

60



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

"ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE  
ADHERENCIA EN ELEMENTOS LINEALES  
DE CONCRETO REFORZADO"

T E S I S  
PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A:

PERCY ALEJANDRO HUERTA AGUILERA



DIRECTOR DE TESIS: DR. OSCAR LOPEZ BATIZ

MEXICO, D. F.

2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/ 073/02

Señor  
**PERCY ALEJANDRO HUERTA AGUILERA**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. OSCAR LÓPEZ BÁTIZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE ADHERENCIA EN ELEMENTOS LINEALES DE CONCRETO REFORZADO."**

- INTRODUCCIÓN**
- I. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ADHERENCIA**
  - II. DEMANDA DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN Y CORTANTE EN ELEMENTOS DE ESTRUCTURAS EN REGIONES DE ALTA SISMICIDAD**
  - III. REVISIÓN COMPARATIVA DE LA PROPUESTA REGLAMENTARIA DE RESISTENCIA Y UN PROCEDIMIENTO CONSIDERANDO LA DEMANDA DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN Y CORTANTE.**
  - IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 13 de mayo de 2002.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

**A mi padre, por su apoyo y compañía a lo largo de toda mi vida, en los**

**buenos y malos momentos que hemos pasado**

**A mis hermanos por creer en mi y ser parte de mi existencia**

**A toda mi familia, a aquellas personas que están y**

**a las que ya no están pero siguen existiendo en mi corazón y en mis**

**recuerdos,**

**por su apoyo, gracias**

## **Agradecimientos:**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la educación necesaria para enfrentar la vida

A todos mis profesores, por compartir su conocimiento con mi persona, darme las herramientas para forjar mi futuro y así poder aportar algo a la sociedad

A mis amigos, por estar siempre presentes durante mi formación universitaria, por brindarme su compañía y confianza, doy gracias por haber conocido gente tan valiosa y especial

Al Doctor Oscar López Bátiz, por su gran apoyo y paciencia para la elaboración de este trabajo y todas las demás actividades relacionadas con mi profesión

Y a todas las demás personas, que de una u otra manera participaron en mi formación y fueron parte de este logro, gracias

# ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE ADHERENCIA EN ELEMENTOS LINEALES DE CONCRETO REFORZADO

## CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>1</b>  |
| Alcances  | 1         |
| Objetivos y organización del trabajo  | 2         |
| <b>Capítulo I CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ADHERENCIA</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1 Introducción  | 4         |
| 1.2 Demanda de adherencia por flexión   | 5         |
| 1.3 Mecanismos de falla y resistencia por adherencia  | 8         |
| <b>Capítulo II DEMANDA DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN Y CORTANTE EN ELEMENTOS DE ESTRUCTURAS EN REGIONES DE ALTA SISMICIDAD</b>  | <b>21</b> |
| 2.1 Demanda de adherencia por flexión al formarse el mecanismo de falla   | 21        |
| 2.2 Mecanismos de transferencia de cortante ante un estado de fuerzas provocado por sismo   | 23        |
| 2.3 Demanda de adherencia por cortante al formarse el mecanismo de falla  | 33        |
| 2.4 Propuestas para determinar la resistencia por adherencia  | 35        |
| 2.5 Conclusiones  | 39        |
| <b>Capítulo III REVISIÓN COMPARATIVA DE LA PROPUESTA REGLAMENTARIA DE RESISTENCIA Y UN PROCEDIMIENTO CONSIDERANDO LA DEMANDA DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN Y CORTANTE</b> | <b>40</b> |
| 3.1 Modelos de análisis a considerar  | 40        |
| 3.2 Evaluación de las demandas de adherencia y las resistencias correspondientes  | 44        |
| 3.3 Estudio de la relación demanda-resistencia de adherencia para las condiciones límite de los elementos estructurales lineales                                      | 49        |
| 3.4 Conclusiones  | 65        |
| <b>Capítulo IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>   | <b>73</b> |
| 4.1 Conclusiones  | 73        |
| 4.2 Recomendaciones   | 75        |
| 4.3 Trabajos futuros  | 75        |
| <b>Referencias</b>  | <b>78</b> |

## INTRODUCCIÓN

### Alcances

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal proporciona los lineamientos mínimos a seguir para la elaboración de obras civiles y de edificación de manera generalizada, en sus aspectos más relevantes y desde una visión general. Con objeto de cubrir aquellos aspectos más específicos dentro de los procedimientos de análisis y diseño fue necesario crear un complemento técnico para el Reglamento, el cual fuera más fácil modificar dado la evolución en los diferentes campos de la ingeniería civil. Para este efecto se crearon las Normas Técnicas Complementarias para el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTC-RCDF, 1997).

Las Normas Técnicas Complementarias (NTC) constituyen una herramienta muy útil e importante para el profesional de la construcción, ya que constituyen un complemento para el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y proporciona, en sus diferentes apartados, las disposiciones a seguir para la elaboración de una determinada obra. En particular, las Normas Técnicas Complementarias para las Estructuras de Concreto Reforzado ayudan a diseñar y construir con base en los requisitos mínimos, logrando un nivel de comportamiento y seguridad adecuado y uniforme para cualquier tipo de sistema estructural.

Entre los diferentes aspectos tratados en las NTC para Estructuras de Concreto se encuentra un punto importante que no se puede pasar por alto al diseñar un elemento estructural ante los diferentes elementos mecánicos que se presentan, se trata de la relación que existe al interactuar el acero de refuerzo y el concreto, lo cual se denomina adherencia. Se sabe que si no se garantiza una adecuada adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, las hipótesis planteadas para tratar de definir el comportamiento de elementos, y por tanto estructuras de concreto reforzado, dejan de sustentarse, lo que generaría la inexistencia del concreto reforzado como material en sí, y se estaría tratando entonces de elementos de

concreto simple con tendones de acero en la vecindad, presentándose un comportamiento totalmente diferente de toda la estructura.

Por lo tanto, un diseño adecuado siguiendo las propuestas reglamentarias no deberá presentar problemas por adherencia; entonces, los requisitos que establece cualquier reglamento de construcciones deberán ser suficientes para evitar la aparición de una falla del tipo de adherencia y anclaje; siendo éste el tema que se aborda en este trabajo.

En este estudio se busca revisar el nivel de seguridad, ante el fenómeno de adherencia, que tienen los elementos lineales diseñados siguiendo los lineamientos planteados en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento del Distrito Federal. Se revisan los resultados obtenidos con algunos modelos analíticos y experimentales para observar su comportamiento ante dichas acciones y, de esta manera, poder llegar a comparar los resultados obtenidos por medio de la propuesta reglamentaria empleando las NTC para Estructuras de Concreto, con los resultados de una propuesta específica para revisión de este fenómeno, planteada en los códigos del Instituto de Arquitectos de Japón (AIJ, 1988) para estructuras de concreto reforzado. De esta forma, observando la relación entre los resultados, se determinará el nivel de seguridad comparativo que se tiene diseñando elementos lineales (vigas y columnas) de concreto reforzado con base en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento para el Distrito Federal.

### **Objetivos y organización del trabajo**

El presente trabajo intenta dar a conocer los aspectos fundamentales sobre el tema de adherencia entre acero de refuerzo y concreto en elementos lineales de concreto reforzado; y por medio de los diferentes capítulos, estudiar y comparar, por medio de algunos ejemplos teóricos de elementos estructurales comúnmente presentes en la práctica, el nivel de seguridad que se alcanza diseñando considerando el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.



El trabajo de investigación se encuentra dividido en cuatro capítulos. Como introducción se da una breve descripción del problema y de la forma de abordarlo. En el capítulo I se dan a conocer los conceptos básicos sobre adherencia, principalmente en un estado de carga estática vertical. En el capítulo II se estudian las demandas de adherencia debidas a los diferentes elementos mecánicos que actúan en una estructura que se encuentra en una región de alta sismicidad. Dado que en las regiones de alta sismicidad es necesario garantizar el buen comportamiento de las estructuras, la mayoría de los reglamentos ponen un especial cuidado en el detallado de los elementos estructurales que se encuentren en esta circunstancia, parte de lo cual influye en el comportamiento ante el fenómeno de adherencia.

En el capítulo III se realiza una revisión comparativa tomando en cuenta elementos estructurales que comúnmente pueden ser utilizados en la práctica y que fueron diseñados con las NTC del RCDF, se obtiene la resistencia de adherencia del elemento y se compara contra la adherencia demandada del mismo por medio de la propuesta del código Japonés, reglamento que presenta una propuesta específica sobre la evaluación del fenómeno de adherencia valuada con resultados experimentales. De tal forma que al final del estudio se proporcionará un valor representativo del índice de seguridad ante el fenómeno de adherencia y se tendrá la capacidad de determinar los aspectos en que se debe de tener más cuidado al diseñar un elemento estructural, de tal forma que se podrán emitir algunas conclusiones y recomendaciones al respecto en el capítulo IV.

En resumen, en el presente trabajo se trata de evaluar el nivel de seguridad ante adherencia, al diseñar elementos lineales de concreto reforzado por medio de las NTC del RCDF para estructuras de concreto, partiendo de la comparación con las recomendaciones de otros códigos como son en este caso los japoneses.

## CAPITULO I

### CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ADHERENCIA

#### 1.1 Introducción

El fenómeno de adherencia se genera al presentarse variaciones en los esfuerzos del acero de refuerzo longitudinal, esa diferencia en esfuerzos, y por lo tanto de fuerzas, deberá ser transmitida al concreto a través de adherencia. Este esfuerzo de adherencia, es un esfuerzo cortante que se genera en la interfase entre la barra y el concreto que la rodea.

El esfuerzo de adherencia es la fuerza por unidad de área superficial de una barra de refuerzo, el cual actúa paralelo a la barra en la interfase entre la barra y el concreto que la rodea. Se ha acostumbrado determinar el esfuerzo de adherencia dividiendo la variación en la fuerza de tensión en la barra en dos diferentes secciones, entre el área cilíndrica superficial de la barra entre esas dos secciones, basada en el diámetro nominal, despreciando la corrugación en la barra.

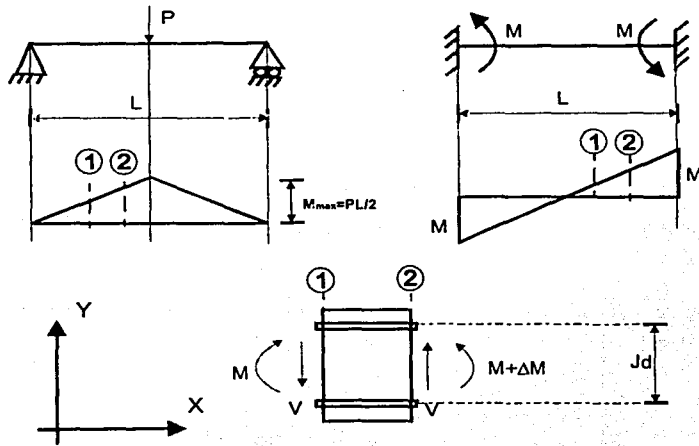
El esfuerzo de adherencia puede ser también la razón de transferencia de carga entre el concreto y el acero. En otras palabras si existe esfuerzo de adherencia existe un cambio en el esfuerzo del acero, o consecuentemente si existe un cambio en el esfuerzo en el acero, debe existir esfuerzo de adherencia.

Un requerimiento básico en las propuestas teóricas para diseño de concreto reforzado es que el acero y el concreto que lo rodea actúen juntos, que exista compatibilidad de deformaciones, y que dentro del nivel de cargas de servicio, no exista separación o corrimiento de la barra respecto al concreto que la rodea. Desde otro punto de vista, el corrimiento de la barra respecto al concreto que lo rodea puede o no resultar la falla de la viga; inclusive si existe la separación completa entre las barras y el concreto en gran parte de la longitud, una viga podría continuar cargando mientras que las barras no pierdan totalmente su adherencia, esto solo repercutirá en un incremento de las respuestas máximas cuando el sistema estructural sea sujeto a los efectos de sismo o carga lateral cíclica

reversible. Los anclajes mecánicos pueden ser usados para garantizar la integridad del sistema. Las barras deben ser ancladas de alguna forma cuando la longitud de anclaje no sea posible de proporcionar por limitación geométrica de los elementos.

### 1.2 Demanda de adherencia por flexión

El comportamiento, o demanda de adherencia, generalmente se manifiesta en aquellas zonas del elemento trabajando en el rango elástico. El fenómeno surge de la necesidad de equilibrar la diferencia de fuerzas de tensión en el acero de refuerzo longitudinal, producto de una diferencia de momentos en el elemento estructural, como se muestra en la figura 1.



Considerando el segmento de refuerzo longitudinal entre las secciones 1 y 2:

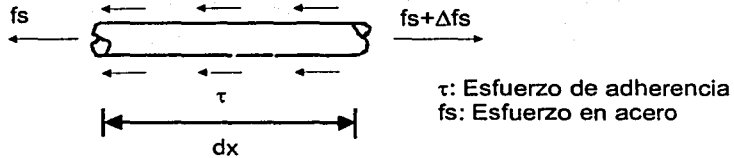


Figura 1. Demanda de adherencia producto de diferencial de momentos flexionantes

De  $\Sigma F_x = 0$  (Equilibrio):

$$A_s df_s - \tau P_o dx = 0$$

$$\tau = \frac{A_s df_s}{P_o dx}$$

Po: Perímetro de la barra de refuerzo longitudinal

dfs = Δfs : Diferencial de esfuerzo de acero

As: Área de la varilla de acero

$$\text{Si } f_s \cong \frac{M}{A_s J_d} \Rightarrow \frac{df_s}{dx} = \frac{dM/dx}{A_s J_d} = \frac{V}{A_s J_d}$$

Se tiene que el esfuerzo de adherencia demandado se puede determinar como:

$$\tau = \frac{V}{P_o J_d}$$

Formulación muy simple, que por existir deslizamiento relativo y agrietamiento generalizado, la expresión no es muy precisa, aunque proporciona una idea del comportamiento y del nivel de demanda de esfuerzos de adherencia en un elemento lineal.

En zonas donde el momento es mayor que el de fluencia, por ejemplo en zonas de formación de articulación plástica, al no existir un diferencial de esfuerzos en el acero de refuerzo longitudinal, no hay demanda de esfuerzos de adherencia, porque el refuerzo estará fluyendo y se ubicará en la región de la planicie de fluencia de la relación  $\sigma - \epsilon$ .

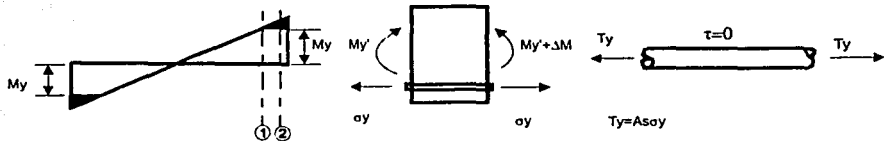


Figura 2. Esfuerzo de adherencia en zonas de articulación plástica

Si se recuerdan los conceptos de flexión, esto es aceptable debido a que para momentos en la sección transversal mayores a  $M_y$ , dado que no habrá incremento en el esfuerzo del acero de refuerzo, el incremento de momento se obtiene de la modificación de esfuerzos en el concreto y acero a compresión, y por lo tanto, de la modificación en la posición del eje neutro.

Desde este punto de vista de tratamiento del fenómeno de adherencia, la distribución de esfuerzo  $\tau$  se considera constante. Sin embargo, el comportamiento de adherencia no es tan simple, sea por ejemplo una viga o segmento de viga a flexión pura como se muestra en la figura 3:

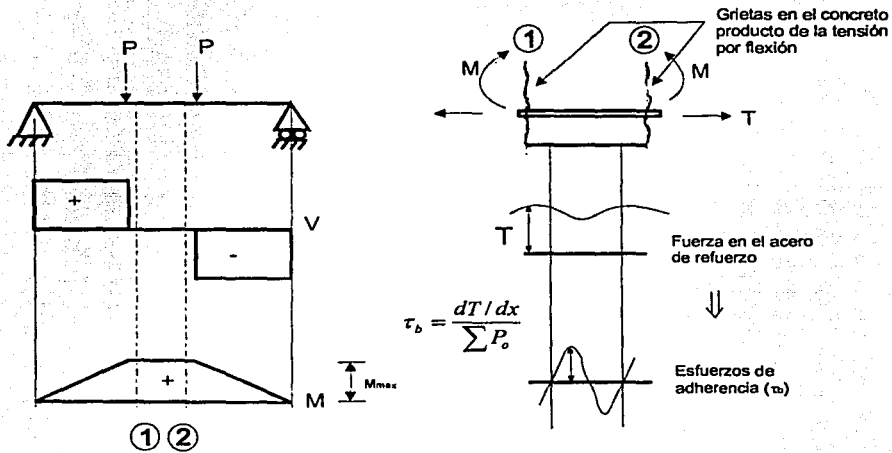


Figura 3. Adherencia y agrietamiento

Existen distribuciones de esfuerzos de adherencia tan diferentes y complejos como la variedad de elementos estructurales existentes. Por ejemplo, sea el caso de una zapata de cimentación; donde se asume que la reacción del suelo no es uniforme, y la distribución del momento no es lineal. En este caso se tiene (figura 4):

Si se recuerdan los conceptos de flexión, esto es aceptable debido a que para momentos en la sección transversal mayores a  $M_y$ , dado que no habrá incremento en el esfuerzo del acero de refuerzo, el incremento de momento se obtiene de la modificación de esfuerzos en el concreto y acero a compresión, y por lo tanto, de la modificación en la posición del eje neutro.

Desde este punto de vista de tratamiento del fenómeno de adherencia, la distribución de esfuerzo  $\tau$  se considera constante. Sin embargo, el comportamiento de adherencia no es tan simple, sea por ejemplo una viga o segmento de viga a flexión pura como se muestra en la figura 3:

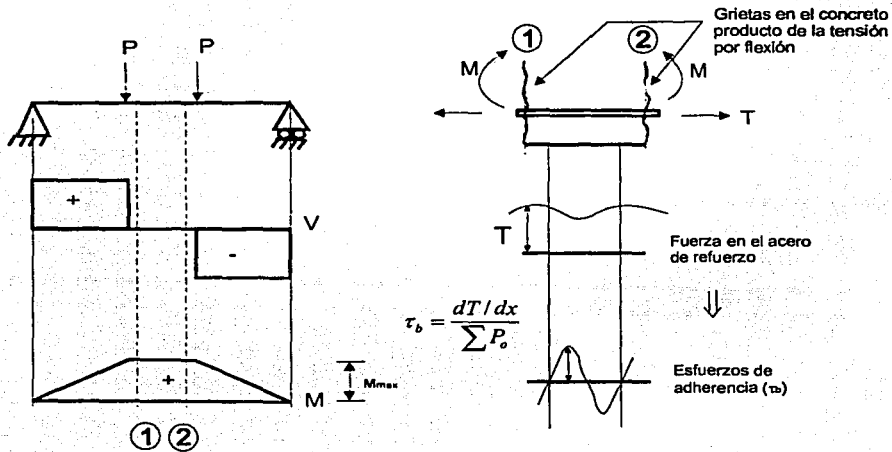


Figura 3. Adherencia y agrietamiento

Existen distribuciones de esfuerzos de adherencia tan diferentes y complejos como la variedad de elementos estructurales existentes. Por ejemplo, sea el caso de una zapata de cimentación; donde se asume que la reacción del suelo no es uniforme, y la distribución del momento no es lineal. En este caso se tiene (figura 4):

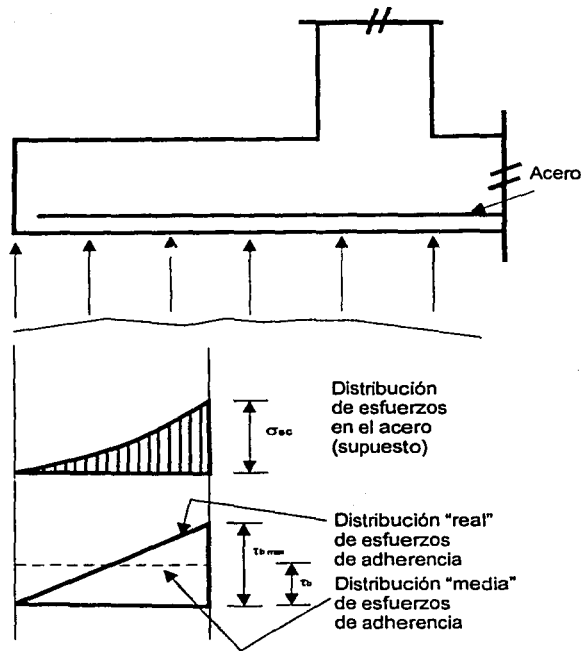


Figura 4. Esfuerzos de adherencia en una zapata de cimentación

Generalmente en los reglamentos y/o códigos de diseño se consideran distribuciones medias de esfuerzos de adherencia. Sin dejar de contemplar que las distribuciones de esfuerzos son complejas y generalmente desconocidas, lo cual trata de estar contemplado en los factores que modifican los esfuerzos de adherencia a considerar, o las longitudes de desarrollo.

### 1.3 Mecanismos de falla y resistencia por adherencia

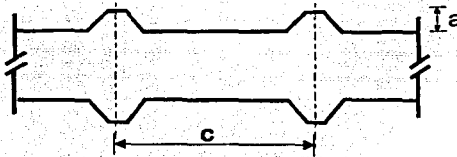
Entre los mecanismos primarios de resistencia por adherencia entre acero y concreto se pueden citar:

- Adherencia química
- Adherencia por fricción, acero-concreto
- Adherencia mecánica (corrugaciones en el acero)

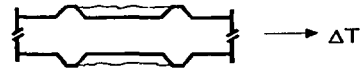
Únicamente en los fenómenos por fricción y mecánico, interviene positivamente el efecto de confinamiento del acero de refuerzo lateral. En cuanto al fenómeno de adherencia mecánica, la resistencia se incrementará conforme se tenga una selección adecuada de los parámetros que afectan el fenómeno; a saber:

- Si se tiene una corrugación alta esta podría fallar por flexión, o el concreto por cortante directo
- Si la corrugación es baja podría presentarse la falla por aplastamiento del concreto
- Si la separación entre corrugaciones aumenta, la resistencia por adherencia disminuye

De resultados experimentales se establecen las características geométricas de la corrugación como se indica en la figura 5:



Si  $a/c > 0.15$   
Falla por cortante  
directo en el  
concreto



Si  $a/c < 0.10$ , Falla por aplastamiento del concreto



Figura 5. Mecanismos de falla por adherencia



Asimismo, la contribución de los mecanismos de resistencia por adherencia dependerá de:

- Resistencia a compresión del concreto
- Características de las dimensiones del acero de refuerzo longitudinal
- Posición y orientación del acero de refuerzo longitudinal
- Dimensiones del recubrimiento
- Configuración y distribución del refuerzo lateral
- Configuración y distribución del refuerzo longitudinal
- Cuantía de acero de refuerzo lateral ( $\rho_w \sigma_{wy}$ )

En lo referente a la expresión para determinar la resistencia por adherencia, la propuesta del ACI (ACI, 2000) contempla principalmente los dos primeros factores, y propone una expresión para determinar la resistencia por adherencia como se indica (esfuerzo  $\tau_b$ ):

$$\tau_b = (6.3 \sim 7.3) \sqrt{f'_c} / D \leq 56 \text{ kg/cm}^2$$

Donde: D es el diámetro de la barra en cuestión.

El valor de  $56 \text{ kg/cm}^2$  como límite superior de resistencia se obtuvo de resultados experimentales para fallas en cortante directo (figura 5).

Volviendo al diagrama de cuerpo libre de la porción de la barra longitudinal sujeta a un diferencial de esfuerzo de tensión, que deberán ser transmitidos al concreto por el fenómeno de adherencia, se tiene en la figura 6:

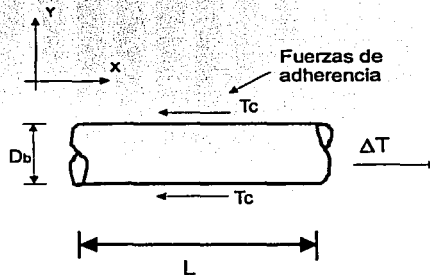


Figura 6. Estado de fuerzas en un segmento de barra de refuerzo longitudinal

Del equilibrio:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Delta T = T_c$$

$$\Delta T = f_s A_s$$

$$T_c = \tau_b P_o L$$

(1)

En diseño, por definición:  $T_c > \Delta T$ , significando que la diferencial de fuerza de tensión en la barra es transmitida totalmente al concreto.

Se deberá cumplir entonces que:

$$\therefore \frac{\Delta T}{T_c} = \frac{f_s A_s}{\tau_b P_o L} \leq 1$$

$$\text{Si } A_s = \frac{\pi D_b^2}{4} \text{ y } P_o = \pi D_b$$

$$\frac{\Delta T}{T_c} = \frac{f_s D_b}{4 \tau_b L} \leq 1$$

De esta última expresión se puede concluir que para cumplir con la desigualdad, y tener o lograr un mejor comportamiento ante el fenómeno de adherencia, se deberá buscar:

- Valores pequeños del diámetro de la barra ( $D_b$ )
- Mayores longitudes de desarrollo del fenómeno ( $L$ )
- Menores esfuerzos en las barras de refuerzo ( $f_s$ )
- Mayor resistencia por adherencia ( $\tau_b$ )

De las mismas expresiones (1) se obtiene:

$$f_s A_s = \tau_b P_o L \Rightarrow L = A_s f_s / \tau_b P_o \quad (2)$$

Si se asume que el elemento presentará fluencia por flexión, entonces:  $f_s = f_y$

Así, se tiene la expresión básica para longitudes de desarrollo y/o anclaje de barras de refuerzo longitudinal:

$$L = A_s f_y / \tau_b P_o$$

Recordando la expresión propuesta por el ACI para el esfuerzo de resistencia por adherencia ( $\tau_b$ ), para falla por cortante directo en el concreto:

$$\tau_{b \max} = 56 \text{ kg/cm}^2$$
$$\therefore L_b = \frac{\pi D^2 f_y}{4\pi D 56} = 0.0045 D f_y \quad (3)$$

Considerando que el esfuerzo de fluencia del acero empleado puede resultar del orden del 25% mayor que el nominal ( $f_y > f_{y \text{ nom}}$ ); se tiene entonces la expresión para determinar la longitud básica de desarrollo y anclaje:

$$L_b = 1.25 (0.0045) D f_y$$
$$L_b = 0.006 D f_y \quad (4)$$

Que constituye la propuesta del RDF-87 para verificación de adherencia ante el fenómeno de falla por cortante directo, constituyéndose en la longitud de desarrollo básica para evitar este tipo de falla.

Para el caso de falla de adherencia por separación se tiene:

$$\tau_{b \max} = 6.3 \sqrt{f'_c} / D_b$$
$$L_b = \frac{A_s f_y}{\pi D_b (6.3 \sqrt{f'_c} / D_b)} \approx 0.051 A_s f_y / \sqrt{f'_c}$$

Si se acepta nuevamente el probable incremento de la resistencia real a la fluencia del acero de refuerzo, respecto a la resistencia nominal, del orden del 25% se tiene:

$$L_b = 0.06 A_s f_y / \sqrt{f'_c}$$

Que es la propuesta del RDF-87 para verificación del fenómeno de adherencia ante falla por separación.

### 1.3.1 Revisión de los mecanismos principales de resistencia por adherencia mecánica (corrugación de la barra).

Considerando las fuerzas actuantes en la barra, como se indica en la figura 7:

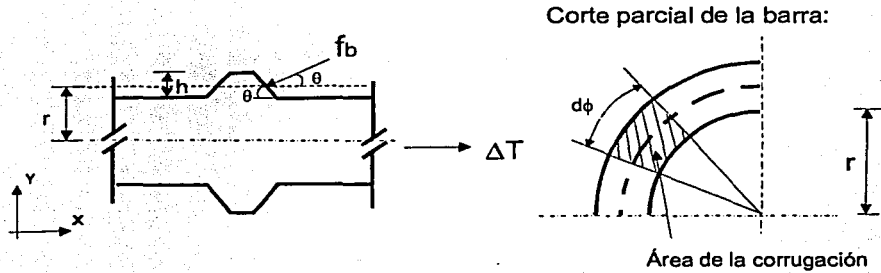


Figura 7. Geometría de barra con corrugaciones

La fuerza inclinada en la cara de la corrugación resultará:

$$F_b = f_b \frac{h}{\cos \theta} r d \phi \quad (5)$$

Así, sobre la barra actuarán las componentes horizontal y vertical de la fuerza  $F_b$ , inclinada un ángulo  $\theta$  respecto al eje de la barra. Considerando la componente de la fuerza a lo largo de la barra:

$$F_{bx} = \left( f_b \frac{h}{\cos \theta} r d \phi \right) \cos \theta = f_b h r d \phi \quad (6)$$

Integrando en la periferia de la barra se obtiene la fuerza total por corrugación:

$$F_{Tbx} = \int_0^{2\pi} f_b h r d \phi = \pi D f_b h \quad (7)$$

Donde  $D=2r$ .

Siendo  $s$  la separación entre corrugaciones, la fuerza por unidad de longitud queda:

$$F_{T_{iubx}} = \frac{\pi}{s} D f_b h \quad (8)$$

De donde el esfuerzo por adherencia será:

$$\begin{aligned} \tau &= F_{T_{iubx}} / P_0 = F_{T_{iubx}} / \pi D \\ \tau &= f_b h / s \end{aligned} \quad (9)$$

Si el tipo común de falla ante la incidencia de esta fuerza horizontal en la corrugación de la barra es por cortante directo (figura 8):

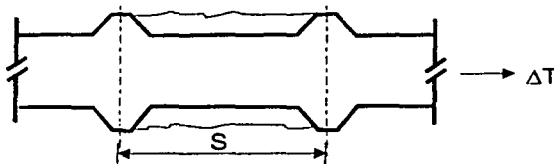


Figura 8. Detalle de falla por cortante directo

La falla se presentará cuando la fuerza horizontal sea igual o mayor a la resistencia a cortante directo del concreto en una superficie cilíndrica de falla entre corrugaciones (considerando la expresión 6).

$$\therefore f_b h r d\phi = \sigma_{\text{cortante}} r d\phi s$$

Donde se está aceptando que:

$$(r + h/2)d\phi \cong rd\phi$$

Por el hecho de que  $r \gg h$ ;  $\sigma_{\text{cortante}}$  es el esfuerzo cortante directo resistente del concreto:

$$f_b = \sigma_{\text{cortante}} s / h \quad (10)$$

Sustituyendo (9) en (10):

$$\tau = \sigma_{\text{cortante}} \quad (11)$$

Por lo tanto, en este tipo de falla la resistencia por adherencia estará determinada por la resistencia al cortante directo del concreto.

Considerando ahora la componente de la fuerza  $F_b$  perpendicular a la barra:

$$F_{by} = \left( f'c \frac{h}{\cos\theta} r d\phi \right) \text{sen}\theta \quad (12)$$

$$F_{bx} = f'c h r d\phi \tan\theta$$

Este esfuerzo deberá ser equilibrado por tensión directa en el concreto, que es generada por un fenómeno de separación en el concreto (figura 9).

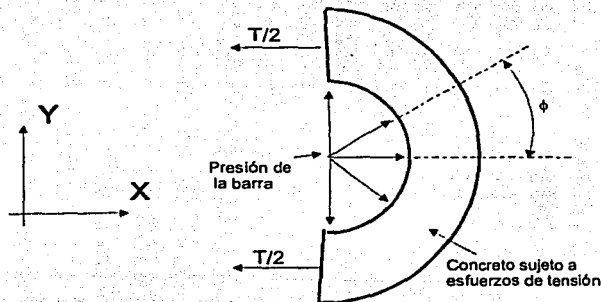


Figura 9. Esfuerzos de tensión en el concreto por el fenómeno de separación

La fuerza total de tensión en el concreto, será:

$$T = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_b h r \tan\theta \cos\phi d\phi$$

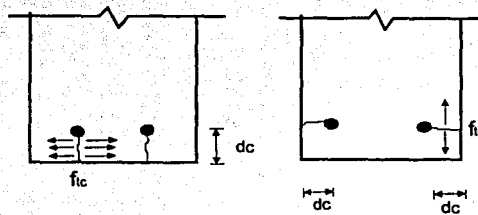
Al afectar la expresión (12) por  $\cos\phi$  es con objeto de descomponer las fuerzas radiales de la barra sobre el concreto en la dirección x de análisis. Integrando la expresión, se tiene:

$$T = D f_b h \tan\theta$$

Y la fuerza por unidad de longitud será:

$$T_{UL} = \frac{D}{s} f_b h \tan \theta \quad (13)$$

Si el tipo más común de falla separación se puede representar con el agrietamiento del recubrimiento, supóngase que la dimensión del recubrimiento es  $d_c$  y que el agrietamiento o superficie de falla se presentará en el recubrimiento más pequeño (figura 10):



$f_{ic}$ : Resistencia a tensión del concreto  
(esfuerzo resistente de tensión)

**Figura 10. Tipos de falla por adherencia del tipo de separación**

Entonces se tiene, por unidad de longitud, la expresión de equilibrio:

$$\frac{D}{s} f_w h \tan \theta = f_{ic} d_c \quad (14)$$

Si se sabe de (9), que:

$$\tau = f_b h / s$$

Despejando  $f_w$  de (14) y sustituyendo en la expresión anterior:

$$\tau = f_{ic} d_c / D \tan \theta \quad (15)$$

Si se considera que  $\theta=45^\circ$  (depende del fabricante de acero, pero  $\theta=45^\circ$  no es un valor fuera del estándar empleado).

$$\tau = f_{ic} d_c / D \quad (16)$$

Finalmente, en este tipo de falla por separación, la resistencia por adherencia será función de la resistencia a tensión del concreto, la dimensión del recubrimiento mínimo ( $d_c$ ) y el diámetro de la barra ( $D_b$ ).

Es importante notar la similitud de las dos ecuaciones para determinar la resistencia por adherencia, considerando únicamente las características geométricas de las barras y mecánicas del concreto (expresiones 11 y 16), con la propuesta del ACI para determinar el esfuerzo resistente:

$$\tau_b = (6.3 \sim 7.3)\sqrt{f_c} / D \leq 56 \text{ kg/cm}^2$$

### 1.3.2 Adherencia producto del fenómeno de anclaje directo

Para resistir el momento flexionante a lo largo de una viga de concreto reforzado, una área de acero es necesaria para soportar la fuerza de tensión. Sin embargo, no importa que área sea proporcionada a la sección, si las barras no están ancladas lo suficiente en el concreto para que la adherencia entre el concreto y el acero desarrolle la fuerza de tensión, las barras se separaran del concreto. La capacidad a momento de una viga es, por lo tanto, una relación tridimensional que abarca no solo las propiedades de la sección transversal sino también las longitudes del acero de refuerzo embebidas en ambas direcciones.

Considerando una viga en cantiliver con carga uniformemente distribuida como la de la figura 11, la cual ha sido adecuadamente diseñada para resistir la flexión. Para ilustrar el principio, se asume que el refuerzo de tensión consiste en una sola barra de diámetro  $D$ .

Cuando el segmento de barra  $AB$  es analizado en cuerpo libre, la fuerza de tensión en  $B$ , la cual es  $f_s(\pi D^2/4)$ , debe ser transmitida al concreto por el esfuerzo de adherencia en la longitud embebida  $L_1=AB$ . Si  $u$  es el esfuerzo promedio de adherencia sobre el área superficial nominal  $\pi DL_1$ , entonces:

$$u\pi DL_1 = f_s \pi \frac{D^2}{4}$$



6

$$u = \frac{f_s D}{4L_1}$$

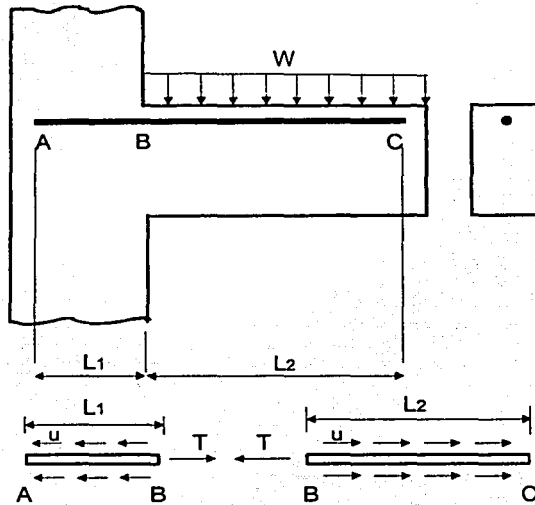


Figura 11. Esfuerzo en el refuerzo de una viga en cantiliver

Entonces, cuando el esfuerzo de adherencia resistente promedio de anclaje que es capaz de ser desarrollado es  $u$ , la longitud de desarrollo requerida para un esfuerzo dado  $f_s$ , se convierte en:

$$\text{Longitud de desarrollo} = L_1 = \frac{f_s D}{4u}$$

La misma situación existe en cuerpo libre para el segmento BC, como se muestra en la figura. La máxima fuerza de tensión en B debe ser desarrollada por el segmento de barra

embebido entre las distancias BA o BC. Cuando existen limitaciones de espacio para hacer adecuadamente el anclaje, esas barras deben ser terminadas por un gancho estándar.

Para el diseño, el objetivo es lograr que se desarrolle el esfuerzo de fluencia  $f_y$  en el acero; por lo tanto  $f_s$  en la ecuación se convierte en  $f_y$ . Además el esfuerzo  $u$  es el esfuerzo unitario nominal cuando una falla por separación es inminente; esto es el esfuerzo último de adherencia  $u_a$ . Por lo tanto la longitud de desarrollo requerida para el anclaje de las barras actuando el esfuerzo de fluencia, asociado al estado de resistencia última, es:

$$\text{Longitud de desarrollo} = L_d = \frac{f_y}{4u_a} D$$

Una adecuada longitud de desarrollo debe ser proporcionada a las barras de refuerzo tanto en compresión como en tensión.

### 1.3.3 La naturaleza de la falla por adherencia

Estrictamente cuando el refuerzo de acero está formado por barras lisas (barras sin corrugación), la adherencia se desarrolla como la adhesión entre la pasta de concreto y la superficie de la barra. Inclusive con bajos esfuerzos de tensión en el refuerzo, podría existir suficiente separación para romper la adhesión entre acero y concreto, en una zona inmediatamente adyacente a una grieta en el concreto, quedando solo fricción para resistir cualquier movimiento de la barra relativo al concreto que la rodea a lo largo de la longitud separada. Los cambios volumétricos podrían causar arrastre por fricción contra las barras. Típicamente, una barra lisa rodada en caliente podría separarse si la adhesión y fricción resistentes son lo suficientemente altas, o solo arrancarse dejando un agujero cuando la adhesión y fricción son bajas.

Las barras con corrugaciones fueron diseñadas para cambiar el patrón de comportamiento de tal forma que exista menos confianza en la adhesión y fricción (aunque aún existen) y más confianza en las corrugaciones actuando contra el concreto. Una falla llamada "falla por adherencia" con barras deformadas en concreto ordinario es casi siempre una falla por

separación. En una falla por separación el concreto se separa en dos o tres segmentos debido a la acción de las corrugaciones contra el concreto, como se muestra en las figuras 10 y 12, con los diferentes patrones de separación.

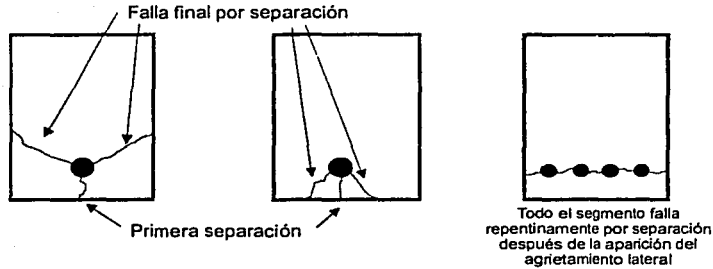


Figura 12. Patrones de falla por separación

Las fuerzas que interactúan entre la barra deformada y el concreto que la rodea se pueden apreciar en la figura 13:



Figura 13. Esquema de fuerzas entre acero y concreto

A causa del poco conocimiento acerca del esfuerzo de adherencia y de la interrelación entre adherencia, cortante, y momento, la práctica de diseño actual hace uso de una gran cantidad de estudios experimentales. Resultando en general, que el esfuerzo de adherencia es proporcional a la raíz cuadrada de  $f_c$  e inversamente proporcional al diámetro de la barra como lo propone el reglamento del American Concrete Institute (ACI).

## CAPITULO II

### DEMANDA DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN Y CORTANTE EN ELEMENTOS DE ESTRUCTURAS EN REGIONES DE ALTA SISMICIDAD

#### 2.1 Demanda de adherencia por flexión al formarse el mecanismo de falla

*Revisión por demanda de adherencia de una viga con distribución antisimétrica de momentos, y probable formación de articulaciones plásticas en los extremos (código AIJ).*

Considerando un segmento de barra sujeta, o en la que actúa un diferencial de esfuerzos de tensión (figura 14).

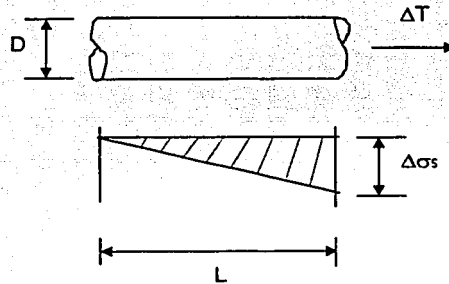


Figura 14. Barra sujeta a un diferencial de esfuerzos de torsión

El estado de esfuerzos provoca una diferencial de fuerza de tensión en la barra. Como se vio antes esta  $\Delta T$  será equilibrada por una fuerza horizontal de igual magnitud y contraria en sentido, definida como fuerza de adherencia.

$$\Delta T = \Delta \sigma_s A_s \quad (\text{diferencial de fuerza en la barra})$$

$$T_c = \tau P_o L \quad (\text{fuerza demandada por adherencia})$$

$$\text{Si: } A_s = \pi D^2 / 4 \quad \text{y} \quad P_o = \pi D$$

Tenemos que:

$$\tau = \Delta\sigma_s D / 4L$$

Ahora bien, en una viga sujeta a distribución antisimétrica de momentos, producto de un estado de elementos mecánicos dominantes ante la incidencia de excitación sísmica, se tiene:

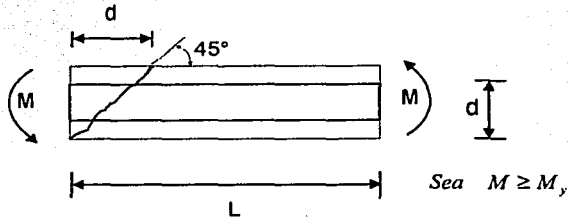


Figura 15. Viga con distribución antisimétrica de momentos

Aceptando que al figurar una grieta en la trayectoria de la barra de acero longitudinal, en ese punto el esfuerzo de adherencia se nulifica (al no existir concreto alrededor del acero en la grieta), y revisando los esfuerzos en las barras de refuerzos del lecho superior de la viga anterior (figura 15):

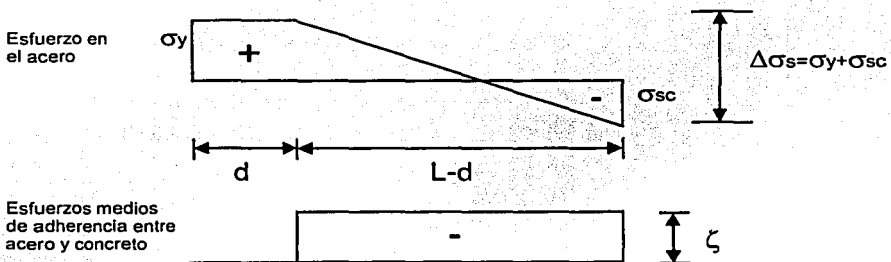


Figura 16. Distribución de esfuerzos en el acero y de adherencia entre acero y concreto

Así, por equilibrio de flexión en el elemento, la demanda total de esfuerzos de adherencia en la longitud total de transmisión (L-d), será:

$$\tau_f = \Delta\sigma_s D/4(L-d)$$

Siendo esta la expresión para determinar la demanda de esfuerzos de adherencia producto de la flexión en la viga.

## 2.2 Mecanismos de transferencia de cortante ante un estado de fuerzas provocadas por sismo

### *Mecanismos de arco y armadura*

Los elementos de estructuras sujetas a fuerzas laterales dominantes (sismo, viento, etc.) generalmente estarán sujetos a una disposición antisimétrica de momentos. La transmisión de fuerza cortante puede considerarse que estará regida por los mecanismos de arco y armadura que se describen posteriormente.

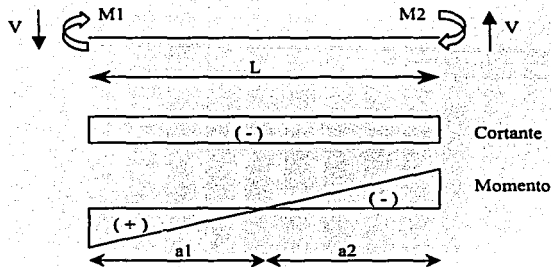


Figura 17. Elementos mecánicos ante la incidencia de fuerzas laterales dominantes

Mecanismo de arco

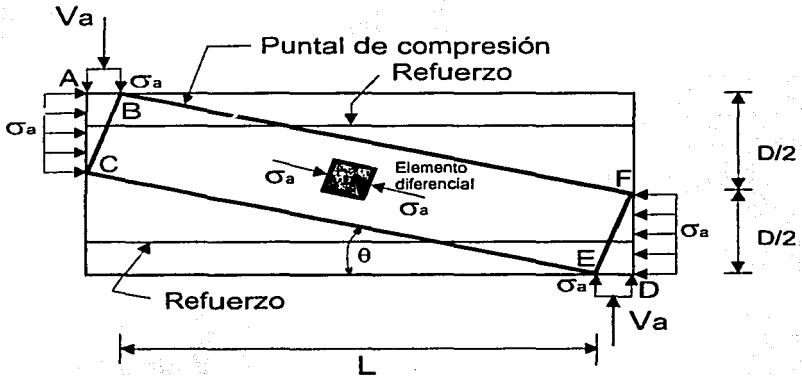


Figura 18. Contribución del mecanismo de arco

Considerando como hipótesis de partida una solución de la teoría de plasticidad, utilizaremos la solución de límite inferior, propuesta por M. P. Nielsen, en la que se asume que el peralte del estrato a compresión de concreto será igual a  $D/2$ , donde  $D$  es el peralte total del elemento.

Entonces por geometría se pueden establecer las siguientes expresiones:

$$N_a = \sigma_a \cdot b \cdot \left( \frac{D}{2} \right) \left( \frac{1}{\cos \theta} \right)$$

$$\therefore V_a = N_a \cdot \sin \theta = \sigma_a \cdot b \cdot \left( \frac{D}{2} \right) \left( \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right)$$

$$V_a = b \frac{D}{2} \sigma_a \tan \theta \tag{17}$$

Donde:

$$\tan \theta = \frac{D/2}{L + (D/2)\tan \theta}$$

$$(D/2)\tan^2 \theta + L \tan \theta - D/2 = 0 \Rightarrow \tan \theta = \frac{\sqrt{L^2 + D^2} - 1}{D}$$

$$\tan \theta = \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 1} - \frac{L}{D} \quad (18)$$

*Mecanismo de armadura*

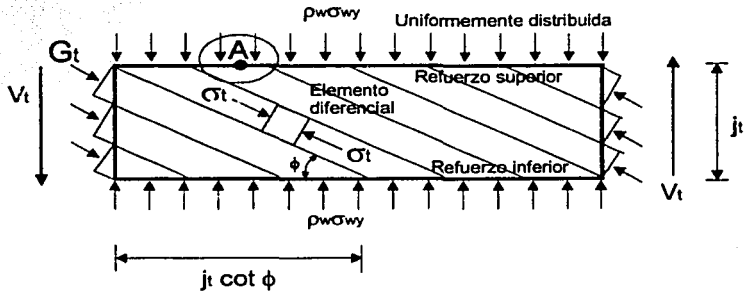


Figura 19. Contribución del mecanismo de armadura

Considerando las condiciones de equilibrio del acero de refuerzo longitudinal en la vecindad del punto (A):

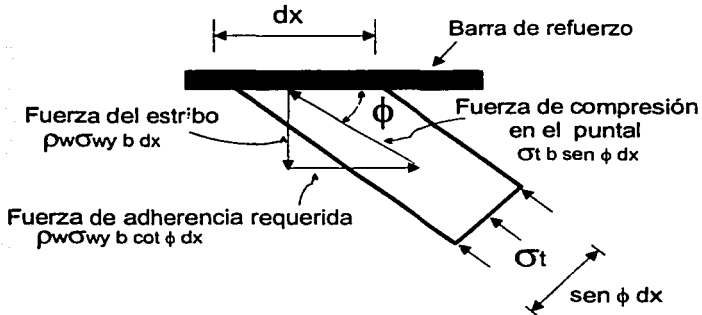


Figura 20. Equilibrio de un nodo en el lecho de refuerzo superior



De la condición de equilibrio global (figura 19), considerando el equilibrio de la sección transversal, se calcula la fuerza de compresión diagonal  $G_i$ :

$$\begin{aligned} G_i &= \sigma_i b J_i \cos \phi \quad ; \quad y \\ V_i &= G_i \sin \phi \\ &= \sigma_i b J_i \cos \phi \sin \phi \end{aligned} \quad (19)$$

De la condición de equilibrio en el punto (A) se tiene:

$$\begin{aligned} \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} dx &= \sigma_i dx \sin^2 \phi \\ \sigma_i &= \frac{\rho_{\omega} \sigma_{\omega y}}{\sin^2 \phi} \end{aligned} \quad (20)$$

Sustituyendo (20) en (19):

$$V_i = b J_i \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} \cot \phi \quad (21)$$

Considerando las expresiones (17) y (21), se obtiene la ecuación primaria de resistencia al cortante:

$$V_{ii} = V_i + V_a = b J_i \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} \cot \phi + b \frac{D}{2} \sigma_a \tan \theta \quad (22)$$

Ahora bien, es importante determinar el ángulo de inclinación de los estratos a compresión del mecanismo de armadura, así como el valor de esfuerzo a compresión real actuante en el estrato a compresión del mecanismo de arco ( $\sigma_a$ ).

## DETERMINACIÓN DE $\phi$ Y $\sigma_a$ PARA DISEÑO

### I. Elementos en comportamiento elástico.

En los que no se proyecta la formación de articulaciones plásticas.

Hipótesis básicas

- a) El ángulo de inclinación del estrato a compresión del mecanismo de armadura, basándose en los resultados de Thurlimann (Thurlimann, 1970) deberá cumplir con:

$$0.5 < \cot\phi < 2.0$$

$$26.5^\circ < \phi < 63.5^\circ$$

- b) La resistencia efectiva a compresión del concreto, considerando la degradación que sufre por agrietamiento y efecto de carga cíclica, se propone a determinar como sigue:

$$\sigma_{ef} = \nu_0 \sigma_B$$

$$\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000 \quad (23)$$

expresión propuesta, basándose en trabajo experimental, por el danés Nielsen (Nielsen, 1984), donde:

$\sigma_B$ : resistencia a compresión del concreto

Unidades:  $\text{kg/cm}^2$

- c) En este proceso de diseño se parte del hecho de que los refuerzos longitudinales y transversal (lateral) fluyen o están fluyendo a la falla, ( $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ ,  $\sigma_y = f_s$ ; donde  $\sigma_{xy}$ : es el esfuerzo en el refuerzo lateral,  $f_s$ : es el esfuerzo en el refuerzo longitudinal).

- d) Se propone un límite superior para  $\sigma_{wy}$  con objeto de promover el diseño óptimo del elemento, tratando de evitar una falla por aplastamiento del concreto sin haber fluido el acero de refuerzo lateral, deberá cumplir con el requisito:

$$\sigma_{wy} < 25\sigma_B$$

Como punto de partida se considera que la resistencia última a cortante se alcanzará cuando el acero de refuerzo lateral alcance el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_{wy}$ ), y el concreto a compresión en el elemento esté sujeto a un esfuerzo igual a  $\nu_0 \cdot \sigma_B$ .

El esfuerzo a compresión efectivo en el concreto, será la suma de los efectos de compresión en el mismo producto de los mecanismos de arco y armadura:

$$\nu_0 \sigma_B = \sigma_t + \sigma_a$$

Donde  $\sigma_t$ : es el esfuerzo de compresión en el mecanismo de armadura (figura 19).

Aunque realmente los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  no son iguales, para efectos de simplificar el modelo, esto no se considera, y se acepta la suma vectorial lineal de los esfuerzos  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$  (resultando en una propuesta conservadora).

Proponiendo el parámetro:

$$\beta = \frac{\sigma_B}{\nu_0 \sigma_B}$$

$$\therefore \sigma_a = (1 - \beta) \nu_0 \sigma_B \quad (24)$$

De (20) se sabe que:

$$\sigma_t = \rho_w \sigma_{wy} / \sin^2 \phi$$

$$\text{y; } \frac{1}{\sin^2 \phi} = 1 + \cot^2 \phi$$

$$\therefore \beta = \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} (1 + \cot^2 \phi) / v_0 \sigma_B \quad (25)$$

Con las expresiones (24) y (25) se determina  $\sigma_a$ .

Los límites en el valor de  $\cot \phi$ , asumiendo la contribución de Thurlimann (Thurlimann, 1988), y sustituyendo (24) y (25) en (22) se tiene:

$$V_u = bJ_i \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} \cot \phi + b \frac{D}{2} (1 - \beta) v_0 \sigma_B \tan \theta$$

Donde:

$$\beta = \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} (1 + \cot^2 \phi) / v_0 \sigma_B$$

Si de  $\frac{dV_u}{d \cot \phi} = 0$ ; se puede obtener un máximo de  $V_u$

$$\Rightarrow \frac{dV_u}{d \cot \phi} = bJ_i \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} + bD \tan \theta \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} \cot \phi = 0$$

$$\therefore \cot \phi = J_i / D \tan \theta \quad (26)$$

Ahora bien, de:

$$\sigma_i = \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} / \sin^2 \phi = \rho_{\omega} \sigma_{\omega y} (1 + \cot^2 \phi)$$

Se obtiene:

$$\cot \phi = \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_{\omega} \sigma_{\omega y}} - 1}$$

Luego, si por definición  $\sigma_t \leq v_0 \sigma_B$

$$\cot \phi = \sqrt{\frac{v_0 \sigma_B}{\rho_a \sigma_{ax}} - 1} \quad (27)$$

Así, el valor de  $\cot \phi$  será el menor de los obtenidos con las expresiones (26) y (27), respetando que siempre  $\cot \phi \leq 2.0$ .

## II. Elementos con comportamiento plástico.

Aquellos en los que se proyecta la formación de una o dos articulaciones plásticas.

### Hipótesis básicas:

- a) La deformación plástica sucede en una región de articulación plástica definido por la longitud  $1.5 D$ , donde  $D$  es el peralte total del elemento.
- b) La resistencia efectiva del concreto a compresión, principalmente por apertura de grietas y comportamiento cíclico post-fluencia, se propone o asume sujeta a degradación proporcional al nivel de deformación post-fluencia, representada por la rotación plástica  $R_p$ .

$$v = (1 - 15R_p) v_0 \quad ; \quad \text{para } R_p \leq 0.05 \text{ rad}$$

$$v = v_0 / 4 \quad ; \quad \text{para } R_p > 0.05 \text{ rad}$$

$R_p$ : es la deformación post-fluencia concentrada en la región de articulación plástica previamente definida.

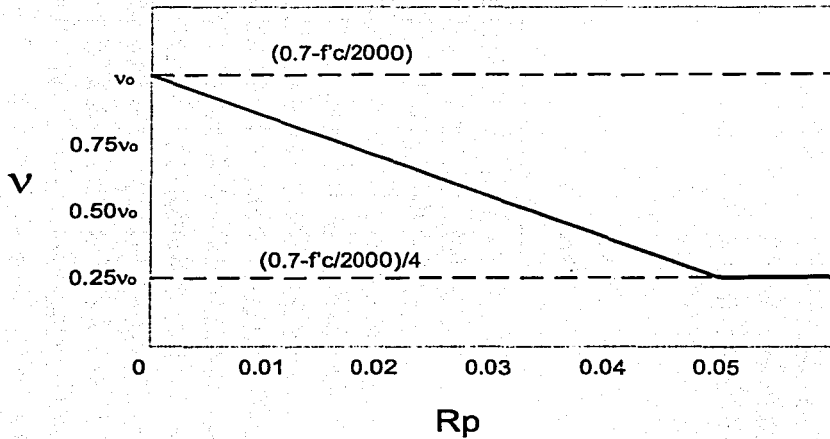


Figura 21. Relación entre  $v$  y  $R_p$

La relación de  $v$ ,  $v_0$  y  $R_p$  es una propuesta de Ichinose, Watanabe y Noguchi, de las Universidades de Nogoya, Kyota y Chiba, Japón (Ichinose, 1988).

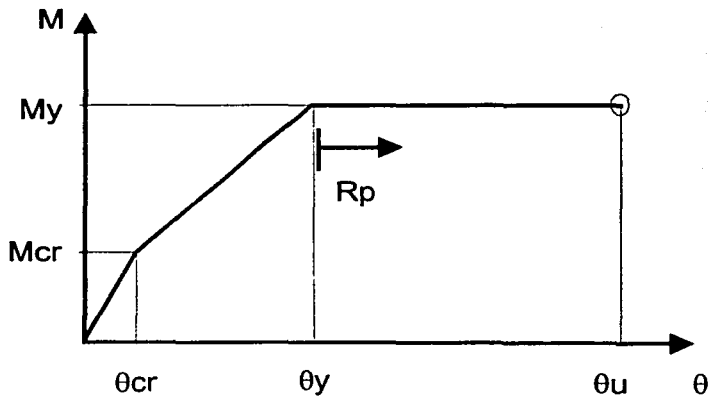


Figura 22. Definición gráfica de  $R_p$

- c) La inclinación del estrato a compresión del mecanismo de armadura; considerando la condición de rotación máxima de la zona de articulación máxima como  $R_p = 0.02$  rad (1/50), y considerando, de resultados experimentales, que en dicha zona se pueden presentar del orden de cinco grietas importantes, la deformación o rotación plástica por grieta sería:  $R_p/5 = 0.004$  rad.

Aceptando que la inclinación de grietas en la zona de plastificación resulta del orden de  $45^\circ$ , y tomando en cuenta las dimensiones "comunes" de un elemento estructural, se puede pensar en la siguiente figura correspondiente a una grieta importante en la zona de plastificación:

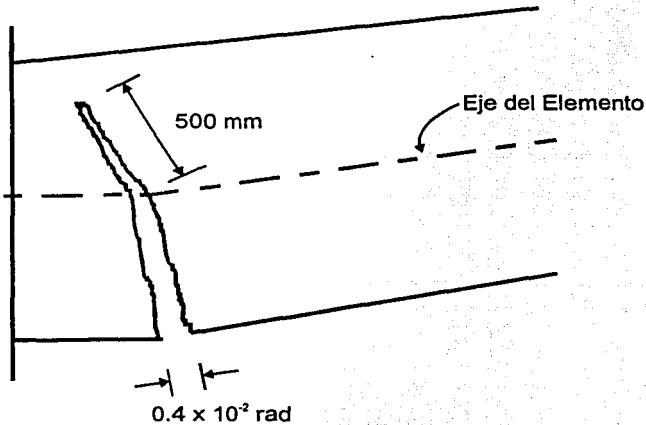


Figura 23. Grieta en región de articulación plástica

De la figura se puede determinar que la apertura de la grieta en el eje del elemento será:

$$w = 500 \times 0.4 \times 10^{-2} = 2 \text{ mm}$$

Según el trabajo experimental desarrollado por Walraven (Walraven, 1970), para apertura de grietas mayores que 2 mm, la transmisión de fuerza por trabazón de agregados a través de una grieta se nulifica. Por lo que, si la posición de la grieta en la región de articulación plástica es  $45^\circ$ , por lo tanto, la inclinación estará limitada por el valor  $\phi = 45^\circ$ .

Dependiendo de la geometría y refuerzo del elemento, el valor de  $R_p$  variará; sin embargo se propone empíricamente un valor límite de definición  $R_p = 0.02$  rad. En función de  $R_p$ , el valor de  $\cot \phi_h$  será:

$$\begin{aligned} \cot \phi_h &\leq 2.50 R_p && ; && \text{para } R_p \leq 0.02 \text{ rad} \\ &= 1.0 && ; && \text{para } R_p > 0.02 \text{ rad} \end{aligned}$$

Donde  $\phi_h$  es el ángulo de inclinación del estrato a compresión en el mecanismo de armadura en las zonas de plastificación. Para las zonas fuera de la articulación plástica se deberá cumplir que:

$$\cot \phi_m \leq 2$$

$\phi_m$ : ángulo de inclinación en la parte media (fuera de la zona de articulación plástica)

### 2.3 Demanda de adherencia por cortante al formarse el mecanismo de falla

La demanda de adherencia por efecto de cortante producto del mecanismo de armadura estará relacionada con el equilibrio de los nodos en los lechos superior e inferior del mismo mecanismo, como se observa en la figura 24.

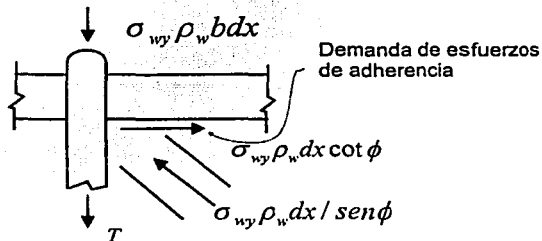


Figura 24. Demanda de adherencia producto del mecanismo de armadura



Recordando, de la expresión primaria:

$$\tau = V / P_o J_t$$

Y por mecanismo de armadura:

$$V_t = J_t b \rho_w \sigma_{wy} \cot \phi, \text{ se puede escribir entonces:}$$

$$\tau_t = b \rho_w \sigma_{wy} \cot \phi / \sum P_o \quad (\text{Po: Perímetro de la barra})$$

Ahora bien, para diseño el instituto de arquitectos de Japón considera lo siguiente:

El esfuerzo de adherencia demandado será el mayor de los que resulten de aplicar las expresiones para evaluar la demanda de adherencia por flexión y por cortante, en las que se deberá cumplir con lo siguiente:

$$\Delta \sigma_s = 2 \sigma_{yu} \quad \text{Para elementos con dos articulaciones plásticas (una en cada extremo).}$$

$$\Delta \sigma_s = \sigma_{yu} + \sigma_y \quad \text{Para elementos con una articulación plástica (en un extremo).}$$

$$\Delta \sigma_s = 2 \sigma_y \quad \text{Para elementos donde no se proyecta la formación de articulación plástica.}$$

Donde:

$\sigma_{yu}$  : Es la resistencia máxima probable a la fluencia del acero (con objeto de considerar la posible sobrerresistencia del material).

$\sigma_y$  : Es la resistencia nominal a la fluencia.

Ahora bien, contando con los valores de resistencia a la fluencia del material a emplear, obtenida a partir de pruebas de laboratorio, puede eliminarse el considerar  $\sigma_{yu}$  y considerando un análisis de flexión de las secciones, obteniendo la distribución "real" de esfuerzos en el acero, los valores de  $\Delta \sigma_s$  pueden determinarse analíticamente, y evitar los valores anteriores que obviamente castigan al elemento en esta propuesta de revisión.

Los valores de  $\rho_w \sigma_{wy}$  y  $\cot \phi$  correspondientes al mecanismo de armadura para resistencia al cortante, se consideran como aquellos determinados para la parte media del elemento  $(\rho_w \sigma_{wy})_m$  y  $(\cot \phi)_m$ . Esto último debido a que, como se mencionó anteriormente, el fenómeno de adherencia se lleva a cabo principalmente en zonas de comportamiento elástico.

## 2.4 Propuestas para determinar la resistencia por adherencia

La resistencia por adherencia de elementos lineales de concreto reforzado, está afectada por un gran número de parámetros como ya se mencionó en capítulos anteriores; sin embargo, el AII, basándose en una propuesta de Morita-Fuji (1980) establece la siguiente propuesta experimental (unidades kg-cm):

Expresión simplificada:

$$\tau_R = (1.2 + 5 \rho_w' b / D_b) \sqrt{\sigma_B}$$

Para barras de lecho inferior. Para barras de lecho superior esta expresión se reducirá un 20%.

Donde:

$$\rho_w' = 2A_w / bs$$

b: Ancho del elemento

$D_b$ : Diámetro de la barra a revisar

s: separación del estribo

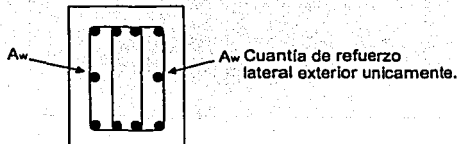


Figura 25. Área de acero para la cuantía de refuerzo lateral

También se puede emplear otra formulación mas detallada, aunque también experimental:

$$\tau_{\phi} = \tau_{Rc} + \tau_{ST}$$

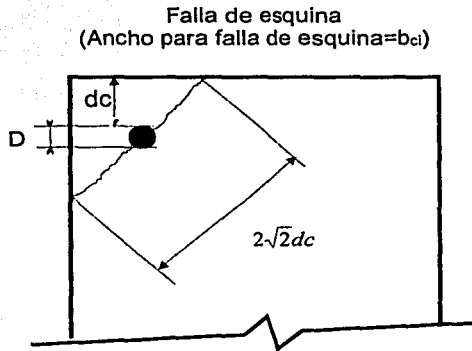
*Contribución del concreto*

$$\tau_w = (0.4b_f + 0.5)\sqrt{\sigma_B}$$

Donde:  $b_f \leq b_{ci}, b_{sl}$

Ancho para falla de esquina ( $b_{ci}$ ):

$$b_{ci} = (2\sqrt{2}d_i - D) / D$$



**Figura 26. Falla de esquina del concreto**

Ancho para falla lateral ( $b_{sl}$ ):

$$b_{sl} = (b - \sum D) / \sum D$$

Falla Lateral  
(Ancho para falla lateral= $b_{si}$ )

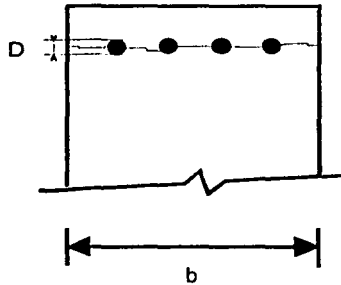


Figura 27. Falla lateral del concreto

Se considera el menor de los valores de  $b_i$  ( $b_{ci}$  ó  $b_{si}$ ) porque es el que proporcionará la probable superficie de falla por separación del concreto.

*Contribución del acero (refuerzo lateral y longitudinal).*

Para falla de esquina:

$$b_i = b_{ci} < b_{si}$$

$$\tau_{ST} = 50 A_w \sqrt{\sigma_B} / s D_b$$

Donde:

$A_w$ : Área de "una sola rama" de la barra empleada como refuerzo lateral.

$s$ : separación del refuerzo lateral.

$D$ : Diámetro del refuerzo longitudinal.

Para falla lateral:

$$b_i = b_{si} \leq b_{ci}$$

$$\tau_{ST} = \frac{(20 + 5Nu + 15Ns)}{Nt} \rho_w' b \sqrt{\sigma_B} / D_b$$

$$\text{si } \frac{Nt}{2} < Nu ; \tau_{ST} = 5\rho_w' b \sqrt{\sigma_B} / D_b$$

Nt: Número total de barras de refuerzo longitudinal.  $Nt = 2 + Ns + Nu$

Ns: Número de barras, que no siendo de esquina, están arriostradas o confinadas por refuerzo lateral.

Nu: Número de barras que no tienen confinamiento por refuerzo lateral.

Gráficamente:

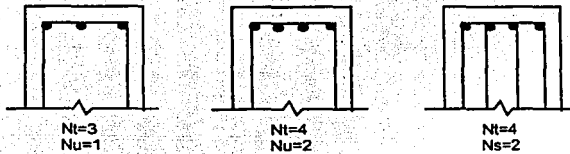


Figura 28. Ejemplos para obtener el número de barras de cada tipo

Si  $A_w$  es el área de la barra empleada como refuerzo lateral:

$$\rho_w' = 2A_w / bs$$

La expresión se constituye en el promedio pesado de la resistencia por adherencia de las barras individuales que pudieran conformar el refuerzo. Esto es, las expresiones anteriores se emplearán para realizar un análisis del problema de adherencia del conjunto de barras.

Ahora bien, la resistencia individual de barras longitudinales ante diferentes condiciones de confinamiento será:

- Para barras de esquina:

$$\tau_{ST1} = 1.22 \times 15.9 A_w \sqrt{\sigma_B} / sD_b$$

Para barras sin confinamiento de refuerzo lateral:

$$\tau_{ST2} = 1.22 \times 7.63 A_w \sqrt{\sigma_B} / sD_b$$

Para barras, que no siendo de esquina, están confinadas por refuerzo lateral:

$$\tau_{ST3} = 15 \rho_w' b \sqrt{\sigma_B} / D$$

$$\text{si } \rho_w' = 2A_w / sb \Rightarrow A_w = \rho_w' sb / 2$$

$$\therefore \tau_{ST1} = 10 \rho_w' b \sqrt{\sigma_B} / D$$

$$\tau_{ST2} = 5 \rho_w' b \sqrt{\sigma_B} / D$$

Donde la simbología es la misma que para los casos anteriores.

## 2.5 Conclusiones

En este capítulo se estudian los diferentes tipos de demandas de adherencia que se presentan en un determinado elemento estructural como son la demanda por flexión y por cortante. Estas demandas de adherencia están íntimamente relacionadas con los diferentes mecanismos de transferencia de fuerzas que se presentan en un elemento estructural. Los mecanismos de transferencia de fuerza cortante propuestos por los códigos Japoneses son el mecanismo de armadura y el mecanismo de arco. Se debe recordar que las hipótesis de diseño están basadas en que existe una adherencia perfecta entre el concreto y el acero por lo que es importante conocer también la adherencia resistente de los elementos estructurales.

En este capítulo se presentó una propuesta para determinar la resistencia por adherencia en un elemento estructural que básicamente es la contribución de resistencia del concreto más la resistencia del acero.

### CAPITULO III

## REVISIÓN COMPARATIVA DE LA PROPUESTA REGLAMENTARIA DE RESISTENCIA Y UN PROCEDIMIENTO CONSIDERANDO LA DEMANDA DE ADHERENCIA POR FLEXIÓN Y CORTANTE

### 3.1 Modelos de análisis a considerar

Para el estudio de demanda de adherencia, se propondrán una serie de vigas con características que comúnmente sean utilizadas en la práctica y que cumplan con los requisitos límite establecidos por el RCDF-NTC.

Los modelos de vigas que se revisarán por adherencia tendrán las siguientes propiedades:

#### *Propiedades de los materiales*

##### - **Concreto:**

$f_c = 200, 250, 300, 400 \text{ kg/cm}^2$

Se considerará un tamaño máximo de agregado grueso de 3/4 de pulgada.

Se trabajará un recubrimiento en lechos superior e inferior de 5 cm y el mínimo permitido por el reglamento.

##### - **Acero de refuerzo:**

$f_y = 3000, 4200, 5000 \text{ kg/cm}^2$

Tanto el acero longitudinal como transversal tendrán las mismas propiedades para cada viga.

Los diferentes casos que se estudiarán, en cuanto a las dimensiones de los elementos y características de las secciones de las vigas rectangulares son:

- Ancho "b" = 30, 40, 50 y 60 cm.
- Peralte "h" = 1.5 b y 2 b.
- Longitud del elemento estructural (L), tal que:  $L/h = 8, 10 \text{ y } 12$ .
- Varillas para refuerzo longitudinal del 4, 6, 8, 10 y 12. Todas las varillas utilizadas para refuerzo longitudinal en una viga serán del mismo número y estarán colocadas en un solo lecho.
- Estribos para refuerzo transversal del # 3, de doble rama cerrado, con un esfuerzo de fluencia igual al del acero longitudinal.

La revisión por adherencia de las vigas se realizará suponiendo que solo las cargas horizontales cíclicas debidas a sismo son dominantes en el diseño. Su diseño en general, se realizará según el Reglamento para construcciones del Distrito Federal; y su resistencia por flexión se determinará, por simplicidad, como vigas simplemente armadas, quedando de esta forma del lado de la seguridad despreciando la contribución del acero de refuerzo a compresión. La cantidad de acero en el lecho superior será igual a la del lecho inferior, por ser una situación común para vigas con cargas cíclicas debidas a sismo y que tiende a proporcionar una buena ductilidad de los elementos.

Se supondrá que en la viga se formarán articulaciones plásticas en ambos extremos, por lo que la revisión por adherencia se llevará a cabo para una viga con esta condición según la propuesta del AIJ. Además, se supondrá que el elemento estructural pertenece a un marco dúctil, por lo que el cálculo de la resistencia a cortante se llevará a cabo según las normas existentes para marcos dúctiles en el Distrito Federal.

Para tener todos los parámetros de las vigas definidos, es necesario proponer la cantidad de acero longitudinal de refuerzo. Para este efecto, se propondrá la máxima cantidad de varillas que se puedan colocar en un lecho para una determinada sección, ya que resulta ser esta la condición más desfavorable para el fenómeno de adherencia; y son las condiciones más críticas las que nos interesa analizar.

---



Como se mencionó anteriormente las vigas contarán con un solo lecho de refuerzo tanto en la parte superior como en la inferior, por lo que es necesario determinar la cantidad de varillas máximas por lecho para cada uno de los anchos de sección propuestos. En este estudio se considerará el acero de refuerzo distribuido uniformemente en cada lecho, no se consideraran paquetes de barras.

El Reglamento para construcciones del D.F. proporciona en sus N.T.C. los parámetros necesarios para determinar esta cantidad con base en recubrimiento mínimo y separación de varillas permisible. Entonces, se requiere conocer la separación mínima entre varillas para saber la cantidad máxima por lecho.

Las N.T.C. para estructuras de concreto reforzado en su apartado 4.9 llamado "Requisitos para el recubrimiento y separación del acero de refuerzo", proporciona los lineamientos para definir el recubrimiento y separación del refuerzo para la colocación del concreto, y establece lo siguiente:

*El recubrimiento y el detallado del acero será tal que el concreto pueda ser colocado y compactado adecuadamente.*

*El recubrimiento y separación no será menor que el mayor de los tres siguientes valores:*

- a) El tamaño nominal del agregado multiplicado por 1.25*
- b) El diámetro nominal de la barra o tendón al cual se le mide el recubrimiento*
- c) Si las barras forman paquetes, 1.5 veces el diámetro de la barra más gruesa del paquete*

Para el caso donde el agregado es de 3/4 de pulgada, que es el que se utilizará en este estudio, se tiene:

- a) Tamaño nominal del agregado multiplicado por 1.25:

$$s = 1.25 \times 3/4 \times 2.54 = 2.38 \text{ cm}$$

b) El diámetro nominal de la barra o tendón al cual se le mide el recubrimiento

s = diámetro de cada varilla

c) Si las barras forman paquetes, 1.5 veces el diámetro de la barra más gruesa del paquete

s = no aplica para este estudio

Por lo que se puede determinar el número máximo de varillas que se podrá ubicar por lecho para cada ancho de sección conforme a la siguiente tabla:

| Varilla # | Diámetro (cm) | Valor de s | Número de varillas por lecho |    |    |    |
|-----------|---------------|------------|------------------------------|----|----|----|
|           |               |            | Ancho "b" (cm)               |    |    |    |
|           |               |            | 30                           | 40 | 50 | 60 |
| 4         | 1.27          | 2.38       | 7                            | 10 | 13 | 15 |
| 6         | 1.91          | 2.38       | 6                            | 8  | 11 | 13 |
| 8         | 2.54          | 2.54       | 5                            | 7  | 9  | 11 |
| 10        | 3.18          | 3.18       | 4                            | 5  | 7  | 8  |
| 12        | 3.81          | 3.81       | 3                            | 4  | 6  | 7  |

Lo mismo se realiza para el caso de agregado de una pulgada, teniendo la siguiente tabla:

| Varilla # | Diámetro (cm) | Valor de s | Número de varillas por lecho |    |    |    |
|-----------|---------------|------------|------------------------------|----|----|----|
|           |               |            | Ancho "b" (cm)               |    |    |    |
|           |               |            | 30                           | 40 | 50 | 60 |
| 4         | 1.27          | 3.18       | 6                            | 8  | 10 | 12 |
| 6         | 1.91          | 3.18       | 5                            | 7  | 9  | 11 |
| 8         | 2.54          | 3.18       | 4                            | 6  | 8  | 9  |
| 10        | 3.18          | 3.18       | 4                            | 5  | 7  | 8  |
| 12        | 3.81          | 3.81       | 3                            | 4  | 6  | 7  |

Con lo que queda determinado el número de varillas a utilizar en cada viga, lo cual permitirá calcular una determinada resistencia que se obtendrá más adelante.

Otro dato necesario para los cálculos de la adherencia resistente es el recubrimiento lateral del acero de refuerzo en las vigas, y que será el que resulte después de colocar el máximo acero por lecho. Para el caso de estudio, con agregado de 3/4 de pulgada, se resume en la siguiente tabla:

| Varilla # | Recubrimiento Lateral (cm) |      |      |      |
|-----------|----------------------------|------|------|------|
|           | Ancho "b" (cm)             |      |      |      |
|           | 30                         | 40   | 50   | 60   |
| 4         | 3.42                       | 2.94 | 2.47 | 3.82 |
| 6         | 3.34                       | 4.05 | 2.62 | 3.34 |
| 8         | 3.57                       | 3.49 | 3.41 | 3.33 |
| 10        | 3.89                       | 5.71 | 4.36 | 6.19 |
| 12        | 5.48                       | 6.67 | 4.05 | 5.24 |

Teniendo las características definidas de las vigas a estudiar, se procede a ejemplificar el procedimiento con una de las vigas propuestas, presentando únicamente los resultados de todas las demás vigas en forma tabular y de gráficas.

### 3.2 Evaluación de las demandas de adherencia y las resistencias correspondientes

*Procedimiento de revisión por adherencia de una viga con distribución antisimétrica de momentos (propio de efectos de carga sísmica), y probable formación de articulaciones plásticas en los extremos (código AIJ).*

A continuación se mostrará el procedimiento de revisión por adherencia para una de las vigas propuestas. Se trata de una viga con 40 cm de ancho, 60 cm de peralte, 6 metros de longitud, un refuerzo longitudinal que consta de 7 varillas del número 8 (una pulgada de diámetro) tanto en el lecho superior como en el inferior, recubrimiento superior e inferior de 5 cm y un recubrimiento lateral en las varillas de 3.81 cm (pulgada y media).

Nota: Los recubrimientos se dan a eje de varillas.

*Cálculo del momento máximo resistente para una de las secciones propuestas, siguiendo el criterio de las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de concreto del RCDF.*

Como primer paso se determinará el momento resistente para la viga propuesta. Esto se realiza con el objetivo de obtener el refuerzo transversal necesario para resistir el cortante actuante asociado al momento máximo resistente de la viga y de esta forma conocer la separación de los estribos.

El momento resistente de la viga se calculará como simplemente reforzada de tal manera que resulte fácil calcularlo sistemáticamente para todas las vigas propuestas aunque, su condición verdadera sea de doblemente reforzada. Se puede demostrar que el momento resultante es una buena aproximación al de la condición doblemente reforzada; se utilizará esta simplificación debido a que la viga cuenta con la misma cantidad de acero tanto en el lecho superior como inferior y que, debido a que el acero a compresión no fluye, se debería determinar la resistencia por medio de tanteos lo cual no resultaría práctico ni necesario para los objetivos que se persiguen en este trabajo.

Características del modelo usado como ejemplo ilustrativo:

$$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$$

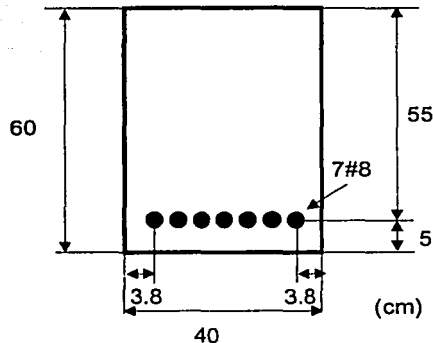
$$f^*c = 0.8 \times 250 = 200 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi_{barr} = \frac{8}{8} \times 2.54 = 2.54 \text{ cm}$$

$$A_s = 7 \times \frac{\pi D^2}{4} = 7 \times \frac{\pi \times (2.54)^2}{4} = 35.47 \text{ cm}^2$$

$$p = \frac{A_s}{b \times d} = \frac{35.47}{40 \times 55} = 0.0161$$

$$q = p \frac{f_y}{f'_c} = 0.0161 \times \frac{4200}{170} = 0.3983$$

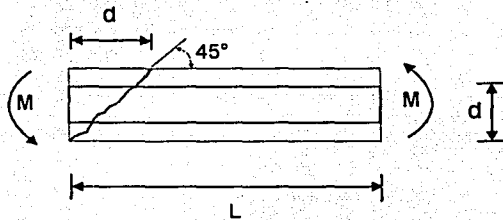


El momento resistente se obtiene considerando un factor de resistencia unitario, suponiendo que se conoce con certeza las propiedades geométricas de la sección y mecánicas de los materiales:

$$M_n = M_r = b d^2 f'' c q (1 - 0.5 q) = 40 \times (55)^2 \times 170 \times 0.3983 (1 - 0.5 \times 0.3983) = 6561646.96 \text{ kg.cm}$$

*Cálculo del cortante actuante asociado al momento máximo de resistencia por flexión*

El cálculo del cortante actuante se realiza suponiendo que el elemento estructural pertenece a un marco dúctil y presenta la configuración de momentos que se presenta en la figura. Por lo que el cortante presente en la viga es constante para esta condición y se calculará como sigue:



$$V = \frac{2M}{L} = \frac{2 \times 6561646.96}{600} = 21872.16 \text{ kg}$$

*Cálculo de la separación de estribos necesaria para el cortante actuante, considerando que el elemento estructural pertenece a un marco dúctil, según las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de concreto del RCDF.*

La contribución del concreto a resistencia al cortante es nula, y se considera un factor de resistencia de 0.6:

$$V_s = 0.6 \frac{A_v f_y d}{s} \Rightarrow s = 0.6 \frac{A_v f_y d}{V_s}$$

Considerando estribos del # 3 (en doble rama):

$$\phi_{\text{barra}\#3} = \frac{3}{8} \times 2.54 = 0.9525 \text{ cm}$$

$$A_v = 2 \times \frac{(0.9525)^2 \times \pi}{4} = 1.425 \text{ cm}^2$$

$$s = 0.6 \frac{1.425 \times 4200 \times 55}{21872.16} = 9.03 \approx 9 \text{ cm}$$

- Revisión de esfuerzos por adherencia según el AIJ.

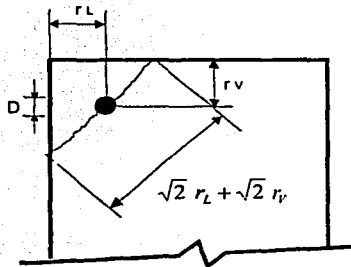
*Definición del mecanismo de adherencia resistente:*

- *Superficie de falla asociada a problema de esquina:*

En este caso la expresión para falla de esquina se modifica un poco respecto a la original del AIJ, debido a que el recubrimiento superior es diferente al recubrimiento lateral, por lo que la expresión queda:

$$b_{ci} = \frac{(\sqrt{2} r_v - D/2) + (\sqrt{2} r_L - D/2)}{D} = \frac{(\sqrt{2} \times 5 - 2.54/2) + (\sqrt{2} \times 3.49 - 2.54/2)}{2.54} = 3.73$$

Falla de esquina



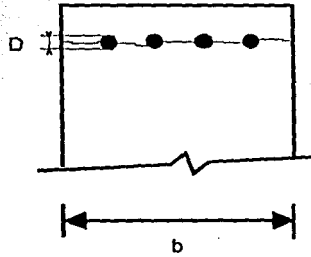
Donde:  $r_v$  = recubrimiento superior o inferior

$r_L$  = recubrimiento lateral

- Superficie de falla asociada a problema lateral

$$b_{sl} = \frac{(b - \sum D)}{\sum D} = \frac{(40 - 7 \times 2.54)}{7 \times 2.54} = 1.25$$

Falla Lateral



Dominando la falla lateral en el fenómeno de adherencia de esta viga

$$\therefore b_l = 1.25$$

Contribución del concreto a la resistencia por adherencia

$$\tau_c = (0.4b_l + 0.5)\sqrt{\sigma_B} = (0.4 \times 1.25 + 0.5)\sqrt{250} = 15.8 \text{ kg/cm}^2$$

Contribución del acero a la resistencia por adherencia

$$b_l = b_{sl} \leq b_{cl}$$

$$\tau_{ST} = \frac{5\rho_w' b \sqrt{\sigma_B}}{D}; \text{ Si } \frac{Nl}{2} < Nu$$

$$\frac{Nl}{2} = \frac{7}{2} = 3.5 < 5$$

$$\tau_{ST} = \frac{5 \times \frac{1.42}{40 \times 9} \times \sqrt{250}}{2.54} = 4.91 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{RESISTENTE} = \tau_c + \tau_{ST} = 15.81 + 4.91 = 20.72 \text{ kg/cm}^2$$

*Esfuerzos de adherencia demandados*

- *Por flexión:*

$$\tau_f = \frac{\Delta\sigma_s D}{4(L-d)} = \frac{2 \times 4200 \times 2.54}{4(600-55)} = 9.79 \text{ kg/cm}^2$$

- *Por cortante:*

$$\tau_c = \frac{b \rho_w \sigma_{wy} \cot \phi}{\sum P_o} = \frac{40 \times \frac{1.42}{40 \times 9} \times 4200 \times 1}{7 \times \pi \times 2.54} = 11.86 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore \tau_{\text{DEMANDADO}} = 11.86 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore \tau_{\text{RESISTENTE}} > \tau_{\text{DEMANDADO}}$$

Por lo tanto, para este ejemplo en particular, se presentó una holgura ante el probable fenómeno de adherencia determinado como se indica::

$$F.S. \text{ Adherencia} = \frac{\tau_R}{\tau_D} = \frac{20.72}{11.86} = 1.75$$

### 3.3 Estudio de la relación demanda-resistencia de adherencia para las condiciones límite de los elementos estructurales lineales

De la misma manera como se realizó el estudio de adherencia para una viga en particular anteriormente, se procede a determinar la misma relación para todas las combinaciones de vigas propuestas para el estudio. Como se trata de un proceso repetitivo, se realizó sistemáticamente con la ayuda de hojas de cálculo de Excel, obteniéndose por ejemplo, el siguiente resultado para el caso en que las características mecánicas de los materiales son:  $f_c=250 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$  y el recubrimiento superior e inferior es igual a 5 cm.



**Separación de estribos necesaria para el cortante actuante**

(  $h=1.5b$  ,  $L/h=10$ , Unidades: kg-cm)

| Ancho "b" | h=1.5b | L=10h | Varilla # | Diametro (cm) | # Var. Max. | As min | As=As' | p      | q      | M resistente | V actuante | Separación "s" |
|-----------|--------|-------|-----------|---------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------------|------------|----------------|
| 30        | 45     | 450   | 4         | 1.27          | 7           | 3.16   | 8.87   | 0.0074 | 0.1826 | 1353736      | 6017       | 20.00          |
| 30        | 45     | 450   | 6         | 1.91          | 6           | 3.16   | 17.10  | 0.0143 | 0.3521 | 2367253      | 10521      | 13.60          |
| 30        | 45     | 450   | 8         | 2.54          | 5           | 3.16   | 25.34  | 0.0211 | 0.5216 | 3146266      | 13983      | 10.24          |
| 30        | 45     | 450   | 10        | 3.18          | 4           | 3.16   | 31.67  | 0.0264 | 0.6520 | 3585933      | 15937      | 8.88           |
| 30        | 45     | 450   | 12        | 3.81          | 3           | 3.16   | 34.20  | 0.0285 | 0.7042 | 3722948      | 16546      | 8.65           |
| 40        | 60     | 600   | 4         | 1.27          | 10          | 5.80   | 12.67  | 0.0058 | 0.1423 | 2718096      | 9060       | 21.72          |
| 40        | 60     | 600   | 6         | 1.91          | 8           | 5.80   | 22.80  | 0.0104 | 0.2561 | 4592853      | 15310      | 12.86          |
| 40        | 60     | 600   | 8         | 2.54          | 7           | 5.80   | 35.47  | 0.0161 | 0.3983 | 6561647      | 21872      | 9.00           |
| 40        | 60     | 600   | 10        | 3.18          | 5           | 5.80   | 39.59  | 0.0180 | 0.4446 | 7111875      | 23706      | 8.30           |
| 40        | 60     | 600   | 12        | 3.81          | 4           | 5.80   | 45.60  | 0.0207 | 0.5121 | 7836962      | 26123      | 7.53           |
| 50        | 75     | 750   | 4         | 1.27          | 13          | 9.22   | 16.47  | 0.0047 | 0.1162 | 4560185      | 12160      | 20.60          |
| 50        | 75     | 750   | 6         | 1.91          | 11          | 9.22   | 31.35  | 0.0090 | 0.2213 | 8197655      | 21860      | 11.46          |
| 50        | 75     | 750   | 8         | 2.54          | 9           | 9.22   | 45.60  | 0.0130 | 0.3219 | 11249490     | 29999      | 8.35           |
| 50        | 75     | 750   | 10        | 3.18          | 7           | 9.22   | 55.42  | 0.0158 | 0.3912 | 13106678     | 34951      | 7.17           |
| 50        | 75     | 750   | 12        | 3.81          | 6           | 9.22   | 68.41  | 0.0195 | 0.4829 | 15255744     | 40682      | 6.16           |
| 60        | 90     | 900   | 4         | 1.27          | 15          | 13.44  | 19.00  | 0.0037 | 0.0920 | 6471337      | 14381      | 21.15          |
| 60        | 90     | 900   | 6         | 1.91          | 13          | 13.44  | 37.05  | 0.0073 | 0.1795 | 12040740     | 26757      | 11.37          |
| 60        | 90     | 900   | 8         | 2.54          | 11          | 13.44  | 55.74  | 0.0109 | 0.2700 | 17212017     | 38249      | 7.85           |
| 60        | 90     | 900   | 10        | 3.18          | 8           | 13.44  | 63.34  | 0.0124 | 0.3068 | 19142831     | 42540      | 7.15           |
| 60        | 90     | 900   | 12        | 3.81          | 7           | 13.44  | 78.81  | 0.0156 | 0.3866 | 22983526     | 51075      | 5.96           |

Donde se resalta la viga modelo que se analizó para el ejemplo de la parte 3.2.

Siguiendo los lineamientos establecidos para revisar elementos viga y columna ante el fenómeno de adherencia, como se indico anteriormente en el cuerpo del trabajo, se presenta en forma tabular a continuación.

Revisión de esfuerzos por adherencia según AJJ

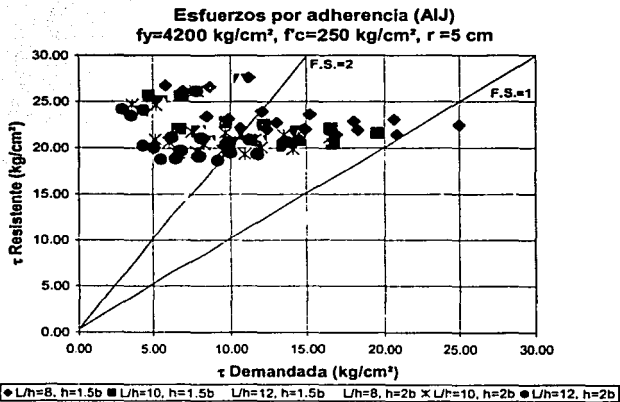
Condiciones mecánicas de los materiales:

Características geométricas:

$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$     $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$     $r = 5 \text{ cm}$    ( $h = 1.5b$ ,  $L/h = 10$ , Unidades:  $\text{kg-cm}$ )

| Ancho "b" | h=1.5b | L=10*h | Varilla # | Diametro (cm) | # Var. Max. | bcl  | bsi  | $\tau$ concreto | $\tau$ acero | $\tau$ resistente | $\tau$ flexion | $\tau$ cortante | $\tau$ demanda |
|-----------|--------|--------|-----------|---------------|-------------|------|------|-----------------|--------------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|
| 30        | 45     | 450    | 4         | 1.27          | 7           | 8.38 | 2.37 | 22.92           | 4.42         | 27.34             | 6.50           | 10.68           | 10.68          |
| 30        | 45     | 450    | 6         | 1.91          | 6           | 5.19 | 1.62 | 18.18           | 4.33         | 22.51             | 9.76           | 12.21           | 12.21          |
| 30        | 45     | 450    | 8         | 2.54          | 5           | 3.77 | 1.36 | 16.52           | 4.32         | 20.84             | 13.01          | 14.60           | 14.60          |
| 30        | 45     | 450    | 10        | 3.18          | 4           | 2.96 | 1.36 | 16.52           | 3.94         | 20.46             | 16.26          | 16.64           | 16.64          |
| 30        | 45     | 450    | 12        | 3.81          | 3           | 2.89 | 1.62 | 18.18           | 3.41         | 21.59             | 19.51          | 19.20           | 19.51          |
| 40        | 60     | 600    | 4         | 1.27          | 10          | 7.84 | 2.15 | 21.50           | 4.07         | 25.57             | 4.89           | 6.88            | 6.88           |
| 40        | 60     | 600    | 6         | 1.91          | 8           | 5.72 | 1.62 | 18.18           | 4.58         | 22.77             | 7.34           | 9.69            | 9.69           |
| 40        | 60     | 600    | 8         | 2.54          | 7           | 3.73 | 1.25 | 15.81           | 4.91         | 20.72             | 9.79           | 11.87           | 11.87          |
| 40        | 60     | 600    | 10        | 3.18          | 5           | 3.77 | 1.52 | 17.52           | 4.26         | 21.78             | 12.23          | 14.40           | 14.40          |
| 40        | 60     | 600    | 12        | 3.81          | 4           | 3.33 | 1.62 | 18.18           | 3.91         | 22.09             | 14.68          | 16.53           | 16.53          |
| 50        | 75     | 750    | 4         | 1.27          | 13          | 7.32 | 2.03 | 20.73           | 4.29         | 25.03             | 3.92           | 5.58            | 5.58           |
| 50        | 75     | 750    | 6         | 1.91          | 11          | 4.66 | 1.39 | 16.67           | 5.14         | 21.81             | 5.88           | 7.91            | 7.91           |
| 50        | 75     | 750    | 8         | 2.54          | 9           | 3.68 | 1.19 | 15.41           | 5.29         | 20.71             | 7.84           | 9.95            | 9.95           |
| 50        | 75     | 750    | 10        | 3.18          | 7           | 3.17 | 1.25 | 15.81           | 4.93         | 20.74             | 9.81           | 11.92           | 11.92          |
| 50        | 75     | 750    | 12        | 3.81          | 6           | 2.36 | 1.19 | 15.41           | 4.79         | 20.20             | 11.77          | 13.49           | 13.49          |
| 60        | 90     | 900    | 4         | 1.27          | 15          | 8.82 | 2.15 | 21.50           | 4.18         | 25.68             | 3.27           | 4.71            | 4.71           |
| 60        | 90     | 900    | 6         | 1.91          | 13          | 5.19 | 1.42 | 16.90           | 5.18         | 22.09             | 4.91           | 6.74            | 6.74           |
| 60        | 90     | 900    | 8         | 2.54          | 11          | 3.64 | 1.15 | 15.16           | 5.56         | 20.72             | 6.54           | 8.54            | 8.54           |

Graficando el valor del esfuerzo de adherencia máximo demandado contra el esfuerzo de



adherencia resistente de los modelos de vigas seleccionados, se obtiene la siguiente gráfica: Dentro del gráfico, la línea con menos pendiente representa la condición de aquellos elementos que tienen un factor de seguridad ante el fenómeno de adherencia correspondiente a la unidad (F.S.=1.0). Los puntos que caigan por debajo de esta línea tienen un factor de seguridad ante adherencia menor que la unidad, y por consiguiente, serán más propensos a tener problemas de falla por adherencia como se estudió en capítulos anteriores.

Además, se traza en la figura una línea con pendiente mayor que la anterior, la cual separa a aquellos elementos estructurales que tiene una relación del doble entre el valor del esfuerzo de adherencia resistente contra el esfuerzo de adherencia demandado; por lo que representan a elementos que cuentan con un factor de seguridad de dos (F.S.=2.0) contra el fenómeno de adherencia. Los puntos que se ubican arriba de esta segunda línea serán los que cuenten con un factor de seguridad mayor a dos.

Para el caso mostrado en la figura, se observa que solo existe un punto que cuenta con un factor de seguridad menor a la unidad, y corresponde a una viga con las siguientes características geométricas y mecánicas:

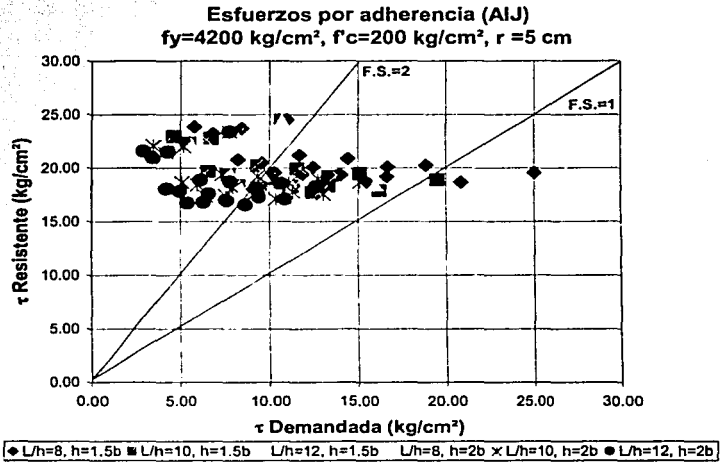
- Relación de peralte total contra ancho de 1.5 ( $h = 1.5 b$ ,  $b = 30$  cm,  $h = 45$  cm)
- Relación de Largo contra peralte total de la viga de 8 ( $L / h = 8$ ,  $L = 360$  cm)
- Recubrimiento superior e inferior de 5 cm.
- Recubrimiento lateral igual al diámetro de la varilla (3.8 cm)
- Número de varillas por lecho = 3
- Varilla de refuerzo longitudinal del número 12 ( $D = 1.5$  pulgadas)
- Separación entre varillas de acero longitudinal de 3.8 cm
- Acero de refuerzo con  $f_y = 4200$  kg/cm<sup>2</sup>
- Concreto con  $f_c = 250$  kg/cm<sup>2</sup>

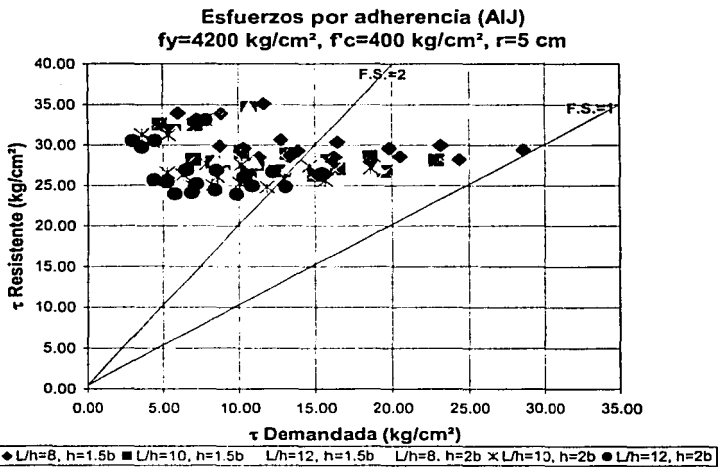
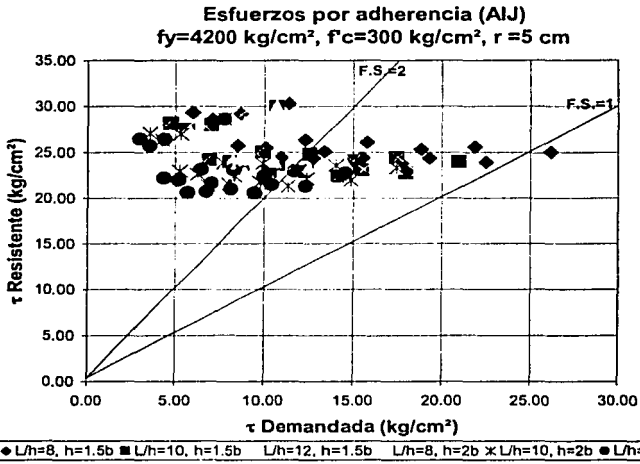
Se aprecia que el modelo corresponde al caso con varillas más grandes (#12), con la relación de claro de cortante más pequeño. Se podría concluir que ese es un caso

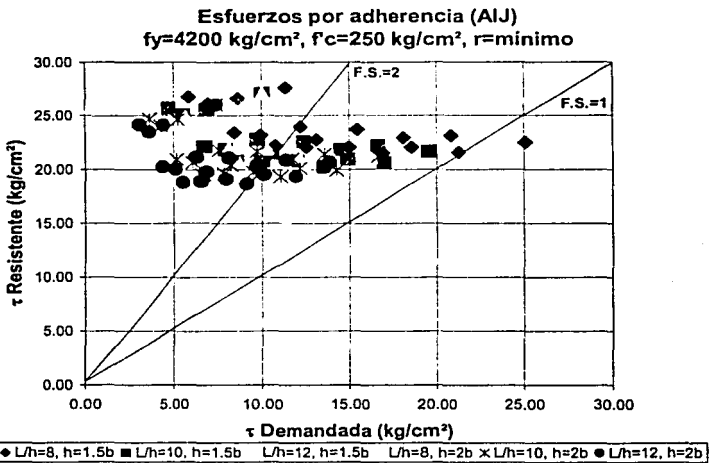
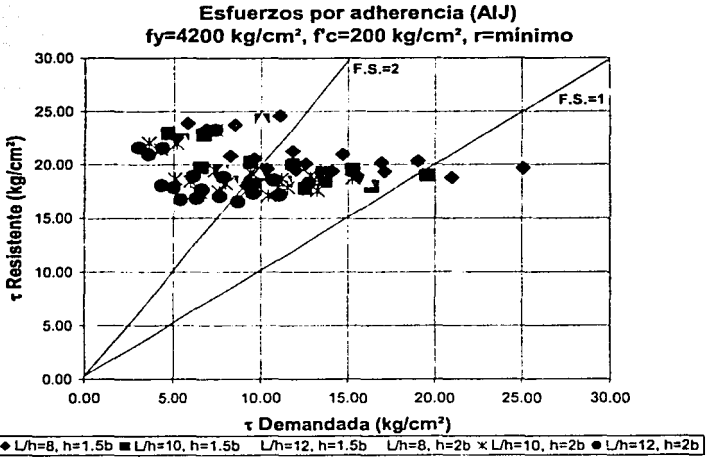
---

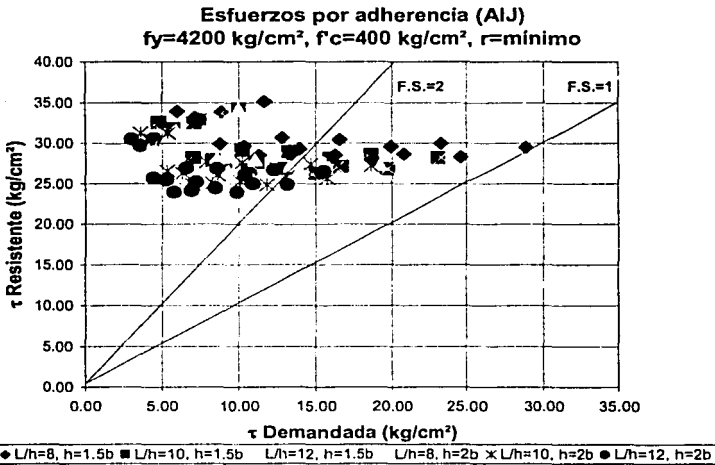
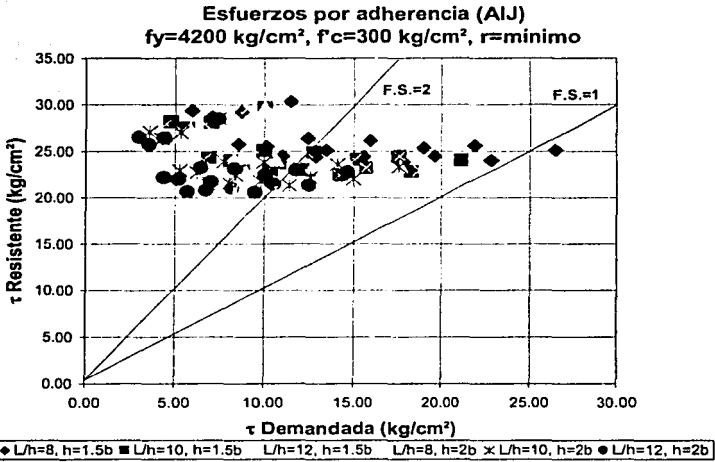
desfavorable para el fenómeno de adherencia (varillas de diámetro grande y elemento de claro corto), pero no se emitirán conclusiones hasta analizar el resto de los casos.

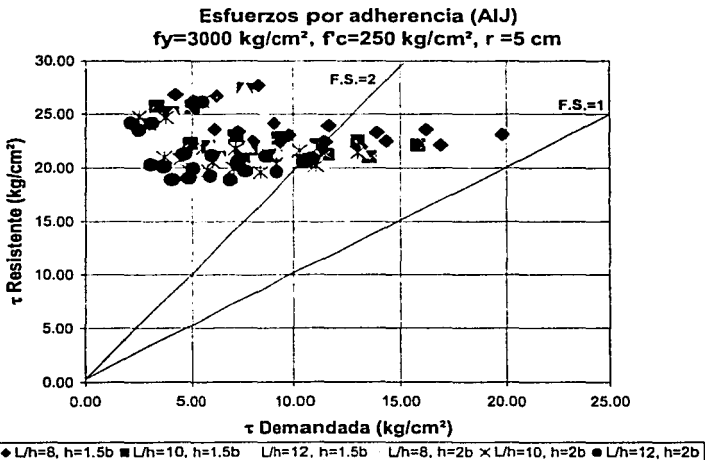
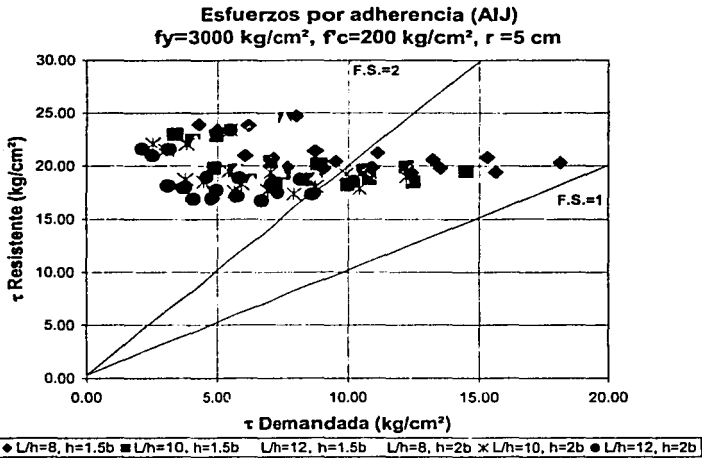
El análisis anterior, se repite de manera sistemática para todos los demás casos de modelos de vigas propuestos, obteniéndose las relaciones entre esfuerzos de adherencia demandado y resistente que se muestran en las figuras de las páginas siguientes:



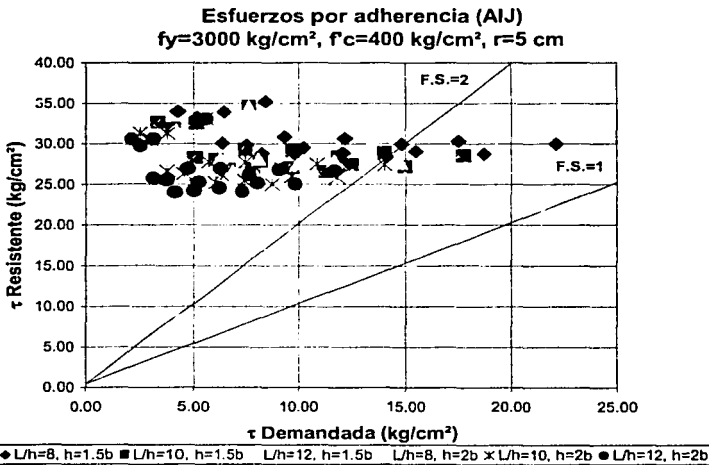
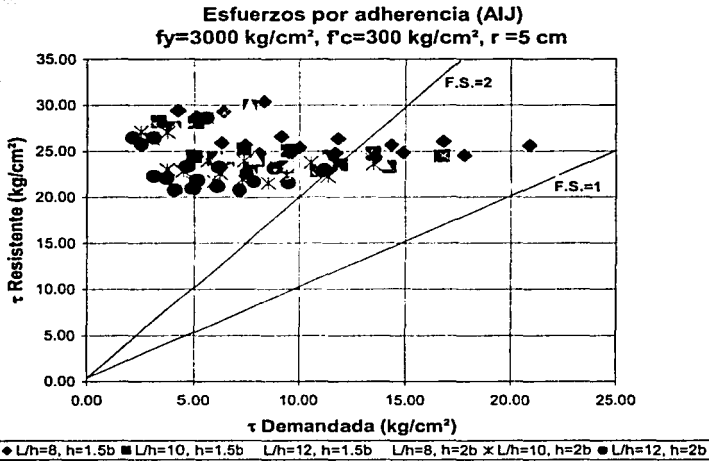


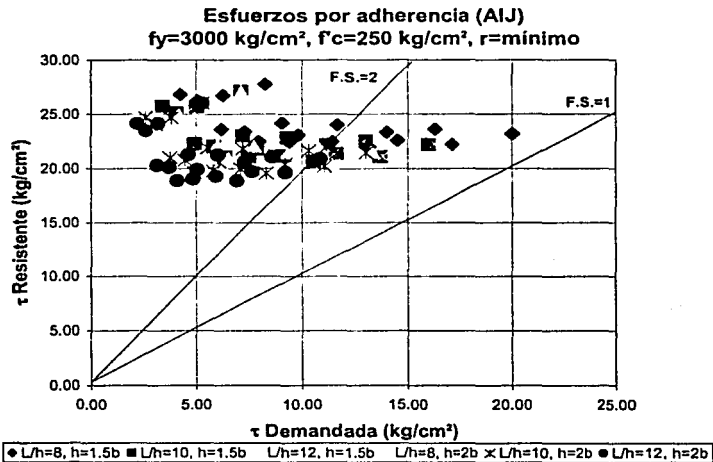
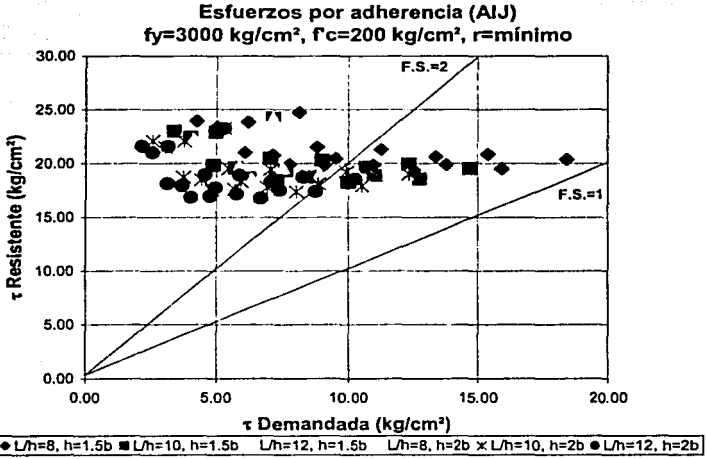


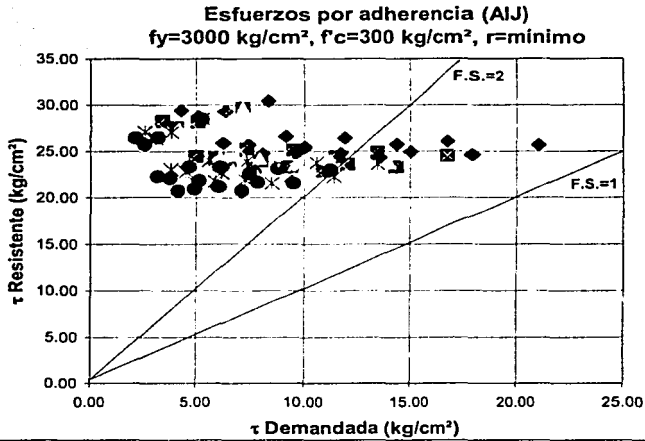


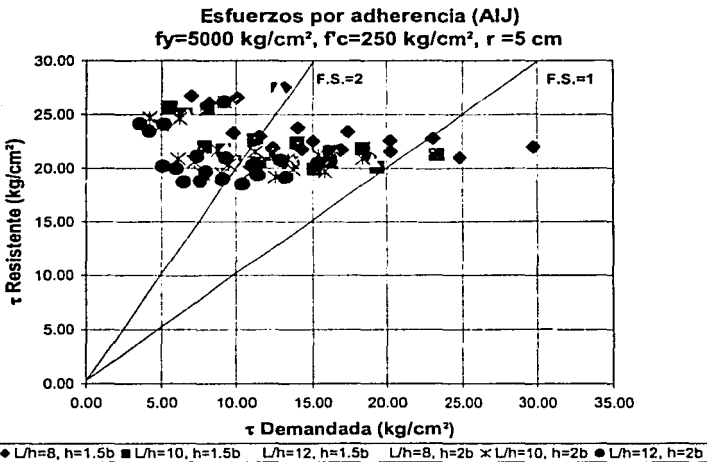
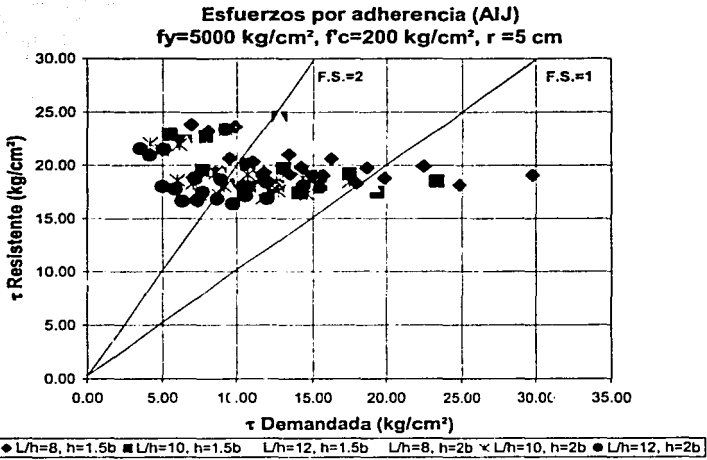


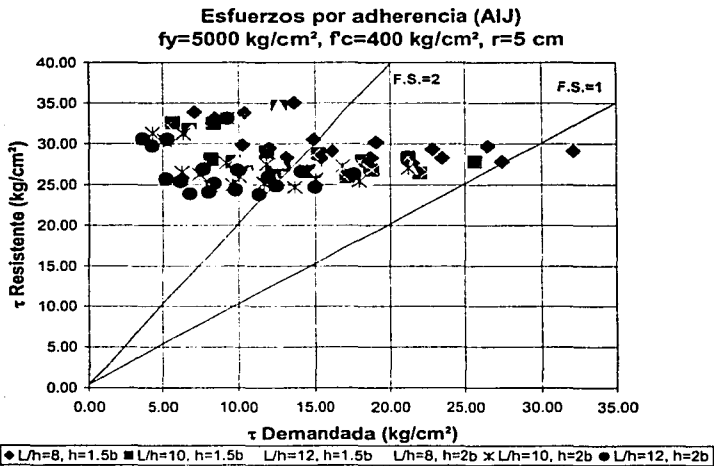
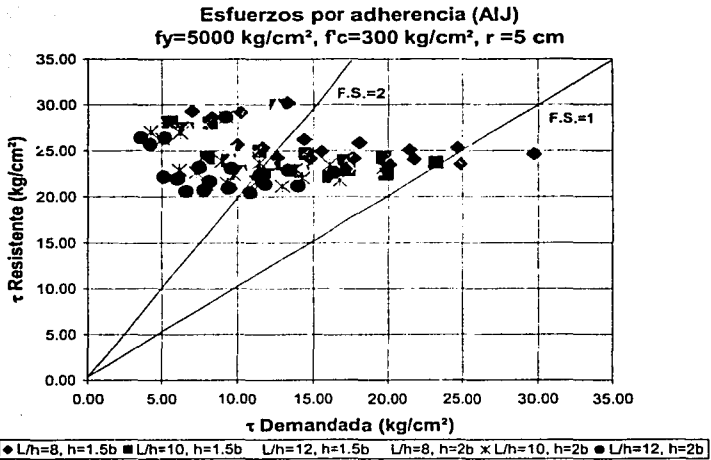


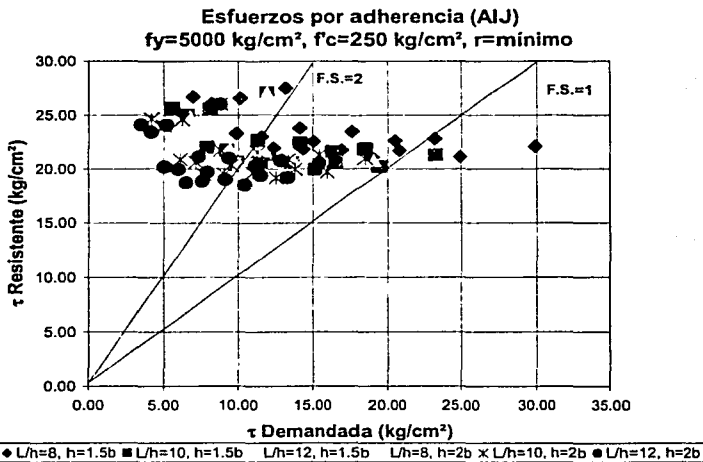
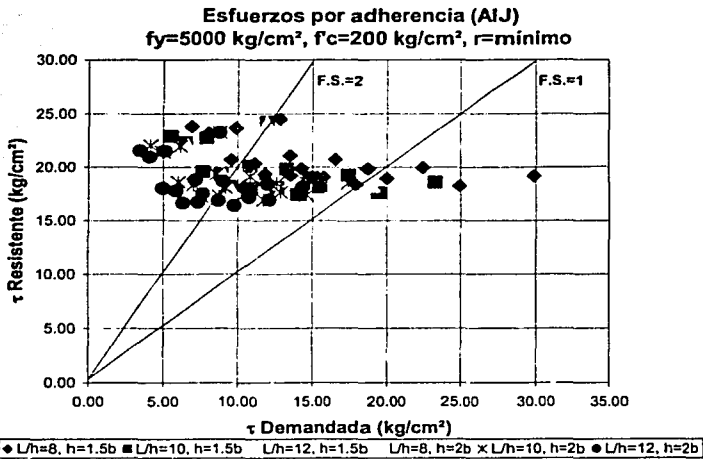


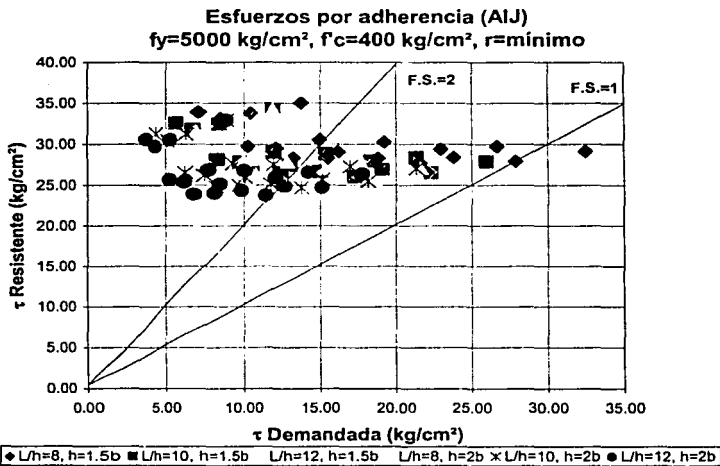
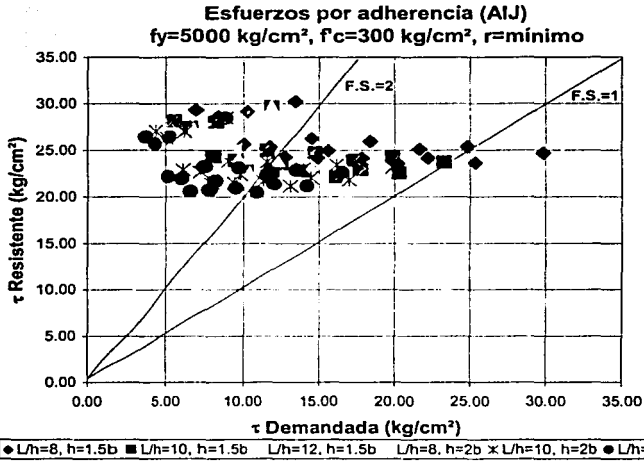












Hasta este punto se ha generado la información analítica sobre el probable comportamiento teórico de los modelos de viga de concreto reforzado ante el fenómeno de adherencia; con lo que se tienen las bases para analizar aquellos parámetros que resulten más desfavorables ante este fenómeno y que se estudiarán a continuación.

### **3.4 Conclusiones**

En primer lugar se estudiarán todos aquellos modelos de vigas en los que el factor de seguridad (F.S.) ante el fenómeno de adherencia resultó menor que la unidad. Todos los modelos de vigas que presentaron un factor de seguridad ante el fenómeno de adherencia menor a la unidad se resumen en la siguiente tabla:



**Vigas con factor de seguridad ante adherencia menor a la unidad**

(unidades kg-cm)

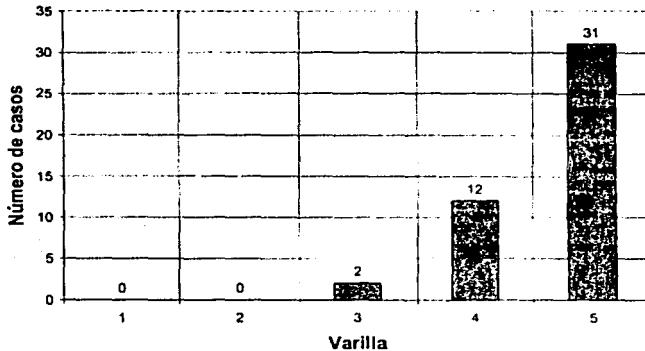
| Ancho "b" | Peralte "h" | Longitud "L" | Varilla # | # Var. Lecho | fy   | f'c | recubrimiento | F. S.<1 |
|-----------|-------------|--------------|-----------|--------------|------|-----|---------------|---------|
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 4200 | 200 | 5             | 0.89    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 4200 | 200 | 5             | 0.78    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 12        | 3            | 4200 | 200 | 5             | 0.97    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 4200 | 250 | 5             | 0.90    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 4200 | 300 | 5             | 0.96    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 4200 | 200 | mínimo        | 0.90    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 4200 | 200 | mínimo        | 0.78    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 4200 | 250 | mínimo        | 0.90    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 4200 | 300 | mínimo        | 0.95    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 8         | 5            | 5000 | 200 | 5             | 0.95    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 5000 | 200 | 5             | 0.73    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 200 | 5             | 0.64    |
| 40        | 1.5b=60     | 8h=480       | 12        | 4            | 5000 | 200 | 5             | 0.89    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 10        | 4            | 5000 | 200 | 5             | 0.90    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 12        | 3            | 5000 | 200 | 5             | 0.80    |
| 30        | 1.5b=45     | 12h=540      | 12        | 3            | 5000 | 200 | 5             | 0.95    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 10        | 4            | 5000 | 200 | 5             | 0.96    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 200 | 5             | 0.85    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 5000 | 250 | 5             | 0.85    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 250 | 5             | 0.74    |
| 40        | 1.5b=60     | 8h=480       | 12        | 4            | 5000 | 250 | 5             | 0.99    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 12        | 3            | 5000 | 250 | 5             | 0.91    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 250 | 5             | 0.94    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 5000 | 300 | 5             | 0.95    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 300 | 5             | 0.83    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 300 | 5             | 0.97    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 400 | 5             | 0.90    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 8         | 5            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.95    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.73    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.64    |
| 40        | 1.5b=60     | 8h=480       | 12        | 4            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.89    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 10        | 4            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.90    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 12        | 3            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.80    |
| 30        | 1.5b=45     | 12h=540      | 12        | 3            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.95    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 10        | 4            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.96    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 200 | mínimo        | 0.85    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 5000 | 250 | mínimo        | 0.85    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 250 | mínimo        | 0.74    |
| 40        | 1.5b=60     | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 250 | mínimo        | 0.98    |
| 30        | 1.5b=45     | 10h=450      | 12        | 3            | 5000 | 250 | mínimo        | 0.91    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 250 | mínimo        | 0.93    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 10        | 4            | 5000 | 300 | mínimo        | 0.93    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 300 | mínimo        | 0.83    |
| 30        | 2b=60       | 8h=480       | 12        | 3            | 5000 | 300 | mínimo        | 0.96    |
| 30        | 1.5b=45     | 8h=360       | 12        | 3            | 5000 | 400 | mínimo        | 0.90    |

De la tabla resulta claro que los modelos de vigas con refuerzo cuyo diámetro es menor a una pulgada ( $\phi < \text{No.8}$ ) no son susceptibles de presentar problemas por adherencia; incluso los casos donde se uso varillas del número ocho corresponden a modelos donde se acepta la máxima cantidad de varillas por lecho, aunado a que se está considerando el concreto con el menor valor de resistencia a la compresión.

También resulta claro que la tendencia de comportamiento inadecuado se presenta consistentemente en elementos de claro corto, con diámetros de varilla grandes y resistencias bajas del concreto. Un resumen del comportamiento observado en modelos con un factor de seguridad menor que la unidad, considerando el diámetro de las varillas, se presenta en la tabla siguiente, con su correspondiente histograma.

| Caso del eje horizontal del histograma | Varilla usada | Número de casos |
|--|---------------|-----------------|
| 1                                      | 4             | 0               |
| 2                                      | 6             | 0               |
| 3                                      | 8             | 2               |
| 4                                      | 10            | 12              |
| 5                                      | 12            | 31              |

Histograma de casos con F.S.<1.0 en relación al calibre o diámetro de la varilla

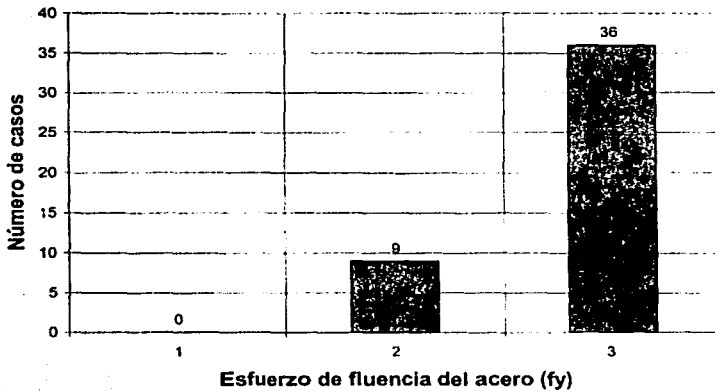


Se puede notar que la mayoría de los casos se presentan con la varilla de mayor calibre (#12).

Presentando un resumen similar de casos que presentan un  $F.S.<1.0$ , ahora con respecto al esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, se tiene:

| Caso del eje horizontal del histograma | Esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) | Número de casos |
|--|--------------------------------|-----------------|
| 1                                      | 3000                           | 0               |
| 2                                      | 4200                           | 9               |
| 3                                      | 5000                           | 36              |

Histograma de casos con  $F.S.<1.0$  en relación al esfuerzo de fluencia ( $f_y$ )

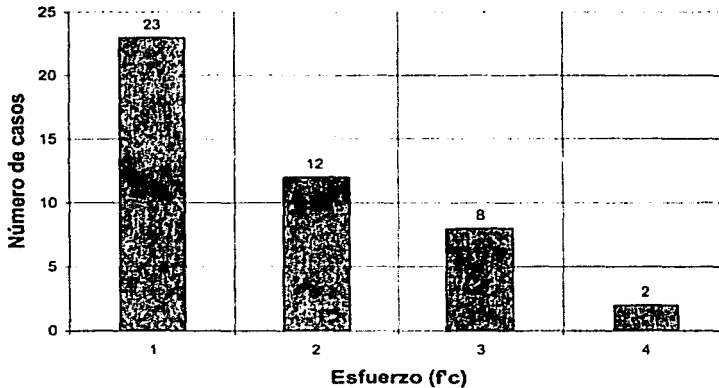


Se observa que la mayoría de los casos se concentran para el mayor esfuerzo de fluencia ( $f_y=5000 \text{ kg/cm}^2$ ).

Con relación al esfuerzo resistente a la compresión en el concreto ( $f'_c$ ), se tiene:

| Caso del eje horizontal del histograma | Esfuerzo del concreto ( $f_c$ ) | Número de casos |
|--|---------------------------------|-----------------|
| 1                                      | 200                             | 23              |
| 2                                      | 250                             | 12              |
| 3                                      | 300                             | 8               |
| 4                                      | 400                             | 2               |

**Histograma de casos con F.S.<1.0 en relación al esfuerzo resistente en el concreto ( $f_c$ )**

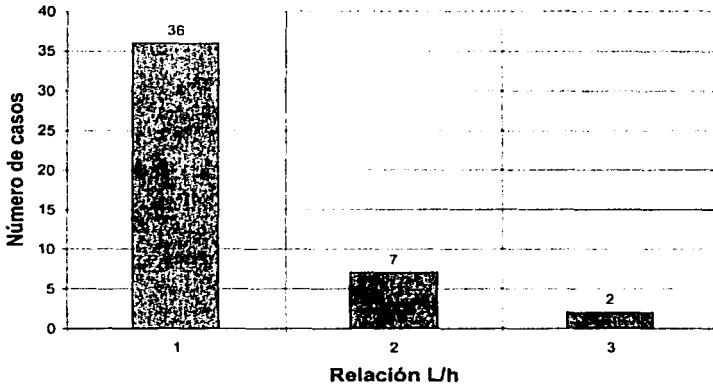


La tendencia en este caso, es que la mayoría de las vigas con problemas tiene un concreto de baja resistencia.

Revisando los casos que se presentan según la relación entre el peralte total de la viga y su longitud, también definida en algunos casos como claro de cortante, se tiene:

| Caso del eje horizontal del histograma | Relación | Número   |
|--|----------|----------|
|  | h-L      | de casos |
| 1                                      | L=8h     | 36       |
| 2                                      | L=10h    | 7        |
| 3                                      | L=12h    | 2        |

Histograma de casos con  $F.S.<1.0$  en relación a las dimensiones de las vigas



De la información anterior se nota que las vigas que tienden a presentar más problemas, son aquellas con una relación de claro a peralte total baja, es decir, elementos de claro corto.

Los parámetros anteriores fueron analizados por ser los más "significativos" después del estudio en cuanto al número de casos presentados. Después de observar los casos desfavorables y sus propiedades, se puede señalar que los problemas en las vigas ante el fenómeno de adherencia, se pueden presentar más frecuentemente con:

- Varillas de calibre grande
- Esfuerzos de fluencia altos para el acero de refuerzo
- Esfuerzos  $f_c$  bajos del concreto
- Relaciones bajas de longitud sobre peralte total de la viga

Este mismo comportamiento se observa para las varillas que caen en el rango de 2 a 1 con respecto a su factor de seguridad ante el fenómeno de adherencia, por lo que se reafirman las observaciones anteriores.

Se observó también que para varillas de diámetro pequeño, sobre todo en elementos de claro de cortante grande, el valor del factor de seguridad resulta muy alto, en algunos casos siendo incluso superior a 8.0. De un tratamiento estadístico de los resultados se puede decir que, para un total de 2880 modelos de vigas considerados en el presente trabajo, se presentó que el 98.40% estaba del lado de la seguridad, con baja probabilidad de ocurrencia de falla por medio del fenómeno de adherencia, y con un factor de seguridad superior a la unidad (F.S.>1). Aproximadamente el 63.23% de los casos presentaba un factor de seguridad superior a 2.0, y aproximadamente el 19.24% presentaba un factor de seguridad superior a 4.0. Un resumen de los diferentes casos se muestra en la siguiente tabla:

**Casos de vigas con diferentes factores de seguridad ante adherencia**

| Propiedades mecánicas: |     |      | Número de casos |          |          |
|------------------------|-----|------|-----------------|----------|----------|
| fy                     | fc  | rec. | F.S.>1.0        | F.S.>2.0 | F.S.>4.0 |
| 3000                   | 200 | 5    | 120             | 90       | 28       |
| 3000                   | 200 | mín  | 120             | 89       | 28       |
| 3000                   | 250 | 5    | 120             | 95       | 31       |
| 3000                   | 250 | mín  | 120             | 95       | 31       |
| 3000                   | 300 | 5    | 120             | 102      | 39       |
| 3000                   | 300 | mín  | 120             | 102      | 41       |
| 3000                   | 400 | 5    | 120             | 110      | 49       |
| 3000                   | 400 | mín  | 120             | 110      | 49       |
| 4200                   | 200 | 5    | 117             | 58       | 14       |
| 4200                   | 200 | mín  | 117             | 57       | 14       |
| 4200                   | 250 | 5    | 119             | 71       | 16       |
| 4200                   | 250 | mín  | 119             | 68       | 16       |
| 4200                   | 300 | 5    | 119             | 73       | 21       |
| 4200                   | 300 | mín  | 119             | 73       | 21       |
| 4200                   | 400 | 5    | 120             | 88       | 28       |
| 4200                   | 400 | mín  | 120             | 88       | 28       |
| 5000                   | 200 | 5    | 111             | 41       | 9        |
| 5000                   | 200 | mín  | 111             | 43       | 9        |
| 5000                   | 250 | 5    | 115             | 55       | 9        |
| 5000                   | 250 | mín  | 115             | 55       | 9        |
| 5000                   | 300 | 5    | 117             | 57       | 14       |
| 5000                   | 300 | mín  | 117             | 57       | 14       |
| 5000                   | 400 | 5    | 119             | 72       | 18       |
| 5000                   | 400 | mín  | 119             | 72       | 18       |
| $\Sigma =$             |     |      | 2834            | 1821     | 554      |
| Porcentaje del total = |     |      | 98.40%          | 63.23%   | 19.24%   |

Desde el punto de vista de la observancia del reglamento, se puede comentar que los requisitos de detallado, que son básicamente los que tratan de evitar la aparición de la falla por adherencia, resultan en algunos casos muy conservadores. Dado que los casos con factores de seguridad menores que la unidad son para varillas de gran diámetro, se considera adecuado la propuesta del Reglamento del Distrito Federal de recomendar el uso de varillas con diámetro menor o igual que una pulgada.

## CAPITULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

En el presente estudio se muestra una revisión global del nivel de seguridad que tiene, ante el fenómeno de adherencia, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en sus Normas Técnicas Complementarias. Para establecer un nivel de seguridad sin trabajo experimental propio se requirió del uso de una propuesta para determinar la resistencia por adherencia de elementos viga y columna. La propuesta, del AIJ, está sustentada en un número importante de resultados experimentales cuyo objetivo primario era abordar el tema del fenómeno de adherencia. Además de la propuesta teórico-empírica del AIJ, se optó por proponer una serie de modelos de vigas "probables" en la práctica siguiendo los lineamientos y requisitos del RCDF en sus NTC.

El estudio teórico de los modelos de vigas ante adherencia, observado en el capítulo anterior, muestra que no es conveniente usar varillas de un calibre relativamente grande, con relación al ancho de la viga. Este fenómeno esta relacionado directamente con el área de contacto entre la varilla y el concreto que la rodea; mientras menor sea el diámetro de la varilla utilizada, mayor será la relación superficie de contacto / área de la varilla, y por consiguiente la eficiencia ante el fenómeno se verá incrementada. Este efecto confirma lo adecuado de proponer, por parte del reglamento, el uso de varillas de diámetro menor o igual a una pulgada en estructuras de edificación.

Muchos casos desfavorables se presentaron al utilizar un esfuerzo de fluencia alto en el acero de refuerzo al mismo tiempo que se utilizaba un esfuerzo resistente a la compresión  $f_c$  bajo. Si se regresa a analizar las ecuaciones utilizadas para cuantificar los fenómenos de adherencia, de la expresión que se utiliza para calcular la demanda de adherencia por flexión, se puede apreciar que está es directamente proporcional al esfuerzo de fluencia en el acero. Esto provoca que cuando se proyecta la formación de articulaciones plásticas en los extremos de las vigas y se debe garantizar que exista la fluencia del acero en esas zonas,



la demanda de adherencia por flexión resulta grande cuando el esfuerzo de fluencia para el acero es grande también, mientras que la adherencia resistente de la viga permanece aproximadamente constante y se puede ver rebasada por la demanda del esfuerzo adherente.

Por otro lado, la resistencia por adherencia de la viga esta relacionada a los esfuerzos resistentes de tensión en el concreto y a la configuración relativa de las varillas de acero de refuerzo longitudinal y transversal (aspecto que no se está estudiando directamente en este trabajo). Las ecuaciones propuesta por el AIJ, así como las propuestas por el ACI, sugieren la falla por efecto de adherencia en una relación prácticamente directa con la resistencia del concreto en la sección. Esta es la principal razón por la cual se presentan más problemas de adherencia cuando el  $f_c$  del concreto es bajo.

Otro parámetro que resaltó en el estudio, fue la relación entre la longitud de la viga y el peralte total de la misma, también definida como claro de cortante. En donde se observa que la demanda por flexión es inversamente proporcional a la longitud de la viga, por lo que elementos con longitudes cortas tendrán más posibilidad de sufrir problemas por adherencia. Esto se debe a que la liberación del esfuerzo de adherencia en las barras depende de la longitud con la que cuente la viga para desarrollar la fuerza que equilibre el sistema, como ya se mencionó en capítulos anteriores.

Finalmente, se pudo identificar un porcentaje alto de elementos que presentaron un factor de seguridad superior a 4 (19.24%), por lo que la propuesta de las NTC-RCDF resulta muy conservadora para vigas y columnas de relaciones  $L/h > 10$ , y en los que se use concreto de resistencia superior a  $250 \text{ kg/cm}^2$  (común en la práctica) y varillas de diámetro menor al No. 8.

#### 4.2 Recomendaciones

En resumen, habiendo identificado las posibles causas que originan al problema de adherencia en vigas, se puede emitir las siguientes recomendaciones que implícitamente están consideradas en el RCDF-NTC (aunque resulta en ocasiones muy conservador):

- Utilizar, en medida de lo posible, una mejor distribución del acero de refuerzo en el lecho, proponiendo un armado con muchas varillas de un calibre razonablemente bajo
- Utilizar un acero de refuerzo cuyo esfuerzo de fluencia no sea muy alto, puesto que esto genera esfuerzos de adherencia por flexión altos.
- Utilizar acero de refuerzo con plataforma de fluencia baja también para el refuerzo lateral, ya que esta provocará reducción en la demanda de esfuerzos de adherencia por cortante
- No utilizar concretos cuyo esfuerzo resistente a compresión  $f_c$ , sea muy bajo, puesto que la adherencia resistente depende de este parámetro. Se recomienda buscar un balance entre la resistencia del acero ( $f_y$ ) con la del concreto ( $f_c$ )
- Buscar relaciones entre la longitud de la viga contra el peralte total de la misma que sean razonablemente grandes, de modo que se evite el comportamiento de viga o columna corta

#### 4.3 Trabajos futuros

Finalmente, se entiende que el ingeniero profesional del diseño debe buscar un diseño seguro y equilibrado, de forma que no tenga problemas de ningún tipo. Sin embargo, desde el punto de vista de adherencia, los factores de seguridad resultan muy elevados y esto significa que las NTC-RCDF para estructuras de concreto son muy conservadoras. Esto repercute directamente en dificultades para los procedimientos constructivos por el gran congestionamiento de acero de refuerzo resultante en algunos casos, lo cual encarece a la construcción en sí. Se recomienda entonces hacer trabajo experimental y analítico, a la fecha es nulo en nuestro país, relacionado con el comportamiento de adherencia en

---

elementos viga y columna, de modo que se logre una propuesta más razonable y uniforme en cuanto a los factores de seguridad de elementos de concreto sujetos a diferentes tipos de solicitaciones.

Este estudio se realizó para vigas muy particulares, por lo que se sería de utilidad que se realicen más estudios de este tipo en el futuro.

## REFERENCIAS

- **American Concrete Institute** (1999), "Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary (318R-99).
- **Architectural Institute of Japan, AIJ** (1988), "Design guidelines for earthquake resistant reinforced concrete buildings based on ultimate strength concept", Instituto de Arquitectos de Japón.
- **Departamento del Distrito Federal** (1997), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementarias", Diario Oficial del Gobierno del Distrito Federal, 1997.
- **Ichinose T.** (1988), "Procedimiento de diseño por cortante de elementos viga y columna de concreto reforzado" (en Japonés), Revista del Instituto de Arquitectos de Japón, Vol.10, No.3, Junio.
- **Morita H. y Fujii M.** (1982), "Estudio sobre las características de adherencia de varillas corrugadas" (en Japonés), Journal del Instituto de Arquitectos del Japón, No.319, Junio.
- **Nielsen, M.P.** (1984), "Limit Analysis and Concrete Plasticity", Prentice-Hall.
- **Thurlimann B.** (1980), "Plastic analysis of reinforced concrete beams", Introductory report of IABSE Colloquium, Plasticity in reinforced concrete, Copenhagen.
- **Walraven J.C.** (1970), "Aggregate interlock: a theoretical and experimental analysis". Tesis presentada a la Universidad de Delft, Países Bajos, para obtener el grado de Doctor en Ingeniería.
- **Walraven J.C.** (1981), "Fundamental analysis of aggregate interlock". Journal ASCE, Vol.107, No.ST 11.
- **Wang C. y Salmon C.,** "Reinforced Concrete design", Tercera edición, Harper International edition, 1979.