiento del nivel de seguridad establecido en el título Sexto del Reglamento.

#### **16.3.2 Proceso de evaluación**

El proceso de evaluación deberá incluir:

- a) Investigación y documentación de la estructura, incluyendo daños causados por sismos u otras acciones.
- b) Si es aplicable, clasificación del daño en cada elemento de la edificación (estructural y no estructural) según su severidad y modo de comportamiento.

c) Si aplica, estudio de los efectos del daño en los elementos estructurales en el desempeño futuro de la edificación.

### ***16.3.3 Investigación y documentación de la edificación y de las acciones que la dañaron***

Se deberá recolectar información básica de la edificación y de las acciones que la dañaron; en particular se procurará:

- a) Recopilar memorias, especificaciones, planos arquitectónicos y estructurales, así como informes y dictámenes disponibles.
- b) Inspeccionar la edificación, así como reconocer su edad y calidad de la construcción.
- c) Estudiar el Reglamento y normas de construcción en vigor en la fecha de diseño y construcción de la estructura.
- d) Determinar las propiedades de los materiales y del suelo.
- e) Definir el alcance y magnitud de los daños.
- f) Tener entrevistas con los propietarios, ocupantes, así como con los constructores y diseñadores originales.
- g) Obtener información sobre las acciones que originaron el daño, tal como su magnitud, duración, espectros de respuesta u otros aspectos relevantes.

Al menos, se debe realizar una inspección en sitio con el fin de identificar el sistema estructural, su configuración y condición. Si es necesario, se deben retirar los recubrimientos y demás elementos que obstruyan la revisión visual del concreto.

### ***16.3.4 Determinación de las propiedades de los materiales***

La determinación de las propiedades de los materiales podrá efectuarse mediante procedimientos no destructivos o destructivos, siempre que por estos últimos no se deteriore la capacidad de los elementos estructurales. En caso de que se tengan daños en la cimentación o modificaciones en la estructura que incidan en ella, será necesario verificar las características del sub suelo mediante un estudio geotécnico.

### ***16.3.5 Clasificación del daño en los elemento de la edificación***

#### ***16.3.5.1 Modo de comportamiento***

Atendiendo al modo de comportamiento de los elementos estructurales y no estructurales, se deberá clasificar el tipo y magnitud del daño. El modo de comportamiento se define por el tipo de daño predominante en el elemento y dependerá de la resistencia relativa del elemento a las distintas acciones mecánicas que actúen en él.

#### ***16.3.5.2 Magnitud de daño***

La magnitud o severidad del daño en elementos estructurales se podrá clasificar en cinco niveles:

- a) Insignificante, que no afecta de manera relevante la capacidad estructural (resistencia y deformación). La reparación será de tipo superficial.
- b) Ligero, cuando afecta ligeramente la capacidad estructural. Se requieren medidas de reparación sencillas para la mayor parte de los elementos sin afectar el modo de comportamiento.
- c) Moderado, cuando afectan medianamente la capacidad estructural. La rehabilitación de los elementos dañados depende del tipo de elemento y modo de comportamiento.
- d) Severo, cuando el daño afecta significativamente la capacidad estructural. La rehabilitación implica una intervención amplia, con reemplazo o refuerzo de algunos elementos.

e) Grave, la rehabilitación implica una intervención amplia, con reemplazo o refuerzo de algunos elementos.

f) Muy grave, cuando el daño ha deteriorado a la estructura al punto que su desempeño no es confiable. Abarca el colapso total o parcial. La rehabilitación involucra el reemplazo o refuerzo de la mayoría de los elementos, o incluso la demolición total o parcial.

Si el daño observado es clasificado como de moderado, severo, grave o muy grave, se deberá notificar a la autoridad para que especifique si es necesaria la evacuación del edificio. Todo a juicio del Corresponsable en Seguridad Estructural.

### ***16.3.6 Evaluación del impacto de elementos dañados en el comportamiento de la edificación***

#### ***16.3.6.1 Impacto del daño***

Se deberá evaluar el efecto de grietas u otros signos de daño en el desempeño futuro de una edificación, en función de los posibles modos de comportamiento de los elementos dañados, sean estructurales o no estructurales.

#### ***16.3.6.2 Edificación sin daño estructural***

Si la edificación no presenta daño estructural alguno se deberán estudiar los diferentes modos posibles de comportamiento de los elementos, y su efecto en el desempeño futuro de la edificación.

#### ***16.3.6.3 Capacidad remanente***

Para evaluar la seguridad estructural de una edificación será necesario determinar la capacidad remanente en cada elemento para cada modo de comportamiento posible o predominante. Dicha capacidad estará definida por el nivel de acciones con el cual el elemento, de la estructura o de la cimentación, alcanza un primer estado límite de falla o de servicio, dependiendo del tipo de revisión que se lleve a cabo.

#### ***16.3.6.4 Cálculo de la capacidad estructural***

Para obtener la capacidad estructural se podrán usar los métodos de análisis elásticos convencionales, así como los requisitos y ecuaciones aplicables de estas Normas o de otras Normas Técnicas Complementarias. Cuando en la inspección en sitio no se observe daño estructural alguno, se puede suponer que la capacidad original del elemento estructural está intacta. En edificaciones con daños estructurales, se deberá considerar la participación de los elementos dañados, afectando su capacidad individual según el tipo y nivel de daño. En edificaciones inclinadas debe incluirse el efecto del desplomo en el análisis.

#### ***16.3.6.5 Consideraciones para evaluar la seguridad estructural***

Para evaluar la seguridad estructural de una edificación se deberán considerar, entre otros, su deformabilidad, los defectos e irregularidades en la estructuración y cimentación, el riesgo inherente a su ubicación, la interacción con las estructuras vecinas, la calidad del mantenimiento y el uso al que se destine.

## **16.4 Determinación de la necesidad de rehabilitar**

### ***16.4.1 Daño ligero***

Si como resultado del proceso de evaluación de la seguridad estructural se concluye que cumple con la normativa vigente y sólo presenta daños estructurales insignificantes o ligeros, deberá hacerse un proyecto de rehabilitación que considere la restauración o reparación de dichos elementos.

### ***16.4.2 Daño mayor***

Si se concluye que no cumple con el Reglamento, se presentan daños estructurales moderados o de mayor nivel, o se detectan situaciones que pongan en peligro la estabilidad de la estructura, deberá elaborarse un proyecto de rehabilitación que considere, no solo la reparación de los elementos dañados, sino la modificación de la capacidad de toda la estructura. La

evaluación podrá igualmente recomendar la demolición total o parcial de la estructura. En este caso la edificación deberá ser desalojada.

## **16.5 Rehabilitación**

### ***16.5.1 Apuntalamiento, rehabilitación temporal y demolición***

#### *16.5.1.1 Control del acceso*

Si se detectan daños en la estructura que puedan poner en peligro su estabilidad, deberá controlarse el acceso a la misma y proceder a su rehabilitación temporal en tanto se termina la evaluación. En aquellos casos en que los daños hagan inminente el derrumbe total o parcial, con riesgo para la construcción o vías de comunicación vecinas, será necesario proceder a la demolición urgente de la estructura o de la zona que representa riesgo.

#### *16.5.1.2 Rehabilitación temporal*

Cuando el nivel de daños observados en una edificación así lo requiera, será necesario rehabilitar temporalmente, o apuntalar, de modo que se proporcione la rigidez y resistencia provisionales necesarias para la seguridad de los trabajadores que laboren en el inmueble, así como de los vecinos y peatones en las zonas adyacentes. La rehabilitación temporal será igualmente necesaria cuando se efectúen modificaciones a una estructura que impliquen la disminución transitoria de la rigidez o capacidad resistente de algún elemento estructural.

#### *16.5.1.3 Seguridad durante la rehabilitación*

Las obras de rehabilitación temporal, o apuntalamiento, deberán ser suficientes para garantizar la estabilidad de la estructura. Antes de iniciar las obras de rehabilitación deberá demostrarse que el edificio cuenta con la capacidad de soportar simultáneamente las acciones verticales estimadas (cargas muerta y viva) y 30 por ciento de las accidentales obtenidas de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con las acciones permanentes previstas durante la ejecución de las obras. Para alcanzar dicha capacidad será necesario, en los casos que se requiera, recurrir a la rigidización temporal de algunas partes de la estructura.

#### *16.5.1.4 Conexión entre elementos existentes y materiales o elementos nuevos.*

Las conexiones entre elementos existentes y los materiales o elementos nuevos se deben diseñar y ejecutar de manera que se logre un comportamiento monolítico y se asegure la transmisión de fuerzas entre ellos. Se admitirá usar anclas, fijadores o pernos adhesivos o de percusión.

### ***16.5.2 Generalidades***

Cuando de la evaluación definitiva de una estructura se concluya que no es suficiente el reforzamiento de sus elementos para cumplir con la capacidad sismo-resistente exigida por este Reglamento, la forma de corregir la estructura se podrá llevar a cabo mediante la inclusión de nuevos elementos que aumenten y balanceen la resistencia y rigidez.

Al incluir nuevos elementos es importante garantizar la compatibilidad de la estructura original y la de los nuevos elementos.

Se deberá garantizar la continuidad de las conexiones entre nuevos elementos y la estructura original. Así como verificar la adecuada transmisión de las cargas de los nuevos elementos a la cimentación.

#### *16.5.2.1 Muros de rigidez*

Se pueden usar estos elementos de concreto reforzado para reducir de una forma efectiva las excentricidades de una estructura y aumentar su capacidad sismo-resistente. El concreto deberá tener una resistencia a la compresión mínima de 250 kg/cm<sup>2</sup>.

Se podrán colocar los muros en la periferia del edificio sin interferir con el funcionamiento del mismo. La conexión con la estructura original se puede efectuar mediante estribos anclados en el sistema de piso, o bien a través del colado de una losa adicional de unión.

Cuando la colocación de los muros sea en el interior de la estructura, la conexión con las losas se efectuará a través de perforaciones en ellas que permitan el paso del refuerzo longitudinal de los extremos del muro y parte del refuerzo intermedio, así mismo estas perforaciones servirán para la colocación del concreto.

#### *16.5.2.2 Muros de relleno*

Son muros de concreto reforzado ubicados en los ejes de las columnas de una estructura. El comportamiento de los muros de relleno puede ser semejante al de los muros de rigidez, cuyo refuerzo en los extremos lo constituyen las columnas de la estructura original, siempre y cuando la unión entre muros y las vigas y columnas garanticen la continuidad. En caso contrario, el muro se comporta como un diafragma que introduce grandes fuerzas cortantes en las columnas y en las vigas, lo que puede hacer necesario el refuerzo de estos elementos.

En los casos en que los muros de relleno deban permitir el paso por la crujía, se podrán colocar en ambos lados de la columna en su eje. En este caso se deberá revisar el efecto sobre las trabes que reducirán su claro significativamente.

El concreto deberá tener una resistencia a la compresión mínima de 250 kg/cm<sup>2</sup>.

#### *16.5.2.3 Marcos y contraventeos*

Cuando se rehabilite con marcos o contravientos, éstos se deberán conectar a la estructura original lo cual se puede efectuar mediante estribos anclados en el sistema de piso, o bien a través del colado de una losa adicional de unión.

Si la resistencia de la estructura es suficiente, sobre todo por cortante, se puede recurrir a la inclusión únicamente del contravento para rigidizar la estructura.

### **16.6 Reparación**

#### *16.6.1 Alcance*

Para recuperar la capacidad original de un elemento será necesaria su reparación o restauración. Aquellos elementos dañados que adicionalmente serán reforzados deberán ser reparados antes.

Se deberán considerar todos los factores que intervengan para lograr una reparación adecuada como magnitud del daño, tipo y calidad de materiales, calidad de la ejecución y ensayos de control de calidad.

Se debe considerar en el análisis y en la evaluación de la edificación, que el nivel de restitución de la capacidad estructural que sea factible alcanzar y satisfaga el modo de comportamiento requerido desde la parte estructural y servicio marcados en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

#### *16.6.2 Reemplazo de concreto*

En elementos con daño severo y muy grave, puede ser necesario sustituir el concreto dañado por concreto nuevo, previo apuntalamiento de los elementos a reparar.

Se deberá promover la buena adherencia entre los concretos existentes y los nuevos, utilizando aditivos especiales para unir concreto fresco a concreto endurecido, o conectores, así como aditivos o cementantes para evitar los pequeños cambios volumétricos debidos a la contracción por secado. Se usarán concretos del mismo tipo y con una resistencia de 50 kg/cm<sup>2</sup> superior a la del concreto original.

#### *16.6.3 Reparación de grietas mediante inyección de resina epóxica*

Se permitirá recurrir a la inyección de resinas o fluidos a base de polímeros. La viscosidad y tipo de la resina epóxica se determinará en función del ancho de la fisura por obturar. Se deberá impedir que se realicen perforaciones sobre las fisuras para evitar que se tapen impidiendo la penetración de la resina.

Se permitirá inyectar una fisura con resina epóxica hasta con un ancho de 10 mm. Cuando el ancho sea superior se deberán utilizar fluidos a base de cementos hidráulicos de contracción compensada.

En todos los casos se debe tener el concreto libre de acabados en por lo menos 300mm adyacentes a la fisura.

#### ***16.6.4 Reparación de daños por corrosión***

Se deberá retirar el concreto, exponer totalmente las barras de refuerzo corroídas y sanas que estén dentro de la zona afectada.

Para asegurar la adherencia entre los materiales nuevos, las barras de refuerzo y el concreto endurecido, se deberán limpiar las barras y las superficies del material existente. Si las barras corroídas han perdido más de 25 por ciento de su sección transversal, se deben reemplazar o bien colocar barras suplementarias que representen el doble del área perdida, ancladas adecuadamente.

El nuevo concreto que se coloque deberá tener una menor permeabilidad que la del concreto existente. Se deberá considerar la conveniencia de proteger de la corrosión al refuerzo expuesto a través de medidas activas o pasivas.

#### **16.7 Pruebas al concreto**

La inspección y evaluación tiene la finalidad de determinar la calidad de una estructura o un elementos de concreto reforzado o presforzado, ya sea en su etapa de construcción, o en servicio, o por tener duda de su estabilidad.

La inspección se considera compleja y requiere frecuentemente de la práctica de ensayos para conocer la calidad del concreto.

La necesidad de los ensayos puede ser necesaria debido a:

- 1) Se estima que la resistencia del concreto es menor a la resistencia especificada en el diseño. lo que obliga a realizar un examen y comprobación estructural.
- 2) Cambio de uso de la estructura que ocasione solicitaciones superiores sobre los elementos estructurales y que obligue al conocimiento de la capacidad resistente actual a fin de determinar si es preciso o no un refuerzo.
- 3) Comportamiento inadecuado de una estructura en servicio presentando deficiencias, fisuras o deformaciones superiores a las del proyecto, obligando al conocimiento de las causas que producen dichas alteraciones.
- 4) Determinación de la capacidad residual de una estructura que ha sufrido una acción peligrosa accidental, tal como: incendio, sobrecarga, impacto etc.

Los ensayos podrán ser semidestructivos y no destructivos.

##### ***16.7.1 Pruebas con esclerómetro***

El ensayo con esclerómetro es un método no destructivo, con el cual se puede estimar la resistencia del concreto a través de su dureza superficial. Estas pruebas tienen la limitación de que la predicción que se hace de la resistencia es a través de la dureza superficial de una capa superficial de concreto.

La realización de esta prueba se deberá llevar a cabo siguiendo lo especificado en la norma vigente: NMX-C-192-ONNCCE. "Determinación del número de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro".

##### ***16.7.2 Prueba con ultrasonido***

Las pruebas con ultrasonido se fundamentan en la propagación de una onda elástica a través del concreto. La finalidad de esta prueba es determinar el módulo de elasticidad dinámico del concreto, su compactación, existencia de fisuras, y su profundidad, a través del tiempo que tarda un grupo de ondas en atravesar un espesor determinado de concreto que forma parte de una estructura.

La realización de la prueba con ultrasonido debe atender a lo especificado en la norma vigente: NMX-C-275 ONNCCE “Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto método de ultrasonido”.

### ***16.7.3 Prueba de resistencia por medio de corazones de concreto***

Los corazones son piezas de forma cilíndrica que se extraen del concreto mediante el corte con una broca hueca de diámetro específico.

Mediante la extracción y ensaye a compresión simple del corazón pueden determinarse la resistencia del concreto, módulo de elasticidad y el diagrama esfuerzo deformación. Para la aplicación de esta prueba se deben aplicar las especificaciones de la norma vigente NMX-C- 169-1997 ONNCCE “Obtención y prueba de corazones y vigas extraídos de concreto endurecido”, NMX-C-128-ONNCCE “Determinación del Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson”, NMX-C-083-ONNCCE “Determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto” (ver sección 15.3.4.3).

Se deberán obtener como mínimo tres corazones por elemento a evaluar.

### ***16.7.4 Análisis petrográfico***

Este análisis se realiza mediante la inspección microscópica de la micro estructura de la pasta de cemento, la composición de los agregados y la unión agregado – pasta. El análisis se lleva a cabo en una lámina delgada de concreto de 20 micras de espesor. Este análisis se basa en la aplicación de la norma ASTM – C-856 “Practice of Petrographic Examination. Examination of Hardened Concrete”, vigente.

### ***16.7.5 Pruebas de carga***

Esta prueba se realiza aplicando a los elementos de concreto la carga de diseño y analizando su comportamiento, midiendo su deformación máxima y capacidad de recuperación. El modo de llevar cabo esta prueba se describe en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Capítulo X11, Artículo 183.

Por lo complejo de la inspección de una estructura no se deberá basar la decisión que se tome de los resultados de la aplicación de una sola prueba, se deberá hacer un análisis comparativo de resultados obtenidos con otros métodos.

## **16.8 Reforzamiento**

### ***16.8.1 Generalidades***

Cuando se requiera modificar las capacidades resistentes o de deformación de un elemento estructural, será necesario recurrir a su reforzamiento. El reforzamiento de un elemento suele producir cambios en su rigidez que deberán tomarse en cuenta en el análisis estructural. Se debe revisar que la modificación de los elementos sujetos a refuerzo no produzca que los elementos no intervenidos alcancen prematuramente, estados límite de servicio o de falla, que puedan conducir a comportamientos desfavorables y no estables.

El análisis estructural podrá efectuarse suponiendo el comportamiento monolítico del elemento original y su refuerzo, si el diseño y ejecución de las conexiones entre los materiales así lo aseguran.

### ***16.8.2 Encamisado de elementos de concreto***

Los elementos de concreto se pueden reforzar colocando barras ó perfiles de acero, mallas metálicas o plásticas recubiertas con mortero, concreto, o fibra de carbón o de vidrio adheridos con resinas especialmente diseñadas.

Cuando el reforzamiento de un elemento estructural se realice mediante encamisado con elementos hechos con fibras de carbón o fibras de vidrio, deberá prepararse la superficie del elemento para que sea lisa y se deben retirar los recubrimientos que afecten la adherencia del concreto y las resinas. Las aristas de los elementos deben redondearse para evitar la rotura de las fibras. Se debe garantizar la compatibilidad entre las resinas y fibras. Se deberán recubrir con un material protector aquellos elementos que estén expuestos directamente a la radiación solar y rayos ultravioleta.

Si solo se encamisa la columna en el entre piso se incrementa su resistencia ante carga axial y fuerza cortante, quedando con un comportamiento más dúctil, pero no se altera su resistencia a flexión original. Para mejorar ésta resistencia es necesario extender el encamisado a través de la losa, pasando las barras a través de la losa.

### **16.8.3 Reforzamiento de muros de concreto**

Con el aumento de espesor de un muro de concreto se incrementa su resistencia a fuerza cortante. Si se requiere además incrementar su capacidad para resistir la flexión, se debe aumentar particularmente la sección de sus extremos, concentrando en ellos la mayor parte del refuerzo adicional. El concreto nuevo deberá anclarse al viejo mediante conectores ahogados en éste con un mortero epóxico, o que atraviesen el muro si el refuerzo se requiere en ambas caras.

Para transmitir las fuerzas cortantes entre los muros y las losas, así como para lograr la continuidad necesaria para el trabajo a flexión, se puede recurrir a perforaciones en las losas que permitan el paso del refuerzo y faciliten el colado. El refuerzo deberá llegar a la cimentación.

## **APÉNDICE A. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR FACTORES DE REDUCCIÓN Y LAS CANTIDADES MÁXIMAS DE ACERO A FLEXIÓN Y FLEXOCOMPRESIÓN**

Alternativamente a las disposiciones del cuerpo de estas Normas, se permite el cálculo de la capacidad a flexión y a flexocompresión de elementos de concreto reforzado de acuerdo con este apéndice.

El diseño de las secciones transversales sometidas a cargas de flexión, cargas axiales, o a la combinación de ambas (flexo-compresión) debe basarse en el equilibrio y la compatibilidad de deformaciones utilizando las hipótesis de 3.5.

La condición de deformación balanceada existe en una sección transversal cuando el refuerzo en tensión alcanza la deformación unitaria correspondiente a  $f_y$  al mismo tiempo que el concreto en compresión alcanza su deformación unitaria última supuesta de 0.003.

Las secciones se denominan controladas por compresión si la deformación unitaria neta de tensión en el acero extremo en tensión,  $\epsilon_s$ , es igual o menor que la deformación unitaria neta de tensión del refuerzo en condiciones de deformación unitaria balanceada. Para refuerzo con esfuerzo especificado de fluencia de 420 MPa (4 200 kg/cm<sup>2</sup>) y para todo acero de presfuerzo, se permite fijar el límite de deformación unitaria controlada por compresión en 0.002.

Las secciones son controladas por tensión si la deformación unitaria neta de tensión en el refuerzo de acero extremo en tensión,  $\epsilon_s$ , es igual o mayor a 0.005, justo cuando el concreto en compresión alcanza su límite de deformación unitaria asumido de 0.003. Las secciones con  $\epsilon_s$  entre el límite de deformación unitaria controlada por compresión y 0.005 constituyen una región de transición entre secciones controladas por compresión y secciones controladas por tensión.

Para elementos no presforzados en flexión y elementos no presforzados con carga axial factorizada de compresión menor a  $0.10f'_c A_g$ ,  $\epsilon_t$  en el estado de resistencia nominal no debe ser menor que 0.004.

El factor de reducción de resistencia,  $F_R$ , debe ser el establecido como sigue:

- a) Secciones controladas por tensión, 0.90
- b) Secciones controladas por compresión:
  - b.1) Elementos con refuerzo helicoidal según 7.3.4.4, 0.75
  - b.2) Otros elementos reforzados, 0.65
- c) Cortante y torsión, 0.75
- d) Aplastamiento en el concreto (excepto para anclajes de postensado y modelos de puntales y tensores), 0.65
- e) Zonas de anclaje de postensado, 0.85

f) Modelos de puntales y tensores (Apéndice B) y puntales, tensores, zonas de nodos y áreas de apoyo en esos modelos, 0.75

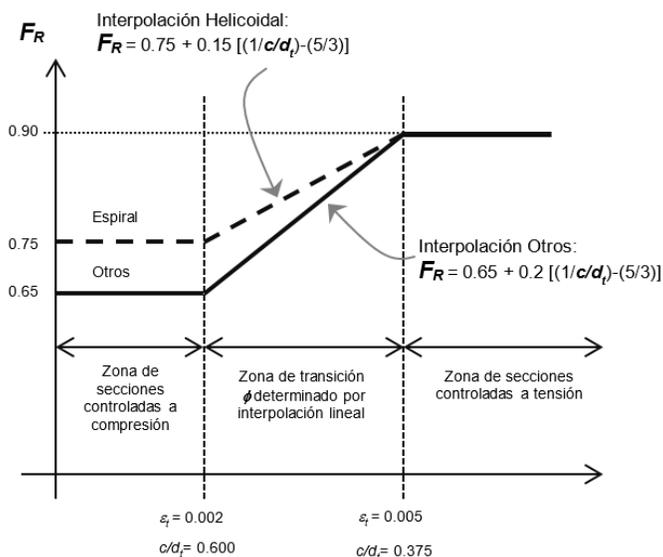
g) Las secciones a flexión en los elementos pretensados donde la longitud embebida del torón es menor que la longitud de desarrollo establecida en 11.6.2:

g.1) Desde el extremo del elemento hasta el extremo de la longitud de transferencia, 0.75

g.2) Desde el extremo de la longitud de transferencia hasta el extremo de la longitud de desarrollo, debe permitirse que  $F_R$  sea incrementado linealmente de 0.75 hasta 0.9.

Donde la adherencia del torón no se extiende hasta el extremo del elemento, se debe asumir que el embebido del torón se inicia en el extremo de la longitud no adherida.

Para las secciones en las que la deformación unitaria neta a la tensión en el acero extremo en tensión en el estado de resistencia nominal,  $\epsilon_t$ , se encuentra entre los límites para secciones controladas por compresión y las secciones controladas por tensión, se permite que  $F_R$  aumente linealmente desde el valor correspondiente a las secciones controladas por compresión hasta 0.90, en la medida que  $\epsilon_t$  aumente desde el límite de deformación unitaria controlado por compresión hasta 0.005.



Interpolación en  $c/d_t$ :

Helicoidal:  $F_R = 0.75 + 0.15 [(1/c/d_t)^{(5/3)}]$

Otros:  $F_R = 0.65 + 0.2 [(1/c/d_t)^{(5/3)}]$

Donde  $c$  es la distancia desde la fibra extrema en compresión al eje neutro en el estado de resistencia nominal y  $d_t$  es la distancia de la fibra extrema en compresión hasta el centroide de la capa extrema de acero longitudinal en tensión.

**Figura A.1 Variación de  $F_R$  con la deformación unitaria neta a tensión  $\epsilon_t$  y  $c/d_t$ , para acero de refuerzo grado 420 y para acero de presfuerzo**

## APÉNDICE B. MÉTODO DE PUNTALES Y TENSORES

### B.1 Notación

$s_i$  Espaciamiento

$a$  claro de cortante, igual a la distancia entre una carga y un apoyo en una estructura, cm

$A_{cs}$	área efectiva de la sección transversal en un extremo del puntal en un modelo de puntales y tensores, tomada perpendicularmente al eje del puntal, $\text{cm}^2$
$A_n$	área de una cara de una zona nodal o de una sección a través de una zona nodal, $\text{cm}^2$
$A_{si}$	área del refuerzo de superficie a una separación $s_i$ en el $i$ -ésimo lecho que cruza un puntal a un ángulo $\alpha_i$ con el eje del puntal, $\text{cm}^2$
$A'_s$	área del refuerzo de compresión en un puntal, $\text{cm}^2$
$A_{tp}$	área del refuerzo presforzado en un tirante, $\text{cm}^2$
$A_{ts}$	área del refuerzo no presforzado en un tirante incluyendo barras o perfiles de acero, $\text{cm}^2$
$d$	distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del refuerzo longitudinal en tensión, $\text{cm}$
$f'_c$	resistencia especificada a la compresión del concreto, $\text{kg}/\text{cm}^2$
$f'_{cu}$	resistencia efectiva a la compresión del concreto en un puntal o una zona nodal, $\text{kg}/\text{cm}^2$
$f'_s$	esfuerzo en el refuerzo a compresión, $\text{kg}/\text{cm}^2$
$f'_{se}$	esfuerzo efectivo después de las pérdidas en el refuerzo presforzado, $\text{kg}/\text{cm}^2$
$f'_y$	esfuerzo especificado de fluencia del refuerzo no presforzado, $\text{kg}/\text{cm}^2$
$F_n$	resistencia nominal de un puntal, tensor o zona nodal, $\text{kg}$
$F_{nn}$	resistencia nominal de una cara de una zona nodal, $\text{kg}$
$F_{ns}$	resistencia nominal de un puntal, $\text{kg}$
$F_{nt}$	resistencia nominal de un tensor, $\text{kg}$
$F_u$	fuerza factorizada que actúa en un puntal, tensor, área de contacto, o zona nodal, en un modelo de puntales y tensores, $\text{kg}$
$h$	altura del elemento
$l$	claro libre, $\text{cm}$
$l_{anc}$	longitud de anclaje
$l_b$	ancho de la placa de apoyo
$w_s$	ancho efectivo del puntal perpendicular a su eje, $\text{cm}$
$w_t$	ancho efectivo del tensor perpendicular a su eje, $\text{cm}$
$F_R$	factor de reducción de la resistencia
$\alpha_i$	ángulo entre el eje de un puntal y las barras en el $i$ -ésimo lecho de refuerzo que cruza ese puntal
$f'_i$	incremento en el esfuerzo en los cables presforzados debido a las cargas factorizadas, $\text{kg}/\text{cm}^2$
$\alpha$	ángulo ente el eje del puntal y la barra de refuerzo
$\Theta$	ángulo entre el eje del puntal o campo de compresión y la cuerda de tensión del elemento

## B.2 Introducción

Las estructuras de concreto pueden dividirse en regiones en las que es válida la hipótesis de una distribución lineal de deformaciones y en las que por lo tanto se puede aplicar la teoría de flexión de la sección 3.5, y regiones en las que ocurren perturbaciones en la distribución de esfuerzos debidas a cambios geométricos abruptos o a la presencia de cargas concentradas y reacciones. Las primeras se denominan Regiones B (de la palabra *Beam*, y las segundas, regiones D (de la palabra *Discontinuity*). En la figura B1-a se muestran ejemplos de discontinuidades por cambios abruptos de sección, y en la figura B1-b, de discontinuidades geométricas y de perturbaciones causadas por cargas concentradas. En las regiones B se pueden aplicar la teoría tradicional de flexión de concreto reforzado y el enfoque de diseño tradicional de resistencia a fuerza cortante ( $V=V_c + V_s$ ).

En las regiones D, una porción grande de la carga se transfiere de manera directa a los apoyos por fuerzas de compresión en el concreto y fuerzas de tensión en el refuerzo, por lo que se debe de utilizar un enfoque de diseño distinto. Las regiones D se pueden modelar utilizando una "armadura" hipotética consistente de puntales de concreto con esfuerzos a compresión, y tensores de acero con esfuerzos a tensión, unidos en nodos. A estas "armaduras" se les refiere como modelos de puntales y tensores.

La falla de los modelos de puntales y tensores puede ocurrir por :

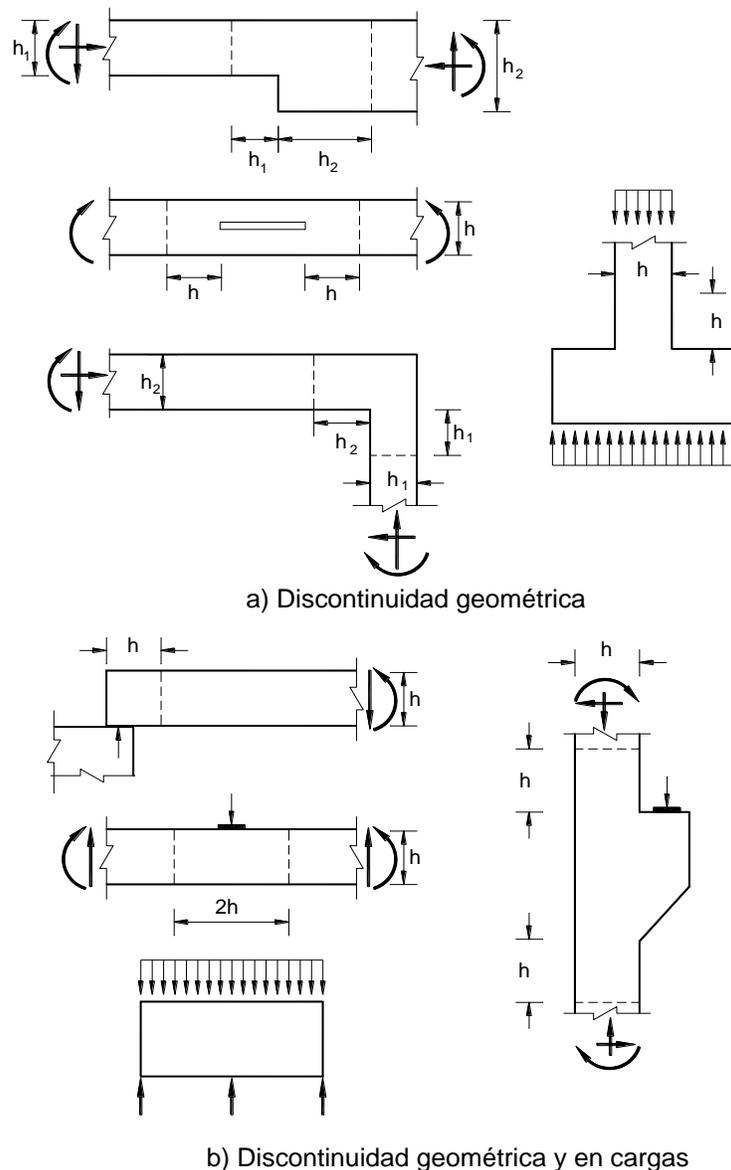
- fluencia de los tensores,
- aplastamiento de los puntales,
- falla de la conexión en las zonas de nodos que conectan los puntales y los tensores,
- falla de anclaje de los tensores.

Las zonas nodales y los puntales alcanzan sus resistencias cuando las fuerzas a compresión que actúan en los extremos de los puntales o en las caras de las zonas nodales alcanzan la resistencia efectiva a compresión  $f_{cu}$ . Los tensores la alcanzan cuando fluye el acero que los constituye. La falla por anclaje se presenta cuando los tensores no tienen suficiente longitud de anclaje.

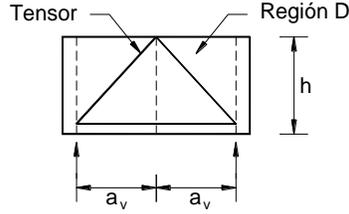
Tanto el análisis de esfuerzos elásticos, como el principio de St. Venant, indican que el efecto localizado de las cargas concentradas o de las discontinuidades geométricas se disipan a un peralte de la carga o de la discontinuidad. Por ello, se asume que la región D se extiende aproximadamente una distancia igual al peralte del miembro a partir de la carga o discontinuidad, figura B.1.

Si dos regiones D, cada una de una longitud  $h$  o menor, se juntan o se superponen, en este apéndice se considera que actúan como una región D combinada.

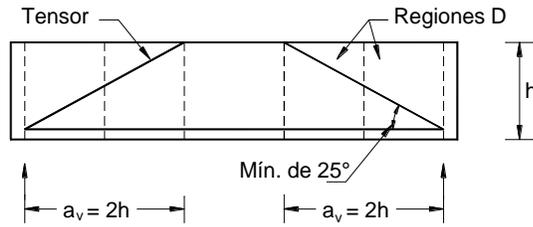
Para el caso de cortante en una viga de gran peralte, la región D combinada tiene un peralte  $h$  y una longitud de  $2h$  en una o dos direcciones de la perturbación. Esto establece el menor ángulo entre el puntal y el tensor unidos en el final del puntal en un  $\arctan(h/2h) = 26.5^\circ$ , redondeado a  $25^\circ$ , figura B.2.



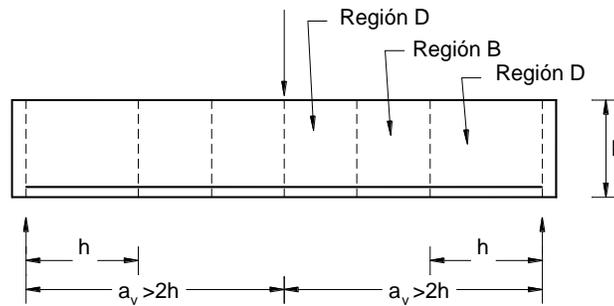
**Figura B.1** Regiones D y discontinuidades



a) Claro de cortante,  $a_v < 2h$ , viga de gran peralte



b) Claro de cortante,  $a_v = 2h$ , límite para una viga de gran peralte



c) Claro de cortante,  $a_v > 2h$ , viga esbelta

**Figura B.2 Descripción de vigas de gran peralte y vigas esbeltas**

Al aplicar este apéndice, se debe poner especial cuidado en la selección del modelo y su representación gráfica.

### B.3 Definiciones

*Discontinuidad.* Cambio abrupto en la geometría o en las cargas que ocasiona un cambio en la distribución de esfuerzos.

*Modelo de puntales y tensores.* Un modelo tipo "armadura" de un elemento estructural, o de una región D de ese elemento, hecho con puntales y tensores conectados en los nodos, capaces de transferir las cargas factorizadas a los apoyos o hacia las regiones B adyacentes.

*Nodo.* Lugar donde se intersectan y conectan los ejes de los puntales, tensores y fuerzas concentradas.

*Puntal.* Un elemento que representa la resultante de un campo de compresión paralelo o en forma de abanico.

*Puntal en forma de botella.* Un puntal que es más ancho en el centro que en sus extremos.

*Región B.* Parte de un elemento en la que pueden aplicarse los supuestos de la teoría convencional de diseño de concreto reforzado de secciones planas, mencionadas de la teoría de flexión en 5.3.

*Región D.* La parte de un elemento dentro de una distancia  $h$  de una discontinuidad de fuerza o una discontinuidad geométrica.

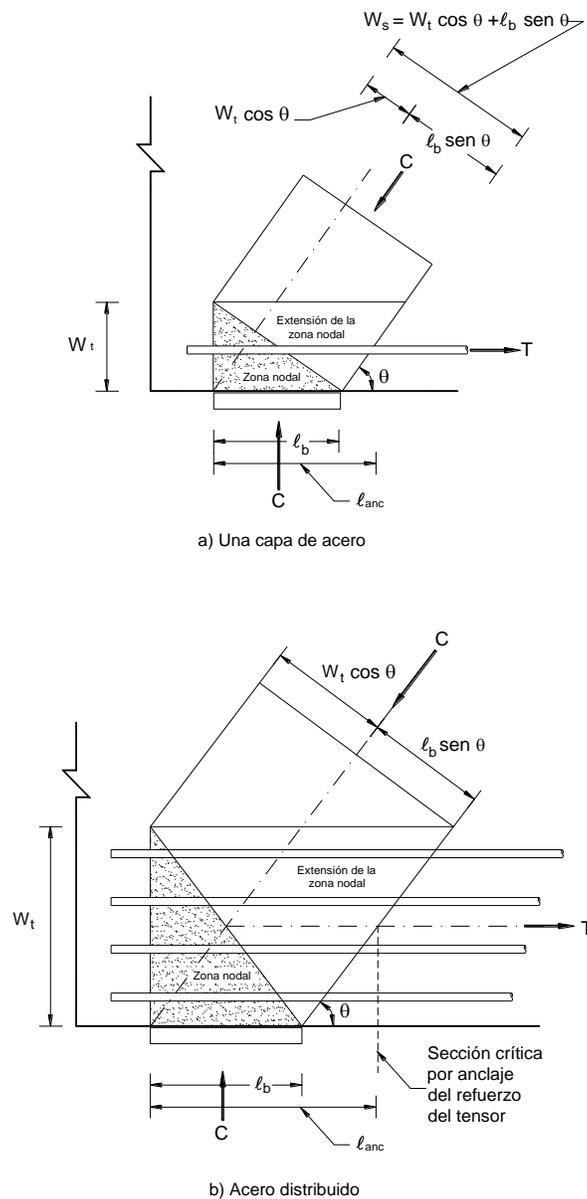
*Tensor.* Un elemento a tensión.

*Viga de gran peralte.* Ver capítulo 10.

*Zona nodal.* El volumen de concreto alrededor de un nodo que se supone transfiere las fuerzas de los puntales y tensores a través del nodo.

*Zona nodal hidrostática.* Tipo de zona nodal que tiene caras cargadas perpendiculares a los ejes de los puntales y tensores que actúan en el nodo y presenta esfuerzos iguales sobre dichas caras.

*Zona nodal extendida.* Parte de un elemento acotada por la intersección del ancho efectivo del puntal,  $w_s$ , y el ancho efectivo del tensor,  $w_t$ , figura B.3.



**Figura B.3** Zona extendida del nodo mostrando el efecto de la distribución de las fuerzas

## B.4 Procedimiento de diseño del modelo puntal-tensor

B.4.1. Se permite diseñar elementos de concreto estructural, o regiones-D específicas en estos elementos, modelando el elemento o región como una armadura idealizada formada por puntales, tensores y nodos, como se definen en B.2. El modelo de armadura debe ser capaz de transferir todas las cargas factorizadas hacia los apoyos o regiones B adyacentes, figura B.4.

B.4.2. El modelo puntal-tensor debe estar en equilibrio con las cargas factorizadas aplicadas y las reacciones. El cálculo de las reacciones y de las fuerzas de los puntales y tensores debe satisfacer las leyes de la estática. Para determinar la geometría de la armadura, se deben considerar las dimensiones de los puntales, tensores y zonas nodales.

B.4.3. Las resistencias de los puntales, tensores, y zonas nodales deben ser iguales o mayores que las fuerzas que actúan en estos miembros. Si la resistencia de todas las secciones transversales es igual o mayor que la resistencia requerida por el análisis de la armadura, se dice que dicha estructura tiene una distribución de resistencias segura.

B.4.4. Los puntales no pueden cruzarse o traslaparse entre ellos, excepto en los nodos. Los anchos de los puntales se determinan para que puedan resistir las fuerzas que actúan en ellos usando la resistencia efectiva del concreto de los puntales. Si los puntales se traslapan, las partes comunes tendrían esfuerzos mayores que los calculados.

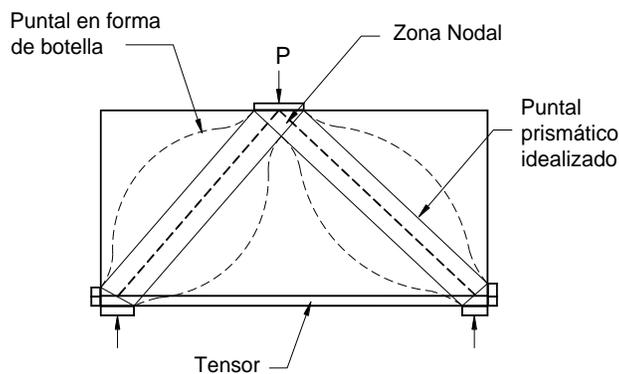
B.4.5. Se permite que los tensores se crucen con puntales o con otros tensores.

B.4.6. El ángulo  $\theta$ , entre los ejes de cualquier puntal y de cualquier tensor que concurran a un solo nodo no debe ser menor de  $25^\circ$ .

B.4.7. El diseño de los puntales, tensores y zonas nodales debe basarse en la relación:

$$F_R F_n \geq F_u \quad (\text{B.4.1})$$

donde  $F_u$  es la fuerza factorizada que actúa en un puntal, en un tensor o en una cara de una zona nodal;  $F_n$  es la resistencia nominal del puntal, tensor o zona nodal; y  $F_R$  es el factor de reducción de resistencia para cortante definido en la sección 3.6.



*Figura B.4 Descripción de un modelo puntal-tensor*

## B.5 Resistencia de los puntales

B.5.1 La resistencia nominal a la compresión de un puntal sin refuerzo longitudinal,  $F_n$ , debe tomarse como el menor valor de:

$$F_n = f_{ce} A_{cs} \quad (\text{B.5.1})$$

en los dos extremos del puntal, donde  $A_{cs}$  es el área de la sección transversal en un extremo del puntal, y,  $f_{ce}$  es el menor valor entre la resistencia efectiva a la compresión del concreto en el puntal, definida en B.5.2, y la resistencia efectiva a la compresión del concreto en la zona nodal definida en B.7.

B.5.2 La resistencia efectiva a la compresión del concreto,  $f_{ce}$ , en un puntal debe ser:

$$f_{ce} = 0.85\beta_s f_c' \quad (\text{B.5.2})$$

donde:

$\beta_s = 1.0$  para puntales de sección transversal uniforme a lo largo de toda su longitud.

Para puntales ubicados de tal manera que el ancho de la sección media del puntal es mayor que el ancho en los nodos (puntales en forma de botella):

$\beta_s = 0.75$  con el refuerzo mínimo especificado en B.5.4,

$\beta_s = 0.60$  sin el refuerzo mínimo especificado,

$\beta_s = 0.40$  para los puntales en elementos sometidos a tensión, o patines en tensión de los elementos.

$\beta_s = 0.60$  para todos los demás casos.

B.5.3 Si se emplea el valor de  $\beta_s = 0.75$  especificado en el inciso B.5.2, el eje del puntal debe ser cruzado por barras de refuerzo capaces de resistir la fuerza de tensión transversal resultante de la inclinación de la fuerza de compresión en el puntal. Se permite suponer que la fuerza de compresión en los puntales se inclina con una pendiente de 2 longitudinal a 1 transversal respecto al eje del puntal.

B.5.4 Para  $f_c'$  no mayor a 42 MPa (420 kg/cm<sup>2</sup>), se admite que se cumple el requisito de B.5.3 si el eje del puntal queda cruzado por capas de refuerzo que cumplan con:

$$\sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \text{sen } \alpha_i \geq 0.003 \quad (\text{B.5.3})$$

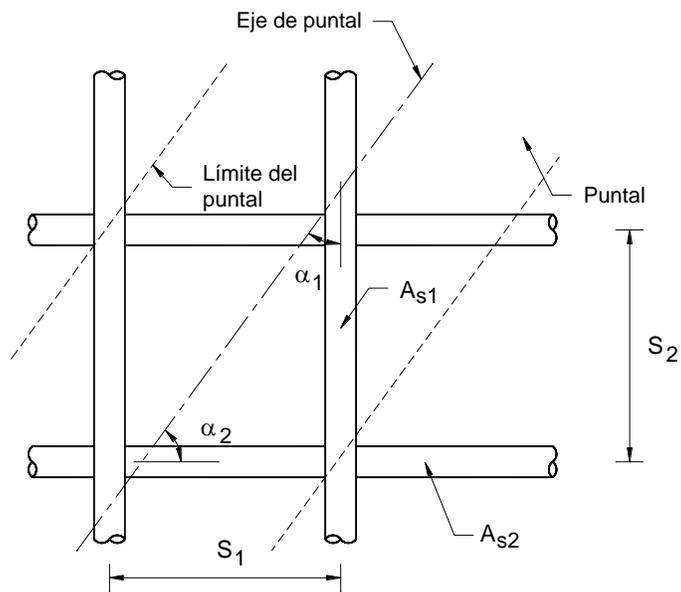
donde  $A_{si}$  es el área total del refuerzo de superficie con un espaciamiento  $s_i$  en la capa  $i$  de refuerzo con barras a un ángulo  $\alpha_i$  con respecto al eje del puntal, figura B.5.

B.5.5 El refuerzo especificado anteriormente en B.5.4 debe colocarse en alguna de las siguientes formas: en direcciones ortogonales en ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  con respecto al eje del puntal, o en una sola dirección a un ángulo  $\alpha$  con respecto al eje del puntal. Si el refuerzo se coloca en una sola dirección,  $\alpha$  no debe ser menor de 40°.

B.5.6. Si se encuentra documentado mediante ensayos y análisis, se permite usar una resistencia efectiva a la compresión incrementada del puntal debida a refuerzo de confinamiento.

B.5.7 Se permite el uso de refuerzo de compresión para aumentar la resistencia de un puntal. El refuerzo de compresión debe colocarse dentro de él, paralelo al eje del puntal, anclarse adecuadamente, y rodearse por estribos o hélices que cumplan con 7.3.4. En estos casos, la resistencia nominal de un puntal reforzado longitudinalmente es:

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} + A'_s f'_s \quad (\text{B.5.4})$$



**Figura B.5 Refuerzo cruzando un puntal**

## B.6 Resistencia de los tensores

B.6.1 La resistencia nominal de un tensor,  $F_{nt}$ , debe calcularse como:

$$F_{nt} = A_{ts}f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (\text{B.6.1})$$

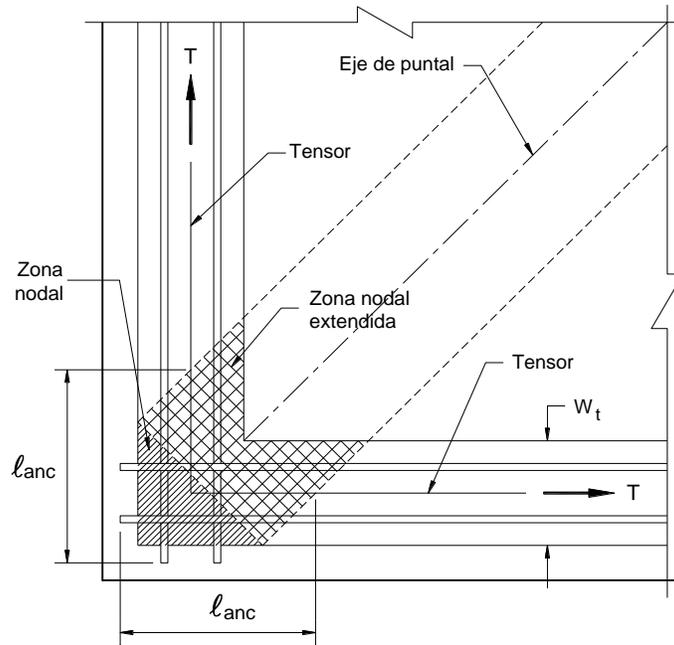
donde  $(f_{se} + \Delta f_p)$  no debe exceder  $f_{py}$ , y  $A_{tp}$  es igual a cero para los elementos no presforzados.

En la ecuación B.6.1, se permite tomar  $\Delta f_p$  igual a 420 MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>) para el refuerzo presforzado adherido, o 70 MPa (700 kg/cm<sup>2</sup>) para el refuerzo presforzado no adherido. Se permiten otros valores de  $\Delta f_p$  cuando se justifiquen por medio de análisis.

B.6.2. El eje del refuerzo en un tensor debe coincidir con el eje del tensor en el modelo de puntales y tensores.

B.6.3 El refuerzo del tensor debe anclarse mediante dispositivos mecánicos, dispositivos de anclaje de tendones postensados, ganchos estándar o mediante longitud de desarrollo de barra recta, como se especifica a continuación:

- Las zonas nodales deben desarrollar la diferencia entre la fuerza en el tensor en un lado del nodo y la fuerza en el tensor en el otro lado del nodo.
- En las zonas nodales que anclan un solo tensor, la fuerza en el tensor debe desarrollarse en el punto donde el centroide del refuerzo del tensor sale de la zona nodal extendida y entra al claro del elemento.
- En las zonas nodales que anclan dos o más tensores, la fuerza del tensor en cada dirección debe desarrollarse en el punto donde el centroide del refuerzo del tensor sale de la zona nodal extendida, figura B.6.
- El refuerzo transversal requerido por la ecuación B.5.3 debe anclarse de acuerdo con lo especificado en 2.1.4.



**Figura B.6 Zona nodal extendida anclada a dos tensores**

## B.7 Resistencia de las zonas nodales

B.7.1 La resistencia nominal a la compresión de una zona nodal,  $F_{nn}$ , debe ser:

$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad (\text{B.7.1})$$

donde  $f_{ce}$  es la resistencia efectiva a compresión del concreto en la zona nodal, como se especifica en B.7.2, y  $A_{nz}$  es la menor de (a) o (b):

- (a) el área de la cara de la zona nodal en donde actúa  $F_u$ , tomada en forma perpendicular a la línea de acción de  $F_u$ , o
- (b) el área de una sección a través de la zona nodal, tomada en forma perpendicular a la línea de acción de la fuerza resultante en la sección.

B.7.2 A menos que se coloque refuerzo de confinamiento dentro de la zona nodal y que sus efectos sean respaldados por ensayos y análisis, los esfuerzos de compresión efectivos,  $f_{ce}$  calculados en una cara de la zona nodal debidos a las fuerzas del modelo de puntales y tensores, no deben exceder el valor dado por:

$$f_{ce} = 0.85 \beta_n f'_c \quad (\text{B.7.2})$$

donde el valor de  $\beta_n$  está dado de acuerdo con lo siguiente:

- a)  $\beta_n = 1$  en zonas nodales limitadas por puntales o áreas de apoyo, o ambas,
- b)  $\beta_n = 0.8$  en zonas nodales que anclan un tensor,
- c)  $\beta_n = 0.60$  en zonas nodales que anclan dos o más tensores.

En un modelo de puntales y tensores tridimensional, el área de cada cara de una zona nodal no debe ser menor a la dada en el inciso B.7.1. a) anterior, y la forma de cada cara de las zonas nodales debe ser similar a la forma de la proyección del extremo de los puntales sobre las caras correspondientes de las zonas nodales.

## **APÉNDICE C. ARCOS Y CASCARONES**

### **C.1 Análisis**

Los arcos, cascarones y losas plegadas se analizarán siguiendo métodos reconocidos. En el análisis de cascarones delgados y losas plegadas puede suponerse que el material es elástico, homogéneo e isótropo y que la relación de Poisson es igual a cero. El análisis que se haga debe satisfacer las condiciones de equilibrio y de compatibilidad de deformaciones, y tomará en cuenta las condiciones de frontera que se tengan. Deben, asimismo, considerarse las limitaciones que imponga el pandeo del cascarón o losa y se investigará la posible reducción de las cargas de pandeo causada por deflexiones grandes, flujo plástico y diferencias entre la geometría real y la teórica. Se prestará especial atención a la posibilidad de pandeo de bordes libres de cascarones y losas.

### **C.2 Simplificaciones en el análisis de cascarones y losas plegadas**

Se podrán aplicar métodos aproximados de análisis que cumplan las condiciones de equilibrio aunque no satisfagan las de compatibilidad de deformaciones, a condición de que la experiencia haya demostrado que conducen a diseños seguros.

Podrá no tomarse en cuenta la influencia de fenómenos tales como pandeo o flujo plástico del concreto, siempre que se demuestre analítica o experimentalmente, o por comparación con estructuras existentes de comportamiento satisfactorio, que tales influencias no tienen importancia.

### **C.3 Dimensionamiento**

Los arcos, cascarones y losas plegadas se dimensionarán de acuerdo con las disposiciones de las secciones 2.3 y 2.5 para flexocompresión y cortante, respectivamente.

El refuerzo de cascarones y losas plegadas se dimensionará para resistir la totalidad de los esfuerzos de tensión que se obtengan del análisis y debe cumplir con los requisitos de la sección 5.7 para refuerzo por cambios volumétricos.

## **APÉNDICE D. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA QUE TOMAN EN CUENTA EL GRADO DE CONFINAMIENTO DEL CONCRETO Y EL DETERIORO ACUMULADO**

En el inciso 3.6.1 se presentaron dos opciones para modelar las zonas de articulaciones plásticas cuando se utilizan los métodos de análisis no lineal prescritos en el Capítulo 6 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo: utilizando diagramas momento-curvatura y longitudes de articulaciones plásticas, y utilizando diagramas momento-rotación. En este apéndice se incluye información complementaria para utilizar estas opciones. Una presentación más detallada de esta información así como otras opciones para llevar a cabo análisis no lineales pueden encontrarse en PEER (2010).

La primera opción se basa en que se pueden modelar las gráficas esfuerzo deformación de los materiales constituyentes incluyendo los efectos del confinamiento y del deterioro del material por cargas cíclicas, para el caso del concreto, y determinar los diagramas momento-curvatura con estas gráficas. En el caso del acero de refuerzo, se considera que no hay deterioro por cargas cíclicas. En la segunda opción se determinan directamente diagramas momento-rotación a partir de ecuaciones obtenidas analíticamente y en forma experimental que incluyen algunos efectos como el confinamiento del concreto o el fenómeno de deslizamiento por falla de adherencia. Estos diagramas, conocidos como curvas básicas (Backbone curves, en inglés), se modifican para tomar en cuenta el efecto del deterioro producido por cargas cíclicas.

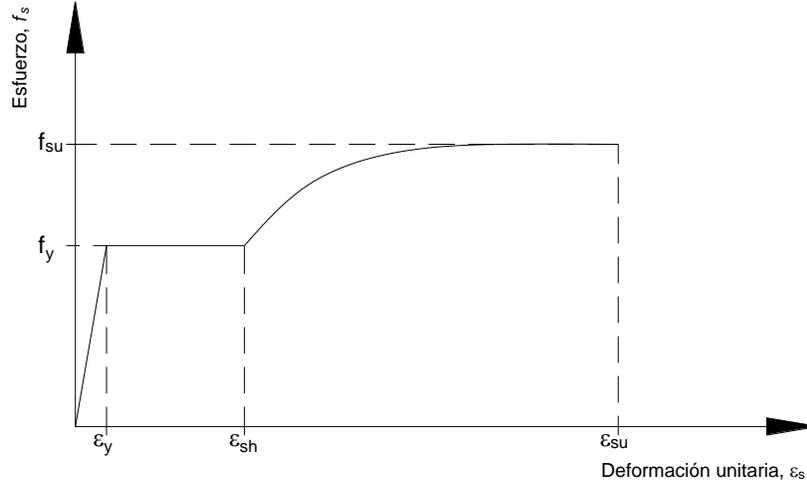
Es importante tener presente que en ambas opciones se supone que los miembros trabajan predominantemente a flexión y que se utilizan criterios de diseño por capacidad para evitar fallas prematuras por fuerza cortante en miembros y nudos, así como fallas por adherencia o por confinamiento insuficiente del concreto.

### **D.1 Diagramas momento-curvatura**

Existen varias propuestas para determinar las gráficas esfuerzo deformación del acero de refuerzo y del concreto, y a partir de estas gráficas calcular los diagramas momento-curvatura con las hipótesis del inciso 3.6.1. En este apéndice se presentan las gráficas propuestos por Mander (1988) y, para el caso de aceros nacionales, por Mendoza (2013) y Rodríguez (1995).

### D.1.1 Modelo elastoplástico del acero de refuerzo con endurecimiento curvo

El acero de refuerzo se modelará utilizando una curva esfuerzo – deformación idealizada en tres tramos. Tanto el intervalo elástico como el de fluencia se representarán por tramos rectos mientras que el endurecimiento por una parábola ver figura D.1.1.



**Figura D.1.1. Modelo elastoplástico del acero de refuerzo con endurecimiento curvo.**

Las tres zonas representadas en la figura serán:

1.- Zona elástica, primer tramo ascendente que ocurre en el intervalo  $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$  donde  $\varepsilon_s$  es la deformación de la barra de refuerzo, calculándose el esfuerzo en este intervalo de deformaciones con:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad (D.1.1)$$

2.- Zona de fluencia, segundo tramo recto horizontal, que ocurre en el intervalo  $\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$ , en el que  $\varepsilon_{sh}$  es la deformación del acero correspondiente al inicio de la zona de endurecimiento por deformación. El esfuerzo en esta zona se calculará como:

$$f_s = f_y \quad (D.1.2)$$

3.- Zona de endurecimiento por deformación, que ocurre en el intervalo  $\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$  donde se considera que la deformación última  $\varepsilon_{su}$  en la ruptura de la barra, corresponde al esfuerzo máximo que se puede alcanzar  $f_{su}$ . El esfuerzo en esta zona debe calcularse con:

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left[ \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right]^F \quad (D.1.3)$$

$$\text{donde } F = \frac{\log \frac{f_{su} - f_{sh1}}{f_{su} - f_y}}{\log \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh1}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}}} \quad (D.1.4)$$

y  $f_{sh1}$  y  $\varepsilon_{sh1}$  son datos de un punto de la curva esfuerzo-deformación en la zona de endurecimiento por deformación. En la tabla D.1.1 (Mendoza, 2013) se presentan valores de los parámetros requeridos para utilizar las ecuaciones D.1.3 y D.1.4 con aceros de fabricación nacional. Se incluye el valor de  $F$  propuesto por Rodríguez (1995) en un estudio amplio de los aceros de refuerzo de fabricación nacional. Estos parámetros pueden usarse cuando no se tengan curvas esfuerzo-deformación del acero de refuerzo obtenidas experimentalmente para los materiales utilizados.

**Tabla D.1.1 Parámetros para modelar la gráfica esfuerzo-deformación de barras de acero de refuerzo**

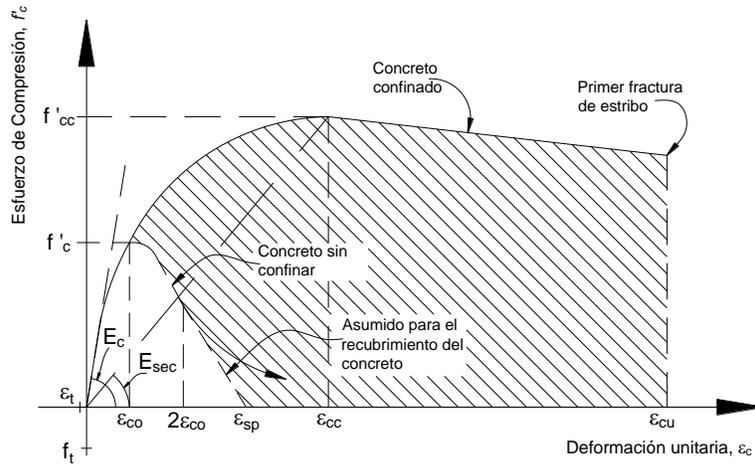
Parámetros	Grado 42		Grado 52		Grado 56*	
	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
$f_y$	457	4487	590	5787	611	5995
$f_{su}$	742	7280	832	8160	797	7820
$f_{sh1}$	612	6000	815	7500	764	7200
$E_s$	209218	2052433	207563	2036195	207224	2032867
$\epsilon_y$	0.0022		0.0028		0.0029	
$\epsilon_{sh}$	0.0066		0.0101		0.0093	
$\epsilon_{su}$	0.1100		0.0977		0.1001	
$\epsilon_{sh1}$	0.0248		0.0406		0.0375	
$F$	4.03 (3.47)**		2.99		2.90	

\* Acero de baja aleación (NMX-B-457-CANACERO)\*\*

\*\* Valor del parámetro  $F$  calculado por Rodríguez (1995) con valores reales de los otros parámetros en muestras de aceros nacionales.

### D.1.2 Modelo elastoplástico para concreto confinado

El concreto se modelará utilizando una curva esfuerzo-deformación continua construida con la siguiente ecuación propuesta por Mander (1988) ver figura D.1.2. En todas las figuras y ecuaciones subsiguientes de esta sección se utiliza el término  $f'_c$  para la resistencia del concreto sin confinar, respetando la notación de los trabajos originales de Mander et al. Sin embargo, para la utilización de estas gráficas y ecuaciones en las Normas Técnicas Complementarias, debe sustituirse el término  $f'_c$  por la resistencia media del concreto  $\bar{f}_c$ , ya que los análisis inelásticos se llevan a cabo con los valores reales esperados.



**Figura D.1.2. Gráfica esfuerzo-deformación del concreto sin confinar y confinado**

El esfuerzo a compresión  $f_c$  estará dado por:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (D.1.5)$$

donde:

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (D.1.6)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}} \quad (D.1.7)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (D.1.8)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 fl}{f'_c}} - 2 \frac{fl}{f'_c} \right) \quad (D.1.9)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 1.4 \frac{\rho_{st} f_y \epsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (D.1.10)$$

$\epsilon_c$  Deformación unitaria del concreto a compresión.

$\epsilon_{co}$  Deformación unitaria correspondiente a la resistencia del concreto sin confinar, generalmente se asume igual a 0.002.

$\epsilon_{cu}$  Deformación unitaria ultima del concreto a compresión.

$f'_{cc}$  Resistencia a la compresión máxima del concreto confinado.

$\epsilon_{cc}$  Deformación unitaria en el punto de mayor esfuerzo a la compresión.

$fl$  Esfuerzo de confinamiento efectivo lateral.

Para secciones circulares y rectangulares  $fl$  está en función del coeficiente de confinamiento efectivo  $k_e$ , que relaciona el área mínima del núcleo efectivamente confinado y el área del núcleo rodeado del centro de la línea del estribo del área transversal.

**Para secciones circulares:**

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (D.1.11)$$

$$fl = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad (D.1.12)$$

donde:

$d_s$  y  $s'$  Diámetro del estribo circular entre centros de varilla y separación libre de estribo respectivamente, figura D.1.3.

$\rho_{cc}$  Relación del área de refuerzo longitudinal  $A_s$ , y el área del núcleo de concreto de la sección encerrada por los centros de línea de los estribos,  $A_c$ .

$\rho_{st}$  Cuantía transversal.

$f_y$  Esfuerzo de fluencia del acero transversal.

**Para secciones rectangulares:**

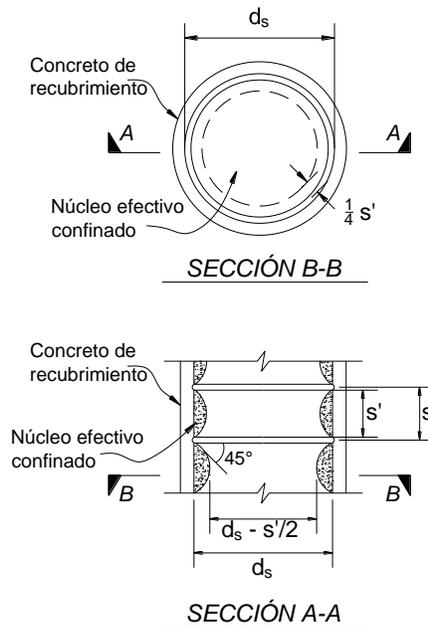
$$k_e = \frac{\left( 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6b_c d_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (D.1.13)$$

$$fl_x = k_e \rho_x f_y = k_e \frac{A_{sx}}{s d_c} f_y \quad (D.1.14)$$

$$fl_y = k_e \rho_y f_y = k_e \frac{A_{sy}}{s b_c} f_y \quad (D.1.15)$$

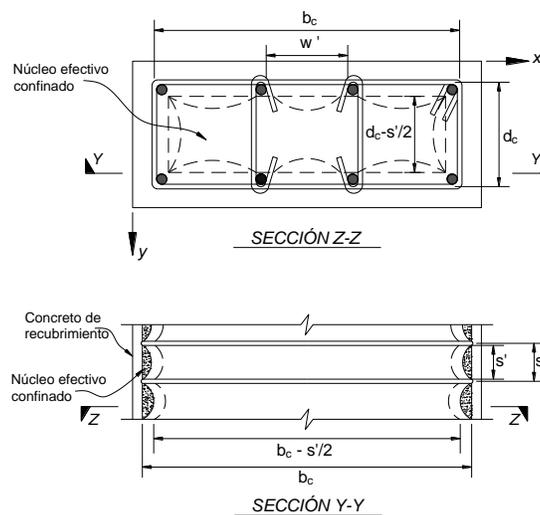
donde:

- $b_c$  y  $d_c$  Dimensión del núcleo de concreto a centros de varilla del estribo perimetral en dirección en  $x$  y dirección  $y$ , respectivamente, donde  $b_c \geq d_c$ . figura D.1.4.
- $\rho_{cc}$  Relación del área de refuerzo longitudinal  $A_s$ , y el área del núcleo de concreto de la sección encerrada por los centros de línea de los estribos,  $A_c$ .
- $\rho_{sx}$  Cuantía transversal en dirección  $x$ .
- $\rho_{sy}$  Cuantía transversal en dirección  $y$ .

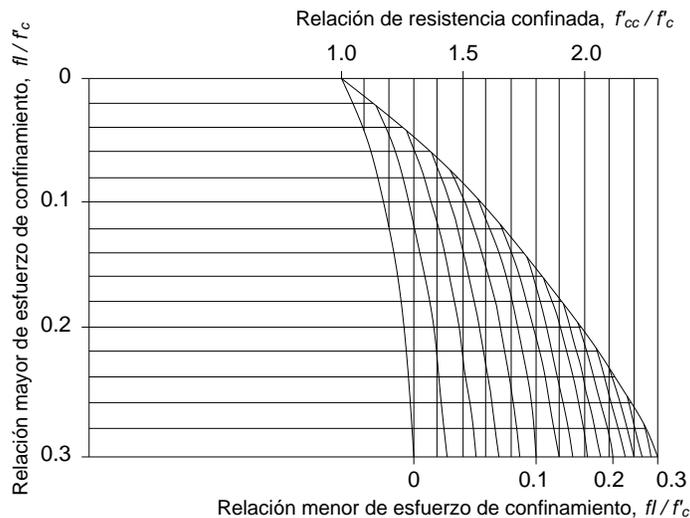


**Figura D.1.3. Núcleo confinado efectivo para estribos de refuerzo circulares.**

A partir del esfuerzo lateral de confinamiento en cada dirección  $f_{lx}, f_{ly}$  se determina la relación entre los esfuerzos máximos del concreto confinado y sin confinar  $\frac{f'_{cc}}{f'_c}$  utilizando el diagrama de la figura D.1.5.



**Figura D.1.4. Núcleo confinado efectivo para estribos de refuerzo rectangulares.**



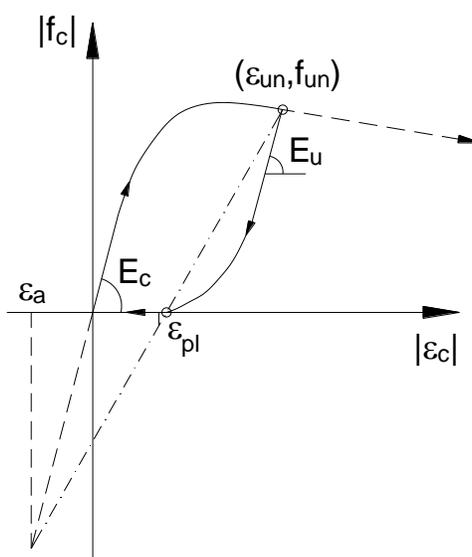
**Figura D.1.5. Determinación de resistencia confinada a partir del esfuerzo de confinamiento lateral para secciones rectangulares.**

**D.1.3 Relación esfuerzo deformación para cargas cíclicas a bajos rangos de deformación.**

Se podrá considerar, en general, que las estructuras que cumplan con las distorsiones máximas medias establecidas en la Tabla 4.2.1 de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo trabajan a bajos rangos de deformación. Sin embargo, en estructuras con relaciones largo/ancho muy grandes, con efectos importantes de torsión en planta, se deberán tomar precauciones especiales, ya que pueden tener deformaciones para las cuales no sean aplicables las disposiciones de este inciso.

**D.1.3.1 Descarga en compresión.**

En la Figura D.1.6 se muestra una curva esfuerzo-deformación incluyendo una rama de descarga. Es necesario determinar las coordenadas del punto de inversión de la descarga ( $\epsilon_{un}, \epsilon_{fu}$ ).



**Figura D.1.6. Curva esfuerzo deformación para una rama de descarga y determinación de una deformación plástica  $\epsilon_{pl}$  de una deformación común  $\epsilon_a$**

La deformación plástica  $\varepsilon_{pl}$  se presenta en la pendiente secante de la descarga que a su vez es dependiente de la de deformación  $\varepsilon_a$ .

$$\varepsilon_a = a\sqrt{\varepsilon_{un}\varepsilon_{cc}} \quad (D.1.16)$$

La constante  $a$  será el máximo valor de:

$$a = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{cc} + \varepsilon_{un}} \quad (D.1.17)$$

ó

$$a = \frac{0.09 \varepsilon_{un}}{\varepsilon_{cc}} \quad (D.1.18)$$

La deformación plástica en la línea secante entre  $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_{un}$  se calculará con:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{un} - \frac{(\varepsilon_{un} + \varepsilon_a)f_{un}}{(f_{un} + E_c \varepsilon_a)} \quad (D.1.19)$$

La curva de descarga mostrada en la figura D.1.6, queda definida por la ecuación:

$$f_c = f_{un} - \frac{f_{un} x r}{r - 1 + x^r} \quad (D.1.20)$$

en la cual:

$$r = \frac{E_u}{E_u - E_{sec}} \quad (D1.21)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{un}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}} \quad (D.1.22)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{un}}{\varepsilon_{pl} - \varepsilon_{un}} \quad (D.1.23)$$

donde  $E_u$  es el módulo de elasticidad al inicio de la descarga y será:

$$E_u = bcE_c \quad (D.1.24)$$

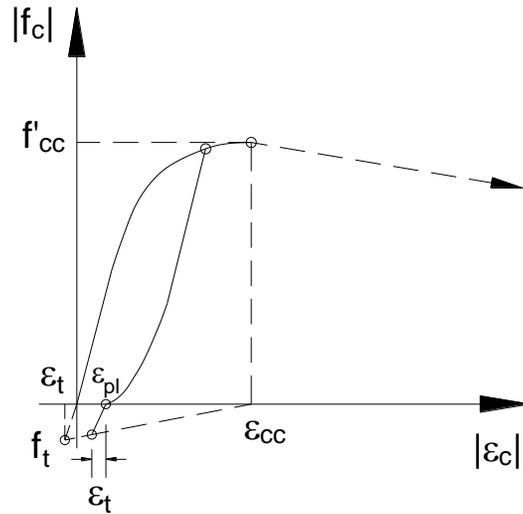
donde:

$$b = \frac{f_{un}}{f'_c} \geq 1 \quad (D.1.25)$$

$$c = \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{un}}\right)^{0.5} \leq 1 \quad (D.1.26)$$

### D.1.3.2 Descarga en tensión

Se asume una deterioración en la resistencia a la tensión debido a una previa compresión, la historia de la deformación está idealizada en la figura D.1.7.



**Figura D.1.7. Deterioración asumida en la resistencia a tensión del concreto debido a una carga de compresión a priori.**

$$f_t = fl \left( 1 - \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{cc}} \right) \quad (D.1.27)$$

Si  $\varepsilon_{pl} < \varepsilon_{cc}$  entonces  $f_t = 0$ . De este modo la relación esfuerzo-deformación se convierte:

$$f_t = E_t(\varepsilon_c - \varepsilon_{pl}) \quad (D.1.28)$$

donde:

$$E_t = \frac{f_t}{\varepsilon_t} \quad (D.1.29)$$

y

$$\varepsilon_t = \frac{fl}{E_c} \quad (D.1.30)$$

Cuando la deformación a tensión excede la resistencia de deformación a tensión, por ejemplo  $\varepsilon_c > (\varepsilon_t - \varepsilon_{pl})$ , se generan grietas y la resistencia a tensión del concreto para todas las cargas subsiguientes se asume igual a cero.

### D.1.3.3 Ramas de recargas

La figura D.1.8 muestra la curva esfuerzo deformación incluyendo ramas de carga y descarga. Las coordenadas del punto de recarga ( $\varepsilon_{ro}$ ,  $f_{ro}$ ) puede ser en cada curva de descarga, o del estado agrietado en el cual  $\varepsilon_{ro} = (\varepsilon_{pl} - \varepsilon_t)$  y  $f_{ro} = 0$ . Se asume una relación lineal entre  $\varepsilon_{ro}$  y  $\varepsilon_{un}$  para una revisión de la magnitud del esfuerzo ante una degradación cíclica. El nuevo punto de esfuerzo ( $f_{new}$ ) se asume con la ecuación:

$$f_{new} = 0.92f_{un} + 0.08f_{ro} \quad (D.1.31)$$

Una curva de transición parabólica es usada entre la relación lineal:

$$f_c = f_{ro} + E_r(\varepsilon_c - \varepsilon_{ro}) \quad (D.1.32)$$

donde:

$$E_r = \frac{f_{ro} - f_{new}}{\varepsilon_{ro} - \varepsilon_{un}} \quad (D.1.33)$$

y la curva esfuerzo deformación monotónica regresa a sus coordenadas  $(\varepsilon_{re}, f_{re})$ .

La deformación de regreso  $\varepsilon_{re}$  se asume con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{re} = \varepsilon_{un} + \frac{f_{un} - f_{new}}{E_r \left( 2 + \frac{f'_{cc}}{f'_c} \right)} \quad (D.1.34)$$

La curva de transición parabólica se describe por:

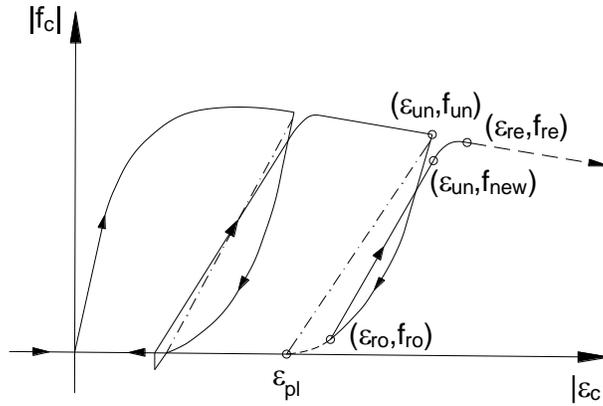
$$f_c = f_{re} + E_{re}x + Ax^2 \quad (D.1.35)$$

donde:

$$x = (\varepsilon_c + \varepsilon_{re}) \quad (D.1.36)$$

$$A = \frac{E_r - E_{re}}{-4[(f_{new} - f_{re}) - E_r(\varepsilon_{un} - \varepsilon_{re})]} \quad (D.1.37)$$

$E_{re}$  y  $f_{re}$  son el módulo y el esfuerzo en el punto tangente de regreso, respectivamente, determinados de la deformación de regreso,  $\varepsilon_{re}$ , usando la relación monotónica esfuerzo-deformación.



**Figura D.1.8. Curva esfuerzo-deformación para rama de recarga.**

#### **D.1.4 Efecto de la velocidad de la deformación en la curva esfuerzo-deformación**

El concreto exhibe un incremento significativo tanto en la resistencia como en la rigidez cuando es cargado con un incremento de velocidad de deformación, figura D.1.9.

Las ecuaciones anteriores son aplicadas para bajas velocidades de deformación (cargas cuasi-estáticas), sin embargo, estas mismas ecuaciones pueden ser aplicadas cuando el concreto es cargado con velocidades altas de deformación, siempre que los parámetros de control del concreto sin confinar  $f'_c$ ,  $E_c$  y  $E_{co}$  sean modificados para aplicar la velocidad adecuada  $\varepsilon_c$ .

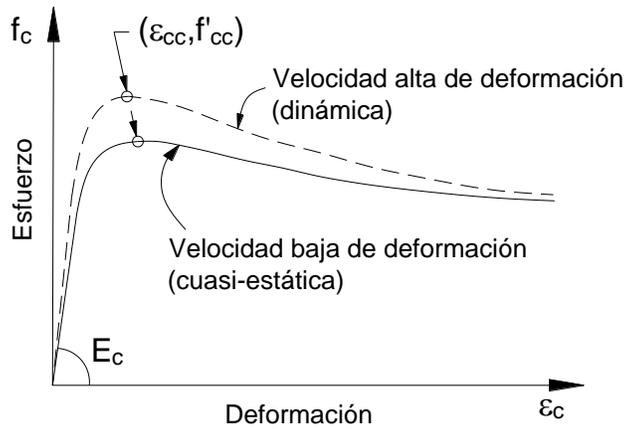


Figura D.1.9. Efecto de la velocidad de deformación en una curva esfuerzo-deformación del concreto.

Los factores de modificación son los siguientes:

**- Resistencia dinámica**

$$(f'_c)_{dyn} = D_f f'_c \tag{D.1.38}$$

$$D_f = \frac{1 + \left[ \frac{\dot{\epsilon}_c}{0.035 (f'_c)^2} \right]^{1/6}}{1 + \left[ \frac{0.00001}{0.035 (f'_c)^2} \right]^{1/6}} \tag{D.1.39}$$

donde:

$\dot{\epsilon}_c$  es la velocidad con que se aplica la deformación  $\epsilon_c$  en  $s^{-1}$ .

**- Rigidez dinámica**

$$(E_c)_{dyn} = D_E E_c \tag{D.1.40}$$

$$D_E = \frac{1 + \left[ \frac{\dot{\epsilon}_c}{0.035 (f'_c)^3} \right]^{1/6}}{1 + \left[ \frac{0.00001}{0.035 (f'_c)^3} \right]^{1/6}} \tag{D.1.41}$$

**- Deformación dinámica en el esfuerzo máximo del concreto sin confinar.**

$$(\epsilon_{co})_{dyn} = D_\epsilon \epsilon_{co} \tag{D.1.42}$$

$$D_\epsilon = \frac{1}{3D_f} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{3D_f^2}{D_E}} \right) \tag{D.1.43}$$

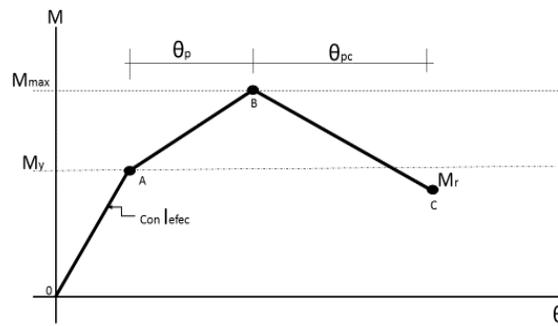
**D.2 Diagramas momento rotación**

En esta opción el comportamiento a flexión o flexo compresión de los miembros estructurales se representa con un diagrama como el mostrado en la figura 3.6.1 (reproducido aquí como figura D.2.1). La rama inicial OA corresponde a momentos

flexionantes menores que el momento de fluencia  $M_y$ ; este momento flexionante puede calcularse con los métodos usuales del bloque equivalente de esfuerzos, pero debe usarse la resistencia esperada del concreto  $\bar{f}_c$  y el esfuerzo de fluencia esperado del acero  $\bar{f}_y$ . La rigidez de la rama inicial debe tomar en cuenta el agrietamiento de las secciones, la contracción y el flujo plástico. Para esto pueden usarse los momentos de inercia efectivos del inciso 3.2.1 de estas normas. También pueden estimarse los momentos de inercia efectivos con la ecuación D.2.1 propuesta por Haselton (2008).

$$I_{efec} = I_g \left( -0.02 + 0.98 \left( \frac{P}{A_g \bar{f}_c} \right) + 0.09 \left( \frac{L_s}{H} \right) \right) \text{ donde } 0.35I_g \leq I_{efec} \leq 0.8I_g \quad (D.2.1)$$

Esta ecuación toma en cuenta el deslizamiento del refuerzo longitudinal en la interfaz de los elementos por ruptura de la adherencia. Ese fenómeno es importante ya que el deslizamiento de las barras dentro del nudo puede contribuir hasta en más de 30% a la deformación total del nudo, Hwang (2015).



**Figura D.2.1. Gráfica Momento-Rotación Idealizada**

Para definir la rama AB de la figura D.2.1 es necesario calcular el momento máximo,  $M_{max}$ , y la rotación posterior a la fluencia,  $\theta_p$ . El momento máximo puede obtenerse con las hipótesis usuales para flexión y flexocompresión, pero debe incluirse el endurecimiento por deformación del acero de refuerzo. La rotación  $\theta_p$  se puede calcular con la siguiente ecuación propuesta también por Haselton (2008):

$$\theta_p = 0.12(1 + 0.55a_{sl})0.16^\vartheta(0.02 + 40\rho_{sh})^{0.43}(0.54)^{0.01c_u f'_c}(0.66)^{0.1s_n}(2.27)^{10.0\rho} \quad (D.2.2)$$

Donde  $a_{sl}=1$ , a menos que se evite el deslizamiento por falla de adherencia;  $\vartheta = P/f'_c A_g$ , es el índice de carga axial;  $\rho_{sh} = A_{sh}/sb$ , es la relación de refuerzo transversal en la zona de articulación plástica;  $c_u$  es un factor de conversión de unidades igual a 1 para unidades en sistema internacional e igual a 0.1 para sistema métrico decimal;  $s_n = (s/d_b)(f_y/100)^{0.5}$  es un factor para considerar el pandeo de los estribos ( $s$  es la separación de estribos,  $d_b$  es el diámetro de los estribos y  $f_y/100$  debe cambiarse a  $f_y/1000$  en unidades del sistema métrico; y  $\rho$  es la relación de refuerzo longitudinal. Esta ecuación no toma en cuenta el deterioro de los elementos estructurales ante cargas repetidas.

La ecuación D.2.2 puede aplicarse tanto a vigas como a columnas, pero cuando el refuerzo longitudinal de los elementos no sea simétrico debe introducirse un factor de corrección de acuerdo con la ecuación D.2.3:

$$\theta_{p(asimétrico)} = \left[ \frac{\max\left(0.01, \frac{\rho' f_y}{f'_c}\right)}{\max\left[0.01, \frac{\rho f_y}{f'_c}\right]} \right] \theta_{p(simétrico)} \quad (D.2.3)$$

Para la rama final, BC, del diagrama momento rotación se deben estimar el momento final,  $M_r$ , y la rotación posterior al momento máximo,  $\theta_{pc}$ , figura D.2.1. El momento  $M_r$  es muy pequeño y conservadoramente se debe despreciar. La rotación  $\theta_{pc}$  se puede calcular con la ecuación D.2.2, Haselton (2008):

$$\theta_{pc} = (0.76)(0.031)^\vartheta(0.02 + 40\rho_{sh})^{1.02} \leq 0.10 \quad (\text{D.2.4})$$

### D.3 Deterioro

La gráfica de la figura D.2.1 definida con los valores de momentos y rotaciones obtenidos de la manera descrita en la sección D.2 es lo que se conoce como curva básica (en inglés backbone curve), pero debe modificarse para tomar en cuenta el deterioro bajo cargas cíclicas. El deterioro en un determinado ciclo  $i$  se define con un parámetro  $\beta_i$  dado por la ecuación D.2.5:

$$\beta_i = \left( \frac{E_i}{E_i - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^c \quad (\text{D.2.5})$$

donde:

$E_i$  = energía histerética disipada en el ciclo  $i$

$E_t$  = capacidad referente de rotación plástica, expresada como  $E_t = \lambda\theta_p M_y$

$\sum E_j$  = energía histerética disipada en todos los ciclos anteriores

$c$  = exponente que define la velocidad de deterioro y que se toma igual a 1.0

$\lambda$  = parámetro que define la capacidad media de disipación de energía y que Haselton (2010) propone como:

$$\lambda = (30)(0.03)^\vartheta$$

donde  $\vartheta$  es el índice de carga axial.

### Referencias Apéndice D

- Haselton, C. B.; Liel, A. B.; Taylor Lange, S, and Deierlein, G. G. (2008). "Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings". Peer Report 2007/03.
- Haselton, C. B.; Liel, A. B.; Taylor Lange, S, and Deierlein, G. G. (2010). "Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings". (Updated Report).
- Hwang, H. J.; Eom, T. S., and Park, H. G. (2015). "Bond-Slip Relationship of Beam Flexural Bars in Interior Beam-Column Joints". ACI Structural Journal. November-December.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (2010). "Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings. Task 7 Report for the Tall Buildings Initiative". PEER Report 2010/111 (También publicado como PEER/ATC-72-1).
- Mander, J. B.; Priestley, M. J. N.; and Park, R. (1988). "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete". Journal of Structural Engineering, V. 114, No. 8., ASCE, August.
- Mendoza, C. J.; Aire, C.; López, J.; Hernández, F. (2013), "Propiedades mecánicas de barras de refuerzo grados 42, 52 y 56", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Rodríguez, Mario E. y Botero, Juan Carlos. (1995). "Comportamiento Sísmico de Estructuras Considerando Propiedades Mecánicas de Aceros de Refuerzo Mexicanos." Revista de Ingeniería Sísmica, No. 49, 39-50.