

Capítulo 3. LOSAS MIXTAS: MECÁNICA DE FLEXIÓN Y MÉTODOS DE CÁLCULO

Índice

| | | |
|----------|--|----|
| 3.1. | <i>Principios básicos</i> | 19 |
| 3.1.1. | Introducción | 19 |
| 3.1.2. | Mecanismos de interacción | 19 |
| 3.1.3. | Grado de interacción..... | 20 |
| 3.1.3.1. | Interacción total | 21 |
| 3.1.3.2. | Interacción parcial..... | 22 |
| 3.1.3.3. | Interacción nula | 22 |
| 3.2. | <i>Mecanismos principales de fallo</i> | 23 |
| 3.2.1. | Fallo por flexión | 24 |
| 3.2.2. | Fallo por deslizamiento longitudinal | 24 |
| 3.2.2.1. | Fallo por liberación longitudinal de la chapa..... | 24 |
| 3.2.2.2. | Fallo por separación vertical..... | 24 |
| 3.2.2.3. | Fallo por rotura del hormigón | 25 |
| 3.2.2.4. | Fallo por aplastamiento de las embuticiones | 26 |
| 3.2.3. | Fallo por cortante vertical | 26 |
| 3.2.4. | Representación gráfica de los modos de fallo | 26 |
| 3.3. | <i>Ductilidad - fragilidad</i> | 26 |
| 3.4. | <i>Métodos normativos de cálculo</i> | 27 |
| 3.4.1. | Método <i>m-k</i> | 27 |
| 3.4.2. | Método de la conexión parcial | 28 |
| 3.4.3. | Otros métodos | 28 |

Capítulo 3

LAS LOSAS MIXTAS: GENERALIDADES

El presente capítulo describe la mecánica resistente de las losas mixtas y los métodos de cálculo estándar contemplados por la normativa.

3.1. PRINCIPIOS BÁSICOS

3.1.1. Introducción

Las losas mixtas están formadas por una chapa de acero conformada en frío, usada como encofrado durante la construcción de la losa, que funciona solidariamente con el hormigón una vez fraguado. De ahí la denominación de *forjado colaborante*.

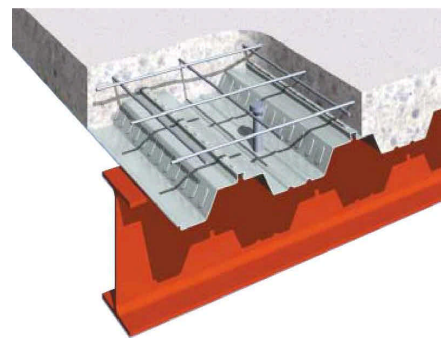


Figura 3-1 Losa mixta en construcción y muestra de montaje

La función colaborante (total o parcial) entre el acero y el hormigón sólo es posible si se garantiza la transferencia de esfuerzos rasantes entre ambos elementos. De lo contrario se producen flexiones independientes de los elementos, a modo de losas en paralelo, siendo despreciable la contribución de la chapa (*encofrado perdido*) y con el armado imperativo en el hormigón.

3.1.2. Mecanismos de interacción

La función colaborante se consigue gracias a los siguientes mecanismos resistentes básicos frente al deslizamiento longitudinal:

- *Adherencia química*: Enlace químico entre el hormigón y el acero, que se produce durante el proceso de fraguado. La resistencia de estos enlaces puede ser muy elevada pero no debería tenerse en cuenta debido a de su alta variabilidad y difícil control.
- *Interferencia mecánica por embuticiones*: Para conseguir una interacción razonable entre el acero y el hormigón se provocan, con intención análoga al corrugado de las barras de acero para el hormigón armado, unas embuticiones en la chapa durante su proceso de conformado que actúan como interferencias mecánicas frente al

deslizamiento. Al iniciarse el deslizamiento, estas interferencias mecánicas provocan unas deformaciones en la chapa (flexión transversal) que incrementan notablemente las fuerzas necesarias para que el deslizamiento prosiga.

- *Interferencia mecánica por fricción:* Las fuerzas normales de contacto entre el hormigón y el acero producen esfuerzos de fricción que se oponen al deslizamiento. Éstas pueden llegar a ser muy importantes cuando existen embuticiones, al incrementar notablemente las fuerzas de contacto. También aparecen en el caso de chapas lisas aunque a nivel mucho menor.
- *Anclajes mecánicos de conexión con las vigas:* Las vigas de apoyo de las losas pueden funcionar como vigas mixtas en su flexión propia (transversal a la losa). En estos casos, las vigas metálicas incorporan los típicos conectores soldados en el ala superior atravesando la chapa y embebidos en la losa. Estos conectores actúan también como anclajes extremos de la losa en su dirección de flexión.
- *Anclajes mecánicos por deformación de la chapa:* De forma similar a los conectores, en los extremos de las chapas –donde no existe momento flector positivo– se puede practicar un aplastamiento de la chapa a modo de anclaje.

A continuación se ilustran estas tipologías de interacción:

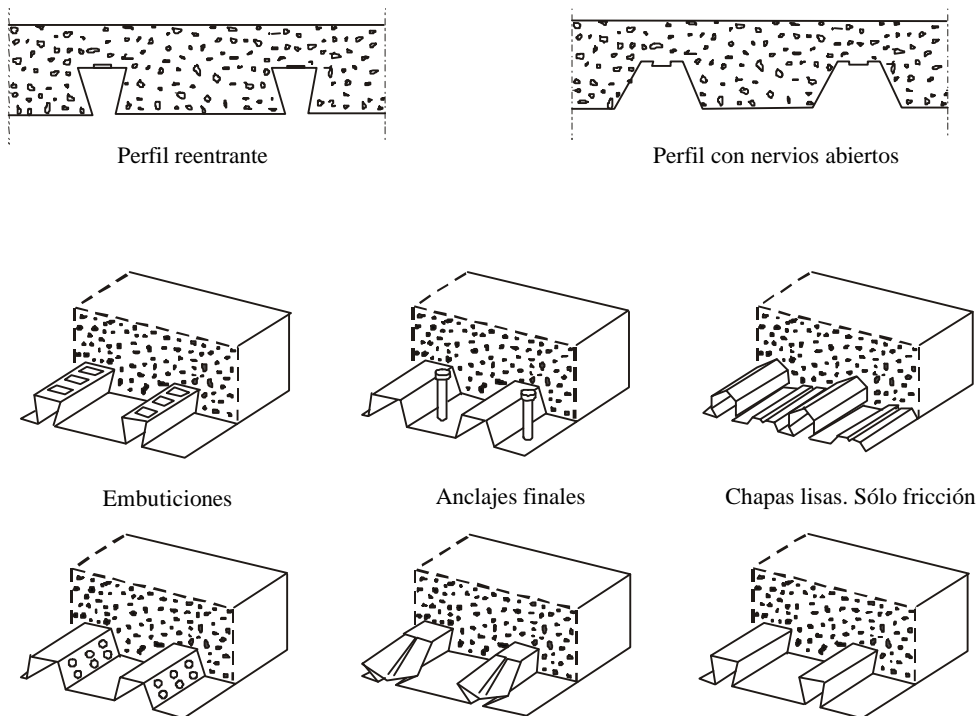


Figura 3-2 Tipos de interferencia en losas mixtas con nervios abiertos y cerrados

3.1.3. Grado de interacción

Cualquier elemento estructural mixto sometido a flexión, presenta un comportamiento que depende de la capacidad de transmisión de esfuerzos rasantes entre ambos materiales, esto es, del grado de interacción.

3.1.3.1. Interacción total

Si no existe deslizamiento relativo entre acero y hormigón, la interacción es total y puede aceptarse como válida la hipótesis de continuidad de deformaciones longitudinales entre los materiales. La ley de deformaciones se supone lineal. Los elementos estructurales actúan conjuntamente como un elemento único.

A continuación se ilustra una posible situación de funcionamiento en conexión total, en la que el hormigón se encuentra fisurado y el acero en régimen elástico.

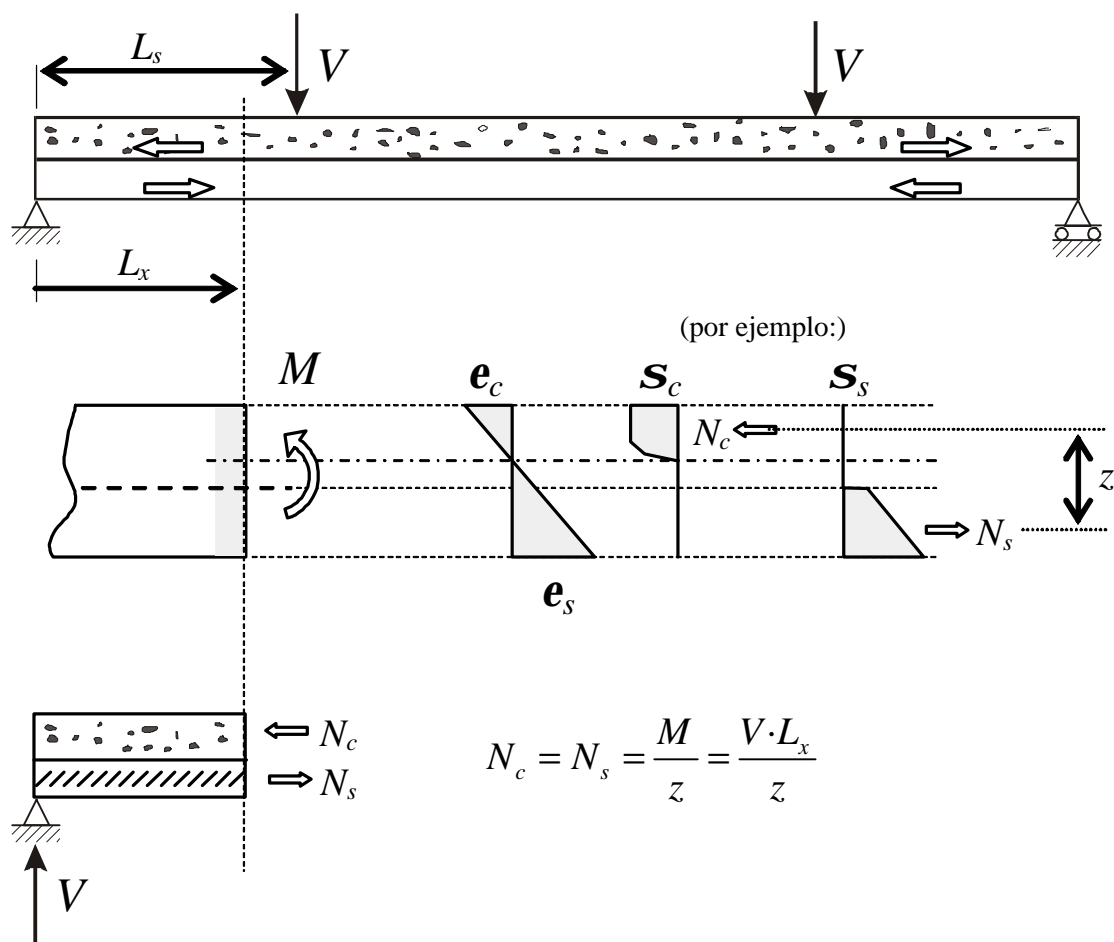


Figura 3-3 Esquema conceptual de funcionamiento en interacción total

La fuerza media por patrón de embutición en la luz de rasante L_s es:

$$F_{emb} = \frac{N_c}{n^{\circ} emb} = \frac{V \cdot L_s / z}{L_s / s} = V \cdot \frac{s}{z}$$

donde, s es la distancia entre patrones de embutición

z es el brazo de palanca de las resultantes longitudinales

3.1.3.2. Interacción parcial

Si existe cierto deslizamiento entre los materiales, la interacción es parcial y, aunque los elementos transmiten el esfuerzo rasante, no puede admitirse la continuidad de deformaciones.

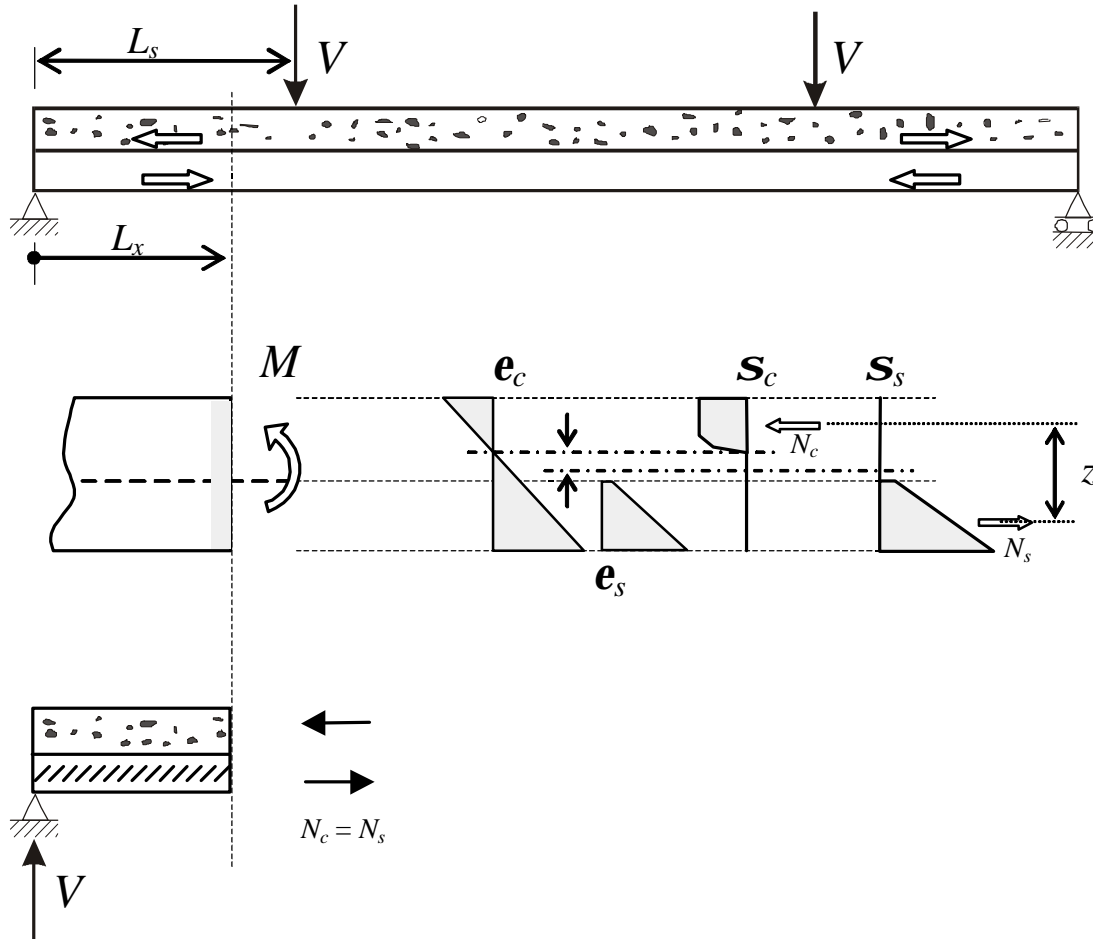


Figura 3-4 Esquema de funcionamiento en interacción parcial

Al no existir continuidad de deformaciones entre los elementos, los respectivos ejes neutros no coinciden.

Se acostumbra a suponer, no obstante, que las secciones de ambos elementos se mantienen planas y que sus curvaturas son iguales. En esta tesis se demuestra que las curvaturas de acero y hormigón pueden perfectamente diferir en chapas de perfilado abierto.

3.1.3.3. Interacción nula

Finalmente, si los elementos no transmiten nunca esfuerzos rasantes, el conjunto puede tratarse como la suma en paralelo de elementos estructurales independientes. Así, no puede hablarse de losa mixta al no existir interacción, sino de una losa nervada de hormigón y una chapa de acero actuando en paralelo. Evidentemente, resulta obligado el armado de la losa de hormigón para resistir sus tracciones longitudinales y, en este caso, la contribución de la chapa de acero pasa a tener un efecto despreciable en la flexión del conjunto, actuando únicamente como encofrado perdido.

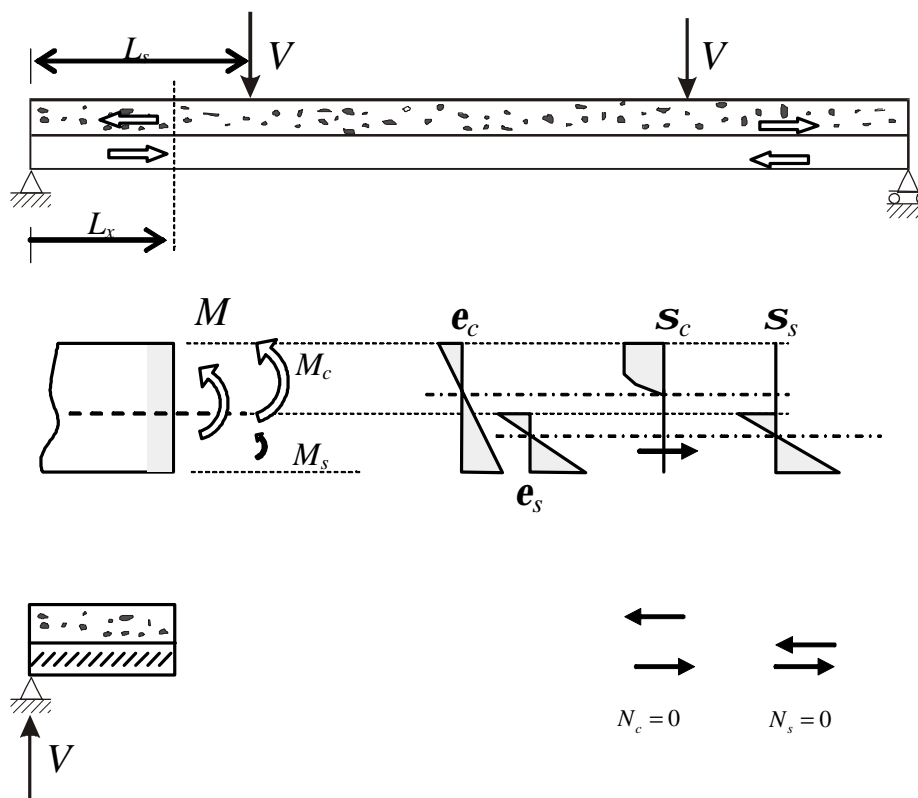
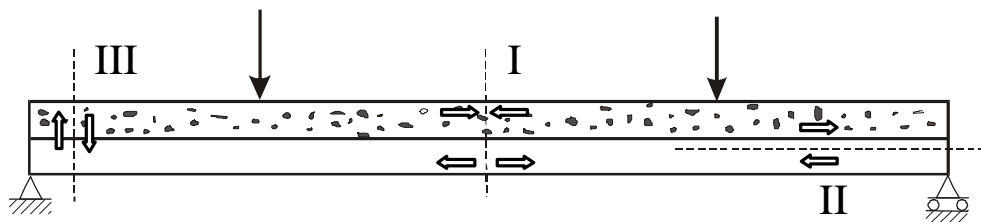


Figura 3-5 Esquema de funcionamiento en interacción nula

El estado de interacción nula también puede darse como punto final del proceso de deslizamiento de una losa mixta sin armar, especialmente en los perfilados en ángulo abierto, como resultado de la separación vertical entre la chapa y el hormigón. En este caso, el hormigón tendría resistencia a flexión nula, actuando únicamente la chapa. (ver caso $\eta=0$ en la Figura 3-11).

3.2. MECANISMOS PRINCIPALES DE FALLO

La figura siguiente ilustra los tres modos de fallo posibles en las losas mixtas y las secciones donde pueden producirse.



I: fallo por flexión

II: fallo por deslizamiento longitudinal

III: fallo por cortante vertical

Figura 3-6 Modos de fallo y zonas características

3.2.1. Fallo por flexión

El fallo por flexión se presenta cuando la interacción es total entre acero y hormigón hasta alcanzar la capacidad última a flexión de la sección compuesta. Esto sucede cuando el esfuerzo cortante es pequeño con relación a los esfuerzos de flexión, o sea, luces grandes, cantos pequeños.

3.2.2. Fallo por deslizamiento longitudinal

Es el modo de fallo más frecuente dada la baja eficacia de los sistemas de interferencia usados comúnmente. Se produce cuando se supera la resistencia de los sistemas de retención del deslizamiento (embuticiones, anclajes extremos y fricción).

Dicho fallo resistente puede deberse a 3 fenómenos fundamentales:

3.2.2.1. Fallo por liberación longitudinal de la chapa

Las rampas de las embuticiones transforman el esfuerzo rasante longitudinal en esfuerzos sobre la chapa que provocan su flexión transversal.

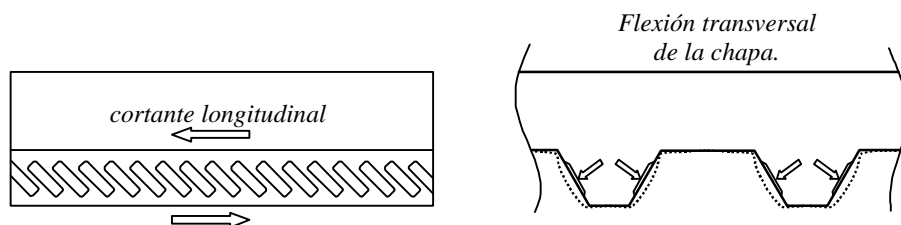


Figura 3-7 Flexión transversal de la chapa provocada por el deslizamiento longitudinal

Cuando la flexión de la chapa y, por tanto, el deslizamiento es el necesario para que el hormigón se desaloje de las embuticiones, se produce una “liberación longitudinal” del sistema y se alcanza el límite resistente.

Las simulaciones numéricas realizadas en esta tesis han permitido comprobar la extensa e intensa plastificación del acero provocada por esta flexión transversal.

El mecanismo resistente es, pues, la resistencia a la flexión transversal de la chapa.

3.2.2.2. Fallo por separación vertical

Es el modo de fallo más frecuente en los perfiles con nervios de ángulo abierto (ver Figura 3-2) y se puede analizar de forma conjunta con el fallo por liberación longitudinal. De hecho, en muchos casos, se produce un deslizamiento inclinado, suma del longitudinal y el vertical.

En los perfiles abiertos, la inclinación de las paredes de los nervios crea una componente vertical en las fuerzas de interacción de las embuticiones, que tienden a separar verticalmente el hormigón y la chapa.

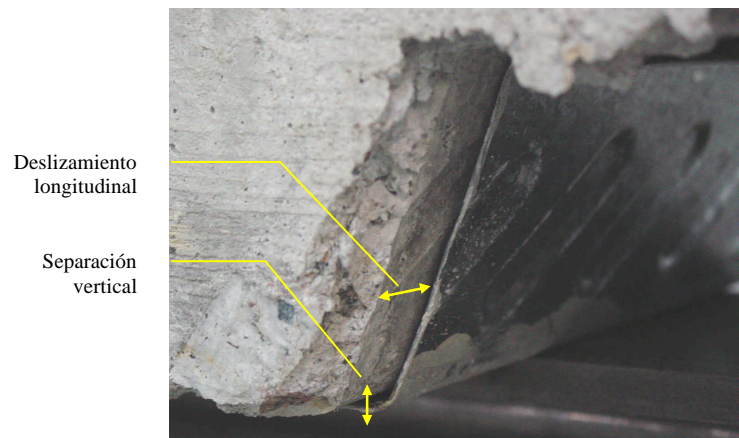


Figura 3-8 Flexión transversal de la chapa provocada por el deslizamiento longitudinal

Las simulaciones realizadas en esta tesis han permitido una descripción detallada de estos mecanismos de fallo.

En perfiles abiertos, la interferencia geométrica de la parte inferior de las embuticiones entrantes y la parte superior de las salientes son las que impiden que dicha separación vertical se produzca. El sistema falla cuando la flexión transversal de la chapa es la necesaria para liberar verticalmente el movimiento relativo entre chapa y hormigón. Al producirse esta separación vertical, la geometría abierta de los nervios conlleva una disminución de la interferencia geométrica entre la chapa y el hormigón, disminuyendo así la flexión transversal de la chapa. Esto provoca una caída resistente.

En perfiles re-entrantes, la propia forma cerrada de los nervios impide la separación vertical por simple interferencia geométrica.

3.2.2.3. Fallo por rotura del hormigón

En el caso de presentarse resistencias elevadas a los dos modos de fallo anteriores, se podría llegar a producir la rotura del hormigón por:

- tracción vertical en la base de los nervios cerrados.
- cizalladura longitudinal en bases de los nervios cerrados.
- cizalladura del hormigón en la base de las embuticiones salientes.
- desconchado del hormigón alrededor de las embuticiones.
- compresión local de las zonas de contacto.

En cualquier caso se trataría de roturas frágiles y por tanto, el sistema precisará de cierta ductilidad en la chapa para evitar la rotura sucesiva, no simultánea, de los sistemas de retención (ver 3.3). La alta resistencia se consigue con una alta resistencia del hormigón y un dimensionado adecuado en las zonas de rotura.

La compresión local es un fenómeno muy local dependiente de la resistencia a compresión del mortero superficial en situación de confinamiento. Cuando se produce el deslizamiento se transforma en erosión superficial, causando los característicos surcos sobre la superficie del hormigón.

3.2.2.4. Fallo por aplastamiento de las embuticiones

En las embuticiones entrantes hacia el hormigón, si el ángulo de embutición es pequeño, el efecto de cuña que provocan las embuticiones, crea una fuerza de interacción cuya componente perpendicular a la chapa puede llegar a presentar intensidades muy importantes, llegando incluso a aplastar las embuticiones completamente.

Este comportamiento se ha producido en perfiles cerrados en cola de milano con embuticiones excesivamente suaves.

3.2.3. Fallo por cortante vertical

Es un modo de fallo poco frecuente ya que sólo se da en losas con luces pequeñas, cantos grandes y esfuerzos cortantes considerables. Debe evitarse por su carácter frágil.

3.2.4. Representación gráfica de los modos de fallo

La siguiente figura muestra la forma típica de la curva de resistencia de una losa mixta. Los parámetros que determinan el tipo de fallo, para una losa de sección transversal definida, son la luz de rasante L_s y el esfuerzo cortante V_t : (ver 3.4.1)

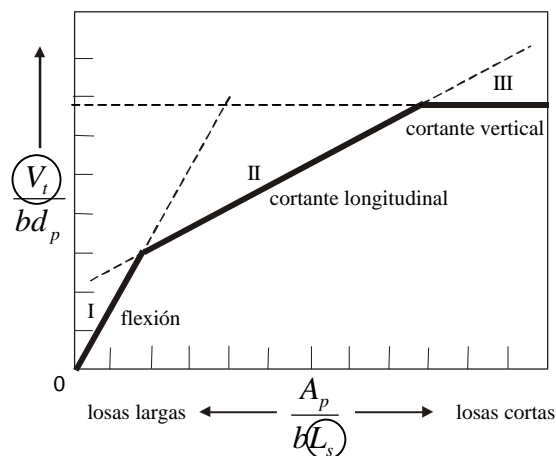


Figura 3-9 Curva resumen de resistencia y modos de fallo en función de la luz rasante

3.3. DUCTILIDAD - FRAGILIDAD

Es de vital importancia tener en consideración que la interacción entre la chapa y el hormigón debe desarrollarse de tal forma que todas las embuticiones, o todos los dispositivos de cualquier otro sistema de retención, sean capaces de repartirse los esfuerzos rasantes para poder resistir conjuntamente el deslizamiento. Una rigidez excesiva del sistema de retención en la chapa puede provocar una concentración de esfuerzos en una pequeña zona. Dicha concentración podría provocar la rotura frágil del hormigón por cizalladura o desconchado y por tanto, una rotura secuencial, no simultánea, de los dispositivos de retención, resultando mínima la resistencia del conjunto de la losa.

Así, para la consecución de la interacción total, debe conseguirse un sistema de retención que, al tiempo que evite el deslizamiento, presente también la deformabilidad necesaria para que el esfuerzo rasante se distribuya convenientemente antes de que se produzca la rotura del hormigón.

3.4. MÉTODOS NORMATIVOS DE CÁLCULO

3.4.1. Método *m-k*

El método semi-experimental *m-k* es utilizado para determinar la resistencia de una losa al esfuerzo cortante longitudinal [46]. Construye una fórmula lineal en la que intervienen los parámetros resistentes más significativos de la losa mixta (se comprueba que la resistencia del hormigón no influye si f_{ck} está comprendida entre 25 y 35 MPa):

$$V_{IR} = F(L_s, d_p, b, A_p, V_t)$$

donde:

V_{IR} Resistencia cortante longitudinal

L_s Luz rasante

V_t Esfuerzo cortante vertical

d_p Distancia entre el centroide de la chapa y la cara superior del hormigón

b Anchura

A_p Área nominal de la chapa

Se realizan 3 ensayos con distintas luces de rasante L_s y se construye el siguiente gráfico:

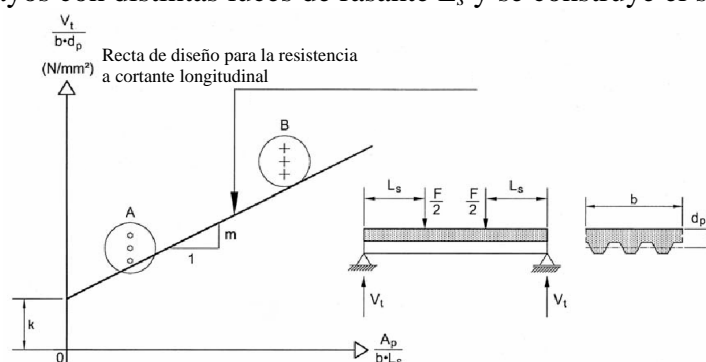


Figura 3-10 Diagrama *m-k* de fallo por rasante

de donde se obtienen los valores de m y k .

El esfuerzo cortante resistente de cálculo viene dado por la expresión:

$$V_{l.Rd} = b d_p [(m A_p / b L_s) + k] / g_{vs}$$

donde las dimensiones están en mm,

$$g_{vs} = 1,25$$

L_s es, en función del tipo de carga:

Carga uniforme: $L/4$

Fuerzas simétricas: distancia al soporte más cercano

3.4.2. Método de la conexión parcial

Sólo aplicable a losas de comportamiento dúctil [46]. El método asume una distribución uniforme de tensiones rasantes en toda la luz de rasante considerada.

Se basa en el cálculo de la tensión tangencial media última de cálculo $t_{u,Rd}$ entre la chapa y el hormigón, a partir del momento flector de ensayo y del diagrama teórico de estados límites últimos desde conexión nula hasta conexión total:

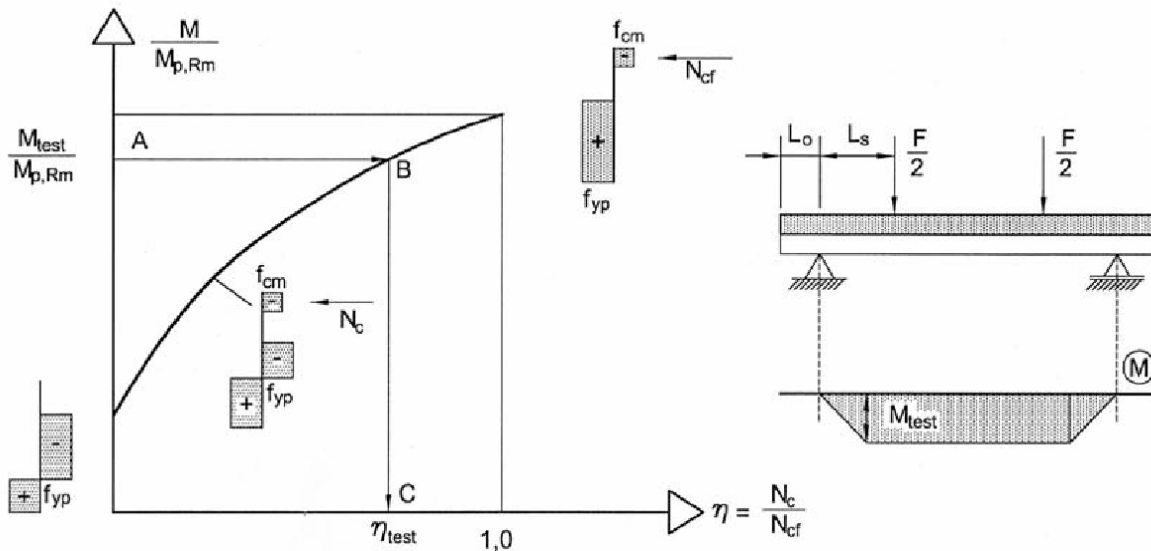


Figura 3-11 Diagrama de diseño en interacción parcial

donde:

f_{cm} Resistencia media del hormigón

f_{yp} Límite elástico del acero

M_{pa} Momento plástico de flexión de la chapa

$M_{p,Rm}$ Momento plástico máximo resistente en conexión total

N_{cf} Esfuerzo teórico en el hormigón para conexión total

La tensión rasante media última se determina como:

$$t_u = \frac{hN_{cf}}{b(L_s + L_0)}$$

Esta tensión rasante media última se utiliza para determinar el momento último resistente M_{Rd} en cada sección de comprobación, a una distancia cualquiera L_x del apoyo.

3.4.3. Otros métodos

Recientemente se han propuesto otros métodos de cálculo, todos ellos orientados a reducir el número y/o complejidad de los ensayos necesarios para la obtención de parámetros resistentes.

Entre ellos mencionamos el descrito en “*New Simplified Method for the Design of Composite Slabs*” [11], cuyos autores son M. Crisinel (ICOM-EPFL) y F. Marimon (ETSEIB-UPC).

Este nuevo método se basa en la obtención experimental de las tensiones tangenciales últimas de adherencia inicial $t_{u,1}$, y de interferencia mecánica $t_{u,2}$ (en el caso dúctil) mediante ensayos reducidos de *Pull-out*. Éstas se suponen, igual que en el método de la conexión parcial, uniformemente distribuidas a lo largo de la luz de rasante.

De las tensiones tangenciales últimas y de los planteamientos teóricos de funcionamiento a flexión elasto-plástica de la losa mixta en conexión total, se construye el diagrama trilineal simplificado $M-q$ para la comprobación de las secciones críticas.

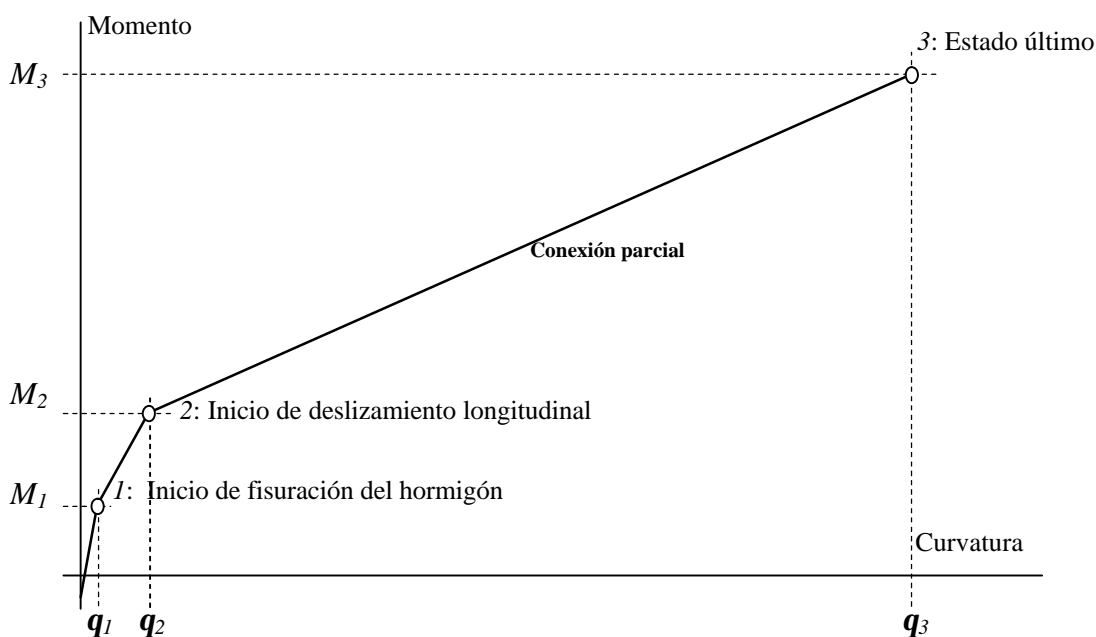


Figura 3-12 Diagrama trilineal simplificado momento-curvatura

Este método es similar al planteado por las normativas actuales para la comprobación resistente de vigas mixtas en conexión parcial.

En la presente tesis se ha comprobado experimentalmente que la distribución de esfuerzos en las embuticiones de la chapa no es siempre uniforme a lo largo de la luz rasante, especialmente en los perfiles de ángulo abierto. En estos casos, no sería válida la hipótesis planteada por los dos últimos métodos, recogido el primero en la norma Eurocódigo 4.

