CAPÍTULO 2.

ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Existe una variedad importante en los sistemas modulares cada uno de ellos ha evolucionado de una manera diferente, en función de diversos condicionantes. Un ejemplo revelador es el de la construcción modular mediante prefabricados que, aunque consta de las mismas bases, ha evolucionado de manera muy dispar en Europa y Estados Unidos. Por todo ello, es fundamental estudiar cómo se han desarrollado los diversos sistemas de construcción modular teniendo en consideración aspectos sociales, económicos y constructivos.

Respondiendo a esta necesidad, en esta primera parte del estudio se efectúa un estado general del conocimiento de los sistemas de construcción modulares. Está estructurado en tres partes, una primera en la que se efectúa una revisión histórica de la construcción modular. Se comienza en sus orígenes a principios del siglo XX, con el sistema Tilt-Up, pasando por los años cincuenta que supusieron su consolidación, y los sesenta que marcaron la expansión. Posteriormente se analiza la década de los setenta, que supuso una época de crisis en el ámbito de los sistemas modulares de prefabricación pesada, para finalizar con el período comprendido entre los años setenta y la actualidad, que han marcado una reorientación en el concepto de la construcción modular.

En una segunda parte del estado general del conocimiento, se revisan aspectos generales de la construcción modular, analizando los principales conceptos asociados a estos sistemas constructivos.

Para una mejor comprensión de los mismos se efectúa, al mismo tiempo, un análisis de aspectos relacionados con los materiales, costes y tolerancias en el proceso. Para ello se realiza una revisión de las principales normativas europeas y americanas al

respecto. Posteriormente se analizan los sistemas de producción de los elementos modulares y se efectúa un repaso intensivo de las diferentes tipologías de uniones que se pueden encontrar, clasificándose en función de su respuesta estructural y de su disposición geométrica.

Por último, se finaliza con unos aspectos generales y recomendaciones sobre el sistema de construcción modular.

2.2 REVISIÓN HISTÓRICA DE LA CONSTRUCCIÓN MODULAR

2.2.1 Introducción

La construcción modular se desarrolla a lo largo del siglo XX principalmente en EEUU y Europa. Para poder comprender las necesidades y motivaciones que llevaron a la implantación de sistemas constructivos modulares es necesario conocer tanto las situaciones políticas, económicas y sociales que atravesaron las dos cunas de estos sistemas (Europa y EEUU) así como la evolución de los materiales (hormigón armado) y elementos auxiliares que se emplearon para el desarrollo de los mismos.

A lo largo de la historia el nacimiento de los sistemas constructivos ha estado siempre condicionado por diversas variables entre las que podemos destacar:

- Viabilidad económica
- Viabilidad tecnológica
- Inercias del sector de la construcción.

Es evidente que si una nueva técnica constructiva no aporta beneficios, es decir, una rentabilidad económica probada, no tendrá cabida dentro de un sector tan competitivo como es el de la construcción. Al mismo tiempo es fundamental que exista una viabilidad tecnológica, es decir, que se disponga tanto de los materiales necesarios (por ejemplo hormigón de suficiente resistencia característica) como de los recursos para una adecuada movilización de los elementos que toman parte en los diversos sistemas constructivos (por ejemplo grúas o sistemas de transporte). Estos dos aspectos no son independientes uno del otro, ya que una gran evolución tecnológica podría dar viabilidad a un sistema que anteriormente no proporcionaba ninguna rentabilidad económica, lo cual es objeto de complejos estudios.

En último término cabe mencionar un aspecto capital en el sector de la construcción como son las fuertes reticencias que presenta el sector ante las innovaciones que se van produciendo. Este hecho perjudica la implantación de nuevos sistemas y procesos constructivos.

A través de esta revisión histórica se aprecia la evolución de diversos sistemas modulares. Se podrá observar que desde el preciso momento en que se plantea un nuevo sistema constructivo su expansión y difusión viene limitada por aspectos técnicos y por las tendencias inmovilistas del sector. Para poder estudiar de una manera más adecuada

esta evolución a lo largo del siglo XX, la revisión histórica se ha estructurado en tres subapartados:

- *Orígenes: Primera mitad del siglo XX*, en la que se recogen los orígenes de la construcción modular en dicha etapa con la implantación del sistema Tilt-Up en los Estados Unidos y los condicionantes sociales y económicos que lo rodearon, hasta llegar a un hecho que marcó el siglo XX: la Segunda Guerra Mundial.

- *Consolidación, despegue y crisis: Años 50, 60 y 70***,** seguidamente se analiza la época que comprende la posguerra. En este periodo se produce la consolidación del sistema Tilt-Up gracias a los avances tecnológicos que permiten su total desarrollo y la expansión de los sistemas de prefabricación con su centro neurálgico en Europa, llegando así hasta la crisis de los sistemas de prefabricación pesada a principios de los 70.

- *Reorientación: De los años 70 a la Actualidad***,** por último se aporta una visión desde los años 70 hasta el momento actual, con la aparición de nuevas tendencias como los sistemas desmontables y la aparición de un sistema de construcción modular netamente español, el sistema Leiro.

2.2.2 Orígenes: Primera mitad del siglo XX

A principios del siglo XX el hormigón armado tenía ya un considerable camino recorrido. Como se refleja en [1] ingenieros como Lamblot que presentó en la exposición Universal de París de 1855 un barco de carcasa metálica recubierto por Hormigón de cal hidráulica, Coignet que presentó un forjado de hormigón armado en 1861 o Monier que en 1868 patentó en Versalles un sistema para la realización de macetas y macetones, depósitos y losas avanzaron lo que a partir de 1880 la Sociedad Waiss-Freytag y otras convirtieron en realidad el trabajo con hormigón armado.

Por aquel entonces, a finales del siglo XIX, Hennenbique comienza a construir en Hormigón Armado y Coignet y Tedesco enuncian sus primeras teorías. Pese a todo este progreso que tiene como foco Europa y se extiende a los EEUU, en el viejo continente no se dieron avances en los aspectos de construcción modular. Es por ello que se centra la atención en los EEUU que capitalizó la importancia del sistema en la primera mitad de siglo.

En este contexto se crearon diversas asociaciones para desarrollar y compartir los conocimientos necesarios para utilizar el hormigón en su máximo potencial como es el caso de ACI (American Concrete Institute) que, actualmente, prepara el centenario de su fundación (1904-2004).

En la primera década del siglo XX, como se recoge en [2], EEUU vive un momento de expansión económica bajo la presidencia de Theodore Roosevelt. En estas circunstancias nace uno de los sistemas de construcción modular de hormigón más importantes tratados en este estudio: el sistema Tilt-Up. Un joven constructor, R. Aiken, realiza sus dos primeras construcciones con este método en 1908 en Ohio e Illinois, como se trata en [3] [4] [5]. Se trata de dos pequeñas obras, un almacén comercial y una

iglesia metodista que no hacían presagiar el nacimiento de un método constructivo que mueve actualmente volúmenes de billones de dólares.

Cabe resaltar que el nacimiento de este sistema se produjo en una época de crecimiento económico fuerte y más concretamente en una de las zonas de más crecimiento de todo Estados Unidos, como se destaca en la figura 2.1, correspondiente a los estados colindantes con los tres grandes lagos (Superior, Michigan y Hurón) que es la zona de mayor producción de acero de todo Norteamérica.

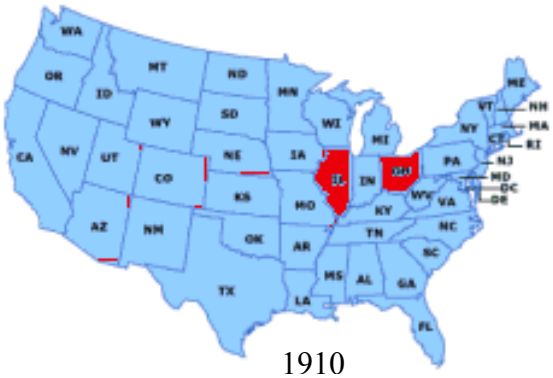


Figura 2.1. Nacimiento del Tilt-Up. Primera década del siglo XX. (Elaboración propia a partir de datos de TCA, 2002)

La inmejorable coyuntura en la que este sistema surgió, buenas perspectivas económicas y estabilidad social y política, presagiaban un desarrollo espectacular del mismo, sin embargo esto no sucedió. Mientras la economía estadounidense crecía de una manera imparable superando a la hasta entonces inalcanzable economía europea. La causa del crecimiento económico fue debida al filón que supuso la Primera Guerra Mundial (1914-1918) en la que EEUU se convirtió en el principal abastecedor de material haciendo trabajar a sus empresas a pleno rendimiento.

En esa época el valor de sus exportaciones se dobló y su balanza comercial se cuadriplicó. Al terminar la guerra se había convertido en la primera potencia mundial, había multiplicado su poderío económico y apenas había sufrido las consecuencias de la guerra excepto en el hundimiento de algunos cargueros en el Atlántico por parte de los U-Boote alemanes. Con todo ello, el sistema no prosperó. Las razones que estancaron su progreso fueron principalmente mecánicas: la inexistencia de medios mecánicos para poner en movimiento los paneles imponían unas restricciones muy elevadas y la imposibilidad de realizar movimientos laterales, simplemente de elevación y limitados a dos pisos por las poco evolucionadas grúas de la época como se aprecia en la figura 2.2.

Figura 2.2. Mecanismos de elevación de principio de siglo. (PCA, 1908)

Posteriormente, la bonanza económica hizo que el país se adentrara en un periodo aislacionista de prosperidad en el que creció de una manera desmesurada (1919-1928). A esta etapa se la denominó como los felices años 20 y el *american way of life*.

En este contexto el método Tilt-Up no se expandió de la manera esperada. ¿Por qué en una coyuntura económica tan favorable no consiguió un despegue que podría haber marcado un punto de inflexión en la construcción de la mayoría de edificios del país? A estas alturas el factor limitante continuaban siendo los mecanismos de elevación y desplazamiento de los paneles.

Si en esta situación tan favorable el sistema no se desarrolló todo lo que cabría esperar, ya no lo haría en los años siguientes: en 1929 se declaró la peor crisis que ha soportado los EEUU en toda su historia. El hundimiento de la bolsa debido a la sobreproducción y la especulación sumieron al país en una profunda crisis: más de 15 millones de parados en 1933. Los años siguientes supusieron un intento desesperado por la recuperación del país tanto económica como moralmente. La llegada al poder de F.Delano Roosevelt y los ideólogos del Brain Trust dio lugar a la confección del *New Deal*, un ambicioso plan de reactivación económica que contemplaba el impulso a la Obra Civil (Aeropuertos, Puentes, Autopistas, Presas y Túneles) y Edificación (Universidades, Bibliotecas, Museos, Escuelas y grandes superficies). Fue otra gran oportunidad desaprovechada por el Tilt-up para su despegue definitivo que tampoco se produjo en este momento.

El país se recuperó justo antes del acontecimiento que más ha marcado el siglo XX: la Segunda Guerra Mundial. La Segunda Guerra Mundial (1939-1945) trajo consecuencias desastrosas para Europa, asoló el continente castigando especialmente

zonas como el Norte de Francia, Bélgica, Holanda, los países del este y Rusia, dejando ciudades asoladas como se pone de manifiesto en la figura 2.3.

Figura 2.3. Ciudades alemanas después de la segunda guerra mundial (Fernández et al., 1993)

El año 1945 con Europa asolada por la guerra, el presidente Truman, llegado al poder tras la repentina muerte de Roosevelt, prometió ayudas para la reconstrucción del viejo continente que pronto se plasmaría en el Plan Marshall. De esta manera facilitó la vuelta de Europa a una economía de paz. Sin embargo, como resultado de la guerra Europa quedó dividida en dos fracciones mediante lo que se denominó el telón de acero, a un lado quedaron Francia, RFA y Reino Unido y al otro la RDA, Bulgaria, Yugoslavia, Polonia, Rumania y Checoslovaquia como países más representativos.

La necesidad de reconstruir muy rápidamente países devastados por la guerra, para poder satisfacer las necesidades de alojamiento de muchas familias, hizo que muchos países se inclinaran por una opción que se popularizó sobremanera: la prefabricación.

Mientras Europa intentaba renacer de las cenizas, cosa que tardaría por lo menos una década, en Estados Unidos se producirían dos inventos que finalmente harían despegar el método Tilt-Up: el camión hormigonera y las grúas móviles como se expone en [3] [4].

Estos elementos, tan usuales hoy en día en cualquier obra, proporcionaron a los constructores la capacidad de manejar mayores cantidades de hormigón en la obra, elevar los paneles de una manera eficiente así como la posibilidad de emplear el método en zonas relativamente alejadas de centrales de producción de hormigón. De este modo, el método conoció una expansión nunca antes vivida, aunque cabe recordarlo, cuatro décadas después de su nacimiento.

2.2.3 Consolidación, despegue y crisis: Años 50, 60 y 70.

Estas tres décadas supusieron un crecimiento espectacular del Tilt-up sobretodo en los llamados sun-belt states (cinturón del Sol), que comprenden una franja que va desde la costa Este a Oeste de los EEUU y entre los que encontramos a California, Nuevo Méjico, Arizona, Tejas y Florida, por nombrar los más importantes. Estos estados sufrieron una migración importante desde finales de los años 50 hasta finales de los 70. Millones de personas tanto de los estados del norte como de Méjico llegaron a estos nuevos estados.

Las industrias, fundamentalmente la bélica y la aeronáutica, se trasladaron al sur en busca de mano de obra más barata de la que encontraban en el norte y también de grandes superficies en las que instalar sus fábricas y almacenes con un menor coste del suelo. De esta forma el método Tilt-up se desarrolló durante estos años, como se recoge en la figura 2.4, especializándose en la construcción de grandes superficies de una y dos plantas destinadas principalmente a industrias y almacenes. Esta especialización a la vez que lo popularizó le supondría un lastre del cual hoy en día todavía no se ha desprendido: la consideración como un método exclusivamente para ese tipo de construcciones.

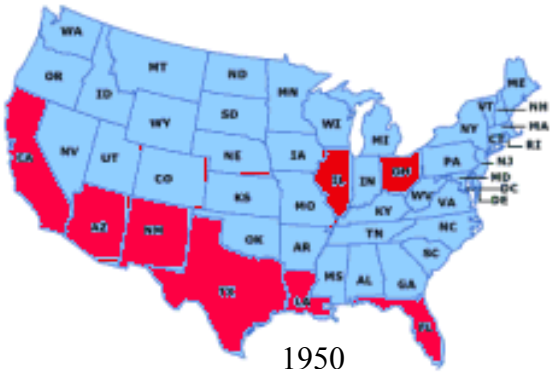


Figura 2.4. Nacimiento del Tilt-Up. Años 50 del siglo XX. (Elaboración propia a partir de datos de TCA, 2000)

Durante los años 70 todos estos estados comenzaron a recibir una serie de inmigración desconocida hasta entonces, que fue la llegada de jubilados en busca de un clima más propicio, todo esto generó una industria turística donde se crearon una inmensidad de centros comerciales de una y dos plantas que se construyeron casi exclusivamente mediante Tilt-Up.

Por su parte en Europa se comenzaban a observar movimientos referentes a la construcción modular. En el año 1957 se creó la CEB (Comité Euro-Internationale du Betón) como un organismo análogo al ACI en Europa. Su objetivo era también promover estudios sobre las aplicaciones del hormigón conjuntamente con otra asociación hermanada: FIP (Féderation Internationale de la Précontrainte). Posteriormente estas dos asociaciones se fundirían en 1998 para crear la FIB (Féderation Internationale du Betón).

Durante el periodo de 1950 a 1970, los sistemas de construcción a base de elementos prefabricados de grandes dimensiones gozaron de una importante implantación en los países de la CEE y del este de Europa, tal y como se trata en [6]. En estos últimos países se erigió en una técnica constructiva dominante. Dictadores como Ceaucescu, en Rumania, crearon enormes suburbios a las afueras de las grandes ciudades mediante sistemas prefabricados (sirva de ejemplo los suburbios de Bucarest).

Se trataba de una prefabricación pesada, cerrada e integral.

- Pesada, por fundamentar su construcción en la combinación de grandes paneles bidimensionales, casi siempre estructurales, buscando con ello minimizar el número de unidades distintas, reducir mano de obra, acelerar la construcción y explotar los potentes medios de elevación disponibles.

- Cerrada, por utilizar un escasísimo número de elementos distintos a disponer según una rígida combinación que apenas admitía variaciones.

- Integral, por basarse en un uso exclusivo del hormigón prefabricado, sin contemplar su posible combinación con otras técnicas constructivas.

Desarrollada principalmente en Alemania para satisfacer la intensa necesidad de vivienda que siguió a la Segunda Guerra Mundial, esta técnica se generalizó rápidamente a los países del Centro y Este de Europa ante una situación semejante.

En la Europa Mediterránea occidental estas necesidades no se hicieron sentir tan fuertemente. Sin embargo, los movimientos migratorios internos que tales países experimentaron durante la época desarrollista, de los años sesenta, propiciaron un uso muy semejante de la prefabricación. También en España surgieron fabricantes de elementos pesados de prefabricación para la construcción de viviendas, cuyo producto estuvo destinado, en una parte importante, al rápido levantamiento de barrios obreros como los que abundan en el entorno de Barcelona.

La mentalidad que subyacía en esta práctica se plasmó claramente en la tipología de las construcciones erigidas. Se dio así lugar a unas formas constructivas casi incompatibles con una práctica arquitectónica creativa, y en las que primaba la productividad por encima de la confortabilidad. El desarrollismo que primó en esta época no se vio apenas interferido por una actitud consciente de los usuarios frente a la calidad.

En los países del Este, la necesidad sentida por los gobiernos comunistas de satisfacer a toda costa la demanda de vivienda ha mantenido esta forma de prefabricación viva hasta finales de los años 80, cuando todos los regímenes comunistas comenzaron a desmoronarse.

Puede decirse que la práctica europea del hormigón prefabricado, debido fundamentalmente a unas necesidades sociales muy inmediatas, explotó este material y esta técnica constructiva por sus posibilidades productivas, despreciando a menudo sus potenciales aptitudes en el orden arquitectónico y funcional. Siendo tal su utilización, difícilmente el proyectista o constructor podían concentrar un esfuerzo adicional en la

materialización de las juntas, conexiones y acabados en general. Por ello estos aspectos de la obra, a pesar de su importancia en la calidad y funcionalidad del conjunto, merecieron un olvido bastante sistemático.

Como consecuencia ciertas voces críticas afirmaron que la construcción mediante elementos prefabricados de hormigón se hallaba necesariamente asociada a una deficiente calidad y durabilidad. No obstante, se demostró que la causa no radicaba tanto en el material y en la calidad de los elementos fabricados como en los malos hábitos y contradicciones despertados por la utilización mantenida, cuya consecuencia era la práctica imposibilidad de llevar a cabo adecuados acabados en obra.

Por su parte el método que eclosionó en Europa durante toda esta época, la prefabricación, no consiguió hacerse un hueco destacable en el rígido mercado norteamericano de la construcción. Por tanto, no siguió la misma evolución que en Europa y no ha alcanzado un desarrollo tecnológico comparable. De las pocas incursiones de la prefabricación estilo europea en los EEUU que se tienen constancia son los Laboratorios médicos Richards (Filadelfia 1957) [7], como se aprecia en la figura 2.5.

Figura 2.5. Prefabricación total. Maqueta Laboratorios Médicos Richards, Filadelfia (Universidad de Pensilvania, 2002)

El desarrollo que la prefabricación ha tenido en los Estados Unidos ha sido peculiar. Los proyectistas norteamericanos no han asociado la prefabricación a una edificación múltiple y económica sino que han apreciado las cualidades de durabilidad, resistencia al fuego, prestaciones estéticas, capacidad de aislamiento y por encima de

todo la celeridad de construcción alcanzable. Todo ello ha dado lugar a un uso del prefabricado, principalmente, en la construcción de grandes edificios explotando su vertiente arquitectónica

Siendo la cultura de la vivienda en esta zona del mundo, tan distinta a la de Europa central y el mediterráneo, no debe sorprender que la utilización del hormigón prefabricado se haya liberado, prácticamente, de una tradicional asociación a la edificación múltiple y económica. Por el contrario, explotando al máximo sus cualidades arquitectónicas, este material ha hallado una notabilísima aplicación en la construcción de edificios importantes de media o gran altura, como se pone de manifiesto en la figura 2.6.

La aplicación más frecuente en la construcción de edificios ha sido en forma de hormigón arquitectónico para paneles de cerramiento, estructurales o no estructurales. Se reconocen y realmente se explotan casi las ilimitadas posibilidades estéticas.

Figura 2.6. Prefabricación estilo EEUU. Edificio de Transamérica, San Francisco.(Corbis Collection,1999)

2.2.4 Reorientación : De los años 70 a la Actualidad.

A partir de los años 70 la prefabricación trata de acomodarse y se muestra más flexible, más elástica. Los métodos de producción cambian en la línea de permitir una adecuación entre producción industrial y diversidad de producto. Sin embargo en 1973

se produjo un acontecimiento que afectó gravemente a la economía mundial: la crisis del petróleo, que hizo bajar de una manera considerable el ritmo de construcción. Este hecho afectó gravemente a este tipo de prefabricación, dado que su viabilidad había descansado en unas posibilidades de producción masiva que desaparecieron en esta época.

Los países comunistas, en cambio, continuaron con una política de producción masiva de viviendas mediante grandes elementos inalterables a la crisis que se produjo.

Sin embargo, como resultado de la crisis nació una forma de prefabricación distinta. Ante una situación socio-económica transformada, los fabricantes supieron responder en variedad y capacidad para satisfacer demandas pequeñas y diferenciadas. La antigua cultura de la prefabricación ante la imposibilidad de instalarse en una producción masiva de elementos semejantes no pudo superar la crisis de los setenta. La nueva cultura de la prefabricación pretende ser más flexible y basarse en el uso de elementos de construcción que, con pocos cambios, sean adaptables a muchos tipos de obra. Todo se integra en el concepto de prefabricación abierta.

Por su parte en EEUU, el Tilt-Up seguía implantándose de una manera definitiva y progresiva por todos los estados de la unión, si bien es en los sureños donde goza de mayor aceptación. El concepto de prefabricación sigue evolucionando de la misma manera creándose edificios singulares mediante este método constructivo.

Actualmente la construcción modular tiene una presencia desigual tanto en Europa como en Estados Unidos.

Si analizamos primero el mercado estadounidense vemos que el Tilt-Up se ha implantado definitivamente en todos los estados de la Unión, aunque su mayor implantación se ha dado en los estados del sun-belt, representando un 75 % de las construcciones de una o dos plantas, llegando este porcentaje a ser del 90 % en el estado de California. Sin embargo, en el norte no ha tenido esta implantación dándose así que el porcentaje total de construcciones de 1 o 2 plantas que se construyen mediante el Tilt-Up se sitúa entorno al 45 %, tal y como se muestra en la tabla 2.1.

Zonas EEUU	% Construido con Tilt-Up (edificios 1 o 2 plantas)
Sun Belt States	75
California	95
Todo EEUU	45

Tabla 2.1. Datos cuantitativos. Implantación del Tilt-Up en EEUU (TCA,1990)

En cuanto a la prefabricación ha seguido su evolución característica, en la que destacamos su aplicación cada vez más apreciable en grandes construcciones de edificios singulares, como se puede apreciar en la figura 2.7.

Figura 2.7. Prefabricación estilo EEUU. IJL Façades Center, North Carolina. (Corbis Collection, 1999)

En cuanto al mercado europeo se refiere, el método Tilt-Up tiene una aplicación nula y la prefabricación ha tenido una implantación desigual. En algunos países nórdicos como Suecia se llega a utilizar en un 90 % de sus construcciones pero en países como España tiene una escasa acogida.

Podemos decir que en el mapa de Europa, la implantación de la prefabricación desciende a medida que nos acercamos al Mediterráneo. Los países nórdicos, con Suecia y Noruega a la cabeza, han desarrollado su industria de prefabricados hasta situarla en cotas de una gran importancia. A una cierta distancia se sitúan Alemania, Francia e Italia, esta última cuna de numerosos sistemas de prefabricación pesada (Fiorio, entre otros). En países como España la prefabricación no ha tenido una implantación significativa.

Finalmente cabe destacar una nueva tendencia constructiva denominada construcción mixta que se basa en el aprovechamiento del trabajo conjunto del acero y hormigón, tradicionalmente utilizada en la construcción de puentes. La construcción modular no ha desaprovechado las múltiples cualidades que ofrece los sistemas mixtos y han aparecido nuevos sistemas como pueden ser *Profiled composite walls* y el sistema español Leiro.

2.3 EL SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN MODULAR

Se entiende por construcción modular, al procedimiento constructivo en el cual la unidad estructural fundamental del mismo se repite de una manera regular a lo largo de todo el proyecto. Los módulos pueden ser elementos de distinta naturaleza y geometría pero suelen ser elementos de geometría rectangular como placas, paneles y losas. En estas tipologías se centrará el presente estudio.

El concepto de construcción modular va indisolublemente unido al concepto de prefabricación en el sentido de disponer elementos fabricados en cualquier lugar diferente de su posición final según [3]. Este concepto abarca tanto la fabricación en plantas de prefabricados como en la misma obra antes de su colocación en su emplazamiento final, en esta última modalidad se engloba la llamada construcción Tilt-up.

2.3.1 Principios generales

Cada sistema constructivo tiene sus propias características que influyen en menor o mayor medida en el diseño estructural: dimensiones geométricas, condiciones de servicio, funcionalidad, estética.

El proyectista ha de considerar frente a cada proyecto las posibilidades, restricciones y ventajas de la construcción modular (los aspectos asociados a la fabricación, transporte, elevación y respuesta en servicio) antes de diseñar en construcción modular, lo que conlleva una buena organización del equipo que proyecta con una concepción global e integrada de todo el proceso.

Un buen diseño debe contemplar detalles lo más sencillos posibles ya que una de las principales ventajas de la construcción modular es inherente a la simplicidad de los detalles y montaje. Por otra parte, la rapidez de construcción es el parámetro principal en muchas obras de edificación y ha de ser considerada de forma cuidadosa. La rapidez de ejecución de una obra que es tradicionalmente una ventaja en los sistemas de construcción modulares, se pierde si los detalles constructivos son complejos o no están bien definidos y, particularmente aquellos que se refieren a las uniones entre módulos. Asimismo en estas uniones reside, en gran medida, la posible respuesta de la estructura.

Un aspecto de marcado interés en la optimización y racionalización del diseño con este tipo de construcciones es la modulación del proyecto, tanto en lo que se refiere a las partes estructurales como en aquello que incide en los acabados.

El uso de una planificación modular [8] no está reñido con la libertad del proyectista ya que constituye una herramienta para alcanzar una buena calidad y reducción de costes, así como una simplificación de uniones y detalles constructivos. Como norma general es recomendable tender hacia una estandarización de los elementos usados. Esto es aplicable también, entre otros, a las alturas de los edificios, medidas de las escaleras y distancias entre mallas usadas para el diseño de la modulación.

Si bien la modulación utilizada en principio podría estar desvinculada de la producción de los elementos modulares, es recomendable establecer la modulación pensando en unos elementos concretos, lo que supone además una reducción de costes globales del proceso.

La base para una buena modulación es establecer una malla adecuada, donde el edificio se posiciona respecto a los ejes principales de la misma. Las distancias de modulación suelen ser también iguales. Ello simplifica el número de componentes diferentes a producir y los detalles constructivos, con lo que todo el proceso se muestra mucho más eficiente. También se suelen definir dos tipos de mallas, una principal para elementos estructurales y otra secundaria para los elementos no estructurales, de este modo una planta cualquiera de un edificio tendría el aspecto esquematizado en la figura 2.8.

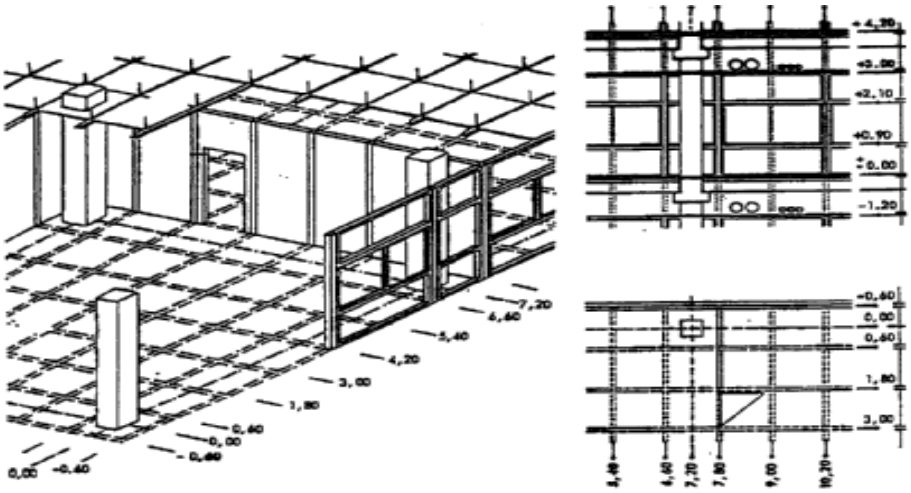


Figura 2.8. Construcción modular. Esquema de modulación en una planta (Vambersky et al.,2002)

La modulación, si está bien concebida, es un aspecto importante que previene en cierta manera diversos defectos típicos en ejecución de obras in situ de edificación, como pueden ser los defectos de alineación en pilares que provocan en muchas ocasiones transmisiones anómalas de cargas en la estructura y por tanto afectan a la respuesta estructural del sistema.

La construcción modular presenta una gran variedad de aspectos a analizar, partiendo del ámbito de aplicación del sistema y pasando por características del mismo como son la calidad, la rapidez constructiva, la flexibilidad y su integración medioambiental.

Ámbito de aplicación

La elección de un determinado sistema constructivo (in situ, construcción modular) es fruto de un análisis en el cual convergen criterios de distinta índole (económicos, técnicos,). En este sentido, a continuación se analizan diferentes facetas relativas a criterios de diseño desde las vertientes constructiva y económica.

Con relación a la vertiente constructiva se contemplan seguidamente aspectos vinculados a la calidad, la rapidez de construcción, la flexibilidad del sistema, la integración en el entorno y el tamaño del elemento construido.

Calidad

La construcción modular presenta, en general, unos mayores requisitos que una obra convencional in situ. Ello se basa, fundamentalmente, en el control de calidad que puede establecerse en la fabricación y producción en serie de los elementos modulares. Este concepto influye favorablemente en varios factores principales como son: resistencia, rigidez, durabilidad (densidad del hormigón) y estética (gran nivel de acabados); esta idea se pone de manifiesto en la figura 2.9.

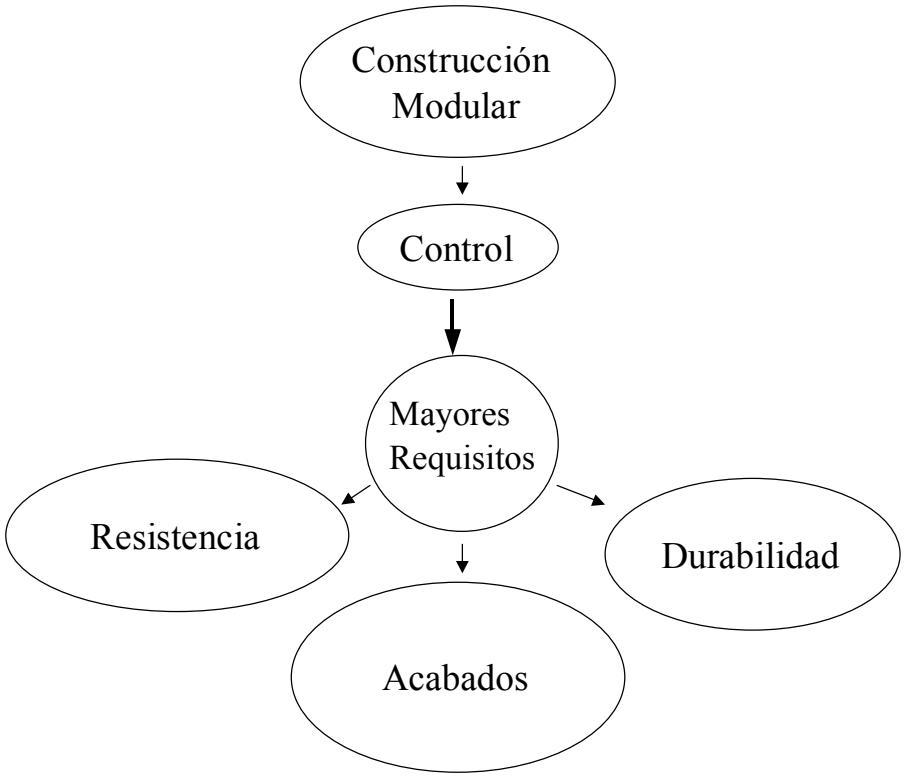


Figura 2.9. Esquema de construcción modular. (Elaboración propia, 2003)

Rapidez de Construcción

En general, la construcción modular incrementa la rapidez de ejecución de un proceso constructivo, pudiendo propiciar reducciones del plazo de ejecución realmente muy significativas en relación con una ejecución tradicional in situ como se esquematiza en la figura 2.10. Sin embargo, en el plazo total (teniendo en cuenta concepción, diseño, proyecto y ejecución) debe contemplarse específicamente un tiempo de preproceso que puede ser relativamente largo, entendiendo por preproceso las fases de concepción, diseño y proyecto de la obra con el sistema modular.

Algunos aspectos que conciernen a la modulación tienen que ser considerados ineludiblemente en una primera fase como son los relativos al cálculo y diseño de

elementos modulares. Ello implica una dedicación de tiempo importante de las personas involucradas en el proyecto, lo que actualmente no se suele hacer dada la progresiva disminución del volumen de dinero destinado a la fase del proyecto. En los últimos años, la calidad de los proyectos se está resintiendo, aspecto que no se debe a la preparación de los ingenieros que se dedican a ello, sino a los escasos recursos económicos que se destinan. Esta es una práctica muy negativa dado que el dinero no invertido en planificación y proyecto se multiplica si posteriormente se detecta algún defecto en la fase de ejecución.

Estos aspectos son realmente importantes, pues si para el constructor lo realmente prioritario suele ser el plazo de ejecución de la obra, para el cliente lo realmente importante es el tiempo transcurrido entre el encargo de un proyecto y la entrega del producto final (obra finalizada). Asumiendo pues, que el tiempo total, preproceso más ejecución, para una construcción modular puede equipararse al de una obra normal. La principal ventaja en términos financieros es la menor cantidad de dinero gastado en intereses, debido a que los intereses de la mayor suma de la inversión tiene que ser pagada en un periodo de tiempo inferior al de una obra convencional.

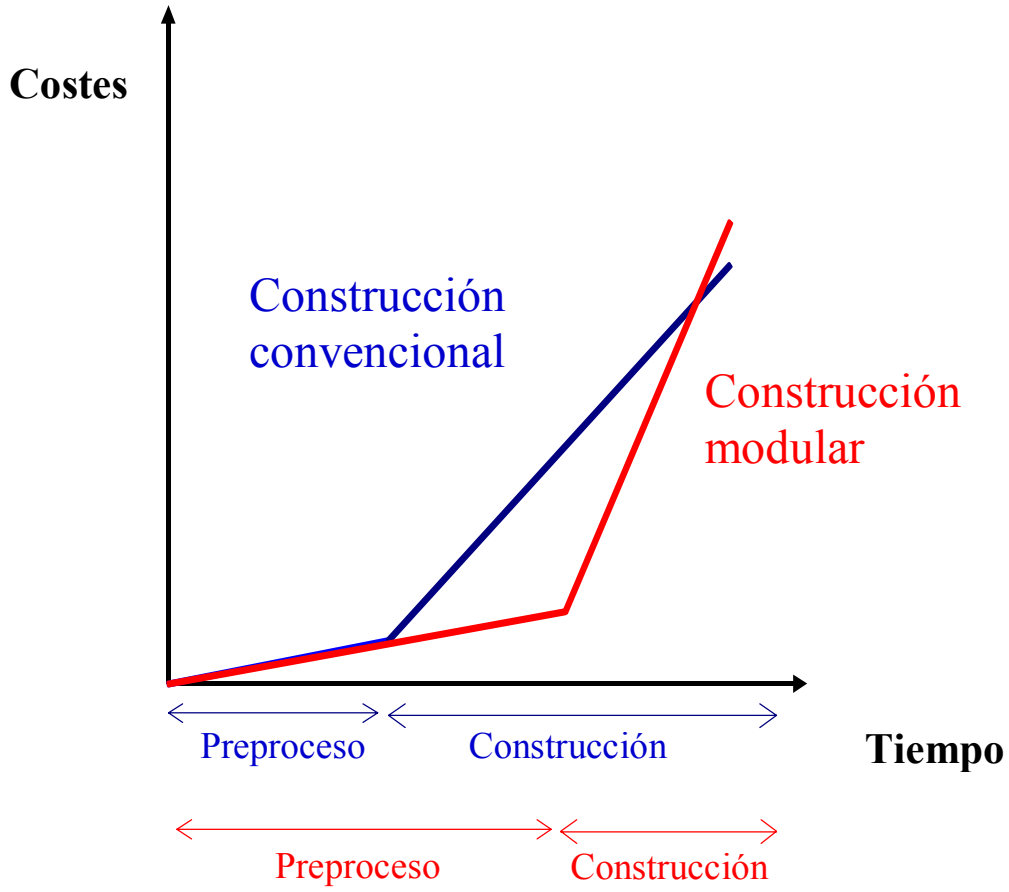


Figura 2.10. Construcción modular. Relación costes-tiempo total. (Vambersky et al., 2002)

Flexibilidad

Las construcciones modulares son fáciles de ampliar debido a la relativa simplicidad de sus conexiones. También cabe destacar la multitud de posibilidades en cuanto al diseño que actualmente se abren con este tipo de construcciones, principalmente, en función de las geometrías de los diferentes elementos modulares susceptibles de ser utilizados. Así mismo, ofrecen también la posibilidad de ser integradas como ampliación de otras construcciones ya existentes.

Aspectos medioambientales

La construcción modular se considera una modalidad constructiva que contempla el respeto al medio ambiente e integración en el territorio. Como ejemplo claro de este aspecto tenemos el sistema de construcciones modulares desmontables, los elementos modulares pueden ser reutilizados o demolidos en zonas diferentes a la de la construcción del edificio. Hecho que provocaría una reducción de contaminación acústica e incluso, como se comentará en capítulos posteriores, con la no liberación a la atmósfera en el proceso de demolición de sustancias tóxicas que se utilizaron en el sector de la construcción en los años 70, como es el caso del amianto.

Tamaño del elemento construido

Para llevar a cabo las obras realizadas mediante construcción modular se requiere un cierto espacio para el movimiento de los módulos. En zonas donde el espacio es limitado, como por ejemplo ciudades, el mecanismo de elevación y encaje de los módulos se ha de diseñar de una manera minuciosa.

Por otra parte desde la vertiente económica, pueden considerarse criterios relativos a la repetitividad de los elementos, características de la empresa constructora y aspectos de organización :

Repetitividad

En un sistema de construcción modular este aspecto es primordial, ya que en él se basa el hecho de la reducción de costes de fabricación de los módulos. A mayor repetición del elemento fabricado, un menor coste por elemento producido. Es también un aspecto a tener en cuenta el hecho de que una mayor repetitividad implicará un control más eficaz del mismo.

Empresa Constructora

Otro aspecto a considerar es que la empresa constructora que ha de llevar a cabo el proyecto necesita la experiencia, recursos y mano de obra especializada para llevar a cabo este tipo de productos, dado que la filosofía del proceso de ejecución modular es bien distinta de los hábitos constructivos adquiridos en la construcción tradicional in situ.

Organización

La organización, si bien siempre es una variable principal, en este caso resulta fundamental, ya que una buena organización nos llevará a una gestión técnica y económica óptima de la obra.

2.3.2 Materiales

Los elementos fundamentales utilizados en la construcción de los elementos modulares son: el hormigón y el hacer. Este último puede ser encontrado tanto en forma de perfiles metálicos como laminados, en el caso de los sistemas modulares mixtos.

Una de las ventajas de la construcción modular es el elevado nivel de control que superan los materiales previamente a la fabricación de los elementos así como al final del proceso de producción. Actualmente, las numerosas prestaciones estéticas y de calidad que en estos momentos se le demandan a la construcción han provocado la aparición de nuevos elementos como son los agregados, que administrados al hormigón permiten conseguir colores y texturas, en definitiva una infinidad de cualidades estéticas.

Si se busca una especial textura, las cualidades de los diversos materiales y mezclas deben ser estudiadas previamente con el fin de obtener un resultado satisfactorio. En el caso de la aplicación de fibras, la calidad de las mismas ha de estar garantizada y vigilar sus características de envejecimiento.

2.3.3 Costes

La mayoría de las veces la manera de inclinarnos por un método constructivo u otro a igualdad de las demás condiciones viene determinado por los costes. La situación final se determinará mediante los factores:

Repetición

La repetición es algo fundamental en la construcción modular dado que un factor importante son los costes del molde donde se fabrique el módulo, por tanto, a mayor repetición de los elementos menor coste del molde.

Contratista

La construcción modular implica unos conocimientos específicos que si no los tiene el contratista siempre tenderá a la fabricación in situ. Esta es una estrategia claramente equivocada y que supone una autolimitación del mercado. Cabe mencionar el ejemplo de una empresa norteamericana, Seretta Constructions (con sede en Florida), que considerada como una empresa de construcción de dimensiones reducidas optó por especializar una división de sus actividades en el Sistema Tilt-Up y en la actualidad es un constructor de referencia en el todo el sureste de los EEUU.

2.3.4 Tolerancias en construcción modular

Una exigencia particular de los sistemas modulares es la necesaria coordinación dimensional entre los elementos componentes y los que se van a utilizar en su constitución.

Para ello, se han de realizar estudios de tolerancias que van a determinar el campo de variabilidad admisible para la aceptación de los elementos en su fabricación o en su puesta en obra. Estos estudios son necesarios desde un punto de vista tanto geométrico, como estructural. Los límites de la tolerancia se ha de imponer entre dos límites, el primero a partir del cual la unión no cumpla estructuralmente o funcionalmente y el segundo el límite de perfección impuesto por condiciones económicas. La tolerancia es, por tanto, la desviación permisible. Las tolerancias son una parte primordial de las especificaciones dimensionales y de los requisitos de calidad.

Los estudios sobre tolerancias tal y como se discute repetidamente en [8][9], se servirán de la estadística y de la teoría de errores para estudiar y evaluar el significado y límites de las dimensiones medidas sobre los componentes. Los distintos valores obtenidos en la medición de los componentes o de su situación permitirán conocer en relación a la distribución de Gauss los errores accidentales de fabricación o montaje.

Para la medición se utilizará como unidad límite, el milímetro, de acuerdo con las exigencias dimensionales de la industria y las condiciones de medida de los medios materiales empleados.

2.3.4.1 Tratamiento de las tolerancias dimensionales.

El tema de las tolerancias presenta varias vertientes, una teórica y otra práctica. El tratamiento teórico es similar al de cualquier sector productivo industrial en el que se emplea. Se trata de un problema de estadística aplicada y de condiciones de fabricación y montaje.

Es bueno conocer, sin embargo, el enfoque práctico que se le ha dado a este tema en los diversos países y en diferentes épocas:

CEB y PCI

Estas dos instituciones CEB (Comité Euro-International du Betón) y PCI (Precast concrete Institute) que se fundieron en el FIB (Féderation Internationale du Betón) propusieron una norma para fijar unas tolerancias:

El objetivo básico de la normativa del CEB era la ejecución de estructuras mediante grandes paneles con lo cual se fijaba la tolerancia sobre la dimensión más grande del mismo o sobre la diagonal de uno de ellos mediante: $\pm 1/8 \cdot (\sqrt[3]{d})$ siendo d la longitud que se trate en cm.

Para el caso de los espesores de los elementos, la tolerancia fijada era $(+0.5\ , -1/8\sqrt[3]{h}\ )$, estando el espesor h expresado en cm. Como se pone de manifiesto en la figura 11 la tolerancia superior es fija mientras que la inferior está marcada por el espesor.

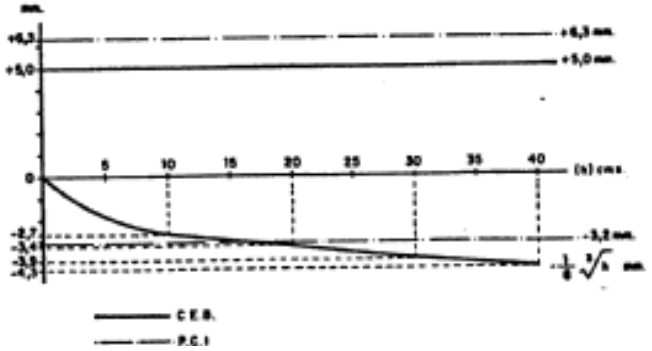


Figura 2.11. Criterios del CEB-PCI para espesores de elementos (Salas Serrano, 1984)

Así mismo los efectos de coplanariedad entre aristas opuestas ha de ser tal que la distancia de un vértice de un rectángulo formado por el paramento de un panel al plano determinado por los otros tres vértices sea inferior a $1/250$.

Norma rusa.

La normativa soviética es importante por dar un enfoque distinto. El factor fundamental en esta normativa no son las magnitudes, sino el tipo de usos de los elementos, de esta manera se fijan las tolerancias en función de las mediciones y de criterios dictados por la práctica. En la tabla 2.2 se recogen los principales aspectos de esta normativa.

Tipo de elemento	Errores admisibles (mm)		
	Sobre el largo	Sobre el ancho de la sección	Sobre el espesor o altura de la sección
Losa de forjado	± 10	± 5	± 5
Losa de cubierta	± 10-5	± 5-10	± 5
Panel de muro	± 10	± 5	± 5
Bloques de cimentación - Dimensiones Totales	± 15	± 15	± 10
Soportes - Dimensiones Totales	± 10	± 5	± 5
Viga principal	± 10-5	± 5	± 5

Tabla 2.2. Tolerancias para distintos elementos. Normativa soviética (Salas Serrano, 1984)

Normativa ISO

La normativa ISO introduce un factor interesante que es el concepto de gradación de niveles de calidad, dependiendo del nivel de calidad requerido se tendrá una menor o mayor rigidez en las tolerancias. Para la tolerancia introduce la siguiente fórmula:

$$i = 0{,}45\sqrt[3]{L} + 0{,}001L \qquad [2.1]$$

Donde i es la tolerancia básica y L la dimensión nominal en mm. Para el concepto de gradación de calidad, introduce lo siguiente:

$$T = \sqrt[k-1]{10 \cdot i^{5}} \qquad [2.2]$$

donde T es tolerancia en mm y k el nivel de calidad.

Norma Alemana

La norma alemana ha sentado precedente por el rigor y la profundidad con la que ha enfocado el tema. El novedoso criterio consiste en relacionar la tolerancia con el proceso seguido para la fabricación de los elementos y con sus dimensiones. Como podemos observar en la figura 13 vemos que los procesos varían desde GK 1 hasta GK8 donde por ejemplo GK8, que es el proceso contemplado de mayor calidad supone la fabricación de los elementos con moldes de acero ensamblados mediante uniones atornilladas.

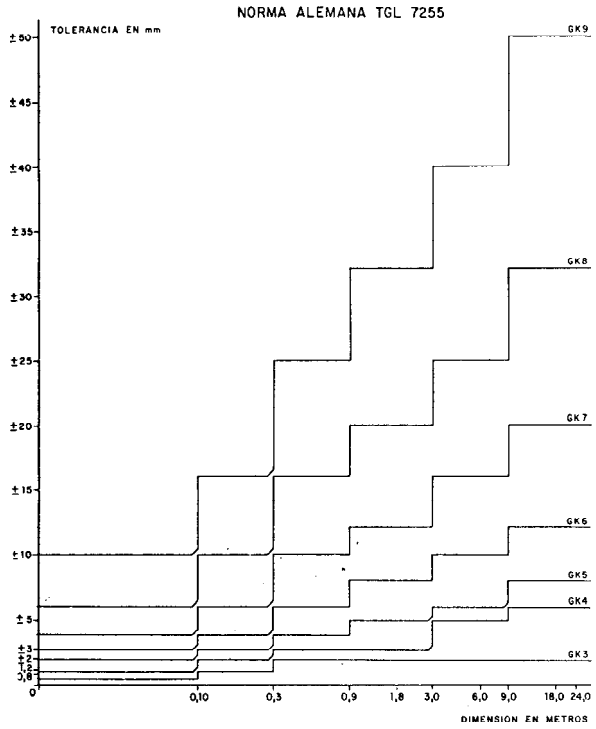


Figura 2.12. Tolerancias según Normativa Alemana. (Salas Serrano, 1984)

Normativa holandesa

La normativa holandesa comparte el concepto de gradación de los niveles de calidad con la normativa ISO y es idéntica en sus planteamientos para la elementos de dimensiones inferiores a 0,5 m. Sin embargo, para dimensiones superiores introduce:

$$i = aL + b \qquad [2.3]$$

con los coeficientes *a, b* se obtienen de análisis de datos de medida.

Normativa ACI

La comisión ACI 117 redactó un documento marco para las tolerancias dimensionales llamado: Standard Tolerances for Concrete Construction and Materials, posteriormente la comisión ACI 551 concluyó que en el caso de Tilt-Up se podría utilizar ese documento. La normativa es simple y se basa en considerar que la tolerancia depende únicamente de tamaño de los elementos. En la tabla 2.3 se recoge dicha normativa.

	Condiciones	Tolerancia
Longitud y Altura	>3 m	+0, -10 mm
	3 a 6 m	+0, -12 mm
	> 6 m	+0, -15 mm
Espesor	Global	± 5 mm
Longitud de la diagonal	>3 m	± 10 mm
	3 a 6 m	± 15 mm
	6 a 12 m	± 20 mm

Tabla 2.3. Tolerancias para distintos elementos. Normativa ACI (Musser,1992)

2.3.4.2 Conclusiones

En todo elemento existen diferencias entre las dimensiones especificadas en proyecto y las que posteriormente se alcanzan. Estas diferencias son inherentes a los errores acumulados en los procesos de construcción y es imposible eliminarlas por completo, es por ello que se han de establecer unas tolerancias, para que estas desviaciones sean lo menores posibles. En definitiva, proceder a una acotación de las mismas.

Este proceso es especialmente crítico en el caso de la construcción modular. Las desviaciones deben estar previstas y calculadas para una factible construcción del edificio. El ancho de las juntas entre elementos ha de estar determinado para evitar problemas durante la elevación de los elementos así como para poder corregir alguna posible desviación adicional.

El hecho de poder determinar bien las tolerancias es básico dado su doble perfil:

- Unas tolerancias desproporcionadamente estrictas llevarían a un incremento de costes innecesario en la fabricación del elemento.

- Un excesivo relajamiento de las tolerancias conduciría a problemas constructivos, debido al hecho de que habría que rechazar muchos elementos, a la vez que surgirían problemas de ajuste y alineación durante el proceso constructivo.

Una vez analizado como tratan las normativas el tema de las tolerancias cabe destacar que la mejor cualidad que puede tener una normativa es la sencillez. Normativas como la antigua soviética y la redactada por la ACI representan a la perfección el concepto de una norma fácilmente asimilable por todas las personas implicadas en el proceso. Normativas que creen demasiadas complicaciones por su dificultad de interpretación están condenadas sin duda al fracaso.

En el gráfico comparativo de la figura 13 podemos observar como la normativa más restrictiva es la alemana seguida de la sueca y por último la menos restrictiva es la normativa Holandesa.

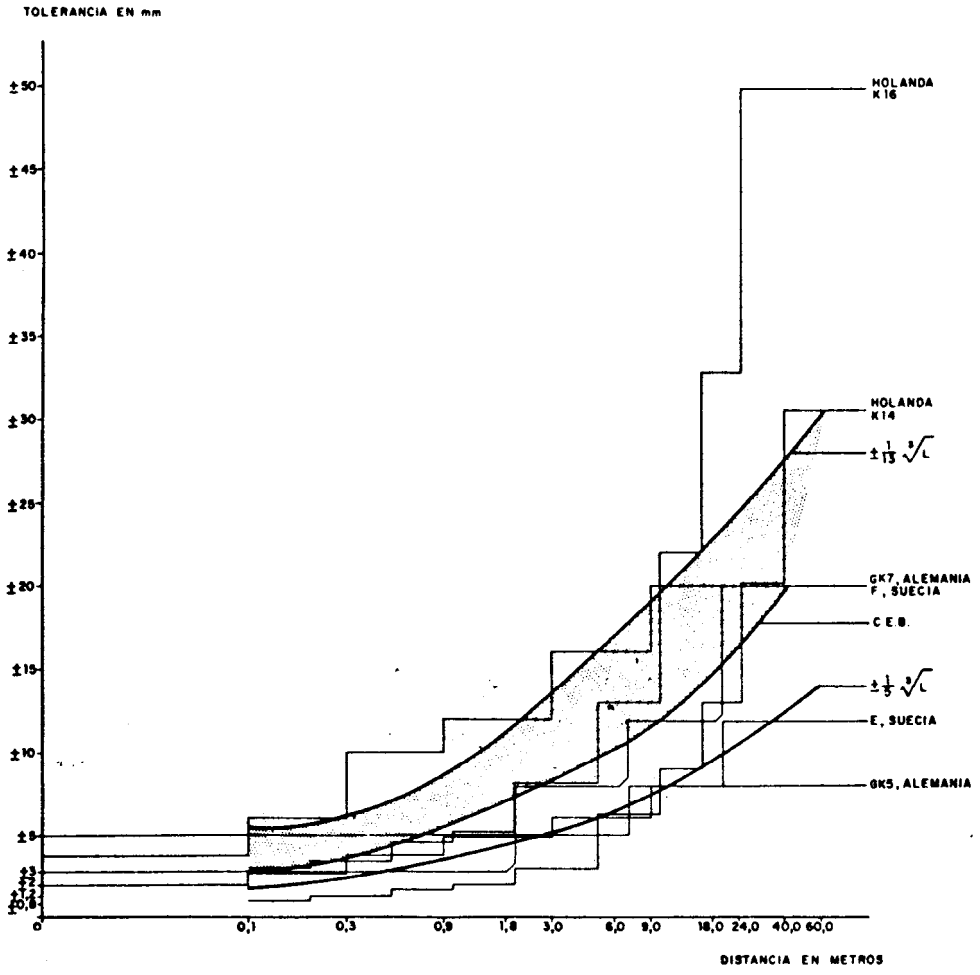


Figura 2.13. Comparativa entre diferentes normativas (Salas Serrano, 1984)

2.3.5 Características de producción

El proceso de fabricación es fundamentalmente un problema de movimientos y de coordinación entre funciones, como se pone de manifiesto en la figura 2.14.

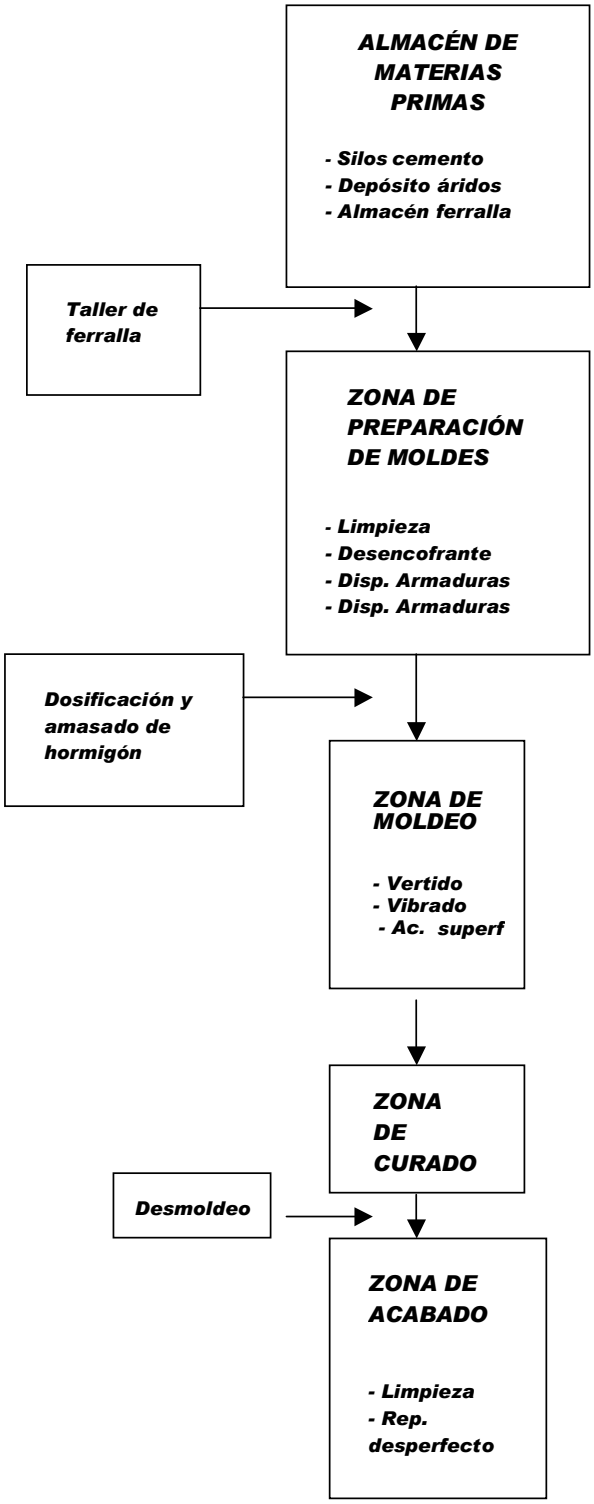


Figura 2.14. Elementos modulares. Proceso de producción (Elaboración propia, 2003)

Los elementos modulares siguen un proceso que suele ser lineal y que comienza en los almacenes de materias primas donde se dispone de los silos de cemento, los depósitos de áridos y el almacén de ferralla, posteriormente se pasa a la zona de preparación de moldes, donde se aplica a los mismos desencofrante y se efectúa una limpieza de los mismos. En una operación posterior se procede a la dosificación y amasado del hormigón y en la zona de moldeo se produce su vertido, vibrado y acabado superficial en el molde. Por último entramos en la fase de curado, para posteriormente efectuar el desmoldeo y pasar a la zona de acabados donde se produce la limpieza y la reparación de desperfectos.

Las fábricas son de diversos tipos según se especifica en [9], desde las antiguas factorías soviéticas que producían todos los elementos de una urbanización, a las pequeñas fábricas que se dedican a la producción de elementos específicos. Sin embargo, podemos distinguir entre tres tipologías básicas: fijas, semifijas y móviles.

Fábrica fija:

Una fábrica fija suele cumplir diversas características:

- La demanda a la que atiende suele ser variada respecto a los promotores, intermitente con el tiempo y dispersa geográficamente, con un radio de acción más o menos grande.

- Como la factoría está montada con carácter permanente debe existir siempre una estrategia de funcionamiento a largo plazo.

- Se sitúan en las cercanías de los puntos de suministro de las materias y junto a las vías de comunicación, armonizando estos condicionantes de emplazamiento junto a las zonas de mayor consumo potencial de los productos. La mayor parte de estas fábricas se sitúan en los alrededores de las grandes ciudades.

Fábrica semifija y móvil:

- La demanda de la factoría semipermanente deberá ser de suficiente volumen para compensar los desembolsos para una nueva ubicación o un traslado.

- La estrategia está mediatizada por la provisionalidad: el período de funcionamiento es lo suficientemente corto para contemplar únicamente la situación presente.

- Se sitúan junto a las obras a las que suministran. En este caso se reducen los gastos de transportes de las piezas pudiendo ser éstas de dimensiones mayores que en una fábrica fija. El problema se plantea en el suministro de materias primas, siendo conveniente acopiar un volumen considerable de áridos y cemento, tanto mayor cuanto mayor sea la distancia desde la que se realiza el suministro.

Organización

Un concepto importante en este tipo de plantas es la organización. El estudio del recorrido de proceso de fabricación es algo fundamental y previo al diseño de la fábrica. Este aspecto es especialmente importante en el caso de los grandes paneles donde deben tratar de evitarse almacenamientos intermedios.

La fabricación debe ser concebida como una serie de operaciones sucesivas y dependientes unas de las otras. Es necesario coordinar los tiempos de las distintas operaciones con el objeto de evitar tiempos muertos y solapes.

Por lo que respecta a las instalaciones es importante evitar los llamados cuellos de botella, que pueden paralizar toda la actividad en caso de percances.

Otro aspecto importante en una fábrica de paneles de hormigón es que su funcionamiento exige el movimiento de una serie de equipos, materiales y productos entre varias zonas en las que se almacenan, manipulan o transforman. Entre ellas se distinguen las siguientes zonas:

- Acopios de primeras materias y almacenes de elementos de incorporación: clasificador de áridos, silos para cemento, depósitos de agua, almacén de acero.

- Fabricación de materias o productos semielaborados. Fabricación del hormigón, talleres de ferralla, talleres de carpintería.

- Fabricación de paneles. Estaciones de vibrado, curado, hormigonado, alisado.

- Zona de repasos y acabados. Tratamientos superficiales.

- Parques de productos acabados.

- Talleres

- Oficinas

En cuanto a los materiales cabe destacar que siguen un recorrido por los diferentes puntos de de la planta:

- *Áridos:* Su llegada a la planta se efectúa mediante camiones. Desde el almacenaje a la hormigonera el proceso suele estar automatizado, empleando por ejemplo cintas.

- *Mallazo o ferralla*: En el almacén se suelen mover con puentes grúas o con carretillas elevadoras. El proceso de corte, doblado y soldado suele ser manual y el traslado del almacén al centro de producción se emplean puentes grúas carretillas y transporte manual.

- *Moldes*: Los moldes suelen moverse poco, sólo en caso de reparaciones.

- *Productos terminados:* Los productos son enviados a la zona de almacenamiento mediante grúas. Desde la fábrica a obra se trasladan mediante semirremolque e incluso algunos mediante ferrocarril.

Las formas de trabajo y transporte descritas suelen ser las más usuales y adquieren una mayor o menor importancia dependiendo del método de producción que se emplee. La situación física, en planta o alzado de los elementos es un nuevo elemento de diferenciación de los sistemas.

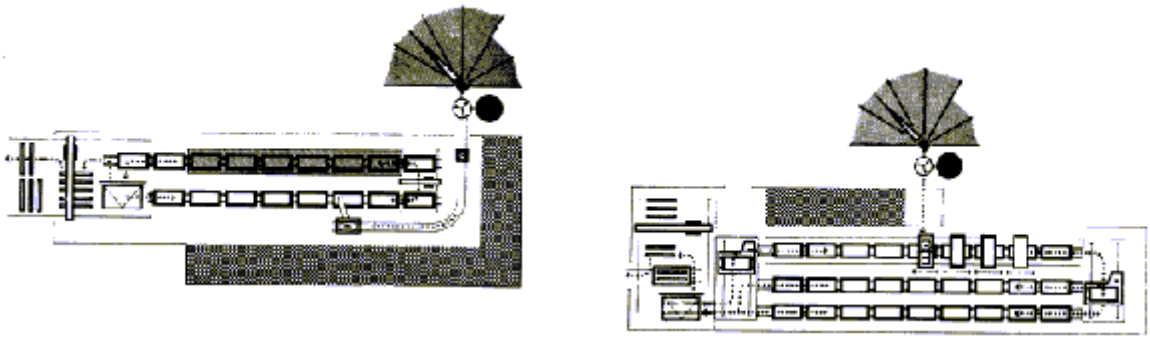


Figura 2.15. Tipología de plantas a) Planta con una línea de curado en túnel b) Planta con doble línea de curado (Salas Serrano, 1984)

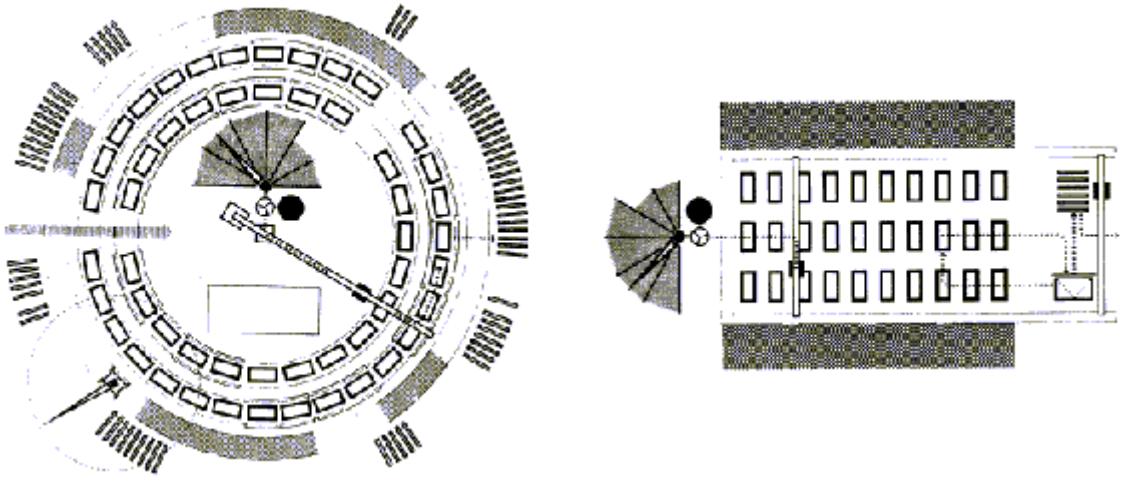


Figura 2.16.Tipología de plantas a) Distribución radial b) Distribución clásica de tres filas y traslado de elementos mediante puente grúa (Salas Serrano, 1984)

Figura 2.17. Planta de Prefabricados en Mollerusa (Pujol, 2002)

2.3.6 Uniones

Una de las ventajas de la tecnología de construcción modular es la velocidad de construcción que se puede alcanzar. No obstante, para llegar a esta velocidad de construcción es necesario adoptar soluciones de fácil y directa aplicación en todas las fases del proyecto; desde el diseño y la producción hasta el montaje final. Este concepto es primordial cuando tratamos el tema de las uniones. Es una idea errónea el considerar el sistema de construcción modular un mero conjunto de elementos que han de ser ensamblados en obra para obtener el concepto de una obra tradicional tal y como se trata en [8]. Esta idea errónea, es debida a una falta de comprensión del concepto de construcción modular y de las características y reglas asociadas a este método constructivo.

En construcción modular, vigas simplemente apoyadas y conexiones articuladas son mucho más recomendables que conexiones rígidas y por tanto que transmitan momentos que son agresivos con los elementos de construcción modular. Esto es debido a que transmiten solicitaciones ante las que algunos elementos no están dimensionados para dar respuesta. Este hecho es importante dado que una errónea concepción de uniones puede llevar al colapso de ciertas partes de la estructura si no están dimensionadas para recibir ciertos esfuerzos.

El no usar uniones empotradas o momento-resistentes implica un menor grado de hiperestatismo del sistema, y por tanto requiere adoptar otras soluciones para asegurar la estabilidad de la estructura global. La estructura debe tener un diseño adecuado para soportar las fuerzas verticales y las horizontales, transmitirlas a la cimentación y hacer frente a fallos estructurales y deformaciones excesivas. Requiere cálculos simples, ya que la mayoría de los elementos estructurales están simplemente apoyados, y puede construirse en un breve periodo de tiempo, pero su estabilidad

requiere una atención continua. La estabilidad del sistema y sus partes ha de ser asegurada en todas las fases, durante su construcción y en su vida útil.

Cuando se trata el tema de las uniones cabe recordar que suponen una discontinuidad entre partes de la estructura, es por ello que deben ser diseñadas para cada caso en concreto dando respuesta a las posible singularidades que se pueden presentar. Normalmente se demandan unos requisitos básicos:

- Adaptación a la función estructural que desempeñen.
- Facilidad de montaje.
- Coste competitivo.
- Seguridad.

Cabe tener en cuenta para el diseño y concepción de las mismas, diversos aspectos fundamentales:

- Debe estudiarse la posibilidad de proyectar detalles típicos comunes a la mayoría de nudos de la estructura, de esta manera se pueden obtener unas rentabilidades económicas mayores, una facilidad de montaje mayor y un mayor control de calidad al estar los operarios efectuando la misma unión de una forma repetitiva.

- Se ha de estudiar con cuidado la modificación de los elementos verticales al ejecutar ciertos tipos de uniones, como puede ser la ejecución de entrantes, ya que de realizarse de una manera incorrecta pueden perjudicar la respuesta estructural del conjunto.

- Se ha de tener en cuenta la situación y medios constructivos tanto en obra como en fábrica, para determinar las uniones cuya realización puede ser más beneficiosa en origen que directamente en obra.

- Las conexiones han de resistir sin un considerable cambio de volumen las fuerzas a las que estarán sometidas durante su vida útil.

- Si la conexión pertenece a aquellas que el cambio de volumen es posible, estas variaciones de volumen han de ser posibles sin causar tensiones críticas.

- La conexión y sus detalles no deben influir negativamente en la fabricación económica de los elementos modulares, su transporte y una rápida y fácil elevación.

- Ha de ser posible revisar y ajustar las conexiones de una manera simple y efectiva.

- La apariencia final ha de satisfacer ciertos requisitos estéticos.

2.3.6.1 Clasificación de las uniones

La clasificación de las uniones, como se puede apreciar en la figura 2.18 se llevará a cabo mediante dos vertientes, la respuesta estructura de las mismas y su disposición geométrica, donde se contemplarán tres tipologías básicas:

- Conexiones entre elementos verticales.
- Conexiones entre elementos verticales y horizontales
- Conexiones entre elementos horizontales.

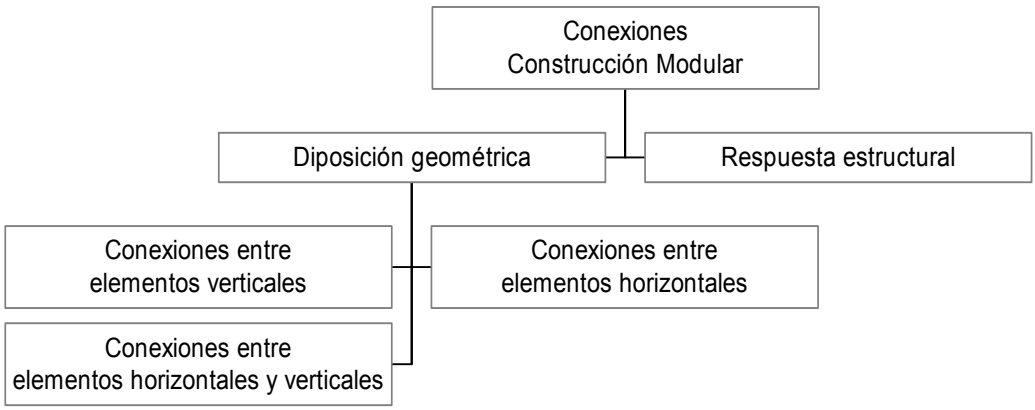


Figura 2.18. Uniones en construcción modular (Elaboración propia, 2003)

2.3.6.1.1 Clasificación según respuesta estructural

La respuesta estructural de las uniones, tratado en [10] y [11], depende directamente del esquema estructural que se tenga, del que se desprenderá una curva momento-rotación y de la curva de funcionamiento de la unión en cuestión. Superpuestas, nos indicarán el punto de funcionamiento de la estructura con un momento y un giro permitidos por la unión.

El caso particular de una unión articulada consiste en un tipo de unión que no debe transmitir momentos. Se utiliza cuando la estructura adjunta no puede soportar ese esfuerzo o bien cuando es ventajosa una estructura lo menos hiperestática posible. Es el caso de algunas cimentaciones o apoyos sobre estructuras ya existentes (rehabilitación) y con cargas térmicas y por asientos diferenciales. A pesar de ello, el concepto de articulación como puede serlo el de empotramiento, no es absoluto:

Si por ejemplo estudiamos una línea de viga cargada por una carga constante obtendremos en un diagrama momento – rotación como el que se representa en la figura 2.19, una recta que intersectará los ejes coordenados en dos puntos, llamados punto A y punto B. El punto A nos indica, que es un punto de rotación nula y por tanto de momento máximo (en este caso por ser una viga tendríamos $M_0 = p \cdot l^2 / 12$) es por

tanto un punto de empotramiento. En el punto B, en cambio tendrá un punto de momento nulo ($M = 0$) y rotación máxima (en este caso tendríamos $\theta_0 = p \cdot l^3 / 24 \cdot EI$) en el que sería por tanto un apoyo simple. Por tanto tendremos los dos puntos opuestos de funcionamiento de un apoyo. Dependiendo de cual sea la curva momento rotación de la unión que se aplique se producirá un punto de funcionamiento.

Suponiendo que tengamos una unión con la curva momento rotación presentada en la figura 2.20, con la pendiente S_{ij}, que se define como la rigidez del nudo y según Eurocódigo 3 se puede representar por $S_{ij} \leq (E \cdot I_b / 2 \cdot L_b)$ con I_b , L_b la rigidez y longitud de la viga respectivamente. Si efectuamos una superposición de ambas curvas como se puede apreciar en la figura 2.21 obtendremos el llamado punto de funcionamiento de la unión para el que obtendremos un momento transmitido y un giro permitido (M_a, θ_a), estas serán las características de la unión.

Un criterio tradicional para la clasificación de las uniones desde el punto de vista de su respuesta estructural y teniendo en cuenta conceptos como las curvas momento – rotación y el punto de funcionamiento es considerar como:

Nudo empotrado si $M \geq 0{,}9 \cdot M_0$

Nudo articulado si $M \leq 0{,}25 \cdot M_0$

Siendo M_0 el momento de empotramiento perfecto (en el caso de vigas cargadas con carga uniforme p es: $M_0 = p \cdot l^2 / 12$)

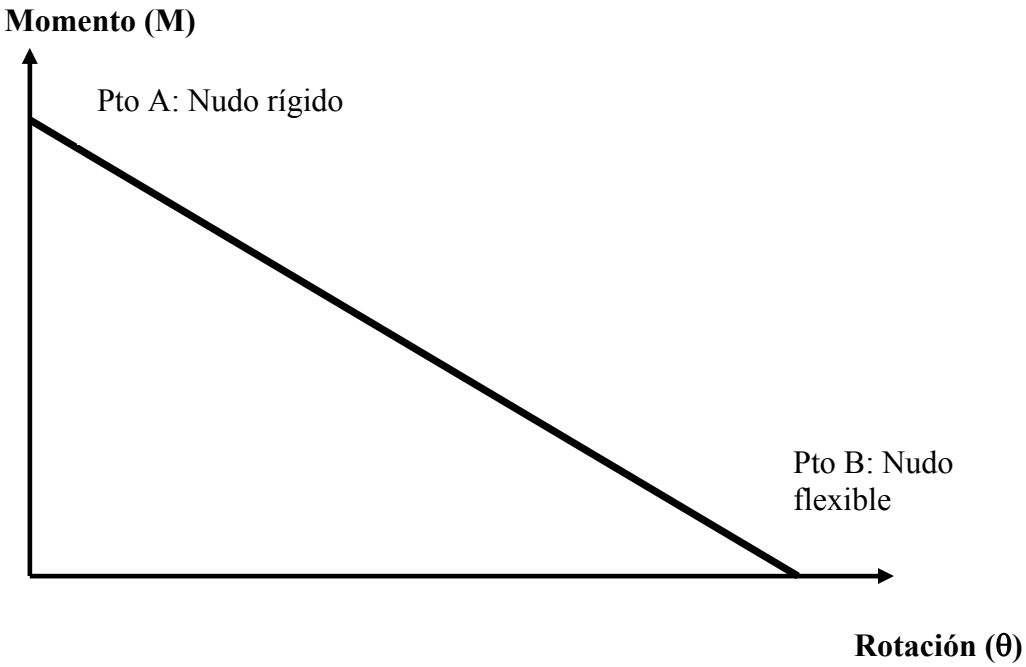


Figura 2.19. Diagrama momento-rotación de una línea de viga cargada con carga uniforme p (Arnedo,2002)

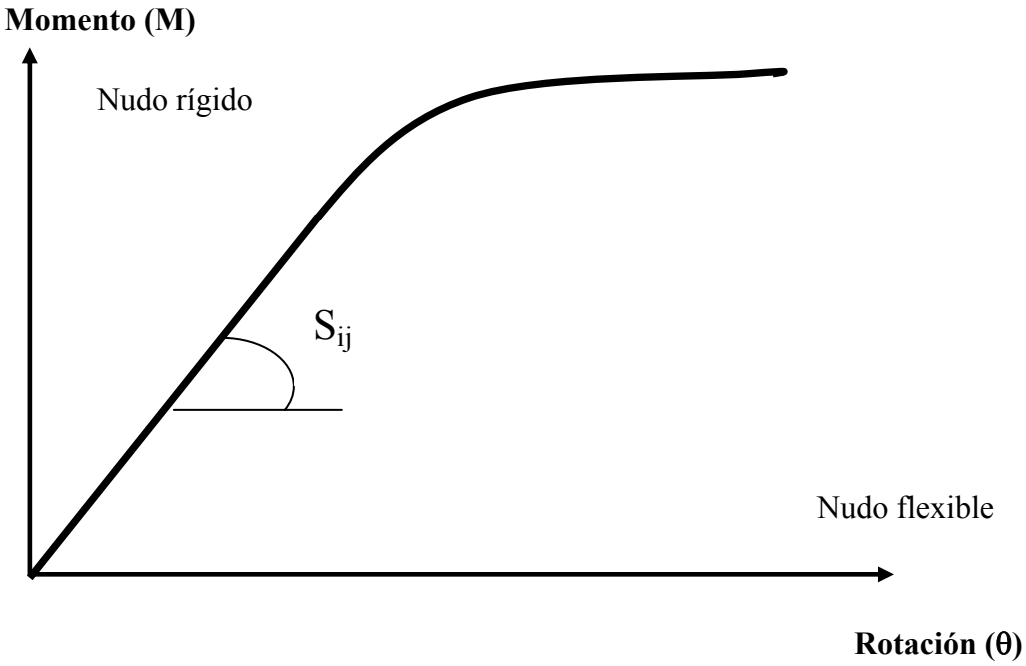
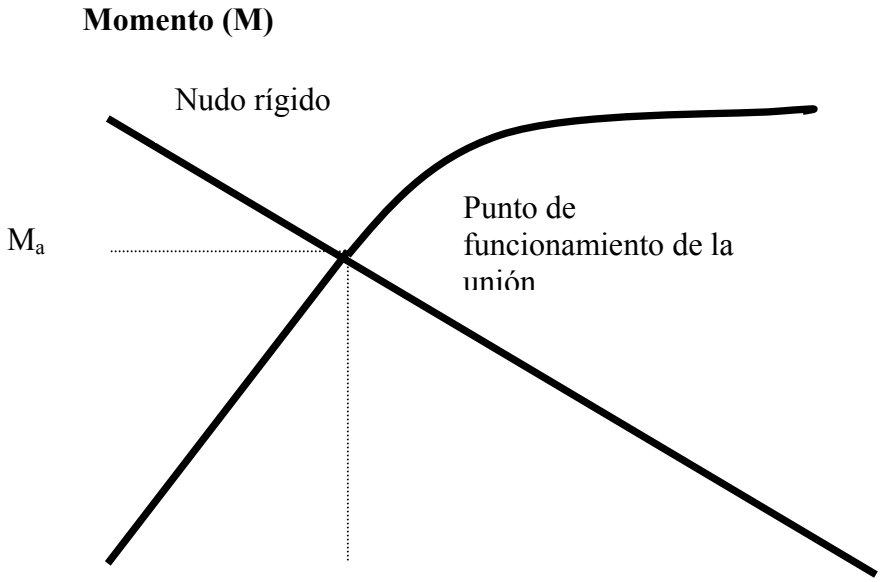


Figura 2.20. Diagrama momento-rotación de una unión (Arnedo, 2002)



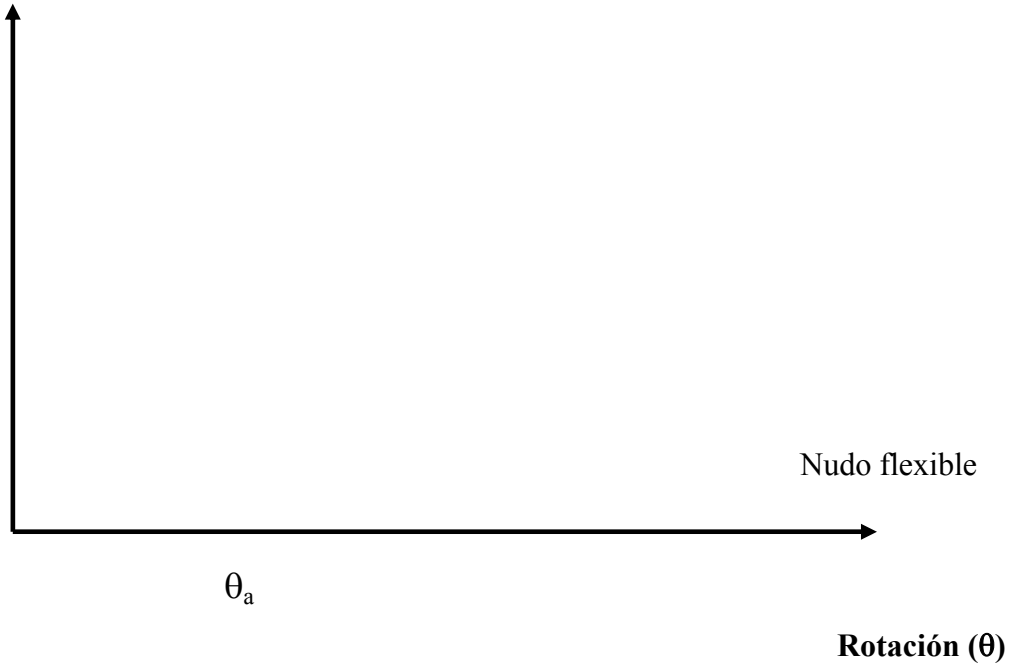


Figura 2.21. Diagrama momento-rotación total (Arnedo, 2002)

2.3.6.1.2 ***Clasificación según disposición geométrica***

A continuación, en la figura 2.22, se recogen las principales tipologías de uniones para construcción modular clasificadas, tratadas extensamente en [8][12][13], diferenciando entre tres tipologías básicas:

- Uniones entre elementos horizontales y verticales
- Uniones entre elementos verticales
- Uniones entre elementos horizontales.

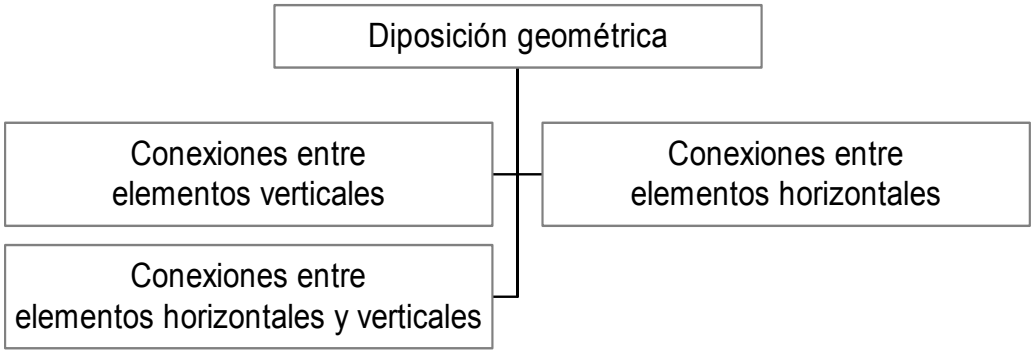


Figura 2.22. Clasificación según disposición geométrica (Elaboración propia, 2003)

Uniones entre elementos horizontales y verticales

En esta tipología de uniones se trata de la solidarización entre un elemento placa vertical y un elemento placa dispuesto horizontalmente y, por tanto, trabajando como forjado.

Unión placa vertical – placa horizontal simple

En esta conexión la cimentación se prolonga para permitir el apoyo directo tanto del muro vertical como del panel de la primera plana que se unen a la cimentación mediante mortero. El muro y la placa se unen mediante material de armado embebido, como se esquematiza en la figura 2.23.

La ventaja es que la presencia de la placa de suelo de la primera planta facilita la elevación de la pared vertical, por el contrario, esto requiere también de unas tolerancias muy estrictas.

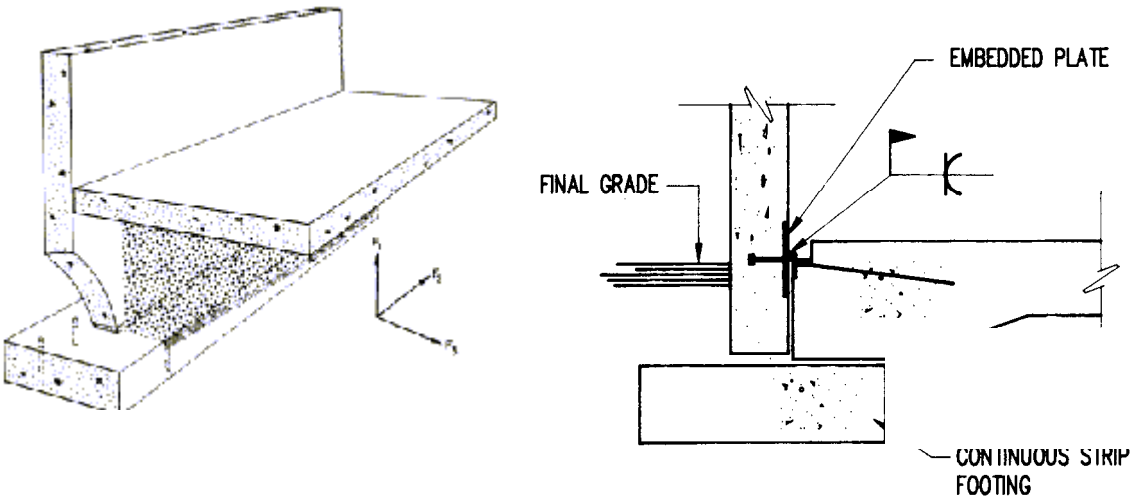


Figura 2.23. Conexión muro placa a)Esquema general b) Detalle (Weiler,1983)

Unión placa vertical – placa con armadura de anclaje

En la figura 2.24 se recoge una variante, donde no se alarga la cimentación y sólo se apoya la placa vertical mediante mortero y posteriormente la placa del primer piso se solidariza mediante material embebido.

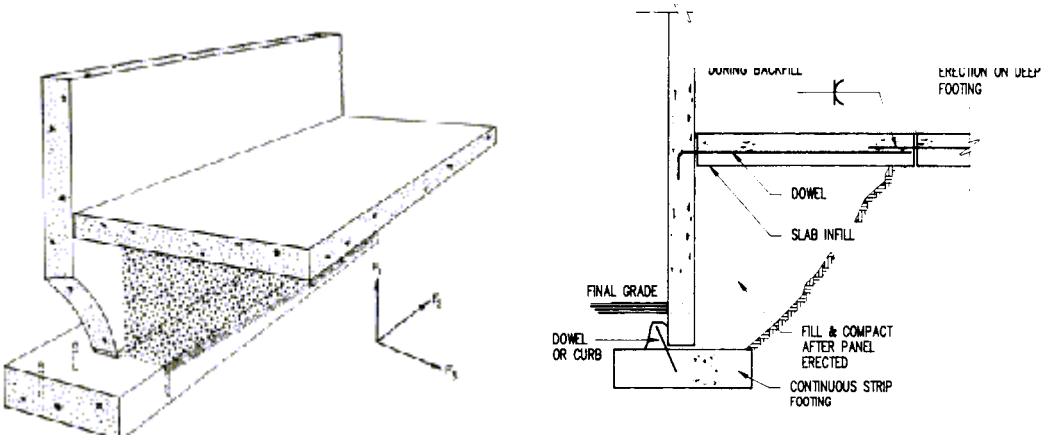


Figura 2.24.Unión muro – placa con armadura de anclaje. a) Esquema general b) Detalle (Weiler, 1986)

Este tipo de unión presenta otra variante, cuyo procedimiento se basa también en la conexión del elemento vertical con el horizontal mediante armadura embebida en los elementos, su esquema se recoge en la figura 2.25. El inconveniente principal de esta unión es la dificultad constructiva comparada con el resto de las uniones lo que hace desestimarla a muchos constructores.

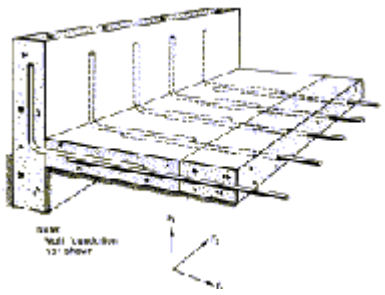


Figura 2.25. Unión muro – placa. Variante a. (Julien et al.,1989)

Unión placa vertical – placa con vigas prefabricadas en T

En este tipo de unión, un sistema de forjado con vigas prefabricadas en T descansa sobre unos salientes especialmente preparados para ello. Por encima del forjado en doble T se suele colocar una fina capa de hormigón que se solidariza a la placa con unas barras de armado embebidas. Esta tipología, que se pone de manifiesto

en el esquema de la figura 2.26, está muy extendida debido al mínimo número de componentes que su realización necesita. Como desventaja se puede citar que la colocación de las vigas en doble T puede complicar el proceso si no se realiza con la pericia necesaria.

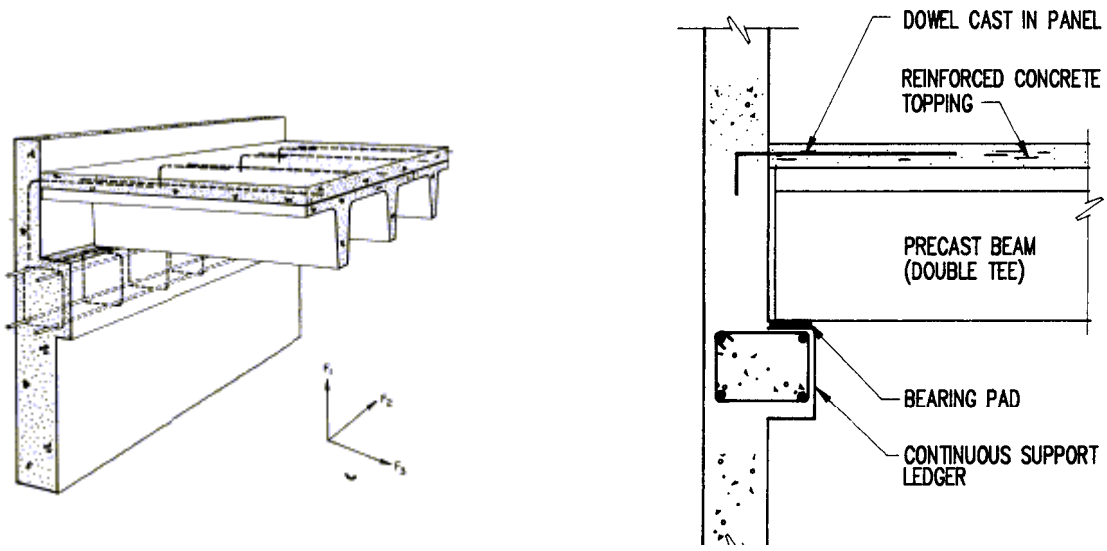


Figura 2.26. Unión placa vertical – placa con vigas prefabricadas en T. a) Esquema general b) Detalle (Julien et al.,1989)

Unión de viga con angular metálico

En esta unión se fija un angular metálico en el panel al que se le atornilla una viga sobre la que soporta la superestructura del forjado, como se aprecia en la figura 2.27. Esta es una tipología compleja, dado que consta de muchos elementos y el montaje de la viga al angular metálico puede ocasionar problemas.

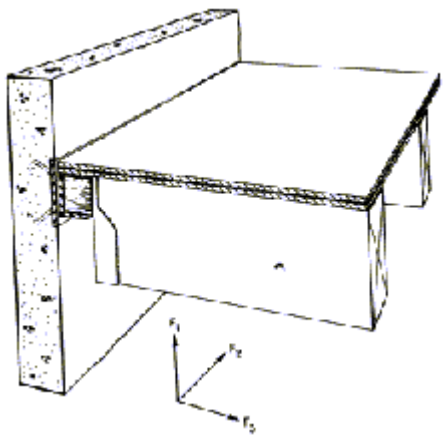


Figura 2.27. Unión de viga con angular metálico(Weiler, 1986)

En la figura 2.28 se recoge una variante de la anterior que consta de un soporte metálico unido mediante pernos a la placa. Sirve de soporte a una gran jácena que soporta el forjado superior. Esta tipología de unión está especialmente recomendada para zonas de riesgo sísmico dado que permite movimientos diferenciales. Las ventajas son que tanto la fabricación como la elevación son muy simples y permite grandes tolerancias de construcción.

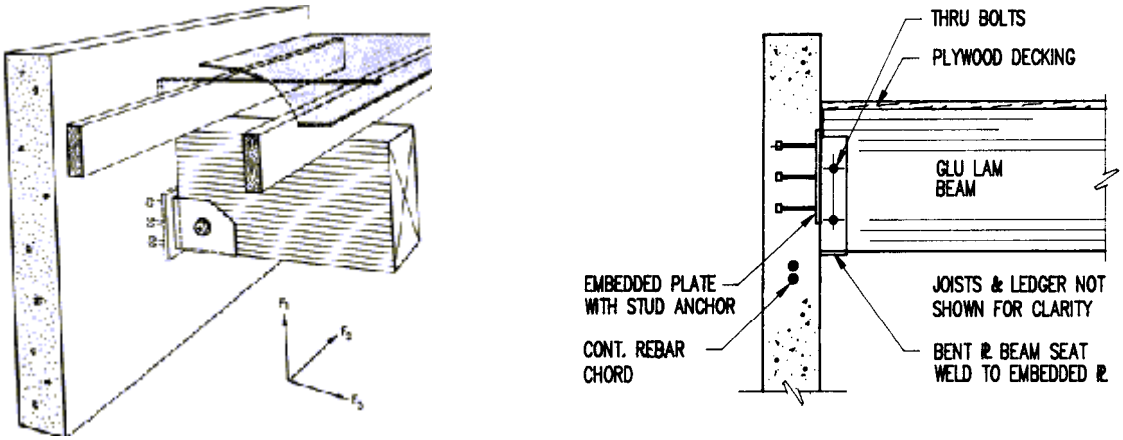


Figura 2.28.Unión de viga con angular metálico. Variante a (Julien et al.,1989)

Unión muro – pilar – perfil metálico

En esta conexión, un pilar de hormigón armado sirve como soporte a un perfil metálico. El pilar de hormigón se incorpora a la placa vertical en el proceso de construcción, anclándolo mediante barras de armado. Esta unión es útil cuando existen importantes cargas concentradas y no pueden ser eficientemente transmitidas a través de la placa vertical. La carga se transmite entonces al pilar. Como podemos observar en la figura 2.29, el perfil metálico no está simplemente apoyado en el pilar sino que está atornillado a una placa embebida en el mismo. Las ventajas de esta tipología se basan en su capacidad para soportar grandes cargas puntuales y sus inconvenientes son el trabajo adicional que supone la fabricación del pilar.

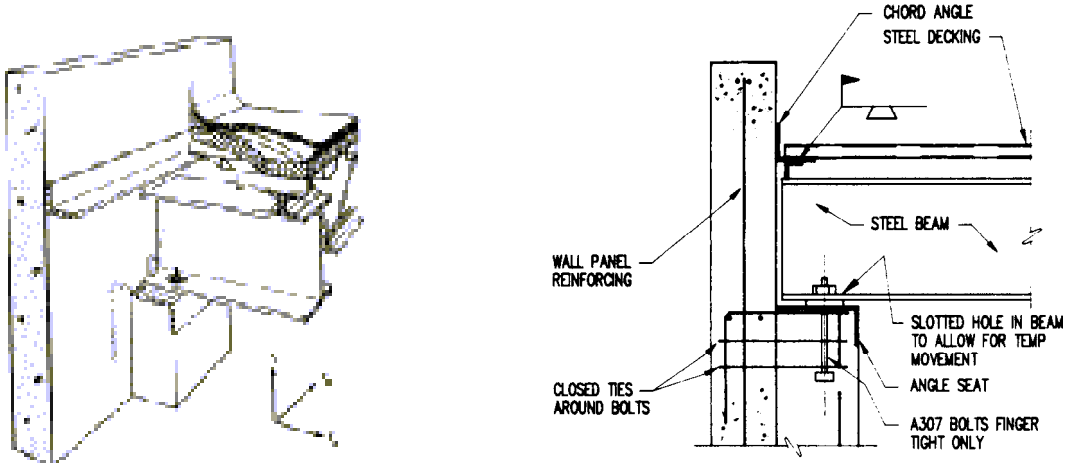


Figura 2.29.Unión muro-pilar-perfil metálico. a) Esquema general b) Detalle (Julien et al.,1989)

Existe una variación de la unión presentada anteriormente, con una capacidad para recibir cargas puntuales mucho menor. Consiste en dejar un oquedad en el interior de la placa vertical sobre el que descansará el perfil metálico que soportará la superestructura del forjado. El perfil, al igual que en la unión anterior, no va simplemente apoyado en el hueco sino que se atornilla en una placa embebida en la placa. La estructura, como podemos ver en la figura 2.30, es idéntica a la anterior. La única variación presente es que no existe el elemento pilar. Como ventajas podemos citar que la no intervención del pilar reduce en gran manera el tiempo de montaje de la unión. Sin embargo, se introduce un punto complicado que es la zona de la oquedad ya que una mala ejecución de la misma puede afectar a la respuesta estructural de la placa vertical.

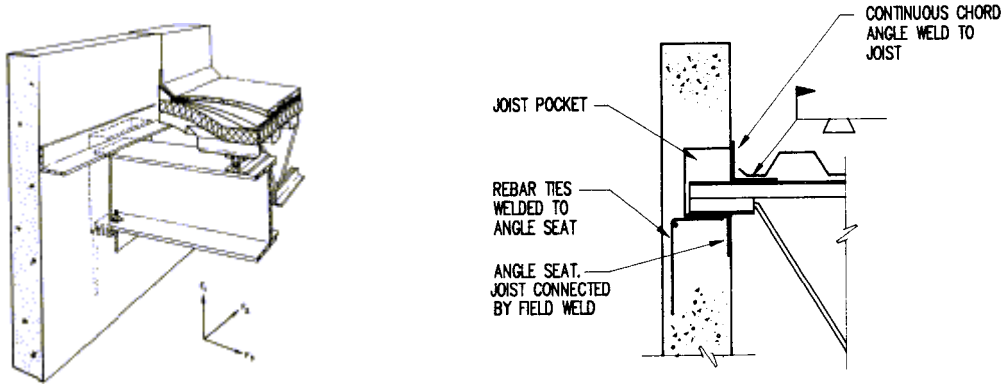


Figura 2.30.Unión muro-pilar-perfil metálico. Variante a (Julien et al.,1989)

Unión mediante angulares

En esta conexión un angular metálico proporciona soporte a un perfil laminado sobre la que reposa el forjado, como se pone de manifiesto en la figura 2.31.

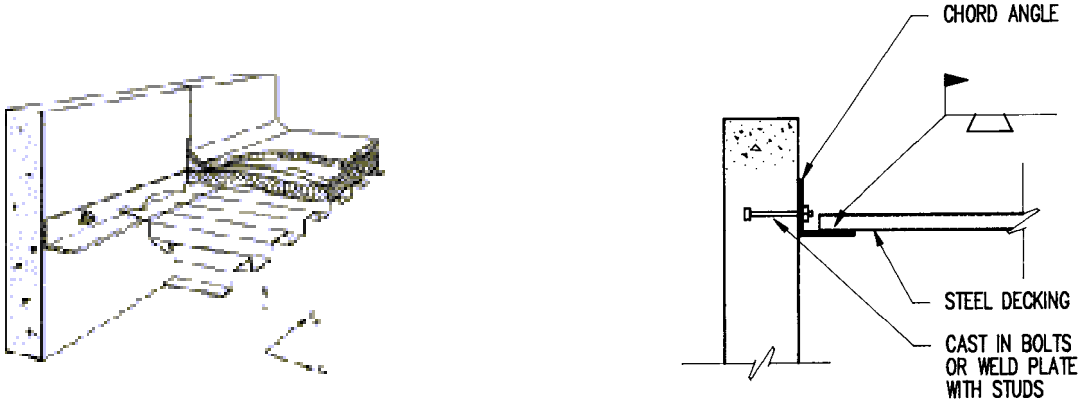


Figura 2.31.Unión mediante angulares. a) Esquema general b) Detalle (Julien et al.,1989)

Uniones con elementos de madera

A continuación se presentan diversas uniones en que la madera es una elemento importante. Estas uniones se usan principalmente en Norteamérica, en Europa son minoritarias. Una variación de las uniones en las que se emplea madera es la que se presenta en la figura 2.32: una viga anclada al panel mediante pernos sirve de soporte para un forjado de madera.

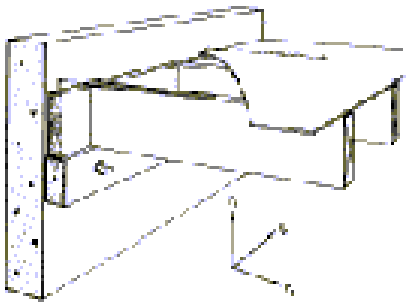


Figura 2.32.Unión con elementos de madera. (Weiler, 1986)

En la siguiente conexión una viga de madera va directamente solidarizada a la placa mediante unos pernos. Esta viga sirve de soporte para jácenas de madera sobre los que descansa el forjado, como se aprecia en la figura 2.33. Su ventaja principal reside en la facilidad de construcción.

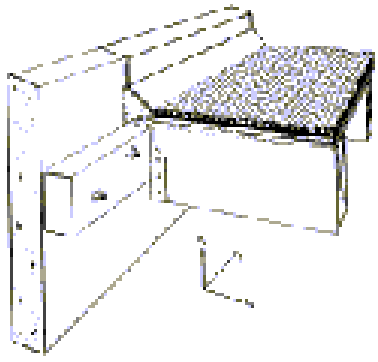


Figura 2.33. Unión con elementos de madera. Variante a (Weiler, 1986)

Por último tenemos una modificación de la unión anterior donde la viga de madera se coloca en la terminación del panel y allí coloca descansa el forjado. Sus ventajas son la sencillez de construcción.

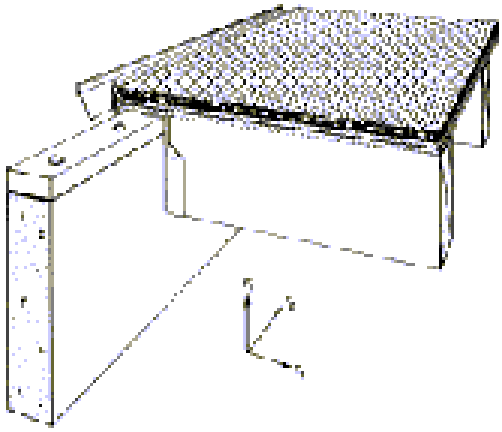


Figura 2.34. Unión con elementos de madera. Variante b (Weiler,1986)

Finalmente, reseñar que las placas o paneles prefabricados desempeñan diversas funciones dentro de la estructura de un edificio. No sólo sirven como revestimiento a una estructura metálica o de hormigón preexistente, sino que también soportan cargas horizontales y verticales. Es por todo ello que las conexiones se deben diseñar para transmitir adecuadamente las diversas fuerzas entre los elementos y las cimentaciones. Así mismo, las conexiones deben ser capaces también de proveer un grado de ductilidad necesario para tensiones debidas, entre otros, a gradientes de temperatura, y para la absorción de energía derivada del sismo. También poner de manifiesto que lejos de avanzar hacia una estandarización, las variaciones en los diferentes métodos de construcción y los diferentes criterios de los proyectistas han derivado en una gama muy variada de conexiones a analizar

Uniones entre elementos verticales

Entre las conexiones de dos elementos verticales como pueden ser: pared con pared o columna con columna, encontramos dos conexiones que son usadas de una manera generalizada, sobretodo, en elementos prefabricados de hormigón:

Unión con mortero

El tipo de unión más sencilla y más frecuentemente usada entre dos elementos de construcción prefabricados cargados en compresión es la unión con mortero. Un gran número de columnas prefabricadas y placas cargadas en compresión (elementos de fachada) están colocadas una encima de otra con una capa de mortero.

La capacidad portante de este tipo de uniones es un aspecto limitante importante. En la industria de prefabricados de hormigón se pueden alcanzar calidades de hormigón de alta resistencia, sin embargo es usual que toda la capacidad portante de esas

columnas y paredes no se pueda aprovechar por completo, dado el efecto limitante que introduce la unión con mortero.

La resistencia de una unión con mortero esquematizada en la figura 2.35 está condicionada a diversos factores como son, entre otros:

- La relación entre la resistencia del hormigón de los elementos prefabricados a un lado y al otro lado de la unión y la resistencia del mortero.

- Las dimensiones de la unión con mortero.

- El tipo de puesta en obra; en este sentido una colocación deficiente, que deje aire retenido en el interior de la unión, reduce la capacidad de la unión.

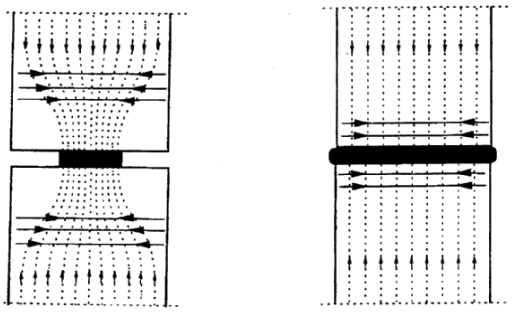


Figura 2.35 .Unión con mortero. (Vambersky et al., 2002)

Unión con mortero reforzado

Otro elemento de unión usual, aunque menos empleado que el anterior, es la unión con mortero reforzado, que consiste en la introducción de barras corrugadas de refuerzo procedentes del elemento interior en la parte inferior del elemento superior. Después del montaje se inyectan los huecos por donde se han introducido las barras. El hecho de que sean corrugadas asegura una fricción suficiente entre el elemento y las barras.

Esta unión, que se visualiza en la figura 2.36, se usa principalmente donde se haya que transmitir momentos y altas compresiones. En el caso de la transmisión de momentos, actúa principalmente la armadura de refuerzo y en el caso de las compresiones el mortero.

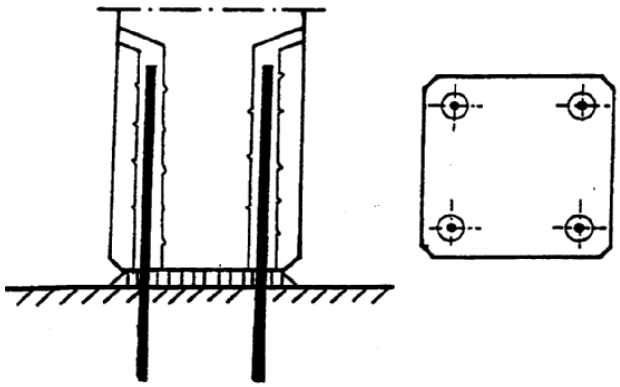


Figura 2.36.Unión con mortero reforzado a) Alzado b) Planta. (Vambersky et al., 2002)

Unión angulares – chapas soldadas

En esta tipología de conexión un angular continuo se coloca en la superficie del panel. El angular se ancla mediante unos pasadores en el centro del panel. En cada junta del panel se sueldan unas placas metálicas para dar continuidad a los angulares y formar así la unión, que se representa en la figura 2.37. Como ventajas de esta unión podemos citar la facilidad de montaje y dadas sus características permite grandes tolerancias.

Como desventajas podemos citar que el proceso de soldadura de las placas puede resultar difícil en algún caso.

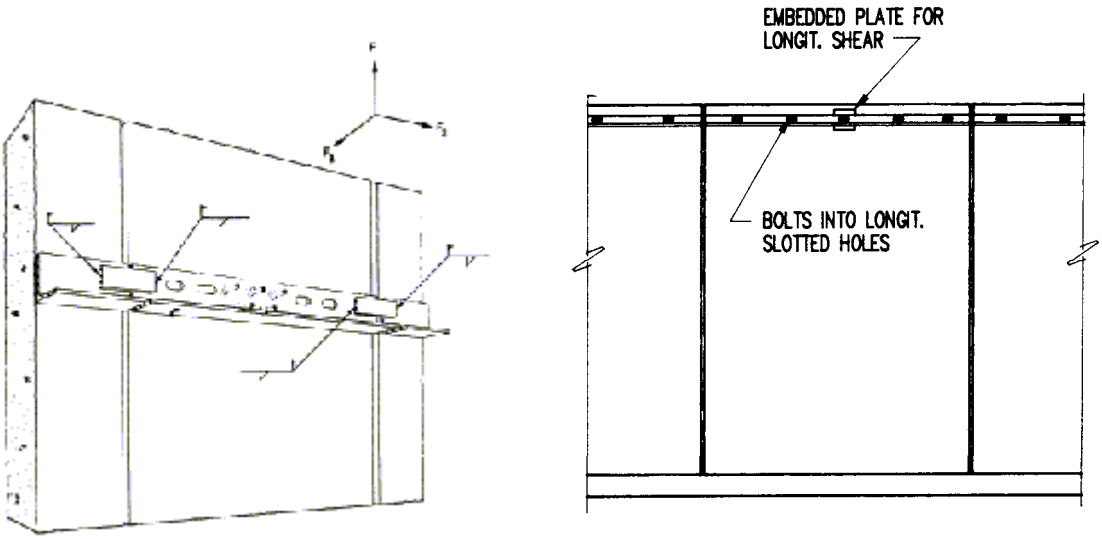


Figura 2.37.Unión angulares –chapas soldadas. a) Esquema general b) Detalle (Julien et al.,1989)

Unión mediante anclajes continuos

En este tipo de conexión la unión se realiza mediante anclajes continuos (ver figura 2.38). El anclaje se efectúa en una pequeña cavidad que se realiza adyacente a las juntas. Como ventajas encontramos facilidad de montaje y buena respuesta ante

cambios de volumen. Los problemas que pueden aparecer son resultado de la realización incorrecta de las cavidades para la inserción de los anclajes.

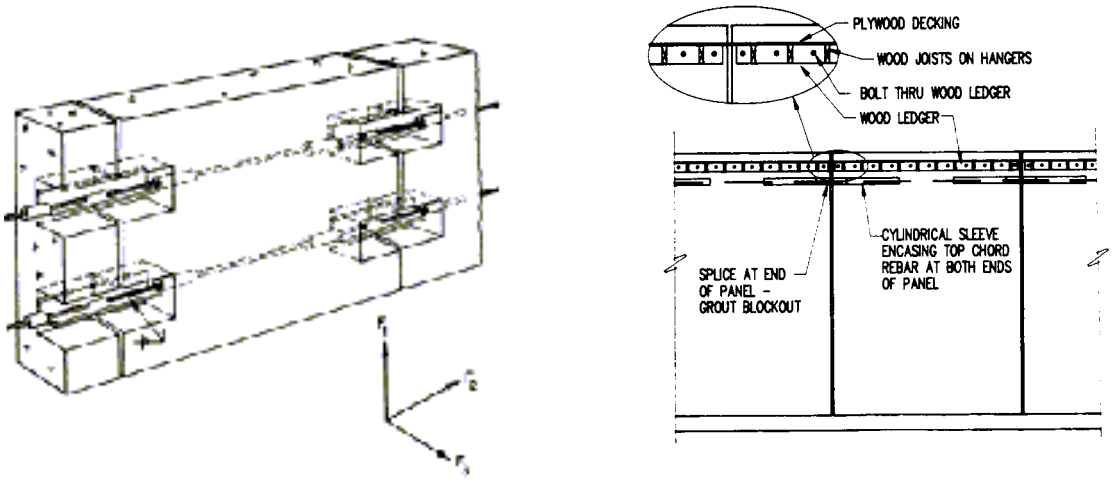


Figura 2.38. Unión angulares – chapas soldadas. Variante a. a) Esquema general b) Detalle (Julien et al.,1989)

Unión mediante chapa atornillada

La principal característica de esta unión es su simplicidad, como se pone de manifiesto en la figura 2.39, por ello es de las más comunes. El sistema consiste en solidarizar dos placas mediante una placa atornillada al hormigón. Uno de los agujeros tiene una holgura mayor para permitir cambios de volumen, así como cierta tolerancia en los alineamientos. Sus principales ventajas son la facilidad y sencillez de montaje así como el hecho de que uno de los agujeros en la chapa tenga cierta holgura horizontal para permitir ciertos movimientos.

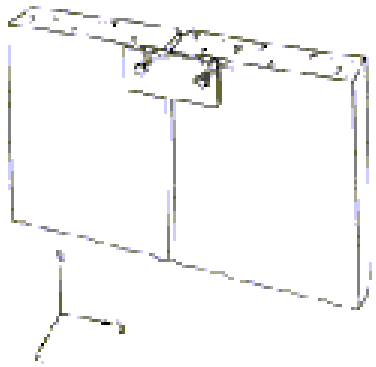


Figura 2.39.Unión mediante chapa atornillada. a) Esquema general (Weiler,1986)

Esta variación de la unión anterior, que se presenta en la figura 2.40, se basa en el mismo concepto que la unión comentada anteriormente, de hecho varia para adaptarla a aquellos paneles que hagan esquina unos con otros. Por tanto presenta las mismas

ventajas que la anterior, pero en este caso tiene una desventaja importante, debido al hecho de unir dos paneles en una esquina necesita unas tolerancias muy estrictas.

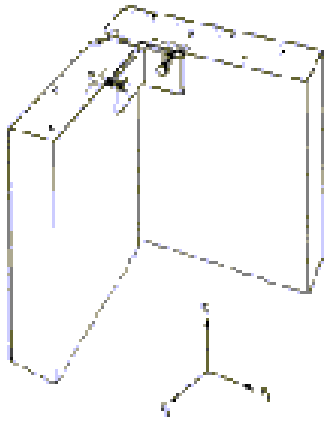


Figura 2.40. Unión mediante chapa atornillada. Variante a (Weiler, 1986)

Unión perfil metálico – placa vertical mediante angulares atornillados

En la figura 2.41 se representa esta conexión es también de una sencillez muy apreciable, consiste en fijar mediante dos pequeñas chapas atornilladas los paneles a un las alas del perfil metálico. Es una unión de fácil montaje que permite tolerancias elevadas.

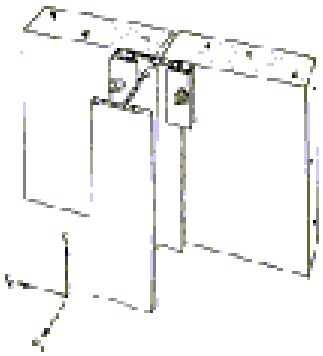


Figura 2.41.Unión perfil metálico – placa vertical mediante angulares atornillados (Weiler, 1986)

Esta unión es una variante de la tipología anterior, el perfil metálico se solidariza a las placas mediante dos chapas metálicas y pernos embebidos en la placas. Como ventajas de esta unión podemos citar una fabricación y acoplamiento simples y como

inconvenientes el hecho de tener el perno embebido en la placa.

Figura 2.42. Unión perfil metálico – placa vertical mediante angulares atornillados. Variante a (Weiler, 1986)

Por último, en esta variante el perfil metálico se une a las placas mediante dos angulares, que por una parte se sueldan al alma del perfil y por otra se anclan mediante tonillos a la placa. Los agujeros de los tornillos presentan cierta holgura para permitir una elevada tolerancia.

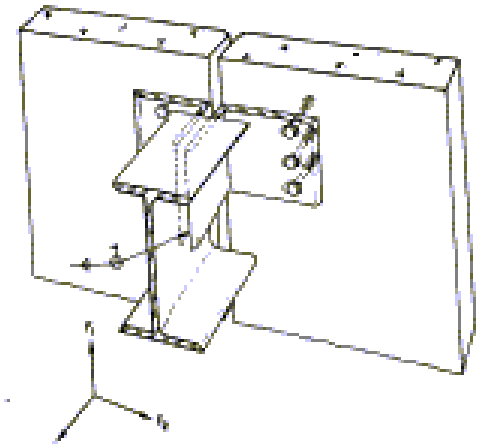


Figura 2.43. Unión perfil metálico – placa vertical mediante angulares atornillados. Variante b (Julien et al.,1989)

Unión mediante clip flexible

En este tipo de conexión, dos paneles adyacentes están conectados mediante barras con una disposición en forma de aspa que confluyen en un cilindro central que permite movimientos diferenciales entre las dos placas, como se presenta en la figura 2.44b. La obertura que vemos se inyecta por condicionantes estéticos. Como ventajas podemos apuntar la posibilidad que permite de pequeños movimientos diferenciales así como la posibilidad de ocultar la conexión debido a condicionantes estéticos. Como

desventajas tenemos que el cilindro dificulta la construcción del panel y sus soldaduras pueden ser complicadas.

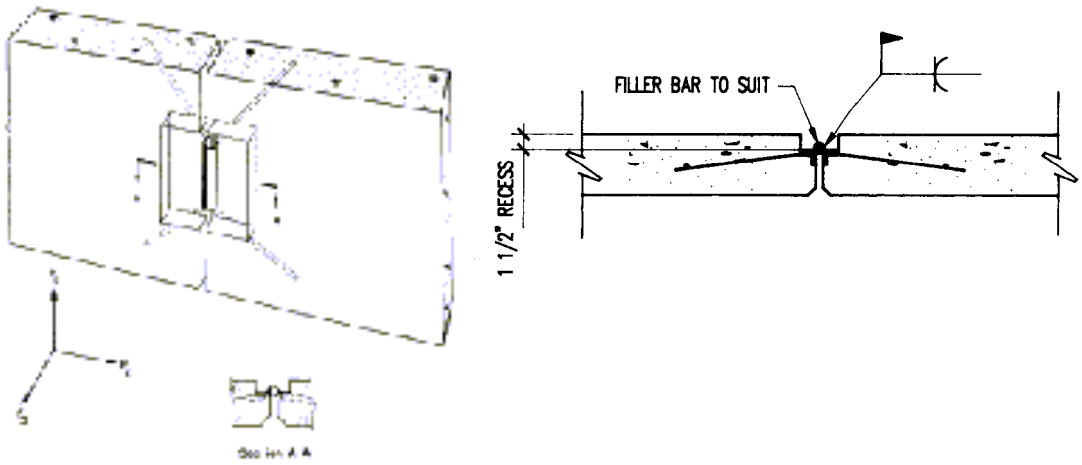


Figura 2.44.Unión mediante clip flexible. a) Esquema general b) Detalle (Julien et al.,1989)

Unión mediante chapa soldada

En esta conexión se embebe una placa metálica en la placa de hormigón y se les suelda una placa para efectuar la conexión, como se pone de manifiesto en la figura 2.45. Es una unión muy rígida y no se recomienda que más de dos o tres paneles se coloquen sin una unión que permita cierta holgura. Es, por tanto, una unión que puede llevar a fallos estructurales si no se estudia previamente.

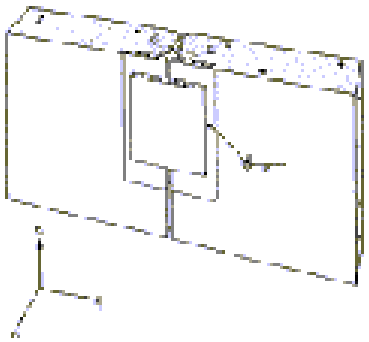


Figura 2.45.Unión mediante chapa soldada. (Weiler, 1986)

En la variante de la anterior, presentada a continuación, las placas de esquina se conectan mediante angulares. El angular se suelda a una placa metálica insertada previamente en la superficie del panel. Es menos crítica que su homóloga para placas alineadas en cuanto a tensión introducidas por cambios de volumen.

Como ventajas podemos destacar que el número de elementos empleados en la conexión es mínimo, sin embargo, la soldadura puede resultar complicada dada su ubicación.

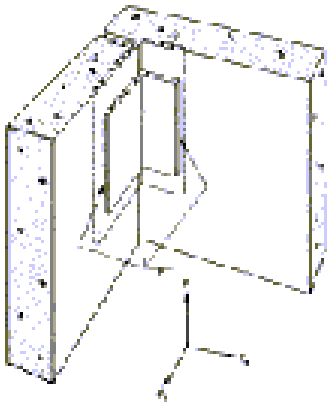


Figura 2.46. Unión mediante chapa soldada. Variante a (Weiler, 1986)

Conexiones entre elementos horizontales

Entre esta tipología encontramos las uniones entre losas que forman los forjados de los edificios y también las uniones entre vigas.

Uniones tipo loop

Este tipo de uniones puede transmitir esfuerzos cortantes, esfuerzos axiles y momentos. Se utilizan a menudo para realizar losas para forjados continuos con elementos prefabricados. En la figura 2.47 se ilustran este tipo de uniones, cuyo fallo es susceptible de producirse por plastificación del refuerzo o por rotura del mortero previa a la plastificación del refuerzo.

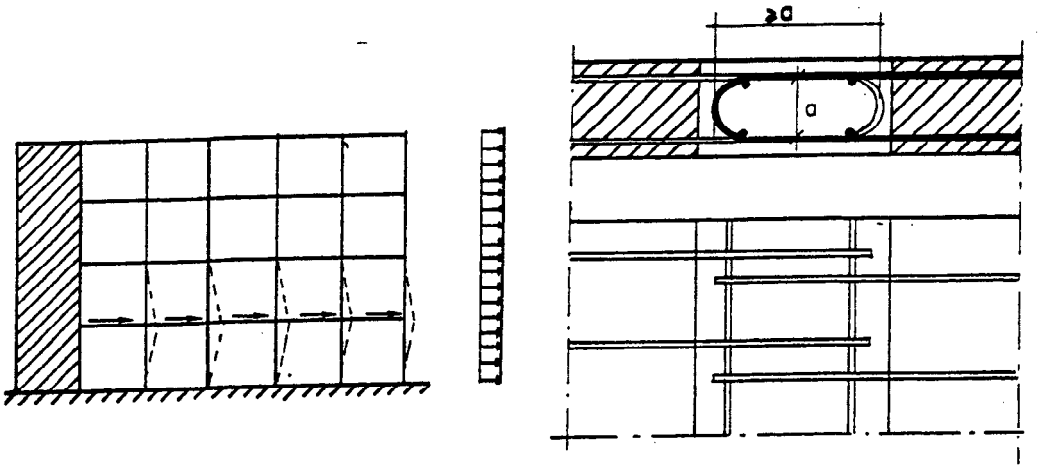


Figura 2.47.Unión tipo loop. (Vambersky et al., 2002)

2.4 CONSIDERACIONES FINALES

Una vez definidas las principales características de los sistemas modulares y repasadas tanto sus características de producción, tolerancias así como diversas tipologías de uniones, en este último apartado se efectúan ciertas consideraciones finales referentes al diseño.

2.4.1 Consideraciones referentes a eficacia

- Simplicidad de diseños

Siempre se ha considerado que los mejores diseños son los que cumplen la función para la que han sido diseñados y a su vez son de una simplicidad apreciable. Reduciendo el número de componentes de una construcción modular se puede llegar a una construcción económica y eficiente.

- Sistematización de detalles

Igual que la simplicidad de los diseños, la repetición y estandarización de los mismos ayudará, en gran manera, a una mecánica de montaje adecuada que redundará en acortamientos en los plazos.

2.4.2 Diseño conceptual

La seguridad de una estructura viene determinada por su capacidad de resistir las acciones a las que será sometida así como los efectos del clima, humedad y

envejecimiento de la misma. Aspectos que pueden producirse tanto en la construcción como en el resto de la vida útil de la misma.

A la resistencia de las cargas y las mencionadas acciones externas contribuyen todos los elementos de la estructura modular. Aún así, la suficiente resistencia y rigidez de cada uno de los elementos por separado no basta para garantizar una estructura segura. Los componentes han de estar conectados unos con otros de manera que se forme una entidad global coherente, con la suficiente resistencia, rigidez y estabilidad.

La práctica nos ha enseñado que las probabilidades de fallo de una estructura vienen determinadas mayoritariamente por factores que no fueron considerados previamente en el proceso de concepción de la estructura. Estos factores suelen ser cargas accidentales, errores en el diseño y construcción, sobrecargas locales y en menor medida hechos excepcionales como pueden ser colisiones de vehículos y explosiones de gas. Esto nos da una idea de lo importante que resulta tener en cuenta todas las consideraciones de diseño en la concepción de la estructura.

El concepto integridad estructural debe ser tenido en cuenta, ya que nos marca la necesidad de evitar que el daño a una pequeña parte de nuestra estructura lleve al colapso de una mayor parte de la misma.

La integridad estructural es un aspecto crucial en construcciones modulares, para garantizar una adecuada rigidez, resistencia y prevenir un posible colapso, dado que al

constar de uniones no momento-resistentes presentan un menor grado de hiperestaticidad. Las conexiones deben ser diseñadas para que bajo una situación excepcional posibiliten diferentes maneras de transmitir cargas a los cimientos. Este concepto se puso de relieve para las estructuras modulares cuando un edificio en Ronan Point [8], Reino Unido sufrió un colapse progresivo después de una pequeña explosión.

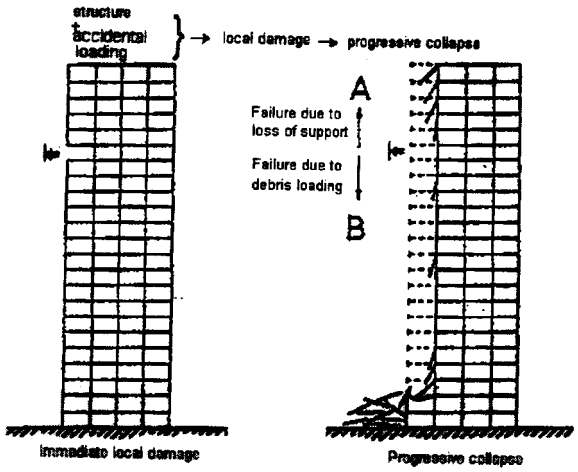


Figura 2.48. Edificio Ronan Point, UK (Vambersky et al.,2002)

En todos los casos contemplamos la seguridad absoluta como algo imposible de alcanzar, no sólo por razones económicas sino también por que es imposible contemplar

todas las posibles agresiones que recibirá la estructura durante su vida útil. Habrá por tanto un riesgo de fallo inevitable y que tendrá que ser asumido por la sociedad.

Todo sistema constructivo en implantación, sin embargo, ha de tener especial cuidado en que sus realizaciones no sufran ningún percance importante, dado que su progresiva implantación puede resultar dañada gravemente. Si algún ejemplo como el del edifico británico sucede, es por lo que se han de tener en cuenta ciertas consideraciones de diseño en las que se prevenga la propagación de un fallo. Para ello se recomienda:

- Reducir las conexiones más débiles
- Limitar el daño a zonas confinadas.
- Aplicar discontinuidades como juntas de expansión.
- Prevenir incrementos de carga producidos por desprendimientos de material debidos a explosiones por ejemplo.
- Poner énfasis en la ductilidad de las conexiones
- Fomentar interrelación entre elementos para garantizar una integridad estructural.
- Cuando sea posible se ha de proporcionar un camino alternativo de carga para prevenir colapso cuando un fallo local se produce. Si esto no es posible debido a razones prácticas o económicas se ha de intentar que los fallos locales tengan la mínima influencia posible en la resistencia global de la estructura.

Un ejemplo de integridad estructural la encontramos en el elemento de la figura 2.49 donde tenemos diferentes tipos de entrelazamiento de elementos. Los de tipo A, que podemos llamar de la periferia que confinan los elementos de forjado. Los de tipo B y C, que son internos y permiten un efecto diafragma de los forjados y que los conectan alas columnas.

Las restricciones verticales D conectan la pared separadora y los elementos de columna proporciona una continuidad vertical. Las restricciones E que conectan los elementos del suelo a los soportes.

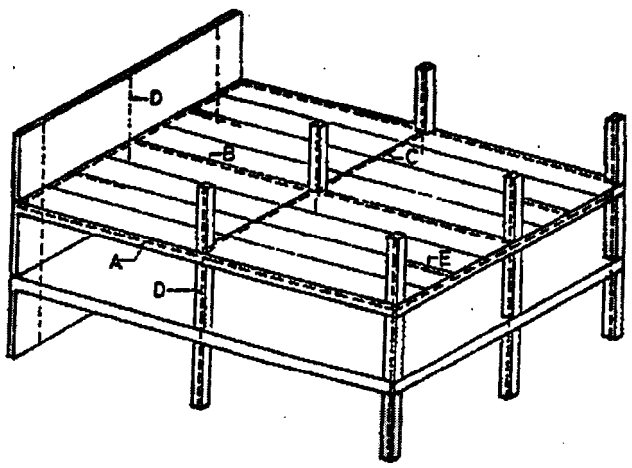


Figura 2.49. Esquema de integridad estructural. (Vambersky et al.,2002)