12

Construcción mixta

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 12

CONSTRUCCIÓN MIXTA

Lección 12.1: Generalidades sobre construcción mixta 1

1 INTRODUCCIÓN 4
2 ACCIÓN CONJUNTA EN VIGAS 8
3 ELEMENTOS MIXTOS 10
3.1 Vigas mixtas 10
3.1.1 Construcción apuntalada 12
3.1.2 Resistencia de la sección 12
3.1.3 Vigas y losas continuas 12
3.2 Conexiones por esfuerzo rasante 13
3.3 Uniones viga-pilar 14
3.4 Pilares mixtos 15
3.5 Secciones de acero parcialmente recubiertas 17
3.6 Losas mixtas 18
4 CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS MIXTOS 20
5 PUENTES MIXTOS 22
6 RESUMEN FINAL 24
7 BIBLIOGRAFÍA 24
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 24

Lección 12.2: Comportamiento de vigas 25

1 INTRODUCCIÓN 28
2 COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES 29

3 DESCRIPCIÓN DE UNA VIGA MIXTA SIMPLEMENTE APOYADA 31
3.1 Generalidades 31
3.2 Comportamiento estructural 33
3.3 Situaciones prácticas de carga 36
3.4 Fluencia y retracción 37
3.5 Vigas mixtas apuntaladas y sin apuntalar 37
3.6 Conexión semirrígida 39
4 VIGAS MIXTAS CONTINUAS 41
5 RESUMEN FINAL 42
6 BIBLIOGRAFÍA 42

Lección 12.3: Vigas de un solo vano 43

1 INTRODUCCIÓN 46
1.1 Estado límite último 46
1.2 Estado límite de servicio 49
2 ASPECTOS DE CÁLCULO DEL ALA DE HORMIGÓN A COMPRESIÓN 50
2.1 Anchura eficaz 50
2.2 Esfuerzo cortante máximo longitudinal en la losa de hormigón 51
3 CÁLCULO 52
4 MÉTODO DE CÁLCULO PLÁSTICO 54
4.1 Momento flector positivo 54
4.2 Esfuerzo cortante vertical 58
4.3 Esfuerzo cortante vertical en combinación con el momento flector 60
5 RESUMEN FINAL 62
6 BIBLIOGRAFÍA 62
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 62

Problema Resuelto 12.1 (i) y (ii): Viga mixta simplemente apoyada .. 63

1 PLANTA 68
2 DETALLES 69

3 ESPECIFICACIONES 71
3.1 Propiedades de los materiales 71
3.1.1 Hormigón 71
3.1.2 Acero de Armadura 71
3.1.3 Acero Estructural 72
3.1.4 Chapa de Acero Perfilado 72
3.1.5 Conectores 72
3.2 Parámetros del forjado 72
3.2.1 Problema 1 72
3.2.2 Problema 2 73
4 PROBLEMA 1 74
4.1 Acciones (Cargas de la Viga) 74
4.1.1 Fase de Construcción 74
4.1.2 Fase Mixta 75
4.1.3 Factores Parciales de Seguridad 77
4.2 Fase de Construcción 77
4.2.1 Tamaño de la Viga 77
4.2.2 Estado Límite Último 78
4.2.3 Estado Límite de Servicio 79
4.3 Fase Mixta 79
4.3.1 Estado Límite Último 79
4.3.2 Esfuerzo Rasante 81
4.3.3 Estado Límite de Servicio 84
5 PROBLEMA 2 88
5.1 Acciones (Carga de la Viga) 89
5.1.1 Fase de Construcción 89
5.1.2 Fase Mixta 90
5.1.3 Factores Parciales de Seguridad 90
5.2 Fase de Construcción 91
5.2.1 Tamaño de la Viga 91
5.2.2 Estado Límite Último 91
5.2.3 Estado Límite de Servicio 93
5.3 Fase Mixta 93
5.3.1 Estado Límite Último 93

5.3.2 Esfuerzo Rasante 95
5.3.3 Estado Límite de Servicio 98
RESUMEN FINAL 100

Lección 12.4.1: Vigas continuas I 103

1 INTRODUCCIÓN 106
2 ANÁLISIS GLOBAL RÍGIDO-PLÁSTICO 108
3 COMPORTAMIENTO DE VIGAS MIXTAS CONTINUAS 109
4 CAPACIDAD DE ROTACIÓN PARA EL ANÁLISIS PLÁSTICO 111
5 ANÁLISIS RÍGIDO-PLÁSTICO EN EL EUROCÓDIGO 4 113
6 CLASIFICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES 114
7 MOMENTO RESISTENTE PLÁSTICO 115
8 DISTRIBUCIÓN DEL MOMENTO FLECTOR 118
9 RESUMEN FINAL 119
10 BIBLIOGRAFÍA 119
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 119

Lección 12.4.2: Vigas continuas II 121

1 INTRODUCCIÓN 124
2 PRINCIPIOS GENERALES 125
2.1 Anchura eficaz del ala de hormigón 125
2.2 Relación modular 125
2.3 Disposiciones de las cargas y casos de carga 125
3 DISTRIBUCIÓN DEL MOMENTO FLECTOR 126
3.1 Análisis de sección fisurada 126
3.2 Método de sección no fisurado 127
3.3 Redistribución de momentos en apoyos para el análisis elástico 127
4 CLASIFICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES DE VIGAS 129
5 MOMENTO RESISTENTE ELÁSTICO 130
6 PANDEO LATERAL POR TORSIÓN 132
6.1 Restricción lateral 134

7 RESUMEN FINAL 135
8 BIBLIOGRAFÍA 135
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 135

Problema Resuelto 12.3: Diseño de una viga mixta continua 137

1 DIMENSIONES Y ESPECIFICACIÓN DE LA VIGA 140
1.1 Planta 140
1.2 Detalles 140
1.3 Especificaciones 140
2 ACCIONES 142
2.1 Fase de construcción 142
2.2 Fase mixta 142
2.3 Factores parciales de seguridad 143
3 FASE DE CONSTRUCCIÓN 144
3.1 Tamaño de la viga 144
3.2 Estados límite último 145
3.3 Estado límite de servicio 148
4 FASE MIXTA 149
4.1 Estado límite último 149
4.2 Unión por rasante 157
4.3 Pandeo lateral por torsión 162
4.4 Estado límite de servicio 171
RESUMEN FINAL 175

Lección 12.5.1: Diseño para estados límite de servicio - I 177

1 INTRODUCCIÓN 180
1.1 Generalidades 180
1.2 Estados límite de servicio 180
1.2.1 Métodos esplícitos 180
1.2.1.1 Criterios 180
1.2.1.2 Cálculo de E_d 181

1.2.1.3 Límites para C_d 181
1.2.1.4 Procedimiento de cálculo 181
1.2.2 Métodos "considerados satisfactorios" 181
2 ANÁLISIS ELÁSTICO 182
2.1 Generalidades 182
2.2 Módulos de elasticidad 182
2.2.1 Módulo de Young para el acero 182
2.2.2 Módulo de Elasticidad del hormigón - a corto plazo 183
2.2.3 Módulo de elasticidad del hormigón - a largo plazo 184
2.2.4 Relación modular (coeficiente de equivalencia) 184
2.3 Propiedades geométricas de la sección 185
2.3.1 Introducción 185
2.3.2 Anchura eficaz 186
2.3.3 Momento de inercia 186
2.3.4 Tensiones de servicio 187
2.4 Rigideces de la sección 188
2.5 Vigas mixtas sobre dos apoyos y continuas 188
3 ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO: FISURACIÓN 189
3.1 Métodos esplícitos 189
3.2 Enfoque de "control satisfactorio" 189
4 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO: FLECHA 192
4.1 Métodos esplícitos 192
4.1.1 Criterios 192
4.1.2 Cálculo de la Flecha (E_d) 193
4.1.3 Límite de la flecha (C_d) 193
4.1.4 Procedimiento de cálculo 193
5 RESUMEN FINAL 197
6 BIBLIOGRAFÍA 197
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 197

Lección 12.5.2: Diseño para estados límite de servicio - II 199

1 INTRODUCCIÓN 202
2 FLUENCIA Y RETRACCIÓN 203

2.1 Generalidades 203
2.2 Fluencia 204
2.2.1 Fluencia: factores que intervienen 204
2.2.2 Funciones de fluencia Φ y coeficiente de fluencia ϕ 204
2.2.2.1 Definiciones 204
2.2.2.2 Fluencia: fórmulas alternativas 205
2.2.2.3 Fluencia: formulación de Eurocódigo 2 206
2.3 Retracción 207
2.4 Métodos de análisis para la fluencia y la retracción 208
3 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO: FISURACIÓN 211
3.1 Enfoque de control satisfactorio 214
3.1.1 Generalidades 214
3.1.2 Áreas de armadura mínima 214
3.2 Cálculo explícito de anchura de fisuras 215
3.2.1 Fisuración: cálculo en estado límite 215
3.2.2 Anchuras máximas de cálculo para fisuras: límites 215
3.2.3 Cálculo de anchura de fisuras 215
4 RESUMEN FINAL 218
5 BIBLIOGRAFÍA 218
6 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 218

Lección 12.6.1: Uniones por esfuerzo rasante I 219

1 INTRODUCCIÓN 222
1.1 Fuerzas apliacadas a conectores 222
1.2 Formas básicas de conexión 223
2 VALORES DE CÁLCULO PARA CONECTORES 228
3 APLICACIÓN DE LOS VALORES DE CÁLCULO 229
4 ESPACIADO DE LOS CONECTORES 232
5 CONECTORES EN LOSAS FORMADAS UTILIZANDO CHAPAS PERFILADAS DE ACERO 234
6 FORMAS ALTERNATIVAS DE UNIÓN 235
7 RESUMEN FINAL 236

8 BIBLIOGRAFÍA 236
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 236

Lección 12.6.2: Uniones por esfuerzo rasante II 237

1 INTRODUCCIÓN 240
2 CLASIFICACIÓN DE CONECTORES 241
3 CÁLCULO CON CONECTORES NO DÚCTILES 243
4 CÁLCULO DE VIGAS SOBRE DOS APOYOS CON CONECTORES DÚCTILES 244
4.1 Definición de unión rígida y semirígida por esfuerzo rasante 244
4.2 Método de cálculo para uniones semirrígidas por esfuerzo rasante 245
4.3 Comprobación del estado límite de servicio 249
5 RESUMEN FINAL 251
6 BIBLIOGRAFÍA 251
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 251

Lección 12.6.3: Uniones por esfuerzo rasante III 253

1 INTRODUCCIÓN 256
2 CÁLCULO DE UNIONES POR ESFUERZO RASANTE EN VIGAS MIXTAS CONTINUAS 257
2.1 Aspectos generales 257
2.2 Vigas continuas con secciones transversales críticas de la clase 1 257
2.2.1 Caso sencillo - carga puntual única 257
2.2.2 Casos generales 260
3 CASO DE VIGAS CONTINUAS CON SECCIONES TRANSVERSALES CRÍTICAS DE LA CLASE 2 EN SUS SOPORTES INTERMEDIOS 263
4 RESUMEN FINAL 264
5 BIBLIOGRAFÍA 264

Lección 12.7: Losas mixtas 265

1 INTRODUCCIÓN 268
1.1 Definición 268
1.2 Tipos de chapas perfiladas 268
1.3 Conexión acero-hormigón 269
2 PRINCIPIOS DE CÁLCULO 270
2.1 Situaciones de cálculo 270
2.2 Acciones 270
2.3 Propiedades de los materiales 270
2.4 Limitaciones de flecha 272
2.5 Condiciones de verificación 272
3 COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS 274
3.1 Comportamiento de las chapas perfiladas 274
3.2 Comportamiento de las losas mixtas 274
3.3 Análisis de losas mixtas 276
4 RASISTENCIA DE LAS SECCIONES 278
4.1 Resistencia a la flexión positiva 278
4.2 Resistencia a la flexión negativa 279
4.3 Resistencia a cortante vertical y a punzonamiento 280
4.4 Resistencia a esfuerzo rasante 281
4.5 Propiedades elásticas de las secciones transversales 283
5 COMPROBACIONES 284
5.1 Comprobación de los estados límite últimos 284
5.2 Comprobación del estado límite de servicio 285
6 RESUMEN FINAL 286
7 BIBLIOGRAFÍA 286
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 286

Problema Resuelto 12.4: Diseño de una losa mixta 287

1 DATOS 290
2 VERIFICACIÓN DE LA CHAPA PERFILADA 293

2.1 Estados límite últimos 293
2.2 Estados límite de servicio 294
3 COMPROBACIÓN DE LA LOSA MIXTA 296
3.1 Estado límite último 296
3.1.1 Carga de cálculo 296
3.1.2 Flexión 296
3.1.3 Esfuerzo rasante (método m y k) 297
3.1.4 Método de unión semirrígida (parcial) 297
3.1.5 Cortante vertical 298
3.1.6 Conclusión con respecto al estado límite último 299
3.2 Estados límite de servicio 299
3.2.1 Cálculos de flecha 299
3.2.2 Comprobaciones 300
3.2.3 Fisuración del hormigón 300

Lección 12.8.1: Pilares I 301

1 INTRODUCCIÓN 304
2 TIPOS DE SECCIONES TRANSVERSALES PARA PILARES MIXTOS 305
3 CALIDAD Y SEGURIDAD DE LOS MATERIALES 307
4 COLAPSO POR ABOLLADURA 309
5 RESISTENCIA DE SECCIONES TRANSVERSALES A LAS CARGAS AXIALES 309
6 RIGIDEZ Y ESBELTEZ RELATIVAS 312
7 RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS 314
8 RESTRICCIONES A LA APLICACIÓN DEL MÉTODO SIMPLIFICADO SEGÚN EL EUROCÓDIGO 4 316
9 EL APOYO EN PILARES MIXTOS 317
10 RESUMEN FINAL 318
11 BIBLIOGRAFÍA 318

Lección 12.8.2: Pilares II 319

1 INTRODUCCIÓN 322
2 GENERALIDADES 323

3 ANÁLISIS DE LOS MOMENTOS FLECTORES 324
4 COMPRESIÓN Y FLEXIÓN UNIAXIAL 325
5 CURVA DE INTERACCIÓN PARA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN COMPUESTAS 326
6 COMPRESIÓN Y FLEXIÓN BIAXIAL 330
7 INFLUENCIA DE LOS ESFUERZOS CORTANTES 331
8 ZONAS DE INTRODUCCIÓN DE CARGA 333
9 RESUMEN FINAL 335
10 BIBLIOGRAFÍA 335
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 335

Problemas Resuelto 12.2: Pilares mixtos 337

1 DATOS DE PARTIDA 340
1.1 Generalidades 340
1.2 Sistema 340
1.3 Cargas 340
1.4 Sección transversal 341
1.5 Recubrimiento de hormigón y armadura 341
2 SECCIÓN TRANSVERSAL 342
2.1 Áreas 342
2.2 Contribución de la armadura 342
2.3 Momento de inercia a flexión alrededor del eje Y de la sección 342
2.4 Momento de inercia a flexión alrededor del eje Z de la sección 342
3 VALORES BÁSICOS 343
3.1 Propiedades de los materiales 343
3.2 Resistencia plástica de la sección contra cargas axiales 343
3.3 Parámetros d de la sección transversal 344
4 PANDEO ALREDEDOR DEL EJE MENOR DE LA SECCIÓN 345
4.1 Cargas de cálculo 345
4.2 Rigidez efectiva 345
4.3 Esbeltez asociada 345
4.4 Resistencia del elemento a cargas axiales 345

5 FLEXIÓN ALREDEDOR DEL EJE MAYOR DE LA SECCIÓN 346
5.1 Cargas de cálculo 346
5.2 Rigidez efectiva 346
5.3 Esbeltez asociada 346
5.4 Resistencia del elemento a cargas axiales 346
5.5 Curva de interación de la sección transversal 347
5.5.1 Generalidades 347
5.5.2 Determinación del punto D del trazado poligonal 347
5.5.3 Determinación de los puntos B y C del trazado poligonal 348
5.5.4 Trazado de la curva de interacción para la flexión alrededor del eje mayor 350
5.6 Momento interno 351
5.6.1 Distribución de momentos sin considerar efectos de segundo orden 351
5.6.2 Valor de cálculo del momento flector 351
5.7 Resistencia a la compresión y flexión uniaxial 352
6 VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CONEXIÓN Y DEL ESFUERZO RASANTE 353
6.1 Rasante longitudinal 353
6.2 Resistencia a rasante del perfil metálico 354
6.3 Resistencia al esfuerzo rasante de la parte de hormigón 356
6.3.1 Tensiones en el área de contacto 356
6.4 Introducción de la carga en el pilar 357
6.4.1 Descripción de la construcción 357
6.4.2 Cálculo de los conectores 358

Lección 12.9: Edificios 361

1 INTRODUCCIÓN 364
2 ACCIÓN CONJUNTA ENTRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN EDIFICIOS 366
3 COMPONENTES DE EDIFICIOS 367
3.1 Estructuras de forjado 367
3.1.1 Forjados 368

3.1.2 Disposición de las viguetas 369
3.1.3 Vigas mixtas 369
3.1.4 Canto de los elementos estructurales 377
3.1.5 Criterios de estimación 378
3.2 Sistemas de pórtico para resistir cargas horizontales 378
3.3 Uniones 381
4 MÉTODOS DE MONTAJE 387
5 DISEÑO SÍSMICO 389
6 SENSIBILIDAD DINÁMICA 390
7 RESISTENCIA AL INCENDIO 390
8 RESUMEN FINAL 392
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 392

Lección 12.10: Puentes mixtos 393

1 INTRODUCCIÓN 396
2 PUENTES MIXTOS – TIPOS PRINCIPALES 397
3 PRINCIPALES VENTAJAS DE LOS PUENTES MIXTOS 401
4 ACCIÓN ESTRUCTURAL 402
4.1 Zonas de momento flector positivo 402
4.2 Zonas de momento flector negativo 402
4.2.1 Factores principales a considerar 403
4.2.2 Aspectos conceptuales 404
5 CONEXIONES POR ESFUERZO RASANTE 408
6 FABRICACIÓN Y MONTAJE 409
7 RESUMEN FINAL 410
8 BIBLIOGRAFÍA 410

Diapositivas complementarias 411

ESDEP TOMO 12
CONSTRUCCIÓN MIXTA

Lección 12.1: Generalidades sobre Construcción Mixta

OBJETIVOS/CONTENIDO

Introducir elementos y construcción mixta de acero y hormigón; explicar la acción conjunta de los dos materiales y mostrar la forma en que se utilizan los elementos estructurales, especialmente en la construcción de edificios.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 9.2: Clasificación de las Secciones Transversales

LECCIONES AFINES

Todas las lecciones posteriores del Tomo 12.

RESUMEN

Se introducen los dos materiales complementarios, acero y hormigón armado y se muestra la forma en que se consigue una acción mixta en el caso de losas, vigas y pilares mixtos. El uso de la construcción mixta en edificios y puentes se subraya e ilustra mediante varios ejemplos típicos; también se comentan sus principales ventajas, comparándolas con estructuras de acero y hormigón utilizadas de forma independiente. Se llama la atención a otros problemas más generales de esta forma de construcción como: clasificación de resistencia al incendio, velocidad de ejecución, flexibilidad y adecuación final.

1. INTRODUCCIÓN

La combinación más importante y frecuente de materiales de construcción es la del acero y el hormigón, con aplicaciones en edificios comerciales y fábricas de varias plantas, así como en puentes. Estos materiales pueden utilizarse en sistemas estructurales mixtos como, por ejemplo, núcleos de hormigón envueltos en tubos de acero, así como en estructuras mixtas en las que elementos de acero y hormigón trabajan conjuntamente.

Estos materiales, aunque esencialmente diferentes, son totalmente compatibles y complementarios entre sí; tienen casi la misma dilatación térmica; tienen una combinación de resistencia ideal, ya que el hormigón es eficaz a compresión mientras que el acero lo es a tracción. Además el hormigón proporciona protección contra la corrosión y aislamiento térmico al acero a temperaturas elevadas y puede proteger las secciones delgadas de acero contra abolladuras y pandeo lateral por torsión.



Diapositiva 1



Diapositiva 2

En los edificios de varias plantas el acero de construcción se utiliza normalmente con hormigón; por ejemplo, vigas de acero con forjados de hormigón. Lo mismo se aplica a los puentes de carretera, en los que normalmente se prefiere utilizar tableros de hormigón. Dependiendo de las circunstancias, los componentes o partes de la estructura de un edificio deberán construirse totalmente de acero, de hormigón armado o tener una construcción mixta. Sin embargo, es un hecho que los ingenieros cada vez proyectan más sistemas mixtos para producir estructuras más eficaces que las que se conseguirían con proyectos que utilizaran sólo uno de dichos materiales. Las primeras dos diapositivas proporcionan una impresión de la forma y la medida en que

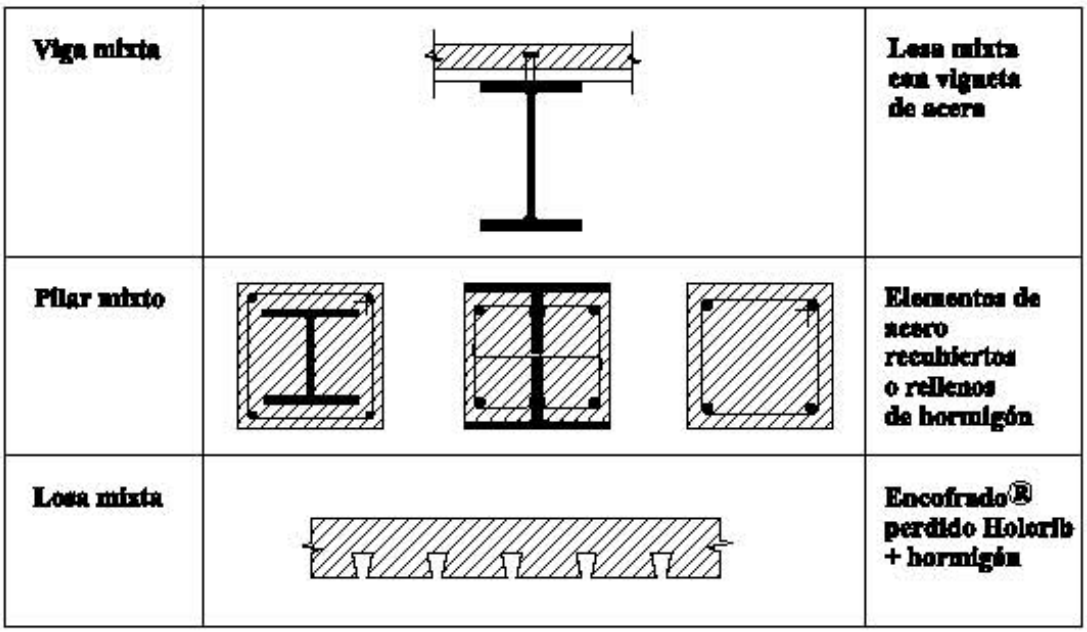


Figura 1 Elementos mixtos para edificios



Diapositiva 3

se utiliza la construcción mixta para edificios de varias plantas: La diapositiva 1 muestra la construcción de un edificio comercial en Londres. La diapositiva 2 muestra el edificio de una fábrica para la industria automovilística en Alemania.

Sería necesario añadir que la combinación de núcleos de hormigón, pórticos de acero y forjados mixtos se ha convertido en el método estándar de construcción para edificios comerciales de varias plantas en bastantes países. Se ha avanzado mucho en lugares como, por ejemplo, Japón, donde el pórtico de acero/hormigón armado es el sistema estándar en edificios altos. La razón principal de esta preferencia es que las secciones y elementos que se muestran en la diapositiva 3 son los más idóneos para resistir cargas repetidas causadas por seísmos, que requieren gran resistencia y ductilidad.

Los edificios con elementos de acero y mixtos experimentaron un renacimiento durante los años 80, lo que condujo a una profusión de nuevos conceptos constructivos y detalles estructurales.

Los elementos mixtos individuales como, por ejemplo, las vigas aisladas, pilares y forjados (figura 1), aunque de un alto nivel de

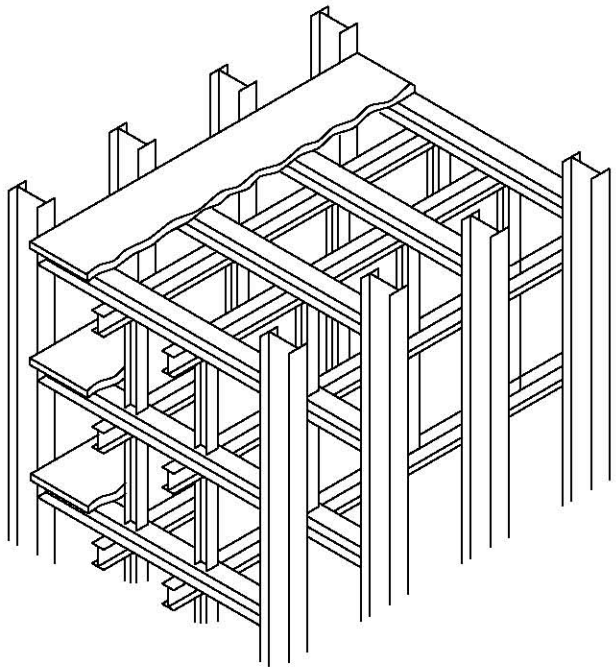


Figura 2a Construcción mixta en edificios

calidad y resistencia, también suelen ser caros, especialmente en edificios con espacios reducidos entre pilares, vigas con luces por debajo de los 9 m y cargas bajas. Por otra parte, la construcción de forjados mixtos es muy competitiva si las luces aumentan hasta 12, 15 o incluso 20 m. Sin lugar a duda, existe una demanda de luces mayores libres de pilares para edificios de oficinas con objeto de facilitar la planificación abierta o un mayor nivel de flexibilidad en la distribución, como se muestra en la figura 2.

Otro factor importante a considerar es que la utilización de secciones de acero laminado, chapas de acero perfilado y/o elementos mixtos prefabricados acelera la ejecución. Para obtener la máxima eficacia y economía, la fabricación de las uniones debe ser económica y fácil de montar en obra.

Muchos expertos opinan que el desarrollo futuro de los edificios de estructura metálica depende principalmente de la utilización de métodos de construcción mixta. Desgraciadamente estos dos importantes materiales de construcción, el acero y el hormigón, pertenecen a industrias diferentes. Dado que estos dos sectores compiten entre sí, a veces resulta difícil asegurar la óptima utilización de estos dos materiales.

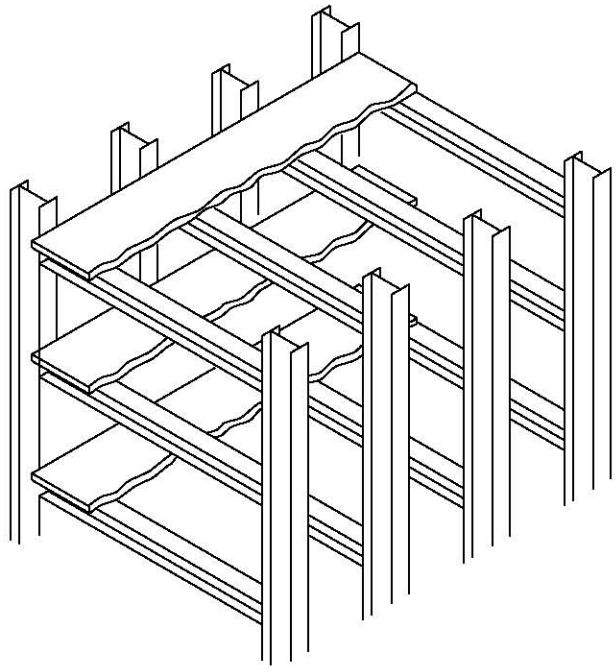


Figura 2b Construcción mixta en edificios

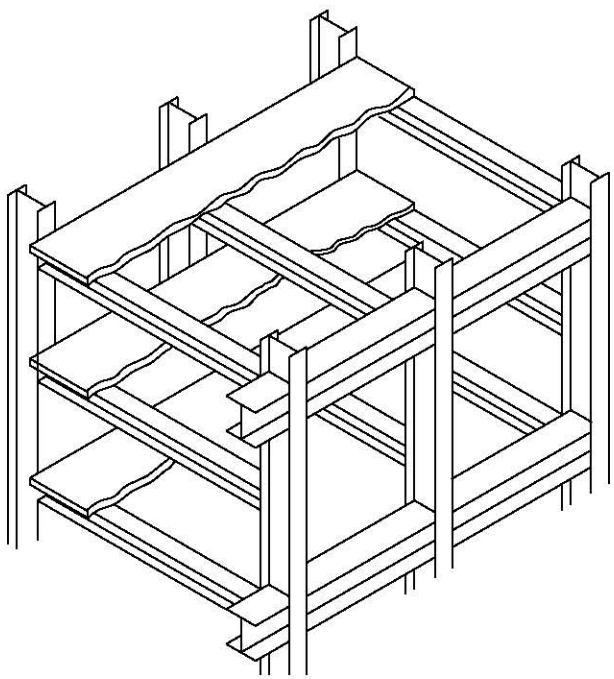


Figura 2c Construcción mixta en edificios

La figura 2 muestra tres ejemplos del uso de construcción de forjados mixtos utilizando vigas de acero y losas de hormigón en edificios: la figura 2a muestra un edificio típico de oficinas distribuidas a ambos lados de un pasillo central, cuyos muros están definidos por las posiciones de las pilares internas; la figura 2b muestra una estructura de grandes luces y libre de pilares que permite un elevado nivel de flexibilidad; la estructura que se muestra en la figura 2c tiene un número reducido de pilares, con vigas principales y secundarias.

2. ACCIÓN CONJUNTA EN VIGAS

Las vigas mixtas, sometidas principalmente a flexión, constan de un perfil de acero que actúa de forma mixta con un ala (o dos) de hormigón armado. Los dos materiales están interconectados por medio de conectores mecánicos. La práctica europea actual consiste en efectuar esta conexión por medio de conectores de espiga, soldados semi automáticamente al ala de acero, véase la diapositiva 4.

La figura 3 muestra varias secciones transversales de viga mixta en la que el hormigón fresco se ha vertido in situ sobre un encofrado de madera. Para las vigas de un solo vano, los momentos flectores, ocasionados por la aplicación de cargas verticales, causan esfuerzos de tracción en la sección de acero y de compresión en la cubierta por el hormigón, dando lugar a la utilización óptima de cada material. Por lo tanto, las vigas mixtas, incluso con pequeñas secciones de acero, tienen altos niveles de resistencia y pueden soportar cargas pesadas en luces grandes.

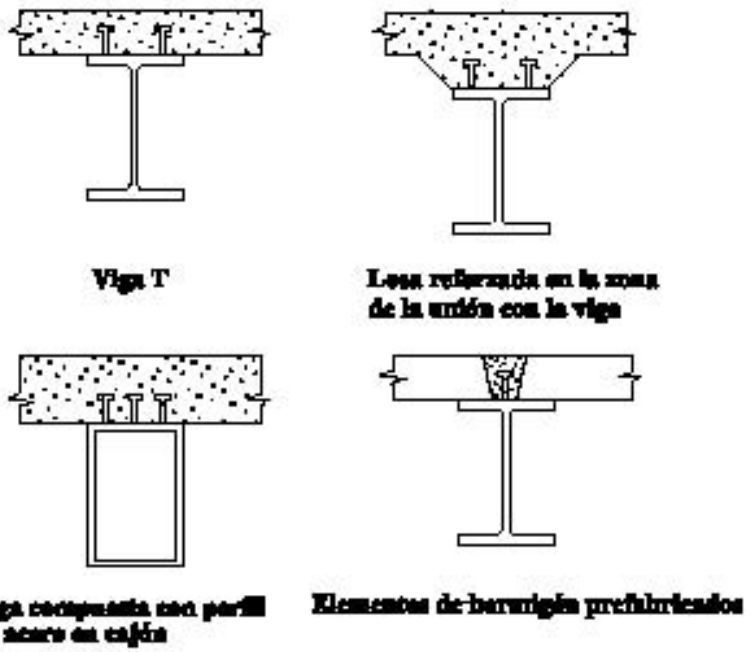


Figura 3 Secciones transversales usuales de vigas

Cada uno de los componentes actuará de forma independiente si existe un deslizamiento en la unión entre la sección de acero y la losa de hormigón, tal como se muestra en la figura 4. Si se elimina, o al menos se reduce, este deslizamiento, la losa y la viga actuarán en conjunto como una pieza mixta. El aumento de la resistencia resultante dependerá de la medida en que se impida el deslizamiento. Debe tenerse en cuenta que la figura 4 hace referencia a la utilización de conectores de espiga. El nivel de conexión depende principalmente del tipo de conexión por esfuerzo rasante que se haya utilizado.



Diapositiva 4

Las siguientes definiciones se utilizan para clarificar las diferencias entre las características de resistencia y rigidez:

- En lo que atañe a la resistencia, se distingue entre la conexión por esfuerzo rasante completa y parcial. La conexión se considera completa cuando la resistencia de la viga mixta se decide en base a su resistencia a la flexión en lugar de a su resistencia horizontal al esfuerzo rasante.

- La conexión completa o incompleta entre el forjado de hormigón y el perfil de acero da lugar a una viga mixta más o menos rígida. Dicha conexión incompleta surge cuando se utilizan conectores flexibles como, por ejem-

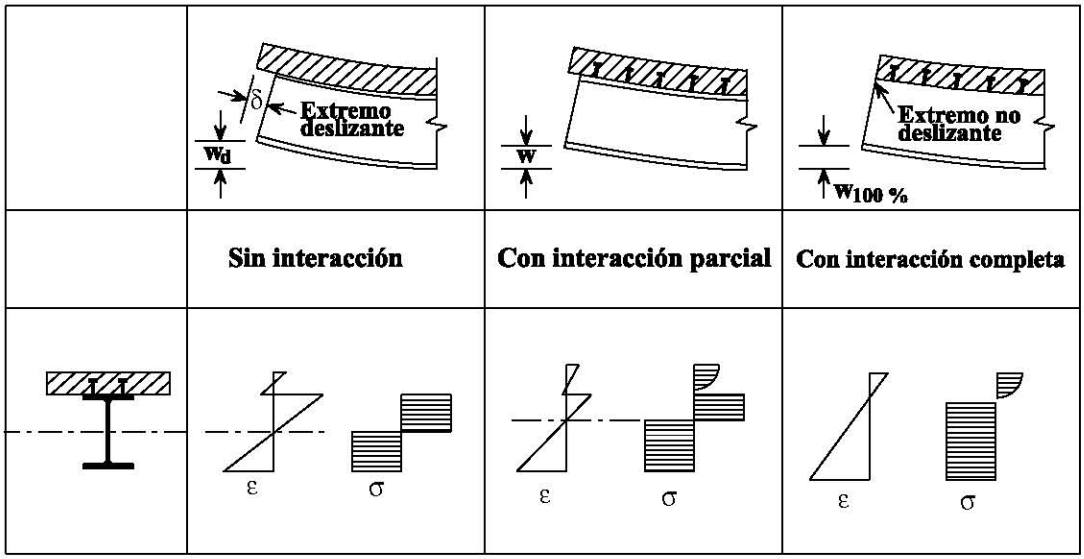
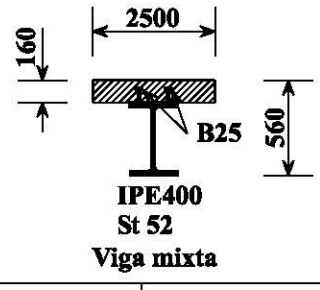
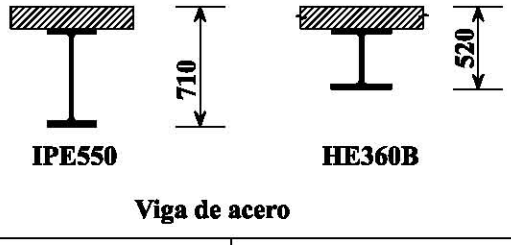


Figura 4 Elemento mixto: interacción entre la viga de acero y la losa de hormigón

plo, conectores de espiga y se experimenta deslizamiento (desplazamiento relativo) en el plano de unión acero-hormigón.

- La acción conjunta conlleva ciertas ventajas. Así, una viga mixta tiene una mayor rigidez y normalmente una mayor resistencia a la carga que su equivalente no mixto, véase la figura 5. En consecuencia, generalmente se requiere una sección de acero más pequeña, lo que conlleva un ahorro de material y de espesores en construcción y, por tanto, una reducción en la altura de las plantas en edificios y estribos más bajos en puentes.





Resistencias a la carga	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Peso del acero	**100 %**	**160 %**	**215 %**
Altura total	**100 %**	**130 %**	**95 %**
Rigidez	**t_o- 100 % t_{oo} - 70 %**	**70 %**	**45 %**

Figura 5 Comparación entre vigas de acero y vigas mixtas (ejemplo)

3. ELEMENTOS MIXTOS

3.1 Vigas Mixtas

La figura 3 muestra el uso de las distintas formas y tipos de vigas de acero (secciones laminadas o soldadas) junto con hormigón elaborado in situ.

Se pueden utilizar losas o placas prefabricadas de hormigón en lugar de forjados de hormigón vertidos in situ (véase la figura 6). Debe procurarse una óptima precisión en el detalle así como unos cuidadosos procedimientos de construcción y acabado para asegurar un relleno adecuado de los conectores. La figura 6a muestra un sistema que utiliza grandes elementos de placas prefabricadas con juntas longitudinales. Los espacios entre las unidades se rellenarán con mortero en la estructura final, facilitando así una acción conjunta con las vigas. Estos sistemas estructurales se introdujeron a principios de los años 60. En Alemania se han construido de esta forma más de 100 aparcamientos, universidades, colegios y oficinas (véase la diapositiva 5).

La utilización de forjados prefabricados reduce las operaciones de construcción in situ y evita los trabajos húmedos. Los elementos se fabrican en taller, mediante encofrado de acero, para asegurar un alto nivel de calidad y pequeñas (estrictas) tolerancias.

La figura 6b muestra elementos de hormigón de pequeño espesor prefabricados, soportados por el ala de la viga de acero. Estos elementos actúan como un encofrado permanente cuando el hormigón se vierte in situ. Sin embargo, las distancias transversales entre los conectores y el borde del elemento de hormigón prefabricado pueden ser pequeñas, lo que hace difícil asegurar un adecuado recubrimiento de los conectores. La razón principal de la utilización de estas placas delgadas (normalmente con un grosor de 4-5 cm) es que son fáciles de manipular, casi tanto como las chapas de metal.

La figura 6b muestra también una viga mixta parcialmente recubierta, cuyos huecos están rellenos de hormigón. Este tipo de sección mixta se utiliza a menudo en la actualidad en algunas partes de Europa para mejorar su nivel de resistencia al incendio sin necesidad de adoptar medidas adicionales de

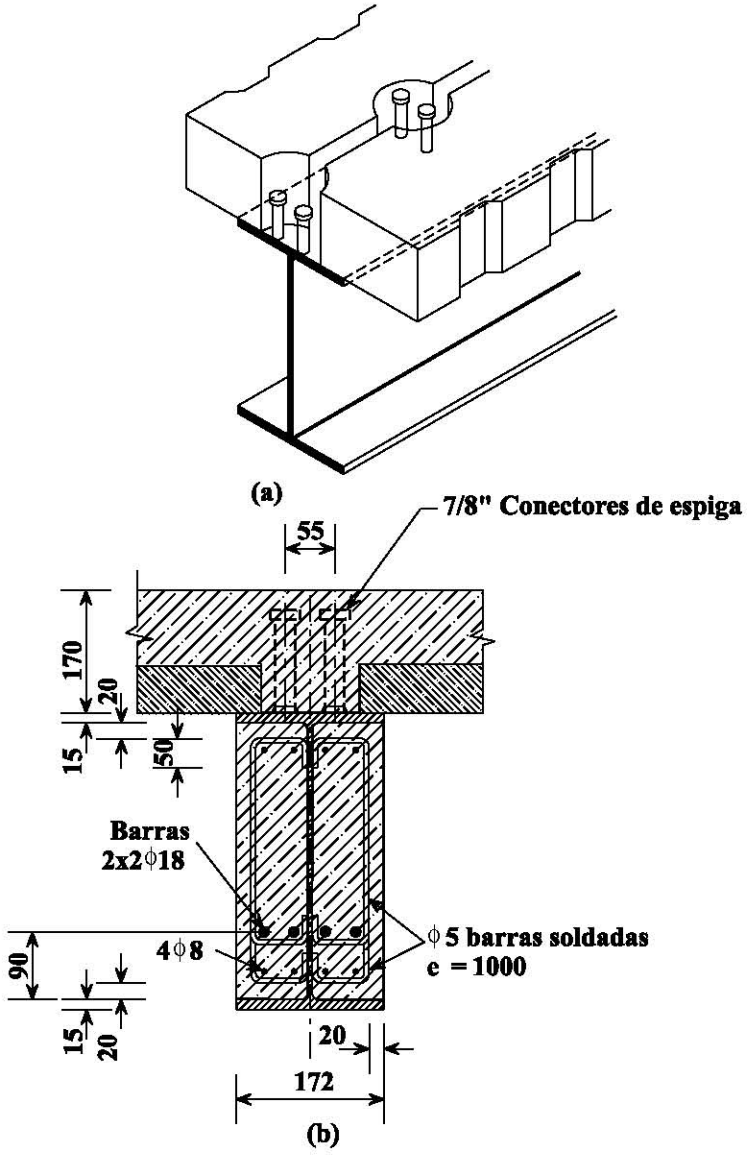


Figura 6 Utilización de elementos de hormigón prefabricados



Diapositiva 5

protección. El ala inferior de acero se queda sin protección.



Diapositiva 6

Sin embargo, la práctica normal en el caso de edificios comerciales e industriales (véase la diapositiva 6) consiste en construir los forjados utilizando placas metálicas que incorporan embuticiones o resaltes para facilitar una acción conjunta. Es una forma muy económica de acelerar la construcción y constituye una parte importante de los sistemas estructurales modernos. La placa soporta las cargas desarrolladas antes y durante el hormigonado y posteriormente actúa de forma conjunta con el hormigón vertido in situ. Normalmente se utilizan chapas de acero con perfiles trapezoidales y resaltes (véanse las figuras 7 y 15).

Las vigas mixtas no requieren cimbras o encofrados de madera. Esta ventaja se estudia en el apartado siguiente junto con dos métodos distintos de construcción, "apuntalado" y "sin apuntalar".

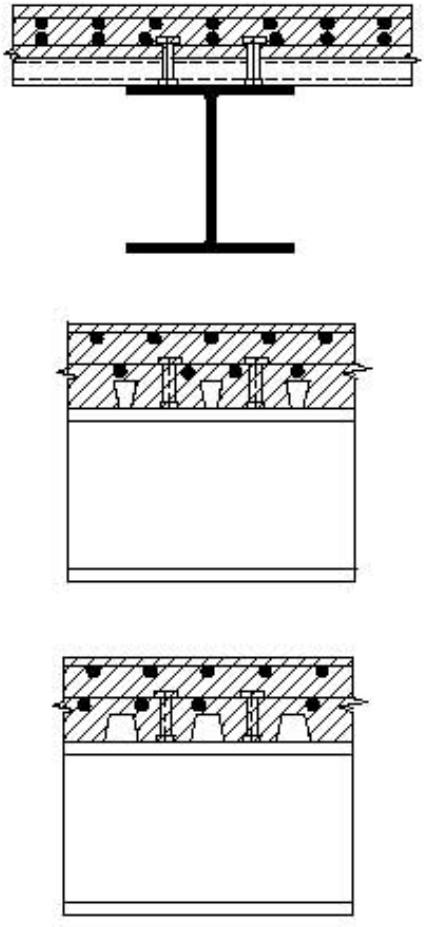


Figura 7 Se usan chapas de acero de diversos perfiles

3.1.1 Construcción Apuntalada

El rendimiento estructural será mayor si se puede asegurar que la losa de hormigón y el elemento de acero van a actuar de forma conjunta en todo momento. A este efecto, la sección mixta debería resistir todas las cargas, incluyendo el peso muerto de la propia estructura. Puede satisfacerse este requisito soportando la viga de acero hasta que se haya endurecido el hormigón. Este tipo de soporte recibe el nombre de "apuntalamiento". El número de soportes temporales no necesita ser alto; por lo general un apuntalamiento en los puntos medios y cuartos del vano es suficiente. Los apuntalamientos se dejan en su sitio hasta que la losa de hormigón haya desarrollado un nivel de resistencia adecuado.

Distintos métodos constructivos producen estados de tensión, distribuciones de esfuerzos y deformaciones por flexión bajo condiciones de servicio, diferentes. Sin embargo, las vigas mixtas cargadas hasta el límite de su resistencia colapsan al alcanzar un determinado momento flector (asumiendo que se impide la inestabilidad local), independientemente de que se haya utilizado un método constructivo con o sin apuntalamiento. Su resistencia a la flexión se puede calcular fácilmente por medio del diagrama rectangular de tensión, lo que se describe a continuación.

3.1.2 Resistencia de la Sección

Una forma típica de construcción mixta consiste en una losa conectada a elementos de acero paralelos. El sistema estructural es, por lo tanto, una serie de vigas en forma de "T", interconectadas, con alas anchas y de poco canto de hormigón, como se muestra en la figura 2. En este sistema, el espesor del ala puede no ser del todo efectivo para resistir la compresión, debido al efecto conocido como "desfase de cortante". Este fenómeno, que se tiene en cuenta utilizando la "anchura efectiva", se explica más adelante.

Normalmente, no es necesario tener en cuenta las abolladuras en la sección de acero en vigas mixtas sobre dos soportes, ya que el ala a compresión va conectada a la losa de hormigón por medio de conectores y la zona del alma que sufre compresión es normalmente pequeña. Sin embargo, en el caso de conexión parcial, la zona comprimida del alma es mayor. En este caso, existe, al menos teóricamente, la posibilidad de que pueda producirse abolladura en el alma de una viga compuesta o en un ala con un saliente ancho fuera del alcance de los conectores.

Las dimensiones de la mayor parte de las secciones de las vigas de acero en edificios permiten la aplicación del análisis plástico a la sección transversal de vigas mixtas. El cálculo del momento límite de resistencia es, por lo tanto, una aplicación del diagrama rectangular de tensiones asumiendo que los perfiles de acero pertenecen a la clase 1 o 2.

3.1.3 Vigas y Losas Continuas

Muchas vigas mixtas en edificios son - desde el punto de vista del cálculo estático- vigas continuas sobre soportes simples. Las losas de hormigón también suelen ser continuas, ya que no tienen uniones. Las vigas continuas tienen, en comparación con las vigas de un solo vano, las ventajas siguientes:

- una mayor resistencia a la carga debido a la redistribución de los momentos flectores
- una mayor rigidez
- una sección menor de acero para resistir la misma carga

Por otra parte, la continuidad puede complicar el cálculo, especialmente en lo que atañe al pandeo lateral por torsión y la abolladura en zonas de momentos negativos. La abolladura del acero puede reducir la resistencia a la flexión por debajo del momento plástico a menos que se satisfagan ciertas limitaciones a las proporciones de anchura/altura de los elementos que conforman la sección. En base a estas proporciones, las secciones de acero se agrupan en las clases

1 a 4: Las secciones de la clase 1 permiten un análisis plástico global, utilizando redistribución de momentos, lo que les proporciona un proyecto muy económico; las secciones de la clase 2 permiten un cálculo plástico del momento de resistencia pero no su redistribución. Las secciones laminadas en caliente corresponden a las clases 1 o 2 en casi todos los casos, por lo que el pandeo local no constituye un problema para su uso.

Cuando no haya uniones deberán suministrarse armaduras contra la fisuración adecuadamente proporcionadas en la losa de hormigón sobre los apoyos interiores. La armadura del hormigón aumentará de forma sustancial la resistencia a la flexión en estas zonas de momento negativo si posee un nivel suficiente de ductilidad.

3.2 Conexiones por Esfuerzo rasante

Se utilizan conectores para desarrollar la acción conjunta entre las vigas de acero y el hormigón. Esta conexión se proporciona principalmente para resistir el esfuerzo rasante longitudinal y recibe el nombre de "desfase de cortante".

La figura 8 muestra varios tipos de conectores. Deben satisfacer un número de requisitos, tal como sigue:

- deben transferir el esfuerzo rasante directo a su base
- deben crear un enlace de tracción con el hormigón
- deben ser económicos de fabricar y reparar

En los países industrializados, el conector más común es el de espiga. Éste se puede soldar semiautomáticamente (véase la diapositiva 4) al ala superior, directamente en taller o a través de chapas finas de acero galvanizado in situ (véase la figura 8a).

Los conectores fijados por disparo, que se muestran en la figura 8b, se utilizan como alternativa para chapas metálicas cuando no hay suficiente energía eléctrica disponible in situ. Estos conectores tienen la ventaja de que se pueden utilizar pistolas modificadas de cartuchos en lugar del equipo especial que se requiere normalmente para la ejecución de complejos trabajos de soldadura a través de chapas.

En el caso de losas prefabricadas de hormigón, se han utilizado algunas veces pernos pretensados de alta resistencia para conectar dichos elementos a las vigas (véase la figura 8c). Este tipo de conexión ha sido utilizado, por ejem-

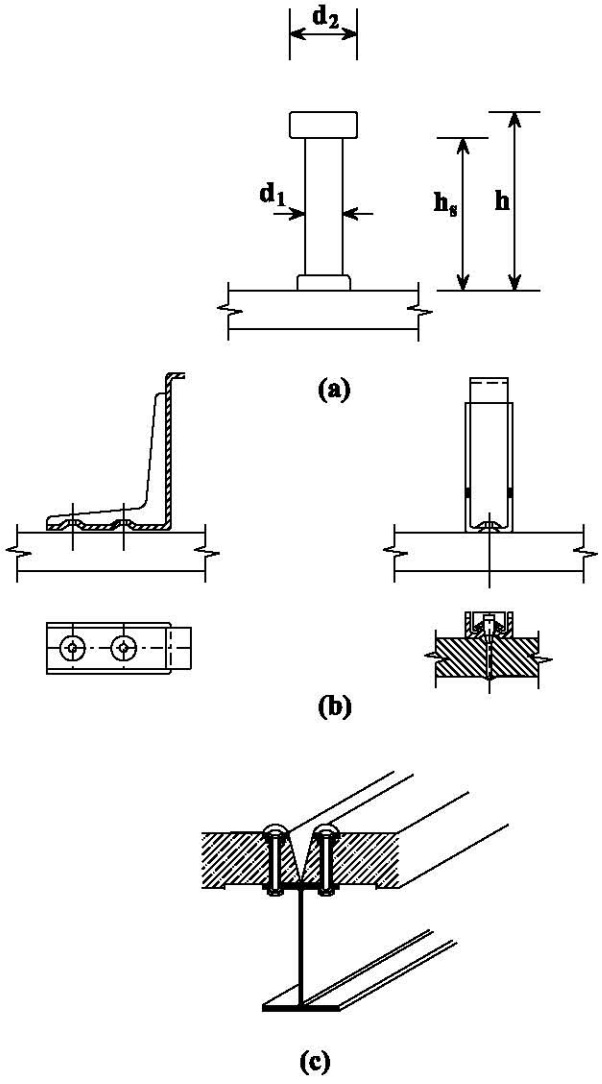


Figura 8 Conectores (ejemplos)

plo, en aparcamientos temporales, ya que puede desmontarse (aunque todos los aparcamientos de este tipo están siendo utilizados de forma permanente en la actualidad).

El comportamiento y resistencia de los conectores de espiga y de otros conectores se comprueba por medio de ensayos de "corte" y "adherencia". Estas pruebas producen curvas de carga-deslizamiento como las que se muestran en la figura 9 para conectores de espiga. Están caracterizados por una alta rigidez a bajos niveles de carga (bajo condiciones de servicio) y por grandes deformaciones a altos niveles de carga, hasta el punto de rotura. Este comportamiento dúctil posibilita la redistribución de los esfuerzos rasantes en el plano de unión entre acero y hormigón y permite una conexión semirrígida por esfuerzo rasante. Además, los conectores de espiga pueden espaciarse uniformemente a lo largo de la longitud de la viga entre secciones transversales críticas.

Las vigas mixtas se proyectan a menudo asumiendo que la viga de acero sin apuntalar soporta el peso del acero y del hormigón fresco más las cargas de montaje. Por razones de economía podría decidirse, por lo tanto, proporcionar sólo el número de conectores que sea necesario para desarrollar una acción conjunta suficiente para soportar las cargas que se apliquen posteriormente. Este enfoque conduce a un número menor del que se requeriría para alcanzar el nivel máximo de resistencia a la flexión de la viga mixta. La utilización de esta conexión semirrígida por esfuerzo rasante conlleva un nivel inferior de resistencia y rigidez.

Podría resultar imposible evitar la conexión semirrígida por esfuerzo rasante cuando se construye una losa con chapa metálica. El número de conectores fijados a la viga de acero podría quedar limitado por la restricción de sólo poder colocarlos en los nervios de la chapa de acero perfilado.

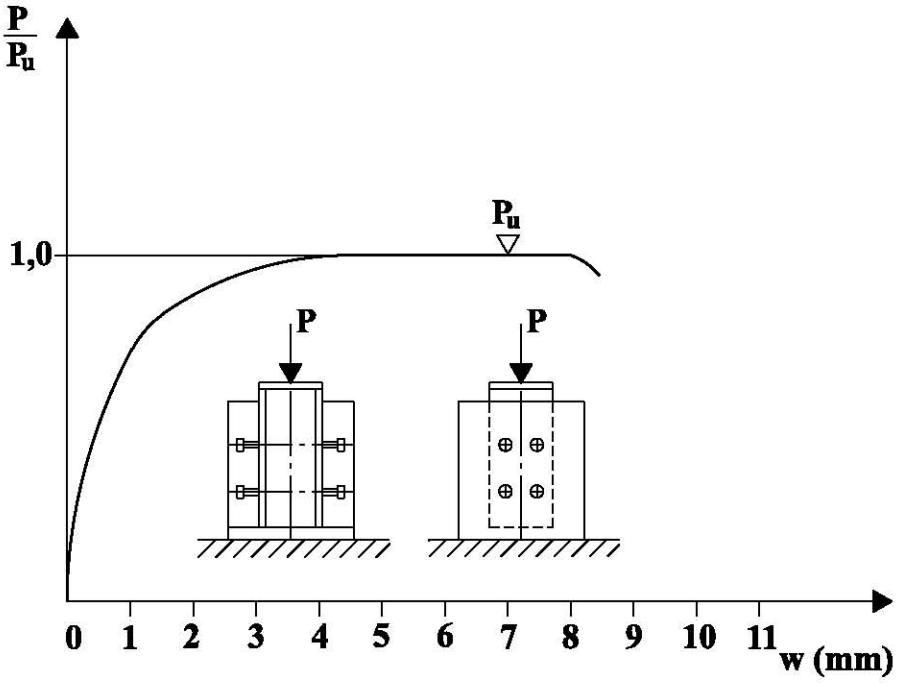


Figura 9 Conectores de espiga bajo ensayos de cortadura

3.3 Uniones Viga-Pilar

Pueden utilizarse técnicas altamente desarrolladas de conexión para unir elementos estructurales de acero entre sí. Las consideraciones baratas requieren, sin embargo, que las uniones sean económicas de fabricar y fáciles de realizar in situ. Muchos estudios indican que la economía y efectividad de las estructuras mixtas pueden mejorarse si se reconoce en su proyecto el grado de continuidad proporcionado por uniones nominalmente sencillas.

En las estructuras mixtas de acero y hormigón, sin embargo, puede proporcionarse un nivel significativo adicional de rigidez y resistencia colocando barras continuas de armadura en la losa cerca de los pilares, debido a que el principal factor que gobierna el comportamiento de las uniones es la acción de la losa.

Este efecto puede aumentarse mediante una secuencia especial de construcción y hormigonado, como sigue: durante el hormigonado la sección de acero actúa como una viga de un solo vano; la viga debería estar conectada al pilar de acero por medio de dos angulares en el alma o mordazas entre alas con o sin perfiles angulares en el alma; una vez se ha endurecido el hormigón (asumiendo que no tiene uniones como se muestra en la figura 10c) pasa a ser considerado como una viga continua que soporta las cargas adicionales aplicadas. Siguiendo esta secuencia de construcción, la redistribución requerida del momento flector no es muy amplia y puede reducirse la rotación plástica de forma significativa. Además, el proyectista puede tomar la decisión de utilizar o no suplementos de ajuste entre el ala de compresión de acero y el pilar, en función principalmente del momento plástico de la unión.

La figura 10 compara uniones simples, mixtas, rígidas y semirrígidas. La construcción sin elementos de ajuste, que se muestra en la figura 10c, es coherente con el creciente interés en pórticos de acero conectados de forma flexible (semirrígidos) con simples detalles constructivos que aceleran el montaje. Se propone que deberían conseguirse los siguientes criterios:

- antes del hormigonado, las uniones deberían comportarse de forma parecida a una rótula.
- las uniones deberían ser rígidas y tener un comportamiento elástico hasta un valor previamente determinado del momento.
- las uniones deben poder resistir el momento plástico con una adecuada rotación plástica.

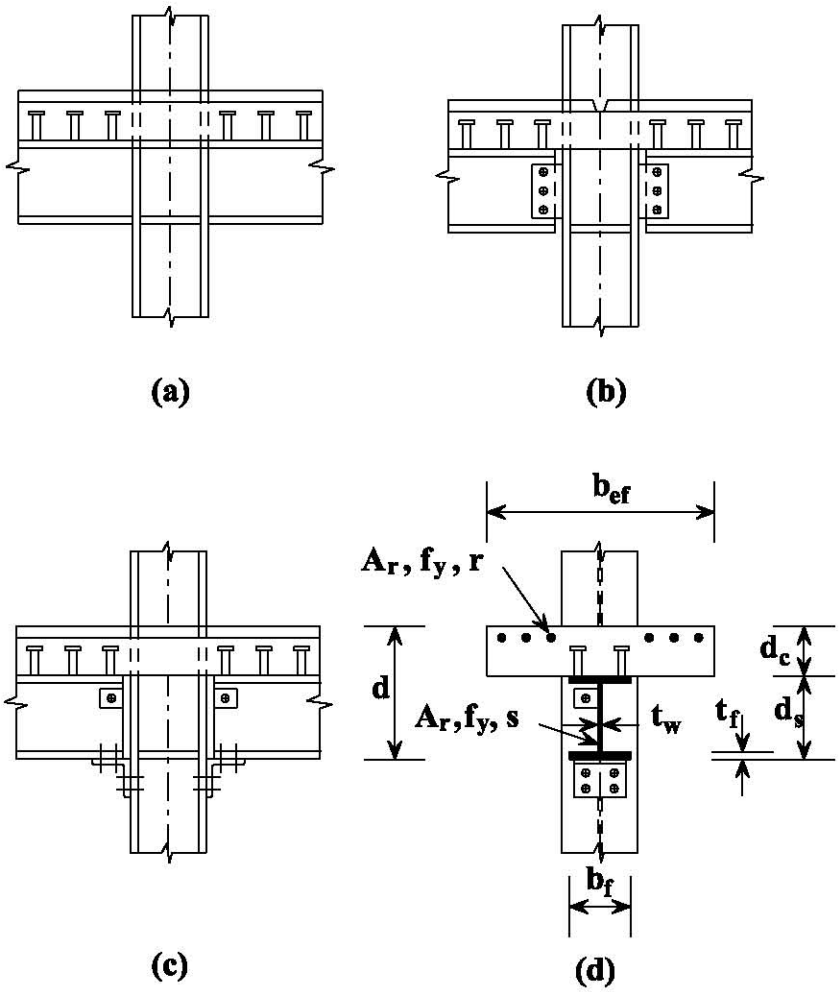


Figura 10 Uniones en la construcción mixta

Las uniones de viga a pilar en edificios altos requieren soluciones algo diferentes. Hasta hace poco estos sistemas estructurales empleaban sólo uniones simples por cortante entre los elementos estructurales de acero y los de hormigón armado. Sin embargo, también deberían considerarse estructuras mixtas construidas mediante un montaje inicial de un pórtico de pilares ligeros de acero y vigas de celosía de alto canto. Los pilares de acero se recubren posteriormente con hormigón armado.

3.4 Pilares Mixtos

Hay tres tipos principales de pilares mixtos en uso, véase la figura 11:

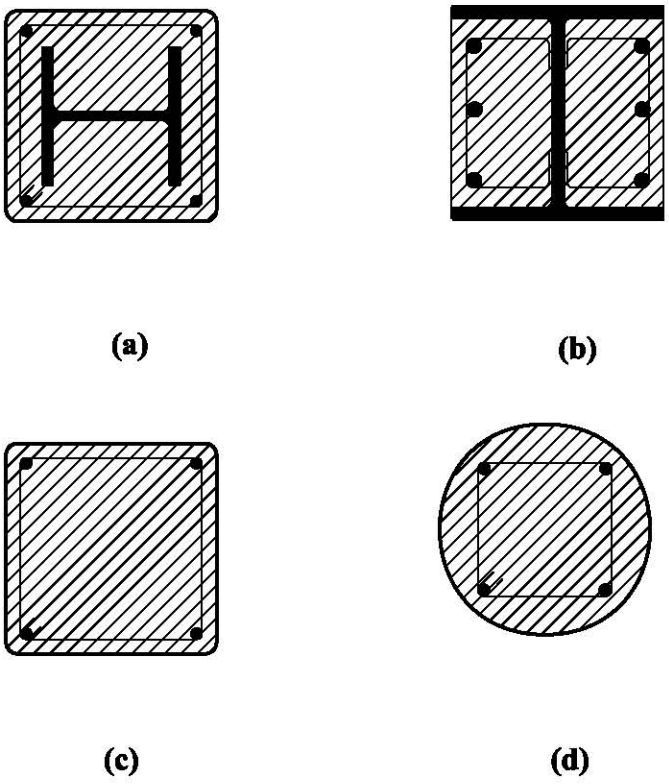


Figura 11 Secciones transversales usuales de pilares mixtos

- pilares de acero recubiertos de hormigón (a)
- tubos de acero rellenos de hormigón (c y d) y
- pilares de sección laminada recubiertos parcialmente con hormigón (b).

En el cálculo de la resistencia de estos pilares se asume una completa conexión sin deslizamiento alguno en el plano de unión entre el acero y el hormigón. En realidad deberían observarse todas las deficiencias de linealidad geométrica y física de los diferentes materiales. Sin embargo, solo es posible satisfacer estos requisitos utilizando métodos numéricos de análisis completos y software informático. La conexión completa asumida permite la definición de propiedades de sección y de relaciones de rigidez y esbeltez para toda la sección transversal no homogénea. Se necesita esta información para determinar la resistencia a las cargas, incluidos los efectos de esbeltez o P-Δ. El Eurocódigo 4 proporciona métodos simplificados de cálculo para su utilización práctica. En lugar de curvas más precisas de pandeo, el Eurocódigo 4[1] ha adoptado las curvas europeas de pandeo a, b y c originalmente establecidas para pilares de acero no revestido.

Debe garantizarse una conexión completa mediante la utilización de uniones mecánicas. Deben realizarse uniones al menos en los extremos de los pilares y donde actúen las cargas o los esfuerzos. Estas uniones han de distribuirse sobre toda la sección transversal. Los conectores pueden ser de espiga, pletinas superiores e inferiores, ménsulas adecuadas, cartelas verticales de unión, cabezales de conectador u otros medios estructurales.

Los pilares recubiertos de hormigón presentan la ventaja de que satisfacen los requisitos de resistencia al incendio sin protección adicional alguna. Además, pueden reforzarse con facilidad mediante la inserción de armadura en la capa de hormigón. No presentan, sin embargo, una superficie accesible de acero estructural para la fijación posterior de uniones ni para tratamiento atractivo de superficies. En el caso de pilares recubiertos prefabricados, las secciones de acero se fabrican en taller e incluyen todas las soldaduras, pletinas de conexión y otros elementos necesarios de sujeción. Estos pilares de acero (los más largos tienen una longitud de hasta 30 m) pueden transportarse después a otro taller donde se realiza el hormigonado. Los pilares ya terminados pueden transportarse a obra una vez ha fraguado el recubrimiento.

También se utilizan los tubos de acero rellenos de hormigón. Los tubos se rellenan generalmente de hormigón de alto nivel de resistencia, con un índice de resistencia (ensayo brasileño) de 45 a 55 N/mm^2. Estos índices de resistencia se encuentran, sin embargo, muy por debajo de los recientemente desarrollados en Norteamérica.

Si los esfuerzos de las vigas del forjado se transfieren por medio de pletinas verticales de conexión, dichas pletinas se colocan a lo largo del tubo y están soldadas en ambos lados. Esta soldadura garantiza que los dos componentes, el tubo de acero y el núcleo de hormigón, sean cargados directamente sin un nivel excesivo de deslizamiento en la unión entre el acero y el hormigón. El núcleo de hormigón debe reforzarse longitudinalmente de forma que satisfaga el necesario índice de resistencia al incendio. Sin embargo, en muchos casos resulta imposible aprovechar toda la resistencia del pilar.

3.5 Secciones de Acero Parcialmente Recubiertas

Las secciones de acero parcialmente recubiertas, para vigas y pilares constituyen un progreso interesante en los últimos 10 años. La característica más importante de dicha sección es su inherente alto nivel de resistencia al incendio. Esto se debe al hecho de que el hormigón impide que las piezas internas de acero - tanto el acero estructural como las barras de armadura - se calienten con una rapidez excesiva. La figura 12 muestra dos vigas mixtas parcialmente recubiertas (en el lateral derecho) comparadas con la protección convencional al incendio mediante tablas. La diapositiva 7 muestra una construcción típica de forjado mixto en la que se utilizan secciones parcialmente recubiertas; en ella no es necesario utilizar protección adicional contra el incendio para vigas y forjados.

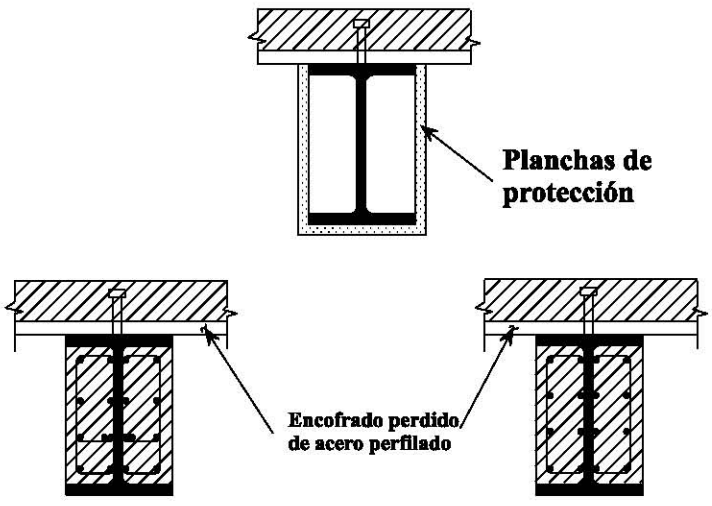


Figura 12 Vigas mixtas resistentes al incendio

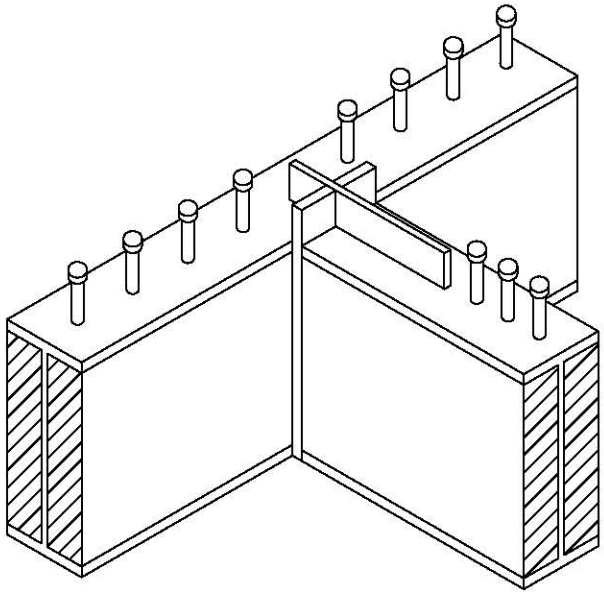
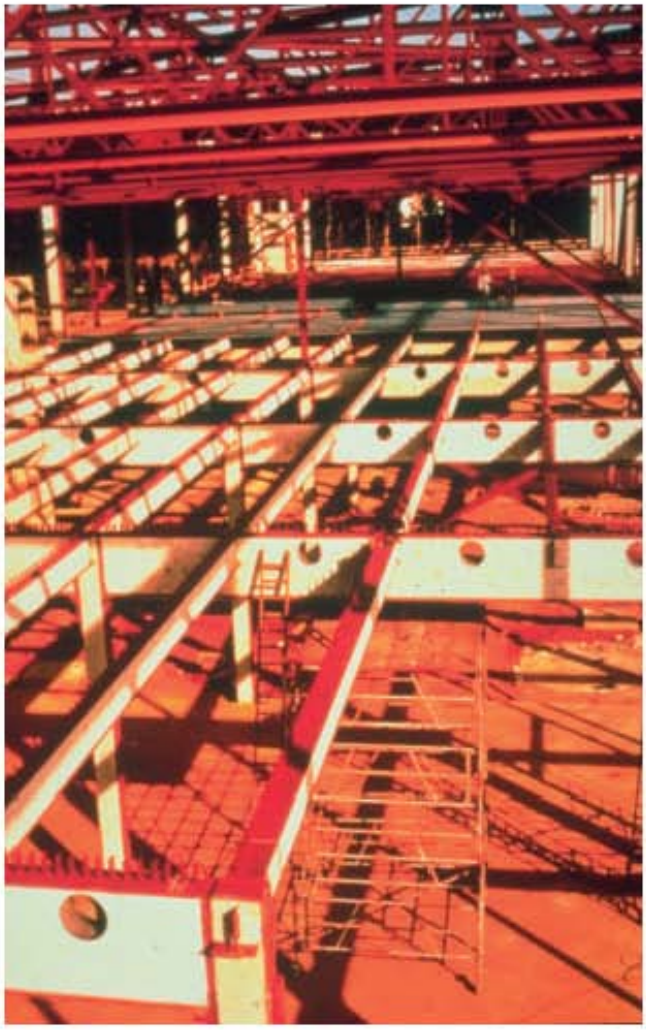


Figura 13 Vigas parcialmente recubiertas

Las piezas de hormigón se fabrican en un taller o in situ con anterioridad a su montaje. Este procedimiento permite una rápida construcción utilizando elementos mixtos prefabricados. Debería reforzarse el hormigón entre las alas utilizando estribos y barras longitudinales y debería asimismo sujetarse al alma utilizando conectores de espiga, barras soldadas o barras fijadas a través de huecos.

Además de la mayor resistencia al fuego, esto contribuye a impedir el alabeo y la abolladura del alma de acero y a aumentar de forma significativa la resistencia de la viga de acero al pandeo lateral por torsión. Estas vigas también poseen una mayor rigidez a cortante vertical y a flexión, lo que produce una reducción de su flecha final. Tienen un aspecto muy macizo, como puede comprobarse en la figura 13 y están caracterizadas por su ala inferior libre, a la que se pueden fijar conductos u otros servicios y elementos.



Diapositiva 7

3.6 Losas Mixtas

En la construcción de forjados, la utilización de losas sólidas de hormigón armado se está viendo sustituida cada vez más por chapas metálicas perfiladas (véase la figura 14). Las modernas chapas de acero perfilado con resaltes o embuticiones actúan como un encofrado permanente durante el hormigonado y como una armadura contra la tracción una vez se ha endurecido el hormigón. En esta fase final la losa mixta consiste en una chapa perfilada de acero y un elemento superior de hormigón que están interconectados de forma que puedan resistir los esfuerzos de cortante horizontales en la unión acero-hormigón. Debe impedirse, completa o parcialmente, el deslizamiento (desplazamiento relativo) en la unión, así como la separación vertical entre la chapas de acero y la capa superior de hormigón.

La acción conjunta requerida puede conseguirse de varias formas (véase la figura 15). Para permitir la posible utilización de la gran variedad de productos actuales y futuros en el mercado, el Eurocódigo 4 permite usar los métodos siguientes de consecución de esfuerzo rasante:

a. interconexión mecánica proporcionada por la forma del perfil (resaltes o embuticiones).

b. interconexión por rozamiento mediante la utilización de perfiles con forma reentrante.

c. anclaje proporcionado por espárragos soldados o conectores fijados por disparo.

d. anclajes mediante deformación de los nervios en el extremo de la chapa en combinación con (b).

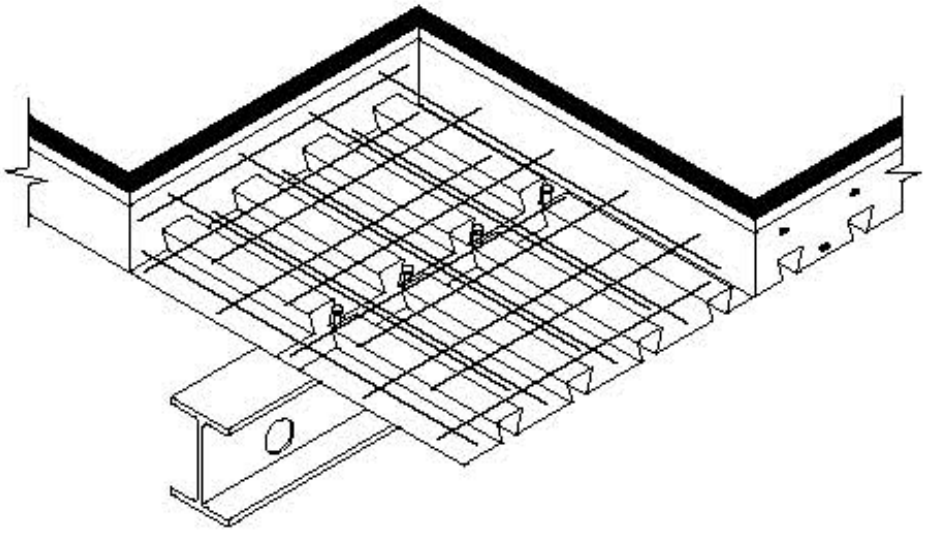


Figura 14 Utilización de chapas perfiladas en una estructura de forjado

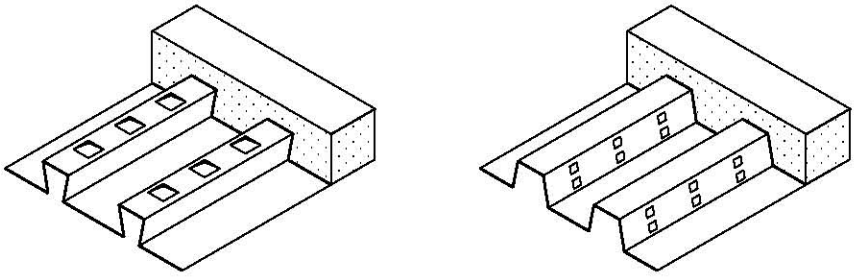
Es indudable que el uso de chapas de acero

perfilado acelera el proceso de construcción. También se utilizan a menudo con hormigón ligero para reducir la carga muerta de los forjados En el Reino Unido, por ejemplo, el uso de hormigón ligero constituye una práctica común en edificios comerciales.

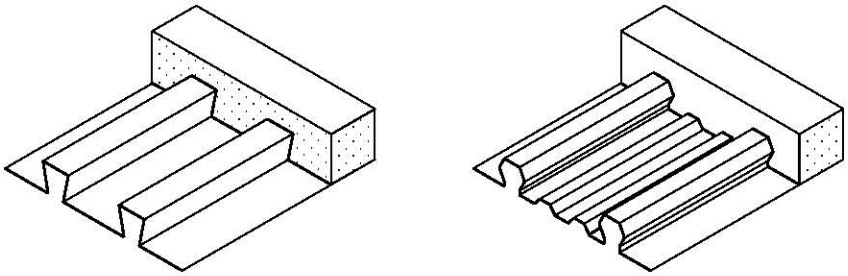
Las losas mixtas están soportadas por vigas de acero, que normalmente actúan de forma conjunta con ella. El espaciado de las vigas y, por lo tanto, la luz de la losa, depende del método de construcción, tal como sigue:

- si el espaciado de las vigas es de unos 2,50 m, no será necesario proveer apuntalamiento temporal alguno durante el proceso de hormigonado de la losa. En cuyo caso, la fase de construcción controla el proyecto de la chapa metálica. En la fase final, una vez se ha endurecido el hormigón, las tensiones en la losa mixta son muy bajas, dada su reducida luz. Para estos forjados se utilizan muy a menudo chapas trapezoidales de acero con un nivel limitado de ductilidad y resistencia al cortante horizontal. Tienen el menor peso de acero por metro cuadrado de superficie de forjado.

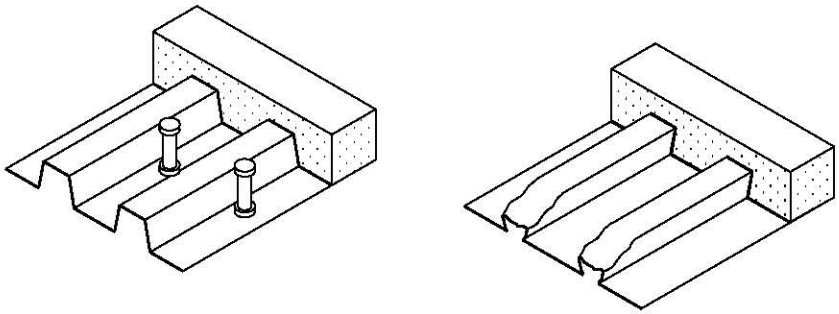
- Para otros tipos de forjado en los que el espaciado de las vigas es mucho mayor será necesario utilizar apuntalamiento para soportar la chapa metálica durante la operación de hormigonado. La losa mixta final sufre un alto nivel de tensión debido a la mayor luz. Este estado final puede condicionar el proyecto. En este caso las chapas de acero requerirán un buen nivel de adhesividad y resistencia a cortante. A menudo se utilizan perfiles con resaltes, lo que produce un mayor peso de acero por metro cuadrado de superficie construida.



(a) Interconexión mecánica



(b) Interconexión por fricción



(c) Anclaje en los extremos **(d) Anclaje en los extremos**

Figura 15 Formas usuales de interconexión en losas mixtas

4. CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS MIXTOS

La construcción de forjados mixtos es esencialmente una superposición de elementos estructurales unidireccionales. Las losas se disponen entre las vigas secundarias que, a su vez, se disponen transversalmente entre las vigas principales. Estas últimas a su vez se sitúan sobre los pilares (véase la figura 16, diapositivas 1 y 2.) Este conjunto de direcciones de carga conduce a parrillas rectangulares, con grandes luces en al menos una dirección (hasta 12, 15 e incluso 20 m). Hasta los 15 m se utilizan principalmente secciones laminadas, mientras que a partir de los 12 m las vigas compuestas, vigas de alma discontinua o cerchas mixtas tienden a ser más económicas.

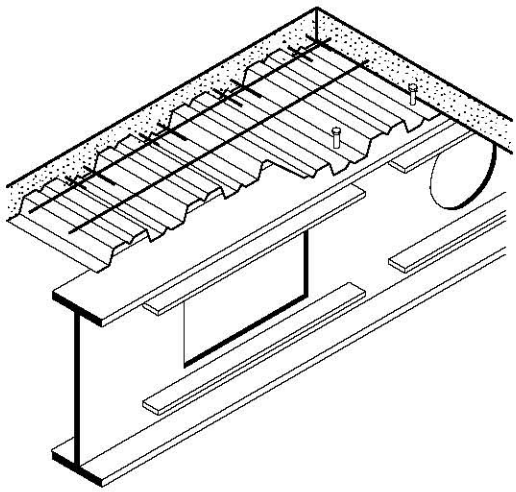


Figura 17 Grandes aperturas rigidizadas en el alma

Durante la vida de un edificio deben esperarse cambios en su utilización. Aunque muchos de estos cambios afectan a los requisitos de servicio, otros afectarán principalmente a la distribución. La mejor forma de maximizar la flexibilidad de la distribución es minimizando el número de pilares. La figura 2 muestra ejemplos típicos de formas en que las vigas principales de luz mayor pueden contribuir a reducir o eliminar pilares intermedios. Estas vigas de vano amplio pueden llegar a ser de tanto canto que los servicios sólo puedan acomodarse proporcionando huecos en las almas principales (véase la figura 17). Podría ser necesario aportar una mayor rigidez alrededor de los huecos, especialmente en la presencia de esfuerzos cortantes verticales muy importantes.

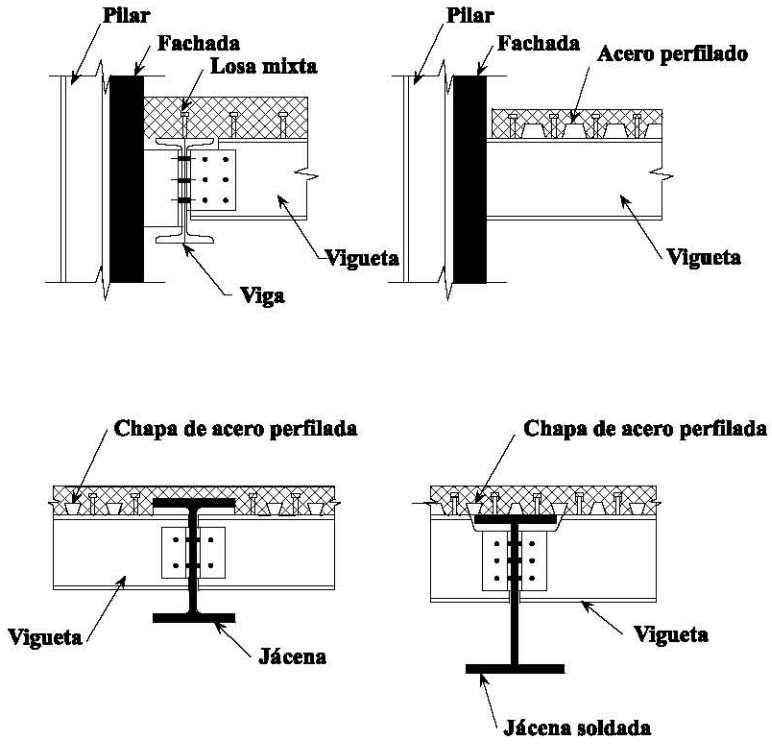
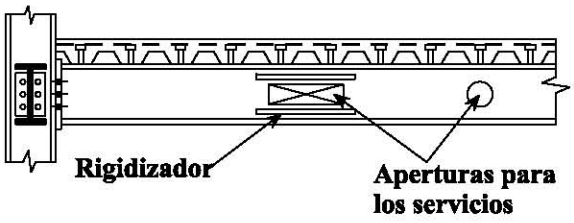


Figura 16 Estructuras de forjados mixtos (ejemplos)

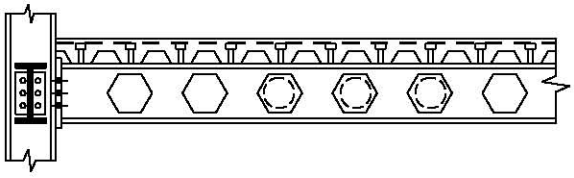
En la figura 18 se muestran otros métodos para incorporar servicios dentro del canto. Una alternativa adicional es la posibilidad de achaflanar las vigas cerca de sus extremos.

En el caso de losas de mayor luz, el proyectista debería tener en consideración el grado de susceptibilidad de la estructura del forjado a las vibraciones. El parámetro normalmente asociado con este efecto es la frecuencia natural del forjado: cuanto más baja sea esta frecuencia natural más responderá la estructura dinámicamente a las vibraciones inducidas por sus ocupantes.

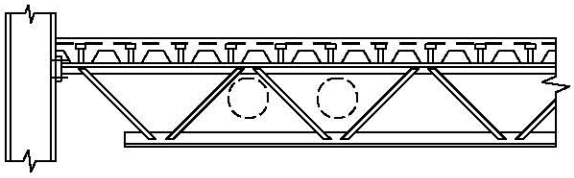
Por esta razón los forjados (o vigas) se proyectan normalmente para que tengan una frecuencia natural no inferior a 3 Hz y, en el caso de forjados que pudieran estar sujetos a actividades



(a) Viga con aperturas en el alma

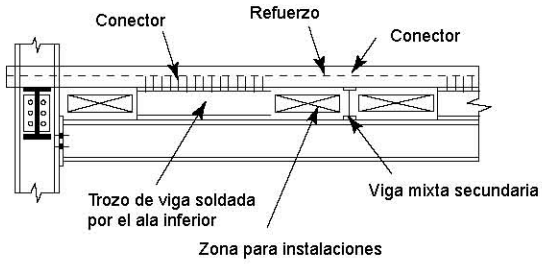


(b) Viga alveolada

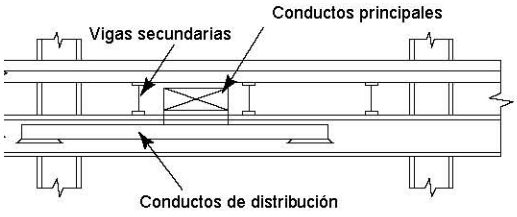


(c) Viga de celosía

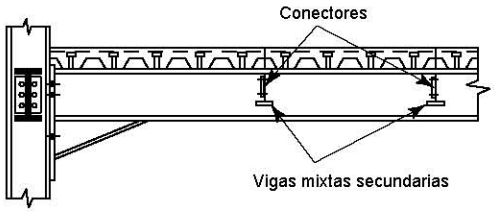
Figura 18a-c Diferentes métodos de incorporar los servicios dentro de la altura de la estructura



(d) Viga para paso de instalaciones



(e) Solución con vigas paralelas



(f) Vigas reforzadas

Figura 18d-f Diferentes métodos de incorporar los servicios dentro de la altura de la estructura

de grupos rítmicos, no inferior a 4 Hz. Un enfoque alternativo más preciso consistiría en estimar el comportamiento vibratorio probable y establecer los criterios de aceptación a partir de aquí, teniendo en cuenta la reacción humana a las vibraciones.

En resumen, la construcción de forjados mixtos utilizada para edificios comerciales y otros edificios de varias plantas ofrecen las siguientes ventajas principales al proyectista y al cliente:

- velocidad y simplicidad de construcción (chapas metálicas, uniones sencillas de acero).
- una construcción más ligera que la de los edificios tradicionales de hormigón (acero y hormigón ligero, elementos estructurales esbeltos de pequeñas dimensiones).
- menos construcción in situ (elementos estructurales y de acero prefabricados).
- consecuencias de tolerancias muy reducidas (estrictas) mediante la utilización de elementos de acero fabricados bajo condiciones controladas de taller, de acuerdo con procedimientos de calidad previamente establecidos.

Las vigas mixtas se proyectan utilizando métodos de cálculo plástico y la teoría de conexión parcial, combinando el acero y el hormigón con excelentes resultados. Para obtener la mayor ventaja de esta forma de construcción es necesario integrar la planificación y el proyecto desde el principio. La implicación de jefes de obra con experiencia desde las fases iniciales ayudará a evitar problemas posteriores. Con este enfoque cuidadosamente planificado se pueden ejecutar de forma simultánea operaciones diferentes como, por ejemplo, el montaje de elementos de acero, chapas metálicas y soldadura de conectores, hormigonado, protección contra incendio, recubrimiento, trabajos de fachada, servicios y acabados en plantas diferentes.

5. PUENTES MIXTOS

Los puentes mixtos de luz media se construyen normalmente utilizando vigas compuestas de acero, soldadas y ensambladas, y un tablero de hormigón armado, tal como se muestra en la figura 19. Las vigas en cajón (véase la figura 20), que tienen un aspecto más atractivo pero que son más caras, se utilizan con menor frecuencia. Para las luces más reducidas, desde 20 hasta 35 m, las secciones de acero laminado son más populares. Éstas pueden utilizarse con un tablero de hormigón o encastradas en hormigón (ala superior y alma). La diapositiva 8 proporciona una ilustración de secciones laminadas que se pueden fabricar curvadas si hiciera falta.



Diapositiva 8

Desde los años 50 se han fabricado varios puentes de carretera, de gran luz, continuos y mixtos. Durante los años inmediatamente posteriores a la Segunda Guerra Mundial el acero era muy caro, por lo que se aprovechaban las secciones transversales mixtas ligeras para ahorrar costes en materiales. Las secciones de hoy en día son más compactas y más simples y no tienen tantas vigas secundarias, anclajes y rigidizadores. Esta forma de estructura ahorra costes de mano de obra en el taller así como en la propia obra.

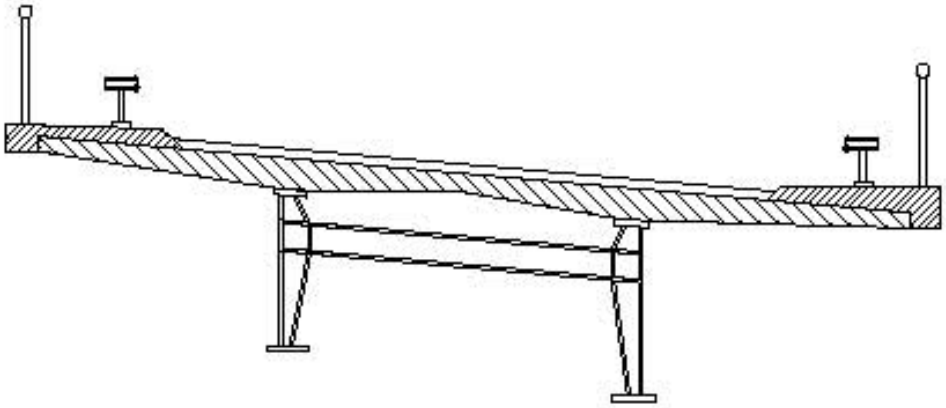


Figura 19 Sección transversal típica de un puente mixto de vigas compuestas para luces medias

Dada la naturaleza asimétrica de la sección transversal, la retracción del hormigón siempre causa compresión y flexión positiva en la sección de acero, lo que conduce a flechas mayores.

En la construcción apuntalada, la compresión del ala de hormigón causada por el peso propio de la viga causa deformaciones por fluencia. El hormigón produce compresión y las tensiones y esfuerzos se distribuyen entonces desde el ala de hormigón a la viga de acero y ésta debe, por lo tanto, resistir una proporción mayor de la carga. Esta redistribución conlleva también mayores flechas.

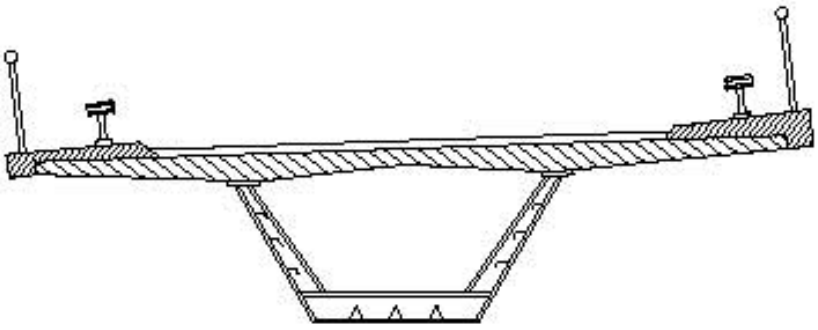


Figura 20 Puente mixto de sección hueca

Una forma sencilla de controlar los efectos de fluencia y

retracción es reduciendo la rigidez del hormigón mediante la aplicación de los correspondientes coeficientes de reducción "n". Estos factores n dependen no sólo de la duración y del tiempo de carga después del hormigonado, sino también de las propiedades de la sección transversal y de las condiciones ambientales. Este procedimiento no se aplica para vigas en edificios, donde se requiere una menor precisión.

En el estado último las deformaciones plásticas causadas por la carga son mucho mayores que las causadas por la fluencia y la retracción, por lo que se pueden despreciar éstas últimas.

Las consideraciones de cálculo de los puentes mixtos se comentan con mayor detalle en la lección 12.10.

6. RESUMEN FINAL

1. La construcción mixta, especialmente la que utiliza chapas de acero perfilado, permite mantener un ritmo rápido de construcción.
2. El peso del acero en la construcción mixta es significativamente inferior al que tendrían los mismos materiales si se utilizaran de forma independiente.
3. No es necesario utilizar andamiaje y encofrado, costoso, ya que la viga de acero puede soportar su propio peso y del hormigón, por sí sola o con la ayuda de algunos elementos provisionales de apuntalamiento. El encofrado de madera puede sustituirse por elementos de hormigón prefabricado o chapas de acero perfilado.
4. Las ventajas anteriormente relacionadas constituyen un poderoso argumento para la utilización de vigas mixtas en edificios. Son más significativas, sin embargo, para luces medias a grandes que para cortas.
5. La desventaja principal de la construcción mixta es la necesidad de proporcionar conectores en la unión acero-hormigón.
6. Otra pequeña desventaja es que su proyecto y construcción son algo más complicados que otros métodos. Esta desventaja es especialmente relevante para estructuras continuas y puentes. Sin embargo, se ve compensada por las ventajas significativas que se pueden obtener.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Eurocódigo 4: "Design of Composite Steel and Concrete Structures:" ENV 1994-1-1: Part 1.1: General rules and rules for buildings, CEN (en imprenta).

8. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

1. Bode, H., "Verbundbau, Werner-Verlag", Düsseldorf 1987.

2. Johnson, R.P., "Composite Construction 1 and 2".

3. Hart, F., Henn, W., Sontag, H., "Multi-Storey Buildings in Steel", Second Edition, Collins, London 1985.

4. Lawson, R.M., "Design of Composite Slabs and Beams with Steel Decking", SCI-Publication 055, 1989.

5. Bucheli, P., Crisinel, M., "Verbundträger im Hochbau, Schweizerische Zentalstelle fur Stahlbau (SZS)", Zürich 1982.

6. Muess, H., "Verbundtrager im Stahlhochbau", Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München/ Düsseldorf 1973.

ESDEP TOMO 12
CONSTRUCCIÓN MIXTA

Lección 12.2: Comportamiento de Vigas

OBJETIVOS/CONTENIDO

Describir el comportamiento básico de vigas mixtas incluyendo una descripción geométrica de una viga típica, su construcción y las relaciones de tensión y deformación plástica que se desarrollan bajo carga.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 9.8.2:	Vigas Arriostradas
Lección 12.1:	Generalidades sobre Construcción Mixta

LECCIONES AFINES

Lección 12.3:	Vigas de un Solo Vano
Lecciones 12.4:	Vigas Continuas
Lecciones 12.5:	Diseño para Estados Límite de Servicio
Lecciones 12.6:	Uniones por esfuerzo Rasante

RESUMEN

Las vigas mixtas se definen según la sección de acero, la losa de hormigón y los conectadores utilizados en el forjado tipo de un edificio. Se hace un breve resumen del comportamiento del material de cada uno de los componentes y se hace referencia a la naturaleza esbelta de la sección de acero y a las propiedades anisótropas de la losa de hormigón. Se describe el comportamiento estructural de una viga mixta típica, en tres fases, con respecto a la deformación unitaria y tensión de cada elemento componente: en primer lugar, bajo cargas bajas que provocan una conexión completa y una respuesta elástica lineal; en segundo lugar, cuando hay un cierto deslizamiento bajo una carga mayor y, finalmente, cuando los materiales alcanzan los niveles de tensión que provocan su agotamiento. La construcción con y sin apuntalamiento da lugar a diferentes comportamientos de viga, que se describirán. La conexión parcial también se explica en términos cualitativos. La lección concluye con un resumen de las limitaciones que el ingeniero debe tener en cuenta al calcular vigas mixtas.

1. INTRODUCCIÓN

Esta lección describe, en términos generales, el comportamiento de la forma más común de elemento mixto: la viga mixta. Al hacerlo, será posible explicar muchos de los problemas asociados con el análisis y proyecto de otros elementos como, por ejemplo, los pilares y las losas. Por todo ello, la lección forma una base sobre la que construir una comprensión del comportamiento de los elementos mixtos.

Después de una descripción general de una viga mixta se facilita una más detallada de los elementos que la componen y de su comportamiento estructural individual. La acción estructural se describe con referencia a la deformación unitaria y a la tensión resultante. Se traza el proceso de deformación en una viga mixta tipo, bajo una carga creciente, hasta su agotamiento.

La forma en que se construyen las vigas mixtas puede alterar su resistencia a las cargas aplicadas. Por esta razón resulta esencial proyectar vigas mixtas teniendo en cuenta tanto su construcción como sus condiciones de servicio. También es posible proyectar un viga para "conexión semirrígida" de forma que cada condición es igualmente crítica. Se facilita una definición de la conexión semirrígida y se exponen breves razones que justifican el requisito de proyecto en dos fases. Los vanos simples constituyen una forma común de viga, por lo que se explica su comportamiento. También se introduce el comportamiento de vigas continuas.

Finalmente se proporciona un resumen de los criterios de cálculo de vigas mixtas. Estos criterios se desarrollan en mayor detalle en lecciones posteriores.

2. COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES

Dado que una viga mixta está compuesta de tres componentes (véase la figura 1), resulta necesario revisar el comportamiento de cada uno de ellos antes de poder describir el comportamiento general del conjunto.

Bajo tensión y compresión, el acero se comporta de forma linealmente elástica hasta que la primera fluencia del material tiene lugar. A partir de ese momento se deforma de forma plástica hasta que se produce su endurecimiento por deformación plástica. Este comportamiento se muestra en forma de diagrama en la figura 2a, junto con la idealización del comportamiento del acero que se asume para el cálculo. En general, la mayor parte de la sección de acero se encuentra a tracción debido al efecto de la flexión por momento positivo, por lo que la abolladura de las secciones esbeltas no constituye un problema. Sin embargo, en vigas continuas, porciones significativas de la sección de acero se ven sometidas a compresión, por lo que es necesario considerar el efecto de la abolladura. Este tema se desarrollará en las lecciones 12.4.1 y 12.4.2.

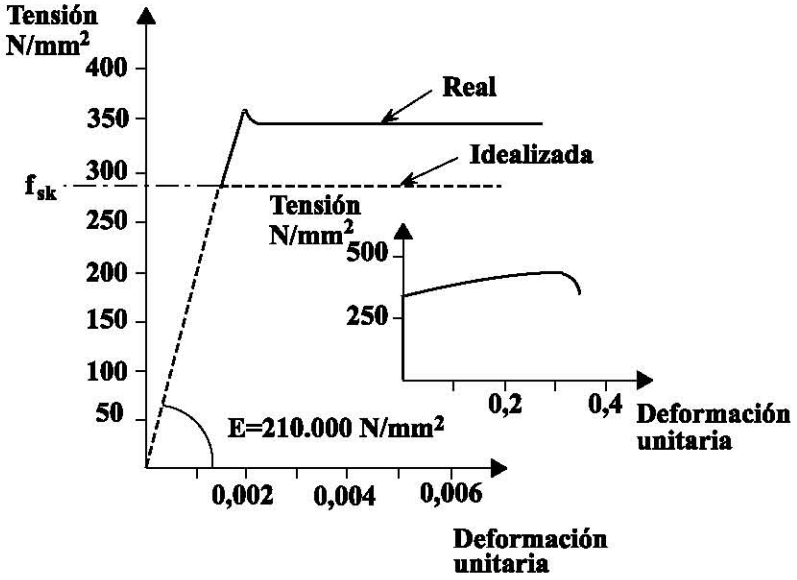


Figura 2a Propiedades mecánicas del acero

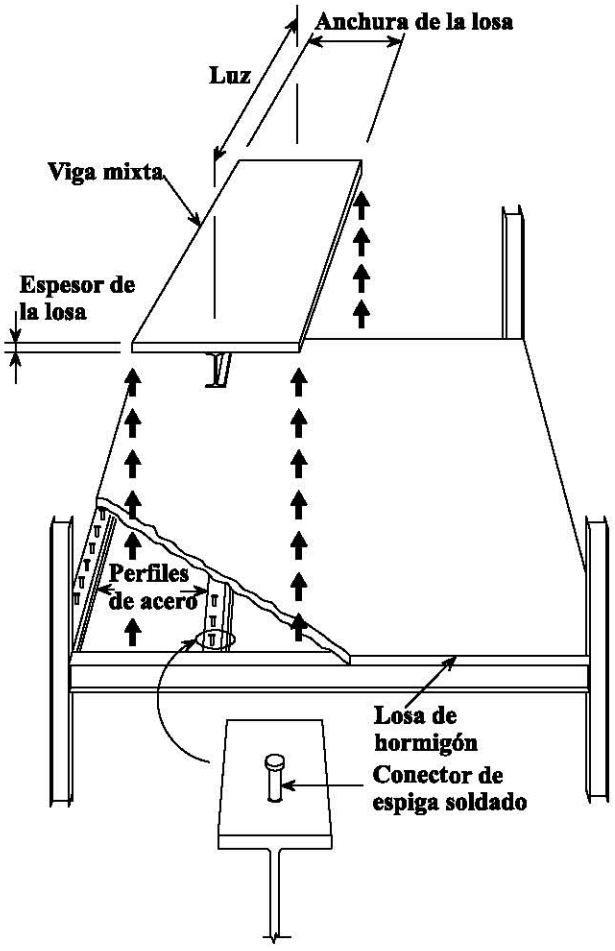
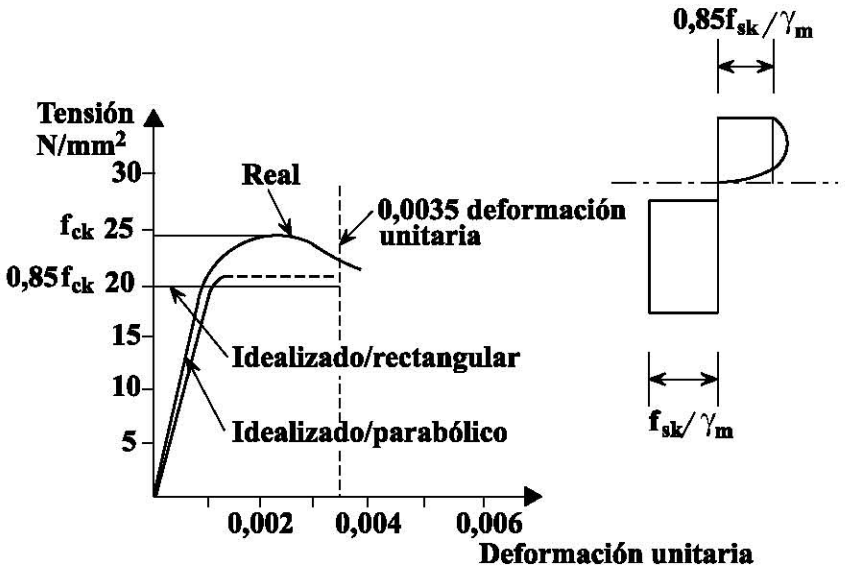


Figura 1 Una típica estructura de forjado; se muestra una viga mixta idealizada como elemento aislado

El comportamiento del hormigón es más complejo. Deben considerarse dos situaciones distintas. El hormigón a compresión sigue una curva de tensión/deformación plástica no lineal. Este comportamiento se muestra en la figura 2b junto con las simplificaciones que se utilizan en el cálculo. El diagrama de tensión parabólico se utiliza a menudo en el cálculo de hormigón armado, pero normalmente se asume el modelo rectangular en el cálculo de vigas mixtas. El comportamiento no lineal del material provoca una respuesta no-elástica en la estructura. El hormigón sometido a tracción se fisura a cargas muy bajas y normalmente se asume en el cálculo que el hormigón no tiene resistencia alguna a la tracción.



El comportamiento de las uniones (véase la figura 2c) se desarrollará en detalle en la lección 12.6.1. Aquí bastará establecer que también es un componente no lineal. Este comportamiento contribuye a la complejidad del cálculo.

Figura 2b Propiedades mecánicas del hormigón

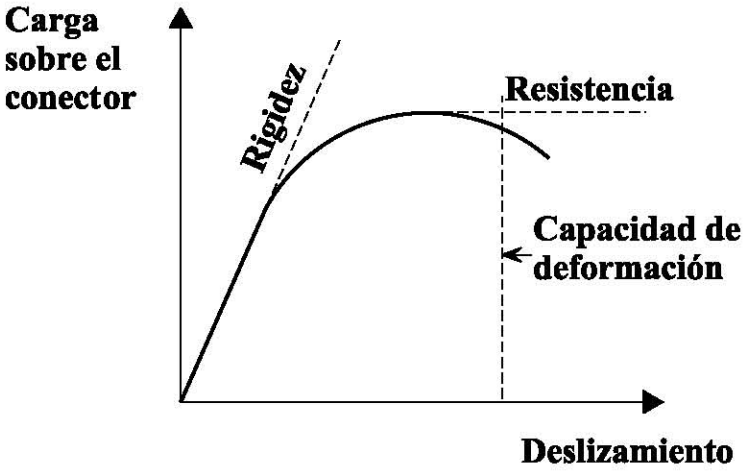


Figura 2c Propiedades mecánicas de conectores

3. DESCRIPCIÓN DE UNA VIGA MIXTA SIMPLEMENTE APOYADA

3.1 Generalidades

Las vigas mixtas están compuestas por una losa de hormigón armado prefabricado o mixta ubicada entre secciones de acero y conectada a ellas. La figura 1 muestra una disposición típica. Los elementos de acero a menudo reciben, erróneamente, el nombre de "vigas". En esta lección se las denomina "secciones de acero" a fin de evitar confusiones.

Normalmente la losa se extiende entre secciones paralelas de acero y su cálculo está dictado por esta acción transversal. Por esta razón, la luz, el canto y la calidad del hormigón se determinan independientemente y se conocen con anterioridad al cálculo de la viga.

Para la construcción no mixta, las secciones de acero se calculan para soportar la carga que actúa sobre el forjado más el propio peso de la losa, tal como se muestra en la figura 3. La sección de acero es simétrica con respecto al canto medio y tiene una línea neutra en este punto. El perfil soporta deformación a ambos lados de esa línea neutra y los esfuerzos de tracción y compresión de las fibras externas son idénticas. Los valores de los esfuerzos (σ) correspondientes a la tracción (t) y compresión (c) de la sección de acero pueden evaluarse utilizando la teoría básica de la flexión.

$$\sigma_t \text{ y } \sigma_c = M_{\text{carga útil}} / W_{\text{sección de acero}}$$

La losa de hormigón no está conectada a la sección de acero, por lo que se comporta de forma independiente. Debido a que generalmente es muy débil en su flexión longitudinal, se deforma adaptándose a la curvatura de la sec-

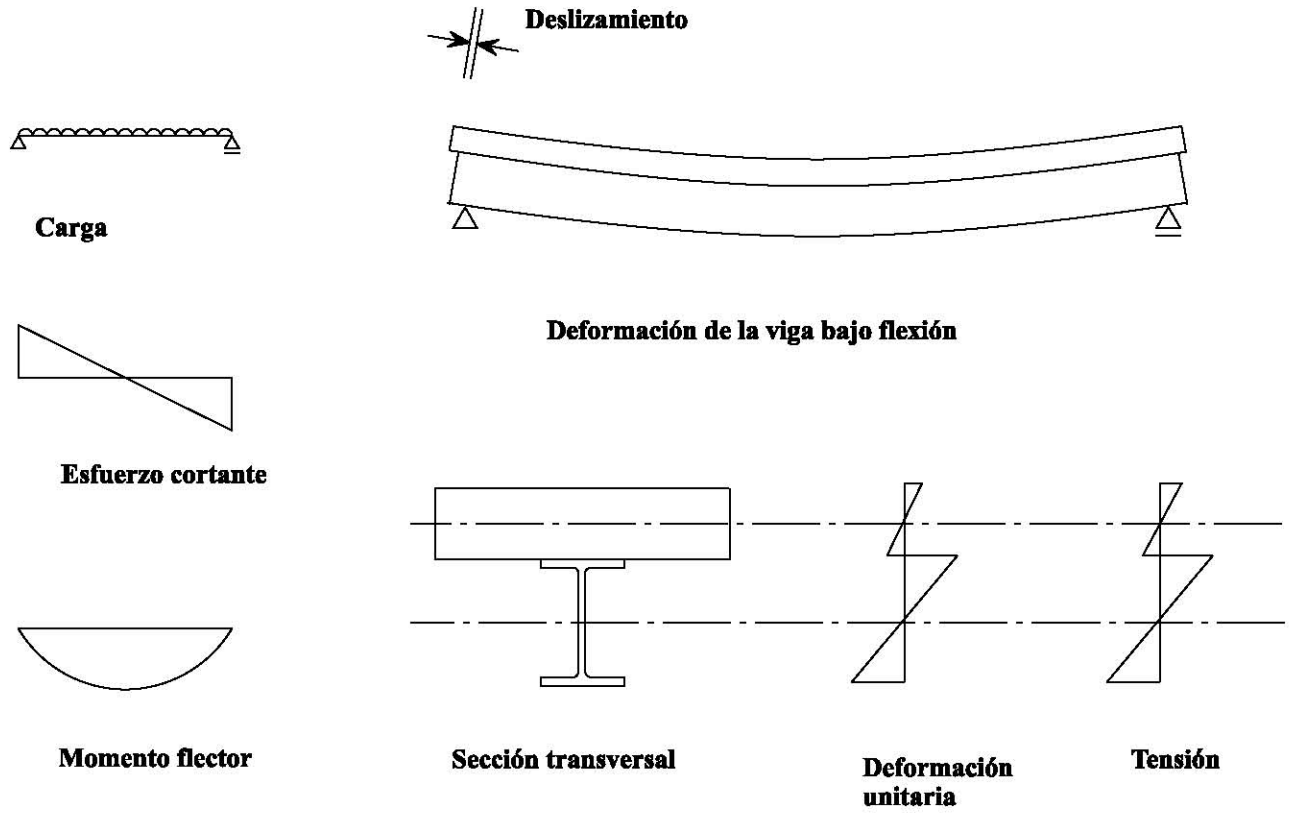


Figura 3 Viga sin acción conjunta

ción de acero y tiene su propia línea neutra. La superficie inferior de la losa de hormigón puede deslizarse libremente sobre el ala superior de la sección de acero y existe un deslizamiento considerable entre los dos elementos. La resistencia a la flexión de la losa a menudo es tan insignificante que se ignora.

Alternativamente, si la losa de hormigón está conectada a la sección de acero, las dos actúan en conjunto para soportar la carga útil, tal como se muestra en la figura 4. El deslizamiento entre la losa y la sección de acero se ve ahora impedido y la conexión resiste un esfuerzo rasante longitudinal (rasante) similar en distribución al esfuerzo cortante vertical que se muestra.

La sección mixta es asimétrica y muestra una sola línea neutra que suela hallarse cerca del ala superior de la sección de acero. Los esfuerzos de tracción y compresión de las fibras externas dependen, por lo tanto, del momento general de inercia (I) de la sección mixta y de su distancia a la única línea neutra.

Asumiendo que la carga ocasiona deformación elástica, las tensiones generadas en la sección pueden determinarse utilizando la teoría básica de la flexión. Los esfuerzos correspondientes a la condición de carga de servicio se pueden obtener (figura 4) en base a:

$$\sigma_t = M_{\text{carga de servicio}} * y_1 / I_{\text{sección mixta}}$$

$$\sigma_c = M_{\text{carga de servicio}} * y_2 / I_{\text{sección mixta}}$$

donde

y_1 es la distancia de la fibra de acero más alejada de la línea neutra

y_2 es la distancia de la fibra de hormigón más alejada de la línea neutra

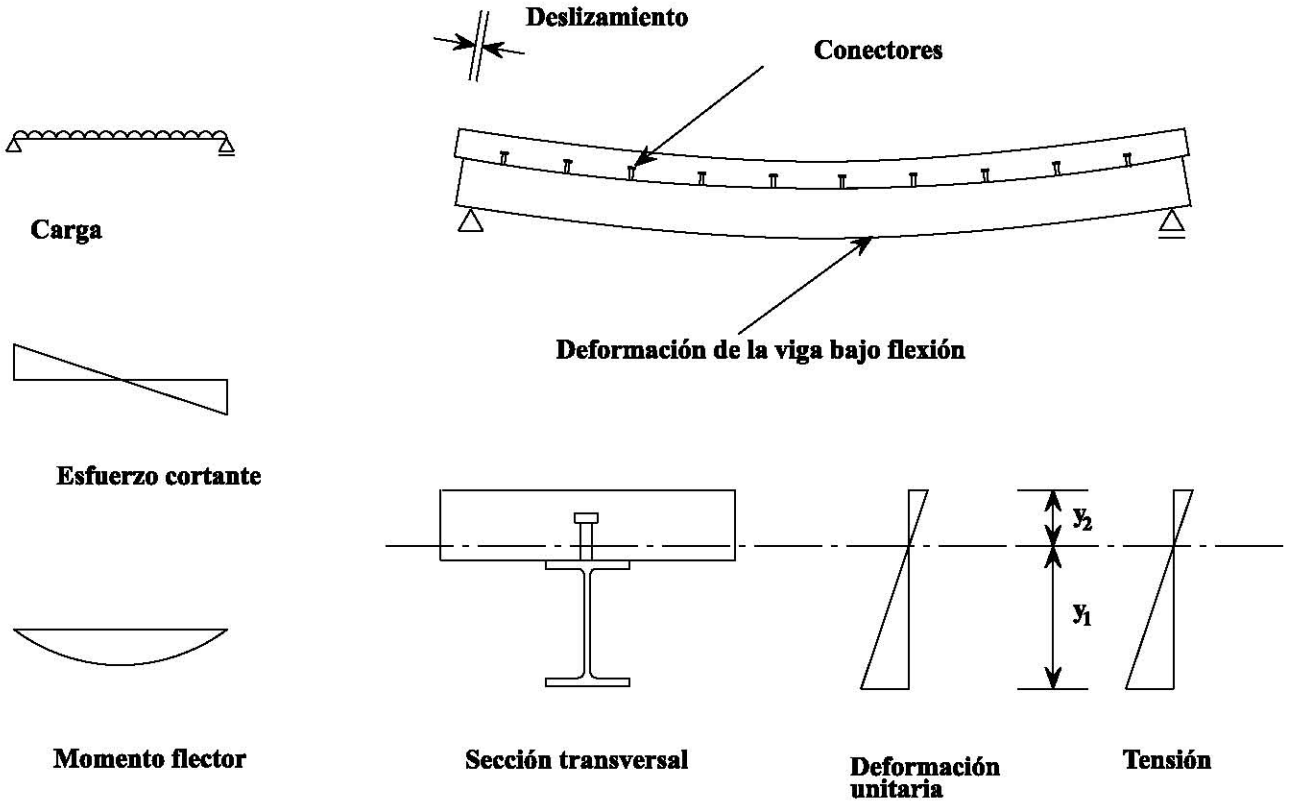


Figura 4 Fase 1 de la viga mixta

El valor I de la sección mixta es normalmente varias veces el valor de la sección de acero. Por lo tanto, se puede observar que, para una carga similar, las tensiones de la fibra más alejada de la sección mixta serán mucho menores que las generadas en la viga no mixta.

Esta diferencia también afecta a la rigidez de las vigas, lo que se comentará con mayor detalle en las lecciones 12.5.1 y 12.5.2.

Se asume que las tensiones que se desarrollan en la losa en sentido transversal a la longitud de la viga no tienen efecto alguno sobre el comportamiento longitudinal. Normalmente se ignoran al calcular la viga mixta. Sin embargo, la luz de la viga a menudo determina la extensión de la losa que puede asumirse que ayuda a adoptar la flexión longitudinal. Este supuesto se desarrollará con mayor detalle en la lección 12.3. Aquí se asume que la mitad del vano transversal, a cada lado de la sección de acero, es efectiva en lo que atañe al soporte de la compresión longitudinal.

La conexión entre la losa y la sección de acero puede establecerse de muchas formas. En general se forma utilizando una serie de elementos mecánicos. El formato más común de conector es el de espiga que se muestra en la figura 1. Las lecciones 12.6.1 y 12.6.2 tratan detalladamente del comportamiento de este conector y describen algunos otros tipos.

Se puede observar que las vigas mixtas forman parte de un complejo sistema de construcción de forjados y que es difícil separar las acciones transversal y longitudinal de la losa. La figura 1 identifica la sección típica de viga que se comenta en el resto de esta lección.

3.2 Comportamiento Estructural

La mejor forma de describir el comportamiento de una viga mixta bajo la acción de una carga baja, una carga media y la carga límite que produce el agotamiento es por fases. Los diagramas de carga, momento flector y esfuerzo cor-

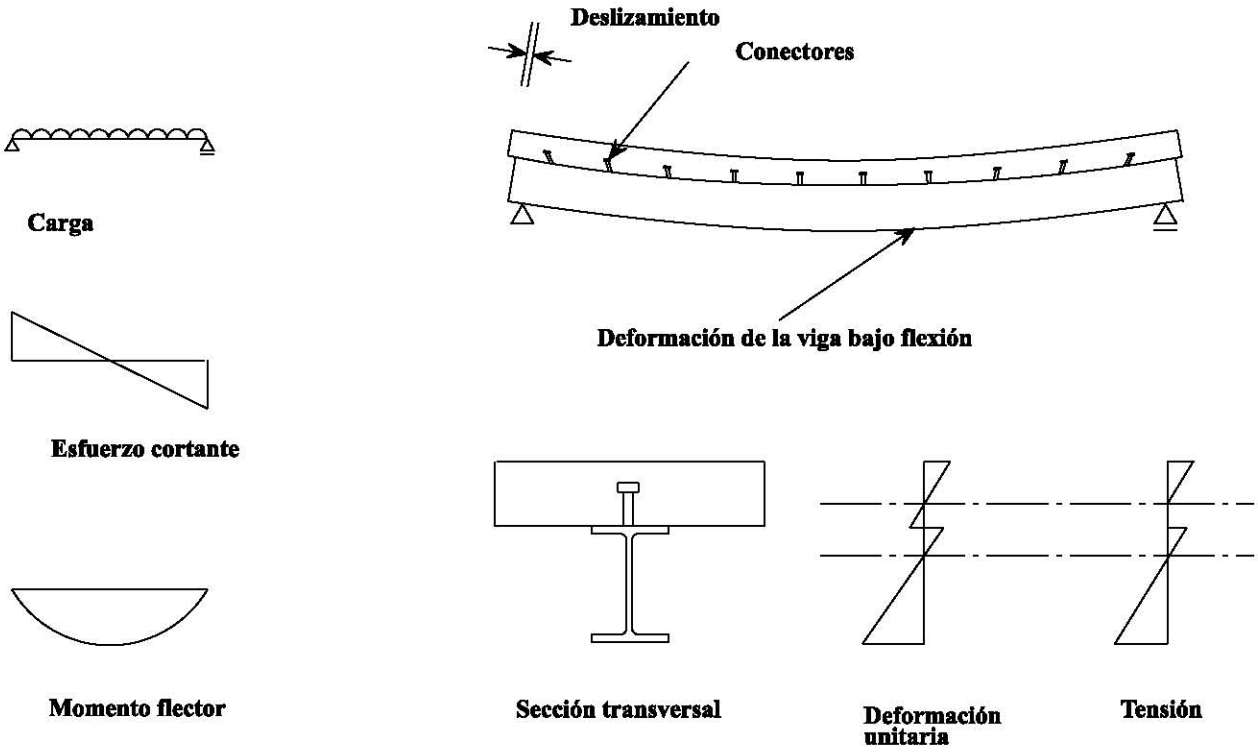


Figura 5 Fase 2 de la viga mixta

tante, así como la deformación, la deformación unitaria y la tensión dentro de la sección, se muestran todas en forma de diagrama, para las tres fases, y relacionadas con las flechas resultantes, en las figuras 4-6.

Fase 1 - Figura 4

Para cargas muy bajas, el acero y el hormigón se comportan de forma más o menos lineal. La conexión entre estos dos elementos soporta bajos niveles de tensión tangencial, por lo que resulta improbable que ocurra un deslizamiento longitudinal apreciable. La viga se deforma de manera que la distribución de la deformación unitaria en el punto intermedio del vano y la tensión resultante son lineales, tal como se muestra en la figura 4.

Puede observarse en el diagrama que, en este caso, la losa deberá ser de gran grosor ya que la línea neutra se halla dentro del hormigón. El resultado de esto es que parte del hormigón se encuentra sujeto a tracción. Se ha asumido que este hormigón se agrieta y que, por lo tanto, no soporta tensiones de tracción. Si la losa fuera delgada sería posible que la línea neutra estuviera en el acero, por lo que el área de acero por encima de la línea se vería sometida a compresión.

Este estado corresponde, en la práctica, a la situación de carga de servicio en la zona de momento positivo de casi todas las vigas mixtas.

Fase 2 - Figura 5

Según aumenta la carga, la tensión tangencial entre la losa y la sección de acero da lugar a deformación en la zona de conexión. Esta deformación recibe el nombre de 'deslizamiento' y contribuye a la deformación general de la viga. La figura 5 muestra el efecto del deslizamiento en la distribución de tensión y deforma-

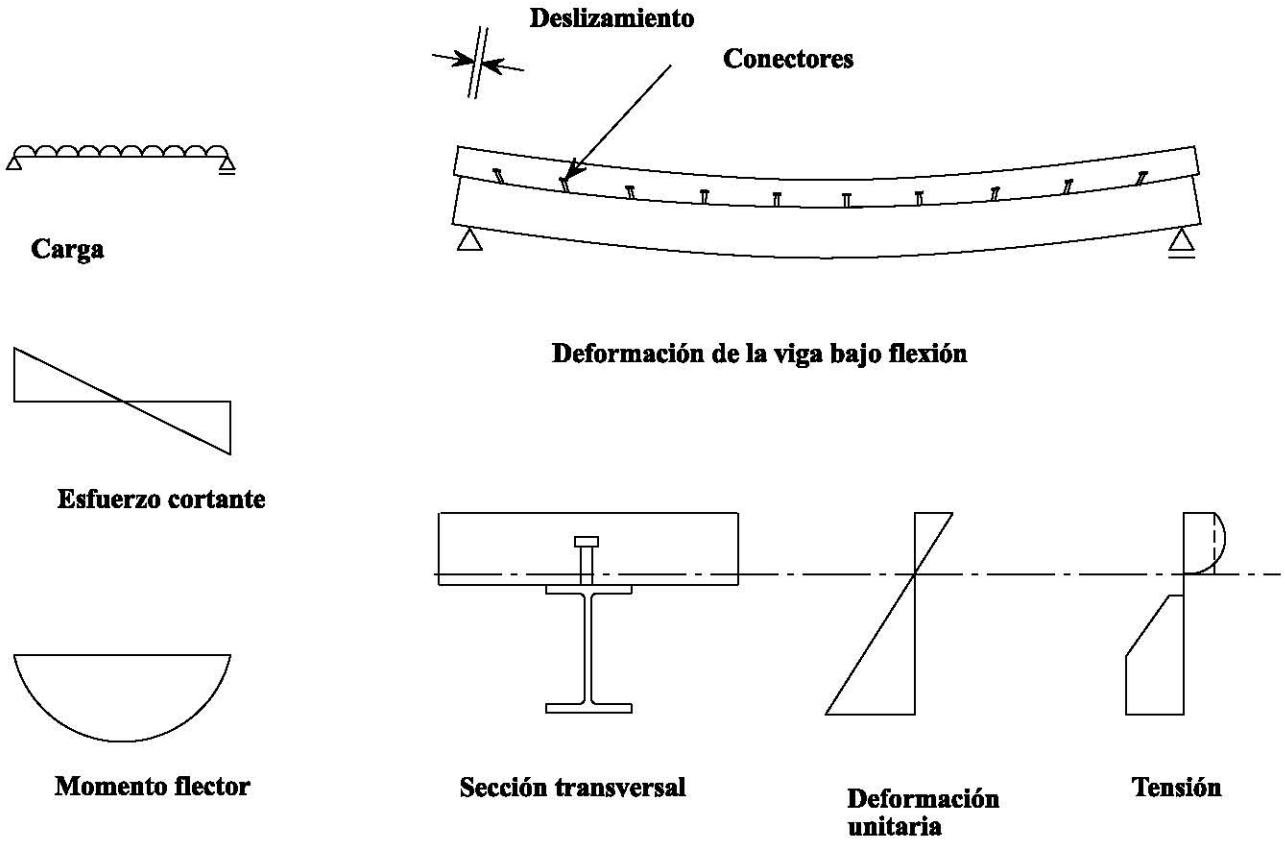


Figura 6 Fase 3 de la viga mixta

ción unitaria. Para muchas vigas mixtas el deslizamiento es muy pequeño y se puede despreciar (más adelante en esta lección, así como en la lección 12.6.2, se comentarán algunas excepciones a este supuesto).

Este estado corresponde a la situación de carga de servicio para la clase de vigas mixtas que se ha calculado como conectada de forma semirrígida. Esta clase de viga mixta se describirá más detenidamente en esta lección y con mayor detalle en la lección 12.6.2.

Con el aumento de tensión dentro del hormigón, inducido por la creciente deformación unitaria, el diagrama de tensión cambia de la forma triangular, que se muestra en la figura 5 a la forma de la figura 6. Para el cálculo resulta difícil representar esta forma matemáticamente, por lo que se utilizan aproximaciones. Estas aproximaciones se desarrollarán con mayor detalle en la lección 12.3. Para las vigas mixtas, la aproximación más común es el modelo rectangular de tensiones denotado por la línea rayada de la figura 6 y con mayor detalle en la figura 2b.

Fase 3 - Figuras 6 y 7

Finalmente la carga llega a ser suficiente para ocasionar deformación unitaria remanente en uno o más de los materiales.

Fase 3a

Si el acero llega a fluir, esto de lugar a un estado plástico y el diagrama de tensión se desarrolla como se muestra en la figura 6. Normalmente se presupone que, para el estado límite último, el diagrama de tensión de plasticidad se desarrolla de forma que toda la sección de acero pueda finalmente alcanzar la fluencia indicada en la figura 6 por medio de la línea punteada.

Fase 3b

El hormigón no es un material plástico. Si se llegaran a desarrollar deformaciones unitarias que causaran tensiones excesivas sería potencialmente posible que tuviera lugar una ruptura por fragilidad de la losa. Este comportamiento sería similar a la ruptura por fragilidad que se espera de una viga de hormigón excesivamente armada. El volumen del hormigón utilizado en la mayor parte de las losas hace que sea improbable que este tipo de situación llegue a darse en la práctica.

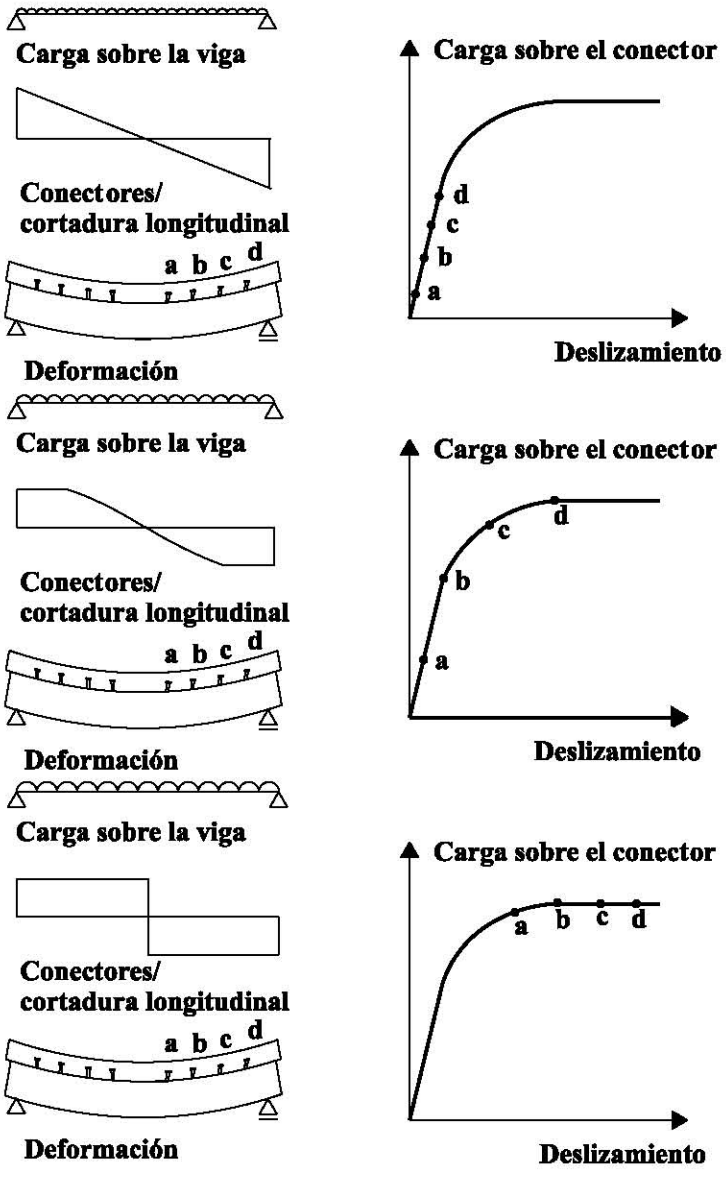


Figura 7 Conectores que resisten la cortadura longitudinal

Fase 3c

Otros componentes de la viga mixta que pueden colapsar antes de la fluencia del acero o del aplastamiento del hormigón son los conectores. Según aumenta la carga aumenta proporcionalmente la deformación unitaria por esfuerzo rasante y, por lo tanto, el esfuerzo rasante longitudinal entre la losa de hormigón y la sección de acero. Para una viga mixta de un solo vano, cargada uniformemente, cuya deformación se supone elástica, el esfuerzo rasante longitudinal por m de longitud de la viga (T), entre la losa y la sección de acero, puede obtenerse en base a la expresión:

$$T = V S/I$$

donde S es el momento estático.

Dado que el esfuerzo rasante longitudinal es directamente proporcional al esfuerzo cortante vertical aplicado, el esfuerzo es mayor en los conectores de los extremos. Si las cargas son bajas, la fuerzas que actúan sobre un conector producen deformaciones elásticas. El deslizamiento entre la losa y la sección de acero será mayor en el extremo de la viga. La figura 7a muestra el esfuerzo rasante longitudinal y la deformación de una viga mixta típica en este estado de cargas.

Si se aumenta la carga, aumenta también el esfuerzo rasante longitudinal y el conector del extremo podría llegar a sufrir deformación plástica. La figura 7 muestra una relación típica entre carga y deslizamiento para los conectores. La ductilidad de los conectores les permitirá deformarse plásticamente manteniendo su resistencia al esfuerzo rasante longitudinal. La figura 7b muestra una situación en la que dos conectadores en los extremos se están deformando plásticamente.

Un aumento de la carga aplicada producirá un mayor esfuerzo rasante longitudinal y una mayor deformación del conector. Por consiguiente, los conectores más cercanos al centro de la viga también comienzan a deformarse plásticamente en secuencia. El agotamiento ocurre una vez que todos los conectores han alcanzado su límite final de resistencia, tal como se muestra en la figura 7c. Esta secuencia de deformación de los conectores por carga cortante se muestra de forma exagerada en las figuras 7a, b y c.

Este patrón de agotamiento depende de que los conectores puedan deformarse plásticamente. El conector del extremo de la figura 5 debe poder deformarse en gran medida antes de que el conector cercano a la línea central de la viga alcance siquiera su capacidad límite. Este requisito de ductilidad se desarrollará con mayor detalle en la lección 12.6.1, donde se demostrará cómo determina la luz de la viga.

Puede comprobarse que el colapso de la viga mixta se ve dictado por la resistencia de sus tres componentes principales. Dada la complejidad de la conexión elástica de estos componentes, es normal calcular estas secciones asumiendo la distribución de tensiones que se muestra en la figura 2b.

Las vigas mixtas proyectadas para colapsar cuando el acero fluya, el hormigón alcance su deformación justa que cause su agotamiento y todos los conectores se deformen plásticamente parecería constituir la situación ideal. Sin embargo, existen varias razones por las que esta situación rara vez ocurre. Estas razones se investigan a continuación.

3.3 Situaciones Prácticas de Carga

Se ha supuesto hasta ahora que la carga está distribuida de forma uniforme sobre la viga y que produce un diagrama parabólico de momento flectores. Esta es una situación común, aunque igualmente pueden encontrarse situaciones en las que cargas concentradas actúan sobre vigas.

En el caso de cargas uniformes, el momento máximo tiene lugar en el punto medio del vano. Este punto recibe entonces el nombre de sección crítica de flexión. El diagrama de ten-

sión en la sección crítica es el descrito en la figura 6. Lleva a una distribución del esfuerzo rasante longitudinal en los conectores que se muestra en la figura 7c. Se puede comprobar que el esfuerzo rasante longitudinal de la sección crítica debe ser resistido por los conectores entre este punto y el extremo de la viga. Se puede deducir que, si la sección crítica se encontrara más cerca del extremo de la viga, como ocurriría para una carga puntual cercana al soporte, sería entonces necesario aumentar el número de conectadores entre este punto y el soporte.

En la práctica, es necesario determinar el número de conectores entre cada punto de carga y los soportes en una viga que esté sometida a múltiples cargas puntuales. Este cálculo a menudo da lugar a un espaciado variable de los conectadores a lo largo de la longitud del vano.

Las cargas puntuales pueden producir también altos índices de esfuerzos cortantes verticales. Aunque parte del esfuerzo cortante vertical podría ser soportado por las alas de la losa y de la viga, constituye una práctica habitual ignorar este factor y asumir que todo el esfuerzo cortante vertical es soportado por el alma de la sección de acero.

Para las vigas continuas, comentadas posteriormente en esta lección, existe la posibilidad de que experimenten a la vez un alto índice de esfuerzo cortante y de flexión. En este caso se reduce la resistencia de la sección al momento. Este aspecto se ha comentado ya con detalle en la lección 9.8.2 y también se comentará en la lección 12.4.2.

3.4 Fluencia y Retracción

El hormigón está sometido a dos fenómenos que alteran la deformación unitaria y, por lo tanto, la flecha de la viga mixta.

Durante su fraguado, el hormigón fresco se endurece gradualmente mediante el proceso de hidratación. Esta reacción química libera calor que causa la evaporación de la humedad, que a su vez hace que el material se contraiga. Dado que la losa está conectada a la sección de acero por medio de los conectores, los esfuerzos de retracción del hormigón se transfieren a dicha sección de acero. Estos esfuerzos causan flecha en la viga mixta. En las luces pequeñas se puede ignorar esta flecha, pero en luces grandes tamaño este factor puede llegar a ser significativo, por lo que es necesario tenerlo en cuenta.

El hormigón tiende a relajarse cuando se le somete a tensión, es decir, tiende a deformarse plásticamente bajo carga, incluso cuando dicha carga ni siquiera se acerca a la carga límite. Este fenómeno recibe el nombre de fluencia y es un factor importante en vigas mixtas. La fluencia del hormigón produce una flecha adicional que depende del tiempo y que es necesario tener en cuenta para el análisis de la viga en la fase de carga de servicio.

3.5 Vigas Mixtas Apuntaladas y sin Apuntalar

La geometría de casi todas las vigas mixtas se ve predeterminada con frecuencia por el tamaño de la losa, tal como se ha comentado anteriormente, y por la capacidad de la sección de acero de soportar la carga de hormigón fresco durante la construcción. Esta limitación de la construcción da lugar a dos tipos de viga mixta, la viga mixta apuntalada y la viga mixta sin apuntalar.

Considere primero el caso de la viga apuntalada que se muestra en la figura 8. Durante la construcción, la sección de acero se soporta sobre apuntalamientos temporales. No necesita resistir momentos flectores significativos y por lo tanto no está sometida a tensiones y no se deforma. Los apuntalamientos se retiran una vez se ha endurecido el hormigón. Cada uno de los elementos que componen la viga recibe en ese momento carga procedente del propio peso muerto de los materiales. Sin embargo, en esta fase, la viga está actuando como un elemento mixto y su rigidez y resistencia son mucho mayores que la de la sección de acero sola. La deformación causada por las cargas muertas es, por lo tanto, pequeña. Las cargas de servicio adi-

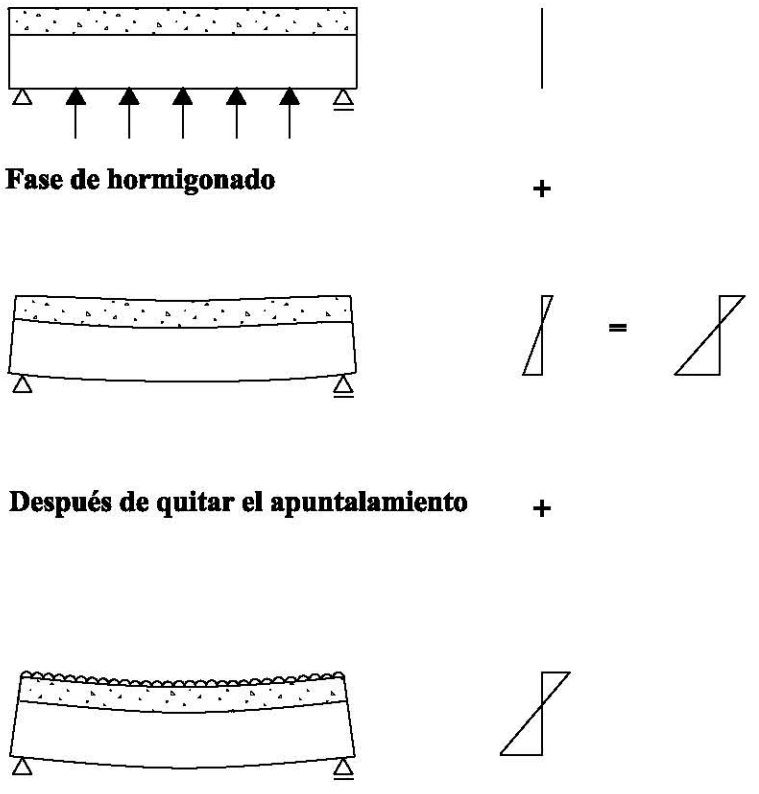


Figura 8 Vigas mixtas apuntaladas

cionales causan la deformación de la viga. Pueden calcularse las tensiones totales presentes en la viga sumando las tensiones causadas por las cargas muertas y de servicio.

Considere ahora la viga sin apuntalamiento que se muestra en la figura 9. Durante el proceso de construcción, la sección de acero se ve cargada con el peso muerto del hormigón fresco, es decir, se ve sometida a tensión y se deforma. El hormigón y los conectadores permanecen en su mayoría libres de tensiones, aparte de las tensiones por retracción desarrolladas dentro del hormigón endurecido. En la figura 9 se puede observar, que el hormigón fresco se represa, es decir, que su superficie superior permanece nivelada mientras que su superficie inferior se deforma para ajustarse a la forma flexionada de la sección de acero. La carga muerta causada por el peso del hormigón fresco constituye una proporción sustancial de la carga total y las tensiones desarrolladas en la sección son a menudo altas.

La sección mixta, que tiene casi el mismo nivel de rigidez que la viga apuntalada, soporta las cargas de servicio adicionales. Es posible, por lo tanto, obtener las tensiones presentes en la sección sin apuntalar sumando las tensiones del hormigón fresco y las de la sección mixta. Este cálculo produce una distribución de tensiones en la sección que difiere de la que se da en la viga mixta apuntalada. Sin embargo, las tensiones de fluencia desarrolladas en el acero y en el hormigón son iguales en los dos casos y las vigas mixtas apuntaladas y sin apuntalar pueden soportar la misma carga final.

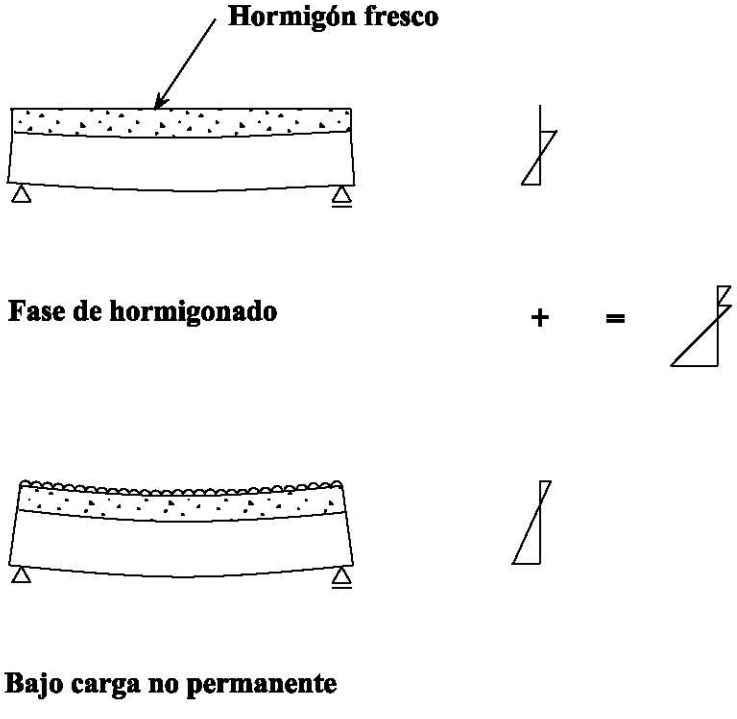


Figura 9 Vigas mixtas sin apuntalar

La sección de acero de una viga mixta sin apuntalar necesita a menudo ser grande para poder soportar el peso del hormigón fresco. De hecho, es a menudo sustancialmente mayor de lo que se habría requerido si la viga hubiera sido apuntalada.

La figura 10 muestra las respuestas a la flexión bajo carga de una sección de acero y de una viga mixta, tanto apuntalada como sin apuntalar. Las deformaciones unitarias y tensiones desarrolladas se muestran en secuencia con la sección sobre la que actúan. En el caso de una viga sin apuntalar, la sección de acero de por sí acepta la carga del hormigón fresco y las deformaciones unitarias debidas a ésta se suman a las causadas por las cargas de servicio aplicadas posteriormente. Las tensiones resultantes se muestran en el diagrama de tensión. Aunque la flecha total de la viga sin apuntalar puede ser mayor que la de la viga apuntalada bajo carga de montaje, esto es a menudo poco importante, ya que la flecha causada durante la construcción puede quedar disimulada por el acabado.

A pesar de las desventajas anteriormente comentadas, la construcción sin apuntalar se prefiere a menudo por las razones siguientes:

- el coste extra que implica proporcionar los medios de apuntalamiento.
- el menor espacio de trabajo disponible en zonas apuntaladas.
- el efecto negativo en la velocidad de la construcción.

3.6 Conexión Semirrígida

En la construcción sin apuntalar el tamaño de la sección de acero se ve a menudo determinado por el peso del hormigón fresco, y el tamaño de la losa se ve determinado de forma independiente por su luz transversal. Si se proporciona un número suficiente de conectores para transferir el esfuerzo máximo longitudinal en la sección de acero o losa de hormigón, el nivel de resistencia de la viga mixta sin apuntalar puede llegar a ser muy alto. De hecho, las vigas mixtas construidas de esta manera pueden soportar varias veces la carga de uso requerida. Para evitar la conexión parcial se utiliza en el elemento mixto esta resistencia excesiva.

Hasta ahora se ha asumido que la conexión transportará todo el esfuerzo cortante de la viga hasta el momento en que la sección de acero haya entrado en fluencia. Sin embargo, debido a que la resistencia de la viga sin apuntalar es tan alta, a menudo es posible reducir el número de conectadores. Esta reducción da lugar a una viga en la que la modalidad de colapso sería causada por la ruptura de los conectadores antes de que el acero haya llega-

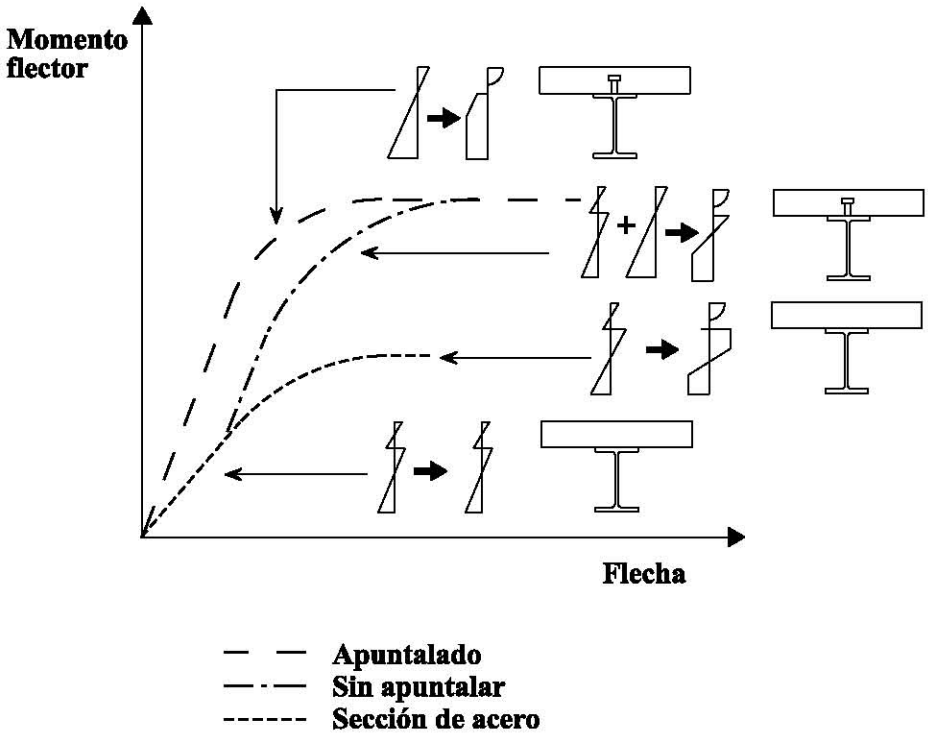


Figura 10 Flecha bajo carga de una sección de acero sin acción conjunta y de una viga mixta con y sin apuntalar

do al límite de fluencia o que el hormigón haya alcanzado su punto máximo de resistencia al aplastamiento.

Estas vigas requieren menos conectores, lo que contribuye a reducir el coste general de construcción. Sin embargo, son menos rígidas debido a que un número menor de conectores permite un mayor índice de deslizamiento entre la losa y la sección de acero. La conexión semirrígida se comentará con mayor detalle en la lección 12.6.2.

4. VIGAS MIXTAS CONTINUAS

Aunque la viga biapoyada es la más común, podrían darse situaciones en las que el uso de vigas continuas fuera más adecuado. Estas vigas se comentarán con detalle en las lecciones 12.4.1 y 12.4.2, por lo que aquí sólo se revisarán brevemente.

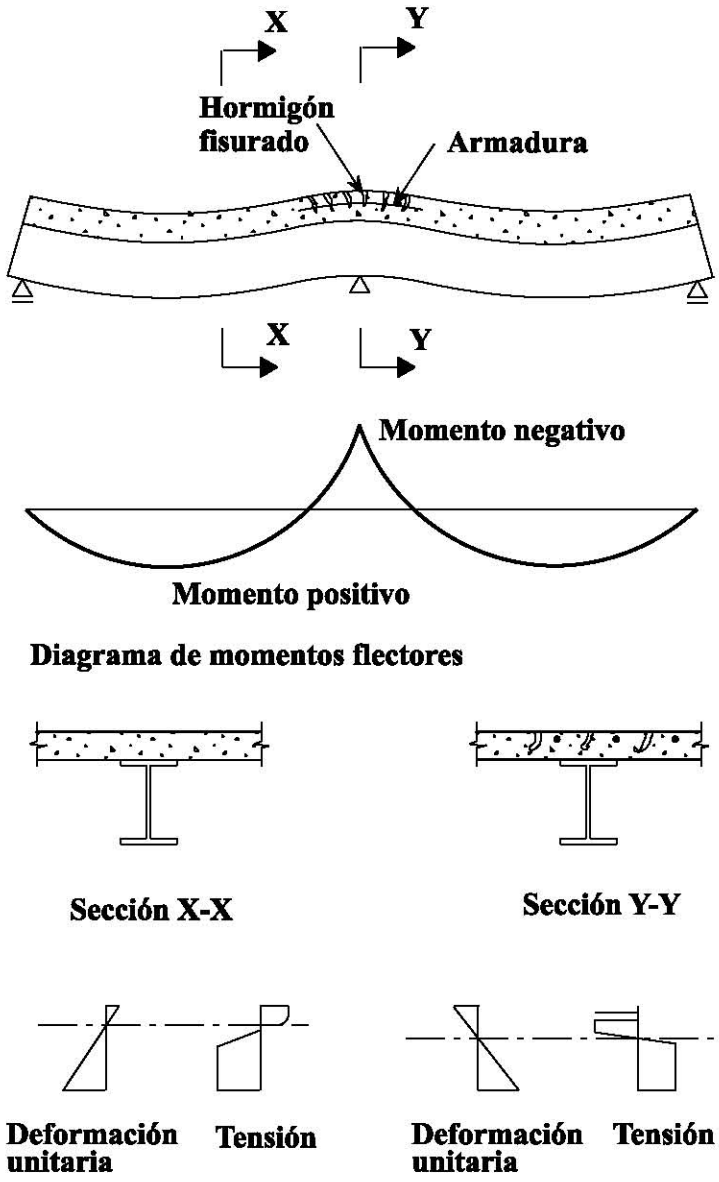


Figura 11 Vigas mixtas y continuas

Las zonas intermedias de los vanos de las vigas mixtas continuas se comportan de la misma forma que las vigas mixtas de un solo vano. Sin embargo, las zonas cercanas a los apoyos demuestran un comportamiento sustancialmente diferente. Este comportamiento se muestra en forma de diagrama en la figura 11.

El hormigón en la zona central del vano se encuentra generalmente a compresión y el acero se encuentra a tracción. Esta distribución se invierte sobre el soporte, ya que el momento es aquí negativo. El hormigón no puede soportar deformaciones significativas por tracción por lo que se fractura, dejando sólo la armadura interior como elemento efectivo para resistir el momento.

La sección de acero cerca del soporte tiene que soportar deformaciones unitarias por compresión a lo largo de una proporción considerable de su canto. Las secciones esbeltas tienen una tendencia a la abolladura en esta zona, por lo que podría ser necesario reforzar las secciones de los pilares para absorber la compresión de sus almas.

Al igual que la abolladura, también es posible que tenga lugar un cierto pandeo lateral por torsión de la viga en estas zonas.

5. RESUMEN FINAL

1. Las vigas mixtas, sujetas a momentos positivos, colapsan al fluir la sección de acero, fracturarse la losa de hormigón o por el corte de los conectores.

2. Las vigas mixtas no apuntaladas requieren que su sección de acero sea lo suficientemente resistente y rígida para soportar el peso del hormigón fresco.

3. Se pueden utilizar vigas mixtas de conexión semirrígida para garantizar una mayor economía de las conexiones por esfuerzo rasante.

4. Es necesario calcular las vigas mixtas continuas para que resistan las deformaciones debidas al momento positivo y negativo. La armadura de la losa soporta la deformación por tracción en la zona sujeta al momento negativo. También es necesario comprobar la sección de acero por la posibilidad de pandeo.

6. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

1. Book, H., "Verbundbau", Werner Verlag, Düsseldorf, 1987.

2. Johnson, R.P., "Composite Construction 1 and 2".

3. Hart, F., Henn, W., Sontag, H., "Multi-Storey Buildings in Steel", Second Edition, Collins, London 1985.

4. Lawson, R.M., "Design of Composite Slabs and Beams with Steel Decking", SCI-Publication 055, 1989. SCI Publication 055, 1989.

5. Bucheli, P., Crisinel M., "Verbundtrager im Hochbau", Schweizerische Zentralstelle fur Stahlbau (S25), Zürich 1982.

6. Huess, H. "Verbundtrager im Stahlhockbau", Verlag Wilhelm Ernst & John Berlin, Muenchen, Düsseldorf, 1973.

7. Eurocódigo 4: "Design of Composite Steel and Concrete Structures": ENV 1994-1-1: Part 1.1: General rules and rules for building, CEN (en prensa).

ESDEP TOMO 12
CONSTRUCCIÓN MIXTA

Lección 12.3: Vigas de Un Solo Vano